anses
agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail

Connaître, évaluer, protéger

Effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des diodes électroluminescentes (LED)

Avis de l'Anses
Rapports d'expertise collective

Avril 2019 - Édition scientifique

anses
agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail

Connaître, évaluer, protéger

Effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des diodes électroluminescentes (LED)

Avis de l'Anses
Rapports d'expertise collective

Avril 2019 - Édition scientifique

Le directeur général

Maisons-Alfort, le 5 avril 2019

AVIS
de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

relatif aux « effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des systèmes utilisant des diodes électroluminescentes (LED) »

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.

L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.

Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part à l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).

Ses avis sont publiés sur son site internet.

L'Anses a été saisie le 19 décembre 2014 par la Direction générale de la santé, la Direction générale du travail, la Direction générale de la prévention des risques et la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes afin de réaliser une expertise visant à évaluer les effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des systèmes utilisant des diodes électroluminescentes (LED).

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

L'expertise mise en œuvre par l'Anses a eu pour objectif de mettre à jour les connaissances sur les effets sanitaires liés à l'exposition aux systèmes d'éclairage utilisant des LED. La demande portait plus précisément sur l'évaluation des risques liés à l'exposition aux systèmes à LED pour la population générale et pour les travailleurs, en distinguant les différents types d'application des systèmes d'éclairage ou objets en disposant (éclairage domestique, usages professionnels, phares de véhicules, jouets, écrans, etc.) et en prenant en compte des situations réelles d'exposition. Par ailleurs, un examen des éventuels risques pour l'environnement que pourraient poser ces systèmes tout au long de leur cycle de vie était demandé.

En application de la Directive européenne n° 2005/32/CE sur l'éco-conception des produits consommateurs d'énergie, dite Directive « EuP » (*Energy using Products*), le retrait programmé des lampes à incandescence (étalé entre 2009 et 2012) et des lampes halogènes classiques (fixé à septembre 2018) du marché de l'éclairage, a induit un fort développement des éclairages à LED sur le marché grand public, augmentant ainsi l'exposition de la population aux éclairages utilisant cette technologie. Les domaines d'application des systèmes à LED se sont élargis : ils concernent aujourd'hui non seulement un nombre important d'applications à usage professionnel, mais aussi des applications d'usage public pour l'affichage et la signalisation, certains objets et dispositifs (jouets, objets de décoration, etc.), le rétro-éclairage d'écrans (téléphones mobiles, tablettes, téléviseurs, …) et l'éclairage intérieur et extérieur.

Lors de la publication de son premier avis sur les effets sanitaires liés aux LED (rapport d'expertise collective de l'Anses publié en 2010[1]), l'Agence attirait l'attention sur les effets toxiques pour la rétine de la lumière bleue. Les LED possèdent en effet la caractéristique particulière d'émettre une lumière riche en longueurs d'onde courtes : une lumière dite riche en bleu. L'Anses avait, à cette occasion, émis des recommandations relatives notamment à la mise sur le marché des LED et à l'information des consommateurs.

Les effets sanitaires potentiels liés à l'exposition à la lumière émise par les LED sont désormais mieux documentés. Depuis l'avis émis par l'Agence en 2010, de nouvelles données expérimentales, notamment chez l'animal, concernant la phototoxicité associée à une exposition de longue durée à la lumière bleue, ont été publiées. De nouvelles données ont aussi été publiées concernant la dérégulation de l'horloge biologique par la lumière bleue, l'éblouissement et les effets sanitaires liés à la modulation temporelle de la lumière (fluctuation du niveau lumineux de l'éclairage potentiellement perceptible visuellement selon sa fréquence). Concernant les effets éventuels sur l'environnement, des données existent et interrogent sur les déséquilibres potentiellement induits sur les écosystèmes, qui pourraient entraîner des conséquences sur la faune et la flore, mais aussi sur l'Homme et sa santé.

L'ajout ou la substitution d'une lumière artificielle à la lumière solaire naturelle pose la question des effets sanitaires potentiels qui pourraient en découler, du fait de l'accumulation ou de la modification de l'environnement lumineux. En quelques décennies, l'Homme a notablement augmenté son exposition à la lumière bleue le soir avec des éclairages artificiels ou des rétro-éclairages riches en lumière bleue. Auparavant, les éclairages utilisés se situaient plutôt dans des teintes jaune-orange (bougie, lampes à incandescence).

La mise à jour de l'expertise a considéré l'ensemble des effets sur la santé humaine mais aussi sur l'environnement (faune et flore) qui pourraient être liés à l'exposition à la lumière des lampes à LED.

2. ORGANISATION ET MÉTHODOLOGIE DE L'EXPERTISE

La présente expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ». L'Agence a mandaté un groupe de travail d'experts intitulé « Effets sanitaires des systèmes à LED » pour réaliser cette expertise, sous l'égide du CES.

Groupe de travail

Le groupe de travail a été constitué à la suite d'un appel à candidatures public émis le 28 avril 2015. Les experts membres de ce groupe ont été retenus pour leurs compétences scientifiques et

[1] https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2008sa0408.pdf.

techniques dans les domaines de la physique, de la métrologie des rayonnements optiques, de la vision, de l'ophtalmologie, de la chronobiologie, de la biologie, de l'environnement et de la réglementation dans le domaine des éclairages. Le groupe de travail a été créé en septembre 2015. Il s'est réuni 25 fois en séances plénières entre septembre 2015 et mai 2018.

Contributions extérieures

Afin de pallier le manque de données relatives à la caractérisation des expositions aux systèmes à LED, trois études ont été financées par l'Agence.

Caractérisation des éclairages artificiels disponibles sur le marché français

Une première « convention de recherche et de développement » a été établie entre l'Anses et l'Institut national de la consommation (INC) afin de procéder à une étude comparative actualisée des caractéristiques techniques de différents éclairages disponibles sur le marché.

Documentation de l'exposition des populations à la lumière

La réalisation d'une seconde étude a été confiée au Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), afin de caractériser l'exposition de la population aux différents éclairages artificiels et systèmes à LED, dans des conditions réelles d'exposition. Un logiciel, développé à cet effet, a permis d'évaluer l'exposition lumineuse pour plusieurs scénarios d'exposition (enfants, travailleurs, personnes âgées, …).

Évaluation des dispositifs de protection contre la lumière bleue destinés au grand public

Une troisième étude a été menée, avec le CSTB, pour évaluer la capacité des moyens de protection à destination du grand public à filtrer la lumière bleue (filtres pour écrans, verres traités, lunettes filtrantes, protections logicielles).

Expertise collective

Les travaux d'expertise ont été soumis régulièrement au CES (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques). Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires discutés avec les membres du CES. Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise ».

Les liens d'intérêts déclarés par les experts ont été analysés par l'Anses avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise. Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques *via* le site internet : http://www.anses.fr

Méthodologie d'expertise

Recherche et analyse bibliographique

L'expertise collective s'est principalement appuyée sur une analyse critique et une synthèse des données publiées dans la littérature scientifique (articles, rapports, etc.). La recherche bibliographique a ainsi été menée sur une période qui s'étend de janvier 2010 à juillet 2017.

Les résultats des études financées par l'Anses afin de compléter les connaissances relatives aux expositions des populations à la lumière artificielle et aux moyens de protection ont été pris en compte dans l'expertise.

Le groupe de travail a également auditionné des experts et personnalités extérieures ainsi que des représentants de l'industrie de l'éclairage et des associations pour la protection de l'environnement, afin d'apporter des informations et des données complémentaires aux données disponibles pour l'expertise.

Évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires

Pour chaque effet sanitaire étudié, les résultats des études disponibles chez l'Homme d'une part, et chez l'animal d'autre part, ont été considérés séparément afin de caractériser les éléments de

preuve apportés sur le lien entre l'exposition à la lumière des LED, et en particulier la lumière riche en bleu, et la survenue de l'effet sanitaire. Au final, les éléments de preuve chez l'Homme et chez l'animal ont été combinés afin d'établir une évaluation globale du niveau de preuve de l'effet sanitaire d'une exposition à la lumière des LED, dans une des catégories suivantes :

- effet avéré ;
- effet probable ;
- effet possible ;
- les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet ;
- probablement pas d'effet.

Caractérisation de l'exposition

Le manque de données bibliographiques portant sur l'exposition de la population aux technologies à LED a conduit l'Anses à financer la réalisation de campagnes de mesures spécifiques, notamment pour décrire la nature et la quantité de lumière émise par des systèmes à LED utilisés au quotidien (lampes d'éclairage, objets intégrant des LED, projecteurs automobiles et écrans d'ordinateurs, de tablettes, de téléphones mobiles etc.). Les expositions à la lumière riche en bleu, induites notamment par les systèmes à LED, ont été évaluées dans le cadre de scénarios de vie, grâce à des mesures réalisées *in situ* dans des environnements spécifiques.

Le tableau 1 en annexe rappelle les principales grandeurs physiques utilisées en particulier pour quantifier les émissions et les expositions dans le domaine de l'éclairage.

Évaluation des risques pour la santé humaine

En combinant l'évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires obtenue à partir de l'analyse des articles scientifiques et les données issues des scénarios d'exposition, l'expertise a cherché à caractériser les éventuels risques associés à l'exposition à des systèmes utilisant des LED, pour l'Homme. Ainsi, le groupe de travail a classé le risque de survenue des effets sanitaires chez l'Homme suivant les quatre niveaux définis ci-dessous :

- risque élevé ;
- risque modéré ;
- risque faible ;
- sans risque prévisible.

Le rapport d'expertise collective détaille la méthodologie d'évaluation du niveau de preuve des effets étudiés et l'évaluation qualitative du risque associé.

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES

Le comité d'experts spécialisé « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » a adopté les travaux d'expertise collective ainsi que ses conclusions et recommandations, objets de la présente synthèse, lors de sa séance du 23 novembre 2018 et a fait part de cette adoption à la Direction générale de l'Anses.

3.1 Spécificités de la lumière émise par les lampes à LED

Les spécificités des LED résident d'une part dans le type de rayonnement émis et, d'autre part, dans les caractéristiques physiques des lampes utilisant cette technologie.

D'une part, le spectre de lumière émis par des LED peut être plus riche en lumière bleue (il existe des lampes avec des températures de couleur[2] très élevées, supérieures à 6 000 K, fournissant une lumière très riche en bleu) mais aussi plus pauvre en lumière rouge que la plupart des autres sources lumineuses, naturelles ou artificielles. L'excès de lumière bleue dans le spectre des LED par rapport aux autres sources lumineuses (déséquilibre spectral) pose la question des effets de la lumière des lampes à LED sur la rétine (effets phototoxiques) mais aussi sur les rythmes circadiens et le sommeil (effets mélanopiques). Le déficit en lumière rouge des LED pourrait par ailleurs priver des effets photoprotecteurs potentiels de ce rayonnement, notamment lors du processus physiologique d'emmétropisation[3] qui se produit dans l'enfance.

D'autre part, en raison de leur forte luminance[4] et de leur caractère ponctuel, les lumières à LED peuvent être plus éblouissantes que les lumières émises par d'autres technologies (incandescence, fluo-compactes, halogènes, etc.). Cela peut être le cas notamment des matrices de LED (agrégats de LED ponctuelles sur un même support), des lampes spots à LED, des feux d'éclairage automobile et des lampes torches.

Enfin, les LED sont très réactives aux fluctuations de leur courant d'alimentation. Ainsi, des variations de l'intensité lumineuse peuvent apparaître selon la qualité du courant injecté. Ces phénomènes sont regroupés sous la terminologie de « modulation temporelle de la lumière ». L'Homme peut subir des effets néfastes de ces variations, qu'elles soient ou non visuellement perceptibles.

3.2 Évolutions réglementaires et normatives depuis 2010

3.2.1 Réglementations et normes relatives à la phototoxicité de la lumière

- *Valeurs limites d'exposition*

Concernant l'exposition aux rayonnements optiques, et en particulier la sécurité photobiologique, la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (Icnirp) a publié, en 2013, de nouvelles recommandations sur l'exposition aux rayonnements optiques visibles et infrarouges (Icnirp, 2013)[5]. Les valeurs limites d'exposition à la lumière bleue, inchangées par rapport à celles proposées en 1997, ne concernent que les expositions aiguës (exposition unique, continue et inférieure à 8 h).

- *Textes réglementaires encadrant les usages de dispositifs, produits d'éclairage ou rayonnements optiques artificiels applicables notamment aux LED*
  - Population générale

La Directive européenne « basse tension » (2014/35/UE) a pour objectif d'assurer que le matériel électrique se trouvant sur le marché européen satisfait aux exigences assurant un niveau élevé de protection de la santé et de la sécurité des personnes. Les fabricants peuvent s'appuyer sur la

---

[2] La température de couleur est une caractérisation des sources de lumière par comparaison à un matériau idéal émettant de la lumière uniquement par l'effet de la chaleur. Elle indique en kelvin (unité du système international dont le symbole est K) la température du corps noir dont l'apparence visuelle serait la plus proche de la source de lumière.

[3] L'emmétropisation est le processus de développement oculaire normal qui conduit à focaliser une image nette sur la rétine.

[4] La luminance est une grandeur correspondant à la sensation visuelle de luminosité d'une surface. Une surface très lumineuse présente une forte luminance, tandis qu'une surface parfaitement noire aurait une luminance nulle.

[5] Icnirp *Guidelines on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation* publié dans : Health Physics 105(1):74-96;2013.

conformité de leurs produits à des normes harmonisées afin de garantir le respect des exigences essentielles de cette directive.

Cependant, les éclairages portatifs (lampes torches, lampes frontales) n'entrent pas dans le champ de la Directive basse tension. Ils utilisent pourtant des sources LED pouvant atteindre des intensités lumineuses très élevées.

De même, pour l'éclairage automobile (feux extérieurs), il n'existe pas de réglementation destinée à garantir la sécurité photobiologique, par exemple en limitant les intensités d'émission des feux ou l'exposition des personnes.

Le cas des jouets intégrant des LED n'est pas suffisamment couvert par la Directive européenne sur la sécurité des jouets (2009/48/CE), car elle fait référence, pour les risques liés à la santé, à la norme de sécurité laser (IEC 608251-1), inadaptée aux éclairages à LED. Cette norme ne considère par ailleurs pas la sensibilité plus élevée des enfants à la lumière bleue en raison d'un cristallin plus clair.

- Travailleurs

La Directive européenne 2006/25/CE du 5 avril 2006 relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels - ROA) inclut le risque lié à la lumière bleue. Pour ce risque particulier, elle s'appuie sur les recommandations de l'Icnirp publiées en 1997. En France, la Directive ROA a été transposée dans le Code du travail par décret en 2010[6]. Un arrêté de 2016[7] définit les modalités d'évaluation de risque, en s'appuyant sur des normes européennes relatives à l'exposition des personnes aux rayonnements optiques.

- Normes

Les normes relatives à l'évaluation de la sécurité photobiologique (CIE S009, IEC 62 471 et NF EN 62 471) se réfèrent aux valeurs limites de l'Icnirp et proposent une classification des lampes en groupes de risque : groupe de risque 0 : « sans risque », groupe de risque 1 : « risque faible », groupe de risque 2 : « risque modéré » et groupe de risque 3 : « risque élevé ».

En 2014, un rapport technique (IEC TR 62778 : 2014) accompagnant la norme NF EN 62471 a été publié par la Commission électrotechnique internationale (IEC). Ce rapport décrit une méthode pour évaluer le groupe de risque photobiologique dans le cas de la lumière bleue. Ce rapport reprend plusieurs recommandations de l'Anses, notamment une procédure pour transférer le groupe de risque d'une LED individuelle à un module de LED et à un produit fini (luminaire), ainsi que la spécification d'une distance minimale de vision pour les personnes exposées à des sources de lumière de groupe de risque supérieur ou égal à 2.

Depuis 2015, des normes harmonisées relatives à l'éclairage incluent des exigences de sécurité photobiologique[8] qui limitent les effets possibles du rayonnement sur l'œil et la peau. Une distinction existe entre les lampes d'une part, et les luminaires[9] alimentés par le réseau électrique (luminaires non portatifs) d'autre part. Pour ce qui concerne les lampes, les exigences consistent à

---

[6] Décret n° 2010-750 du 2 juillet 2010 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements optiques artificiels, JORF n°0153 du 4 juillet 2010 page 12149, texte n° 11.

[7] Arrêté du 1er mars 2016 relatif aux modalités de l'évaluation des risques résultant de l'exposition aux rayonnements optiques artificiels en milieu de travail, JORF n°0066 du 18 mars 2016, texte n° 30.

[8] Ces exigences sont précisées notamment dans la norme NF EN 62 560– Lampes à DEL autoballastées pour l'éclairage général fonctionnant à des tensions > 50 V – Spécifications de sécurité et la norme NF EN 60 598-1 Luminaires – Partie 1 : exigences générales et essais (partie générale commune à tous les luminaires).

[9] Un luminaire est l'association d'une lampe (souvent appelée « ampoule ») avec un ornement décoratif ou l'association de plusieurs lampes.

limiter le groupe de risque photobiologique au niveau 0 ou 1 selon la norme NF EN 62471. Pour ce qui concerne les luminaires non portatifs, il n'existe pas de limitation du groupe de risque, mais uniquement une obligation d'avertir le consommateur en cas de groupe de risque supérieur ou égal à 2[10].

3.2.2. Réglementations et normes relatives aux autres effets sanitaires

Il n'existe pas, à ce jour, de réglementation spécifique concernant les effets liés à la perturbation des rythmes circadiens, à l'éblouissement et à la modulation temporelle de la lumière.

- *Perturbation des rythmes circadiens*

En 2004, la Commission internationale de l'éclairage (CIE) a publié un document, remis à jour en 2009 (CIE, 2009)[11], qui définit notamment des courbes de sensibilité spectrale des cellules ganglionnaires à mélanopsine de la rétine[12].

- *Éblouissement*

Les normes concernant l'éblouissement n'ont pas évolué depuis 2010. L'industrie de l'éclairage utilise les indices normatifs d'éblouissement définis par la CIE, notamment l'UGR (*Unified Glare Rating*). La formule de l'UGR a été initialement élaborée pour des luminaires intérieurs équipés de tubes fluorescents. La validité de la mise en application de l'UGR aux systèmes d'éclairages intégrant des LED pose question. La publication en 2013 de la CIE, « *Review of Lighting Quality Measures for Interior Lighting with LED Lighting Systems* » CIE 205:2013, conclut qu'un nouveau système d'évaluation de l'éblouissement est nécessaire pour l'éclairage à LED.

- *Effets sanitaires liés à la modulation temporelle de la lumière*

Depuis 2015, de nouvelles normes et documents techniques ont été élaborés ou remis à jour par la plupart des organismes de normalisation pour décrire les phénomènes liés à la modulation temporelle de la lumière. Cependant, il n'existe pas de réglementation européenne ou française limitant la modulation temporelle de la lumière émise par les lampes et les luminaires. La réglementation sur l'éclairage (en matière d'écoconception et d'étiquetage) est en cours de révision par la Commission européenne ; des aspects concernant la modulation temporelle de la lumière devraient figurer dans le texte en préparation.

3.3 Risques pour la santé humaine liés à l'exposition à la lumière des LED

Les risques pour la santé humaine liés à l'exposition à la lumière des LED sont essentiellement dus à la composition spectrale d'une part et à la modulation temporelle de la lumière d'autre part.

Parmi les effets sanitaires des LED, ceux liés à la lumière bleue que sont la phototoxicité et la perturbation des rythmes circadiens sont très dépendants de l'âge de la personne exposée. En effet, le cristallin joue notamment le rôle de filtre à lumière bleue dans l'œil et sa transmittance évolue fortement avec l'âge. Les enfants naissent avec un cristallin clair, laissant passer toute la lumière bleue pour atteindre un taux de filtrage optimal vers l'âge de 20 ans. Les personnes de plus de 60 ans ont un taux de filtrage de la lumière bleue environ deux fois supérieur à une personne de 20 ans.

---

[10] Pour les luminaires non portatifs appartenant au groupe de risque 2, les normes de sécurité (par exemple la norme NF EN 60598-1 portant sur les exigences générales des luminaires) imposent un marquage de la distance seuil et des mentions suivantes : « *il convient que le luminaire soit positionné de telle manière que la vision prolongée du luminaire à une distance inférieure à x m ne soit pas attendu » et « ne pas fixer la source lumineuse en fonctionnement* ».

[11] CIE 158:2009 : *ocular lighting effects on human physiology and behavior*.

[12] La mélanopsine est un photopigment présent dans la rétine et les cellules ganglionnaires sensibles à la lumière.

On distingue les sources lumineuses (ou objets lumineux) émettant de la lumière bleue, des objets qui ont une couleur bleue. Dans le premier cas, le spectre lumineux reçu par l'œil est (souvent) enrichi en lumière bleue. La quantité de lumière reçue par la rétine dans la bande bleue peut être importante et avoir des effets phototoxiques sur l'œil et un effet perturbateur sur les rythmes biologiques. Dans le second cas, la couleur bleue des objets et matériaux environnants, sous un éclairage classique, résulte de la réflexion d'une partie du spectre et a pour effet d'absorber une partie de la puissance lumineuse. La puissance de la source lumineuse est globalement atténuée, et la perception colorée peut avoir des effets apaisants.

3.3.1. Perturbation des rythmes circadiens, perturbation du sommeil, effet sur les performances cognitives et le niveau de vigilance

3.3.1.1 Caractérisation du danger

- *Perturbations des rythmes circadiens*

La lumière reçue par la rétine a deux effets majeurs : elle permet la formation d'images (effets visuels) et transmet à l'organisme une indication du moment de la journée (effet non visuel). Cet effet non visuel implique les cellules ganglionnaires à mélanopsine (CGM) de la rétine qui ont une sensibilité spectrale particulière : elles sont fortement stimulées par la lumière bleue, avec un pic de sensibilité aux environs de 480 nm. Les CGM envoient leurs messages vers les noyaux supra-chiasmatiques de l'hypothalamus, siège de l'horloge circadienne centrale. Cette horloge centrale distribue le message vers le reste du corps, afin de synchroniser l'ensemble des fonctions biologiques avec le rythme jour/nuit. Ainsi, une régulation adéquate de l'activité des CGM est primordiale pour la bonne synchronisation des rythmes biologiques des organismes avec leur environnement. La bande de longueurs d'ondes dite « mélanopique » (bleu turquoise, 480 - 490 nm) est ainsi liée à des effets sur la rythmicité circadienne.

L'horloge biologique centrale détermine la production d'une hormone, appelée mélatonine, dont la sécrétion commence en soirée environ deux heures avant le coucher, atteint un niveau maximum vers le milieu de la nuit, pour revenir à des niveaux très bas voire indétectables le matin et le reste de la journée. Ainsi, le rythme journalier des concentrations circulantes de mélatonine est un indicateur fiable de l'activité de l'horloge biologique et de ses perturbations.

La synchronisation efficace de l'horloge circadienne centrale, et donc des fonctions biologiques qui en dépendent, notamment le rythme de veille/sommeil, nécessite une intensité de lumière importante durant la journée et une obscurité totale pendant la nuit. Le mode de vie actuel, notamment urbain, tend de plus en plus à déréguler le rythme journalier naturel lumière/obscurité avec d'une part une journée passée à l'intérieur (accompagnée par une baisse d'intensité lumineuse) et d'autre part une soirée et une nuit exposées à de multiples sources lumineuses (éclairages, écrans).

Il existe un nombre important de publications étudiant la perturbation des rythmes circadiens liée à une exposition à la lumière en soirée ou la nuit. Les résultats de plusieurs études expérimentales menées chez l'Homme, au cours desquelles les personnes étaient soumises à des lumières riches en bleu issues d'éclairages artificiels ou d'écrans (ordinateurs, téléphones, tablettes, …) convergent et indiquent que la synthèse nocturne de mélatonine est retardée ou inhibée par une exposition, même très faible, à de la lumière riche en bleu.

L'intensité de la perturbation circadienne semble dépendre de l'intensité lumineuse, du moment et de la durée d'exposition, mais également de l'historique de l'exposition de l'individu à la lumière dans la journée. Cependant, une valeur aux alentours de 10-40 lux, voire en dessous (niveau très faible pouvant être largement dépassé en éclairage domestique) suffit pour observer un impact sur l'horloge circadienne (témoigné par la suppression de la sécrétion nocturne de la mélatonine).

En conclusion, compte tenu des éléments de preuve suffisants apportés par les études réalisées chez l'Homme, la perturbation des rythmes circadiens induite par l'exposition à une lumière riche en bleu en soirée ou la nuit est considérée comme avérée.

Par ailleurs, des travaux expérimentaux chez l'animal ont démontré que la mélatonine circulante de la mère traverse la barrière placentaire pour entrer dans la circulation du fœtus, qui possède des récepteurs à la mélatonine. Ainsi, la mélatonine maternelle peut agir sur le développement du fœtus, notamment sur la mise en place de son système circadien. La nuit, l'exposition de la mère à la lumière modifie les niveaux de mélatonine et induit un effet prénatal dont les conséquences persisteraient chez l'adulte (effets sur les rythmes circadiens, effets métaboliques, etc.). On peut raisonnablement supposer que chez l'Homme l'effet de l'éclairage moderne la nuit sur la sécrétion de mélatonine maternelle impacte négativement le développement du fœtus *in utero*.

La perturbation des rythmes circadiens est par ailleurs associée à d'autres effets sanitaires[13] (perturbation de la qualité et de la quantité de sommeil, troubles métaboliques, risque augmenté de cancer - notamment le cancer du sein -, pathologies cardiovasculaires, effets sur la santé psychique). Cependant, le lien direct entre l'exposition à la lumière riche en bleu en soirée ou la nuit et la survenue de ces effets sanitaires, bien que fortement suspecté, n'est pas établi à ce jour chez l'Homme.

- *Perturbation du sommeil*

La plupart des travaux scientifiques disponibles montrent que la lumière bleue altère la régulation du sommeil par le biais des perturbations circadiennes. Les éléments de preuve apportés par les études réalisées chez l'Homme sont suffisants pour conclure à un effet avéré de l'exposition à une lumière riche en bleu en soirée sur la latence à l'endormissement, la durée et la qualité du sommeil.

- *Effet sur le niveau de vigilance et les performances cognitives*

Plusieurs études ont montré que l'exposition à la lumière bleue (notamment issues de LED) de jour comme de nuit améliore les performances cognitives et augmente le niveau de vigilance. Ainsi, un certain nombre d'études se sont intéressées aux effets de l'éclairage, et en particulier à la lumière bleue, sur les performances de travailleurs de nuit. L'objectif est l'optimisation à court terme de la vigilance et la baisse de la somnolence afin de réduire les accidents industriels ou routiers et d'améliorer les performances et la productivité. Il s'agit d'un enjeu important de nos sociétés contemporaines. Cependant, la question d'impacts éventuels sur la santé, en raison notamment d'une possible phototoxicité accrue de la lumière la nuit, reste à définir.

3.3.1.2 Caractérisation des sources lumineuses à LED et des expositions

L'évaluation de l'exposition à la lumière bleue pour ses effets sur la mélatonine et les rythmes circadiens est étudiée dans la bande dite « mélanopique » (bleu turquoise, 480 - 490 nm).

La quantité de lumière bleue émise par un objet à LED peut être estimée à partir de sa température de couleur, exprimée en Kelvin (K), et de son niveau d'éclairement sur une surface, exprimé en lux (notamment sur le plan de l'œil).

[13] Évaluation des risques sanitaires liés au travail de nuit, rapport d'expertise collective de l'Anses, Juin 2016.

Les campagnes de mesures menées pour décrire la nature et la quantité de lumière émise par des systèmes à LED ont montré que la lumière émise par des écrans de téléviseurs, d'ordinateurs, de téléphones mobiles ou encore de tablettes présentait un faible niveau d'éclairement mais était riche en bleu. En effet, les écrans d'ordinateurs à LED présentaient des températures de couleur variant de 4 500 K à 6 900 K et des éclairements sur le plan de l'œil variant de 20 à 60 lux. Pour les écrans à LED de *smartphones* ou de tablettes électroniques, les températures de couleur variaient de 4 100 K à 7 000 K et les éclairements sur le plan de l'œil de 2 à 10 lux. Pour ce qui est de l'éclairage domestique, les lampes à LED disponibles sur le marché peuvent proposer des températures de couleur variant de 2 500 K (lumière peu riche en bleu) à 6 900 K (lumière très riche en bleu).

Concernant l'exposition des personnes à la lumière bleue dans la bande mélanopique, aucune donnée n'a été identifiée dans la littérature scientifique. Les scénarios d'exposition à la lumière développés pour cette expertise, représentant des conditions de vie typiques pour différentes populations, ont mis en évidence que l'exposition dans la bande mélanopique est similaire avec des éclairages à LED modérément riches en bleu (température de couleur variant de 2 700 K à 4 000 K), des lampes fluocompactes ou des lampes halogènes. Néanmoins, avec des scénarios de vie intégrant des situations de type « pire cas » (LED très riches en bleu, température de couleur autour de 6 500 K), l'exposition dans la bande mélanopique est augmentée par rapport aux autres technologies d'éclairage, et ce quelle que soit la population concernée. Par ailleurs, l'utilisation d'écrans et d'objets à LED est susceptible d'augmenter l'exposition à la lumière bleue dans la bande mélanopique.

3.3.1.3 Estimation du risque sanitaire

Les données disponibles ne permettent pas de quantifier précisément le risque de perturbation des rythmes circadiens, ou de perturbation du sommeil lié à l'exposition aux LED. Les experts du groupe de travail, sur la base d'une approche qualitative, estiment néanmoins, au vu de ce qui précède, que le risque de perturbation circadienne associé à l'exposition aux lumières à LED riches en bleu en soirée ou la nuit est élevé.

En particulier, l'exposition avant le coucher aux éclairages et écrans à LED de téléviseurs et technologies de communication, enrichis en lumière bleue, serait susceptible de nuire à la durée et à la qualité du sommeil et d'avoir un impact sur les fonctions cognitives.

3.3.1.4 Populations sensibles

Les études disponibles ont montré des effets de retardement de l'heure du coucher, dus à l'altération de fonctions non-visuelles et notamment la suppression de la mélatonine, encore plus marqués chez les enfants, les adolescents et les jeunes adultes (avant 20 ans). Un facteur évident est la transparence du cristallin, plus importante chez les jeunes, qui laisse passer plus de lumière que chez les adultes. En plus de l'utilisation très répandue d'appareils à écrans à LED chez les adolescents, les changements comportementaux, hormonaux et circadiens qui interviennent à cet âge (allongement de la période endogène du cycle circadien) sont probablement aussi impliqués.

De manière plus générale, plusieurs populations ont pu être identifiées comme étant plus spécifiquement sensibles au risque de perturbation circadienne et du sommeil associés à une exposition aux LED :

- les nourrissons, les enfants et les adolescents, les jeunes adultes (en raison d'un cristallin clair) ; les personnes aphakes (sans cristallin) et pseudo-phakes (ayant un cristallin artificiel) ;
- les femmes enceintes (effets sanitaires potentiels sur l'enfant à naître) ;

- les travailleurs de nuit[14] ;
- les personnes souffrant de pathologies ou d'anomalies oculaires, les personnes souffrant de troubles du sommeil.

3.3.2 Effets et pathologies oculaires

3.3.2.1 Caractérisation du danger

La phototoxicité est un mécanisme d'altération cellulaire induit par la lumière qui peut conduire à la mort cellulaire. L'exposition à une lumière intense et aiguë est phototoxique car elle entraine la perte irréversible de cellules rétiniennes qui peut conduire à une baisse de l'acuité visuelle partielle, définitive (scotome[15], diminution du champ visuel, baisse de la résolution) ou totale (cécité). Une exposition chronique à des lumières phototoxiques de faible intensité accélère le vieillissement des tissus rétiniens, pouvant conduire à une baisse de l'acuité visuelle et à des maladies dégénératives telles que la DMLA (dégénérescence maculaire liée à l'âge).

En ce qui concerne les effets toxiques d'une lumière riche en bleu sur l'œil, les données disponibles mettent en évidence le fait que :

- l'effet phototoxique sur la rétine d'une exposition aiguë (inférieure à 8 heures) à une lumière riche en bleu est avéré ;
- l'effet de l'exposition chronique de la rétine (plusieurs années) à la lumière riche en bleu sur la contribution à la survenue de dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA) est avéré ; les effets à long terme des éclairages artificiels sur l'œil n'étant pas étudiés à ce jour, ces conclusions se basent sur des études épidémiologiques prenant en compte l'exposition à la lumière solaire (lumière riche en bleu) ;
- au-delà de la dose phototoxique reçue, le moment de l'exposition joue un rôle important. Certaines études expérimentales, aujourd'hui limitées à l'animal, démontrent une vulnérabilité augmentée de la rétine à la phototoxicité pendant la nuit, en raison d'un rythme journalier de photosensibilité et des effets perturbateurs sur l'horloge rétinienne endogène.

De nombreuses études montrent que les valeurs limites d'exposition (VLE) retenues par l'Icnirp pour la toxicité rétinienne de la lumière ne sont pas suffisamment protectrices. Certains auteurs (Hunter *et al.*, 2012)[16] ont estimé que ces VLE étaient supérieures d'un facteur 20 par rapport à des VLE protectrices. De plus, l'expertise a permis de souligner que ces VLE ne sont proposées que pour une exposition aigüe (exposition inférieure à 8 h) et éludent la question d'une exposition à long terme. Les experts ont par ailleurs mentionné l'existence de nouveaux systèmes UV-LED[17] qui pourraient présenter des risques phototoxiques.

---

[14] Les travailleurs de nuit sont particulièrement sensibles dans le sens où ils sont potentiellement exposés de manière importante aux éclairages à LED.

[15] Lacune dans le champ visuel due à l'insensibilité de certains points de la rétine.

[16] Hunter, Jennifer J., Jessica I. W. Morgan, William H. Merigan, David H. Sliney, Janet R. Sparrow, et David R. Williams. 2012. « The Susceptibility of the Retina to Photochemical Damage from Visible Light ». Progress in Retinal and Eye Research 31 (1): 28-42.

[17] Nouvelle génération de LED dont le pic de lumière bleue est décalé dans le domaine de l'ultraviolet (vers 410 nm).

Par ailleurs, l'examen de la littérature scientifique sur la myopie et le syndrome sec[18] a conduit à conclure que :

- l'effet de la lumière riche en bleu sur la myopie est possible (positif ou négatif) ;
- l'effet de la lumière riche en bleu sur la survenue du syndrome sec est possible.

3.3.2.2 Caractérisation des sources lumineuses à LED et des expositions

L'évaluation de l'exposition à la lumière bleue est étudiée dans la bande dite « phototoxique » (bleu profond, 450 – 470 nm).

Les mesures physiques effectuées dans le cadre de cette expertise montrent que certains dispositifs lumineux à LED testés (des lampes-torches, des lampes frontales, des jouets ou certains phares automobiles - notamment les feux de croisement -, etc.), émettent une lumière riche en bleu (dispositifs classés en groupe de risque 2, temps d'exposition admissible inférieur à 100 s, selon les valeurs limites d'exposition définies par l'Icnirp). Certains écrans de téléphones et tablettes électroniques utilisant la technologie LED émettent une lumière à des niveaux d'intensité assez bas, mais là aussi systématiquement riche en bleu. On note par ailleurs l'apparition sur le marché de LED bleues décoratives et l'utilisation de LED dans un nombre croissant d'applications (par exemple dans l'éclairage agricole, pour l'éclairage d'aquarium, …).

L'addition d'un éclairage artificiel à l'éclairage naturel est de nature à modifier les doses oculaires reçues par la cornée et par la rétine dans la bande phototoxique (jusqu'à 50 % d'augmentation). La comparaison de la contribution des éclairages à LED à l'exposition globale des personnes, par rapport à d'autres technologies d'éclairage et selon des scénarios définis, a permis de mettre en évidence les éléments suivants :

- de façon générale, les éclairages à LED augmentent le déséquilibre des longueurs d'onde en faveur de la lumière bleue par rapport à la lumière rouge, en comparaison à d'autres éclairages, à température de couleur égale ;
- l'exposition dans la bande phototoxique est d'autant plus importante que la température de couleur est élevée (lumière riche en bleu), quelle que soit la technologie d'éclairage (LED ou non).

Pour ce qui concerne la dose phototoxique reçue par la rétine, les résultats issus de l'étude des scénarios d'exposition montrent que les LED ne se distinguent des autres technologies que dans le scénario « pire cas », dans lequel les éclairages à LED utilisés sont très riches en bleu (température de couleur élevée autour de 6 500 K). Pour autant, les experts soulignent que ce scénario « pire cas » peut correspondre au cas de certaines populations très peu exposées à la lumière naturelle et soumises à des éclairages riches en bleu sur leur lieu de travail (par exemple, en hiver, il fait nuit le matin au départ du domicile et le soir au retour du domicile, la journée étant passée sous un éclairage exclusivement artificiel riche en bleu).

Les experts du groupe de travail signalent le développement commercial important de petites LED décoratives nues émettant de la lumière bleue (guirlandes, éclairages d'ambiance, …). Ces LED peuvent augmenter l'exposition dans la bande phototoxique et ce même à de faibles luminances. En effet, les photons composant la lumière bleue sont plus énergétiques que les photons associés à des longueurs d'onde plus grandes. Ainsi, ils peuvent induire des réactions photochimiques comparables à celles provoquées par les rayonnements ultraviolets. De plus, la perception visuelle humaine est moins sensible à la lumière bleue. Des niveaux d'énergie élevés de lumière bleue

[18] Le syndrome sec se manifeste par un mauvais fonctionnement du système lacrymal qui entraîne une sécheresse au niveau de la surface oculaire (cornée, conjonctive, etc.). Ce syndrome se manifeste par un inconfort oculaire avec des sensations de picotements ou une impression de corps étranger dans l'œil.

peuvent donc être reçus par la rétine sans que cela ne crée une forte sensation visuelle. Cette lumière de couleur bleue n'étant pas nécessairement éblouissante, sa fixation prolongée est possible, notamment par les enfants.

3.3.2.3 Estimation du risque sanitaire

Les données disponibles ne permettent pas de quantifier précisément le risque de survenue de pathologies oculaires lié à l'exposition aux LED. Cependant, sur la base d'une approche qualitative, les experts estiment au vu de ce qui précède que le risque de toxicité aiguë des LED à usage domestique « blanc chaud » (basse température de couleur) est faible.

Il faut noter que des dispositifs lumineux appartenant à un groupe de risque 2 (lampes-torches, lampes frontales, jouets ou certains phares automobiles) sont disponibles sur le marché. Le risque de survenue de pathologies oculaires lié à l'exposition à ces dispositifs est augmenté et ce d'autant plus pour les populations sensibles. De même, des objets émettant spécifiquement de la lumière bleue (par exemple les LED décoratives), même à faible intensité, peuvent augmenter l'exposition dans la bande phototoxique.

En raison du manque de données sur les effets chroniques d'une exposition à la lumière froide à faibles doses (écrans, par exemple), le niveau de risque associé à une exposition chronique à des LED riches en bleu ne peut être évalué à ce jour.

3.3.2.4 Populations sensibles

Plusieurs populations sensibles ont pu être identifiées au vu des données de la littérature, s'agissant du risque lié aux pathologies oculaires :

- les nourrissons, les enfants, les adolescents, les jeunes adultes (cristallin clair) ; les personnes aphakes (absence de cristallin) et pseudo-phakes (cristallin artificiel) ;
- les personnes souffrant de pathologies oculaires (œil sec, DMLA, glaucome, rétinopathies…) ; les personnes souffrant de troubles moteurs ou cognitifs qui réduisent les capacités d'évitement ou de prise de décision face à une lumière trop intense ; les personnes prenant des médicaments photosensibilisants ou exposés à des polluants photosensibilisants ;
- les travailleurs de nuit[19] ou tout professionnel potentiellement exposé de manière importante aux éclairages à LED (les chirurgiens, les dentistes, les éclairagistes, les revendeurs d'éclairages, les métiers des arts de la scène, les personnes travaillant dans les installations sportives, les personnes travaillant dans l'agroalimentaire utilisant des LED (serres, aquaculture), etc.).

3.3.3 Éblouissement et confort visuel

3.3.3.1 Caractérisation du danger

L'éblouissement se définit par des conditions de vision dans lesquelles une personne éprouve une gêne ou une réduction de l'aptitude à distinguer des détails ou des objets, par suite d'une répartition défavorable des luminances ou d'un contraste excessif. Il convient de distinguer l'éblouissement perturbateur (éblouissement d'incapacité), qui diminue les capacités et les performances visuelles du sujet, de l'éblouissement inconfortable qui apporte une sensation de gêne au sujet, sans provoquer de baisse de performance visuelle.

Plusieurs facteurs modulent l'incapacité due à l'éblouissement : la quantité de lumière envoyée dans l'œil par la source elle-même, mais aussi la distance à la source éblouissante et l'âge de

[19] Les travailleurs de nuit sont particulièrement sensibles dans le sens où ils sont potentiellement exposés de manière importante aux éclairages à LED.

l'observateur. La composition spectrale de la lumière, en revanche, ne modifie pas le phénomène d'éblouissement d'incapacité.

Il apparaît que la multiplicité des sources ponctuelles visibles dans les luminaires (matrices à LED), aggrave notablement l'inconfort. Toutes les études s'accordent à montrer que (1) les sources non-uniformes sont plus éblouissantes que les sources uniformes de même luminance moyenne et (2) plus le contraste est élevé, plus la sensation d'inconfort est grande. De plus, la diffusion de la lumière dans les milieux oculaires augmentant avec l'âge, l'inconfort augmente également. Pour ce qui concerne tant les sources à LED que les sources lumineuses « traditionnelles », la température de couleur ne semble pas être un facteur déterminant du confort visuel. Cependant, à température de couleur égale, la composition spectrale et en particulier l'enrichissement en bleu du spectre a des conséquences probables sur l'inconfort visuel.

Les effets à long terme de la répétition des éblouissements ne sont pas connus à ce jour. Il existe par ailleurs une grande variabilité interindividuelle dans la population générale quant à l'appréciation des situations éblouissantes.

3.3.3.2 Caractérisation des sources lumineuses à LED et des expositions

La luminance, mesurée en vision directe d'une source lumineuse à courte distance, exprimée en cd/m² [20], permet d'évaluer le niveau d'éblouissement que peut provoquer cette source de lumière. Les lampes à LED testées dans le cadre de cette expertise présentent des niveaux de luminance disparates, certaines étant très éblouissantes, notamment dans les spots à LED.

Un autre aspect du confort visuel est lié au rendu des couleurs. L'indice de rendu de couleur (IRC) représente la capacité d'une lumière à rendre compte d'une couleur de manière fidèle. Un IRC égal à 100 désigne une lumière optimale, et il est admis qu'un IRC est jugé acceptable au-dessus de 80. Les lampes à LED ne sont pas encore à ce jour au niveau des lampes halogènes, dont les IRC avoisinent 100, mais présentent des performances similaires aux lampes fluocompactes, avec des IRC mesurés parfois au-dessus de 80. Par rapport à la précédente expertise de l'Anses publiée en 2010, la technologie à LED propose aujourd'hui un rendu de couleur de meilleure qualité.

3.3.3.3 Estimation du risque sanitaire

Les données disponibles ne permettent pas de quantifier précisément le risque d'éblouissement perturbateur ou d'inconfort visuel lié à l'exposition aux LED. Cependant, les experts, sur la base d'une approche qualitative, estiment au vu de ce qui précède que certains dispositifs d'éclairage incluant des LED peuvent conduire à un risque d'éblouissement important : les lampes torches, les phares automobiles, les spots à LED, matrices de LED, etc. De plus, même si certaines lampes à LED ont un meilleur rendu de couleur qu'il y a quelques années, celui-ci reste perfectible.

3.3.3.4 Populations sensibles

L'âge est un facteur aggravant le risque d'éblouissement associé aux LED, de jour comme de nuit. La dégradation de l'acuité visuelle s'accélère au-delà de l'âge de 60 ans, de façon plus ou moins prononcée selon les personnes. Le voile de luminance généré autour des sources augmente considérablement avec l'âge, abaissant la perception du contraste des objets et, de ce fait, les performances visuelles.

Les sujets migraineux semblent être spécifiquement sensibles à l'éblouissement causé par certaines irrégularités de la répartition spectrale d'énergie de la lumière.

---

[20] cd/m² : candelas par mètre carré.

3.3.4 Effets cutanés

3.3.4.1 Caractérisation du danger

La lumière bleue pourrait avoir un effet nocif sur la peau, accélérant le vieillissement et retardant les processus de cicatrisation, alors que l'exposition à des longueurs d'onde comprises entre 590 et 700 nm (lumière rouge) aurait des effets inverses. Les experts concluent que l'effet d'une exposition à la lumière riche en bleu sur la survenue de pathologies cutanées est possible.

Par ailleurs, l'effet cancérogène (induction de mélanome) retardé induit par une photothérapie à LED bleues pour traiter l'ictère néonatal devrait faire l'objet d'une attention particulière. Des cinq études réalisées pour évaluer le risque de développer des lésions mélanocytaires bénignes ou malignes suite à une photothérapie néonatale à la lumière bleue, trois ont montré un nombre accru de nævi communs ou atypiques chez les enfants exposés.

3.3.4.2 Caractérisation des sources lumineuses à LED et des expositions

Il n'existe pas de données d'exposition spécifiques aux émissions de lumières bleues sur la peau. Néanmoins, le groupe de risque photobiologique renseigne sur la quantité de lumière bleue émise par les éclairages à LED (*cf*. § portant sur la caractérisation de l'exposition pour les pathologies oculaires).

3.3.4.3 Estimation du risque sanitaire

Les données disponibles ne permettent pas de quantifier l'existence d'un risque pour la peau, lié à l'exposition aux LED. Les experts estiment, sur la base d'une approche qualitative, compte tenu des niveaux d'exposition associés à un usage domestique des éclairages à LED et de la faible profondeur de pénétration des rayonnements optiques bleus dans la peau, que le risque de survenue de pathologies cutanées lié à une exposition à la lumière bleue issue des LED est faible.

3.3.4.5 Populations sensibles

Les experts ont identifié certaines populations potentiellement sensibles :

- les nouveau-nés dans le cas d'une photothérapie à LED bleues prescrite pour traiter l'ictère néonatal ;
- les personnes atteintes de certaines pathologies cutanées (lésions épithéliales, plaies, …) ; ces populations auraient un risque accru de voir survenir ou s'aggraver des lésions cutanées lors d'une exposition à la lumière bleue.

3.3.5 Autres troubles (migraines, maux de tête, fatigue visuelle, accidents, crises d'épilepsie)

3.3.5.1 Caractérisation du danger

La modulation temporelle d'un système d'éclairage est principalement caractérisée par sa fréquence de modulation et le taux de modulation associé, exprimé en pourcentage de l'intensité lumineuse (valeurs comprises entre 0 et 100 %). Selon sa fréquence, cette modulation peut être perceptible ou non par le système visuel humain. Trois effets visuels (perception consciente de la modulation) distincts ont été décrits : le papillotement (*flicker*), l'effet stroboscopique et l'effet de réseau fantôme. Des effets sanitaires peuvent être induits directement par ces effets visuels, ou apparaître sans perception consciente d'une quelconque modulation. Les effets sanitaires qui peuvent découler de la perception consciente ou non de la modulation sont les crises d'épilepsie, les accidents de la route et ceux liés à l'utilisation de machines, ainsi que les migraines, les maux de tête et la fatigue visuelle.

Les effets comme les maux de tête, les migraines, la fatigue visuelle, peuvent être associés à des fréquences de modulation temporelle comprises entre 80 et 120 Hz. Les éléments de preuve associés apportés par les études sont limités chez l'Homme.

Des phénomènes comme l'effet stroboscopique (immobilité ou ralentissement apparent d'un objet en mouvement) ou l'effet de réseau fantôme (rémanence de l'image lors d'une saccade visuelle) peuvent se produire à des fréquences élevées de modulation (supérieures à environ 80 Hz). Dans un contexte industriel ou domestique, il est vraisemblable que l'effet stroboscopique impacte la sécurité lors de l'usage de machines ou d'outils.

La modulation temporelle de la lumière peut également être associée au déclenchement de crises chez les personnes souffrant d'épilepsie. Cependant, les fréquences de modulation des lampes et luminaires à LED disponibles sur le marché sont trop élevées pour déclencher des crises chez ces personnes. Il subsiste néanmoins une possibilité de déclenchement de crises dans la population des sujets épileptiques lors d'une exposition à des lampes et luminaires à LED présentant une modulation temporelle anormale (produits défectueux ou incompatibilité avec le variateur).

Par ailleurs, certains éclairages autonomes sur les vélos (rechargement par induction magnétique) sont très fortement modulés (pourcentage de modulation de 100 %) à des fréquences variant avec la vitesse du cycliste. À certaines vitesses, les modulations temporelles se situent dans la bande la plus critique pour le déclenchement de crises d'épilepsie, autour de 15 Hz.

Dans tous ces cas, la modulation temporelle de la lumière est associée à un inconfort visuel et à une diminution de l'ergonomie visuelle, notamment aux postes de travail dans le cadre professionnel.

3.3.5.2 Caractérisation des sources lumineuses à LED et des expositions

Des résultats issus de la littérature scientifique portant sur la modulation temporelle de lampes à LED ont été agrégés avec des mesures réalisées dans le cadre de cette expertise ; sur les 53 lampes testées :

- 18 lampes (environ 34 %) ont une modulation temporelle très faible (pourcentage de modulation inférieur à 1 %) ;
- 12 lampes (environ 23 %) ont un pourcentage de modulation temporelle compris entre 1 % et 15 %, semblable à celui des lampes halogènes et fluocompactes ;
- 14 lampes (environ 26 %) ont un pourcentage de modulation compris entre 12 % et 70 %, des valeurs significativement plus élevées que celles des technologies halogènes et fluocompactes ;
- 9 lampes (environ 17 %) ont un pourcentage de modulation très élevé, supérieur à 70 % et pouvant atteindre 100 %.

On estime qu'environ 43 % des lampes à LED à usage domestique ont des performances dégradées (taux de modulation supérieur à 15 % à 100 Hz) en matière de modulation temporelle par rapport aux technologies halogènes et fluocompactes.

L'effet stroboscopique est particulièrement visible avec des lampes et luminaires à LED ayant une forte modulation temporelle à 100 Hz.

Certaines lampes et luminaires à LED possèdent des niveaux de modulation suffisamment élevés pour que l'effet de réseau fantôme soit perceptible, spécialement en situation de conduite automobile.

3.3.5.3 Estimation du risque sanitaire

Pour les personnes souffrant d'épilepsie, les données disponibles ne permettent pas de quantifier le risque de déclenchement de crise associé à une modulation temporelle d'un système d'éclairage à LED.

Les experts estiment par ailleurs qu'en raison du nombre limité de données d'exposition, le risque associé aux effets (maux de tête, migraine, fatigue visuelle) intervenant dans la gamme de fréquences (80 – 120 Hz) associé à une exposition aux LED n'est pas connu.

Les données scientifiques ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet de la perception de l'effet stroboscopique ou de réseau fantôme sur l'accidentologie lors de la manipulation de machines ou d'outils, ou sur les routes.

3.3.5.4 Populations sensibles

Les études portant sur la maturation du système de perception visuelle des contrastes chez l'Homme indiquent que la sensibilité maximale aux contrastes temporels est atteinte chez l'adolescent et le jeune adulte. Il s'agit donc d'une catégorie de population particulièrement sensible aux lumières modulées.

Les études épidémiologiques montrant une association entre lumière modulée et déclenchement de migraines désignent les personnes souffrant de migraine comme une population sensible aux lumières modulées.

Les travaux menés en utilisant des tubes fluorescents d'anciennes générations ont montré que certaines personnes ont une sensibilité accrue aux modulations temporelles de la lumière à la fréquence de 100 Hz. De plus, des études montrent que certains individus perçoivent visuellement le papillotement à 100 Hz.

Ainsi, plusieurs groupes de populations sensibles ont pu être identifiés concernant certains effets sanitaires liés à la modulation temporelle de la lumière :

- pour ce qui concerne les maux de tête, la migraine et la fatigue visuelle :
  - les enfants, adolescents et jeunes adultes ;
  - les personnes souffrant de migraines ;
- pour ce qui concerne le risque d'accident lié à l'effet stroboscopique ou à l'effet de réseau fantôme :
  - les opérateurs de machines et d'outils et les conducteurs de véhicules ;
  - les personnes souffrant de troubles moteurs ou cognitifs réduisant leurs capacités d'évitement ou de prise de décision ;
  - les enfants, adolescents et jeunes adultes ;
- pour ce qui concerne le déclenchement de crises d'épilepsie, les personnes souffrant d'épilepsie.

3.4 Efficacité des moyens de protection

Différentes solutions revendiquant une atténuation ou une suppression des effets de la lumière bleue existent : filtres incorporés aux écrans d'ordinateurs ou s'adaptant aux lunettes correctrices, systèmes d'éclairage programmables qui modulent la quantité de lumière mélanopique (longueur d'onde située autour de 480 - 490 nm) en fonction de l'heure.

D'après les mesures réalisées pour la présente expertise :

- les lunettes spécifiques de protection contre la lumière bleue ont une efficacité de filtrage plus importante que les verres ophtalmiques traités. Aucun de ces deux systèmes n'est cependant assez efficace pour être considéré comme un équipement de protection individuelle[21] (EPI) contre le risque de phototoxicité rétinienne aiguë résultant d'une exposition prolongée à une source LED d'intensité lumineuse importante ;
- selon les moyens de protection testés, la capacité de filtrage du rayonnement bleu dans la bande mélanopique est très variable : elle est très faible pour les verres traités, voire

[21] À ce jour, il n'existe pas de norme fixant les méthodes d'essai et les exigences de performance pour des EPI vis-à-vis de la lumière bleue.

inexistante, malgré les revendications avancées par les fabricants ou distributeurs de ces produits. Il est impossible d'affirmer que ce filtrage est suffisant pour empêcher la diminution de la sécrétion de mélatonine induite par une exposition lumineuse en soirée et les effets de retard à l'endormissement qui peuvent être associés ;

- pour les écrans testés revendiquant une limitation de l'émission de lumière bleue, aucune efficacité réelle n'a été observée. La diminution de la température de couleur (passage au blanc chaud) et de la luminosité des écrans a, en revanche, montré une certaine efficacité sur la diminution de la quantité de bleu dans le spectre.

3.5 Impact des LED sur l'environnement

3.5.1 Danger pour la biodiversité

La diversité du vivant se reflète dans la grande diversité des réponses métaboliques, physiologiques et comportementales de la faune et de la flore à la lumière. Ainsi, ce qui peut être un avantage pour une espèce donnée (animale ou végétale) peut s'avérer un inconvénient pour une autre. Des modifications des rythmes biologiques (journaliers et annuels), de l'orientation, de la répartition géographique, et de la migration des espèces peuvent ainsi être observées, à la suite d'une exposition à la lumière artificielle. Des effets indirects sont observés (à moyen et long termes), sur ces populations et leurs écosystèmes.

Les travaux de recherche sur l'impact de la lumière émise par les LED la nuit sur le vivant s'appuient encore beaucoup sur ceux se rapportant à la lumière artificielle en général. Ils concernent d'ailleurs un nombre encore très limité d'espèces. Quel que soit l'écosystème étudié, la tendance générale relevée dans la littérature scientifique montre, à long terme, une augmentation de la mortalité et un appauvrissement de la diversité des espèces animales et végétales étudiées dans les milieux éclairés la nuit, y compris par des éclairages à LED.

Selon la littérature scientifique, les effets de la lumière la nuit, notamment issue d'éclairages à LED, sur la faune et la flore et les écosystèmes, sont avérés pour toutes les espèces étudiées. Ces effets correspondent globalement à ceux de l'éclairage nocturne, parmi lesquels il faut distinguer ceux qui pourraient être spécifiquement liés à des caractéristiques propres aux LED (intensité, composition spectrale). Ces effets viennent s'ajouter aux autres pressions anthropiques (pollution chimique, barrières géographiques, réduction de l'espace vital, surexploitation…). L'extension continue des activités humaines, industrielles et de loisir, les nuisances physiques et chimiques auxquelles viennent s'ajouter les effets du changement climatique constituent autant de facteurs auxquels certaines populations animales et végétales seront probablement incapables de faire face, ce qui entraînera une accélération de la diminution de la biodiversité. Cependant, les données impliquant l'action combinée de ces multiples facteurs perturbants sont encore rarissimes.

3.5.2 Pollution lumineuse

Le rapport d'expertise collective associé à cette synthèse propose une évaluation de l'effet du déploiement des LED (sources d'éclairage et d'affichage extérieurs notamment) sur la pollution lumineuse. Différents aspects ont été considérés, comme les effets sur le halo nocturne, les nuisances pour l'Homme (lumière intrusive, débordements lumineux, éblouissement, rythmes circadiens) et les nuisances pour les écosystèmes et la biodiversité.

Selon les experts du groupe de travail, le changement des technologies d'éclairage par des LED pourrait augmenter ou diminuer la pollution lumineuse, en fonction des choix retenus pour l'éclairage public, d'intérieur, de mise en valeur architecturale et paysagère, etc. Les catégories de systèmes d'éclairage à LED qui pourraient être responsables des plus grandes augmentations de la pollution lumineuse sont : les enseignes, les affiches et publicités lumineuses, ainsi que l'éclairage des zones commerciales, des zones agricoles (y compris les serres horticoles) et

aquacoles et des zones industrielles. L'éclairage des parkings extérieurs de ces zones est également concerné. Dans ces catégories, la tendance est à l'augmentation du nombre et de l'intensité des points lumineux.

Le remplacement des lampes de l'éclairage public (sur la voirie) et d'intérieur par des LED pourrait contribuer à réduire la pollution lumineuse, en ciblant davantage les zones à éclairer (et donc en limitant la diffusion) et en modulant la qualité (longueur d'onde) et l'intensité de la lumière émise, ce que permet la technologie LED ; la condition associée est que le nombre de points lumineux à LED ne soit pas augmenté comparativement au nombre de points lumineux remplacés.

Malgré les résultats mis en avant ci-dessus, il est difficile d'évaluer l'impact global de la transition de l'éclairage existant vers les LED sur la pollution lumineuse.

3.5.3 Impacts liés au cycle de vie des lampes et luminaires à LED

Plusieurs catégories d'impacts environnementaux sont définies lors de l'analyse du cycle de vie d'un produit : la consommation d'énergie, la quantité de déchets dangereux produite, la quantité d'eau utilisée, l'impact sur le réchauffement climatique, les effets toxiques sur la santé humaine, etc. Les résultats des études d'analyse du cycle de vie (ACV) des sources lumineuses analysées montrent que les lampes et luminaires à LED causent les impacts environnementaux les plus bas en comparaison avec d'autres technologies d'éclairage. Ceci est lié à une plus haute efficacité lumineuse des éclairages à LED par rapport aux autres sources. Le contenu des études d'ACV portant sur des lampes et luminaires varie cependant, en particulier dans les produits analysés et les méthodes choisies (l'unité fonctionnelle, les catégories d'impact, les étapes du cycle de vie incluses). Malgré des différences notables dans les méthodes d'ACV, les analyses ont généralement abouti à des résultats très similaires : c'est la phase d'utilisation des LED qui est majoritairement (70 à 99 %) responsable des impacts environnementaux, en raison de leur consommation d'énergie. Leur fabrication est responsable de la plupart des autres impacts.

Le CES note comme limitation, dans les ACV, l'absence de méthodologie pour évaluer les impacts de la lumière sur la santé humaine et l'environnement (faune et flore).

Recommandations du CES

Sur la base des conclusions et recommandations du groupe de travail, le CES formule les recommandations suivantes visant à mieux protéger la santé humaine (population générale et travailleurs) et l'environnement vis-à-vis des effets liés à l'exposition aux systèmes à LED. Ces recommandations visent à limiter les effets néfastes liés à l'exposition aux LED en développant l'information de la population générale et en milieu de travail, et en améliorant l'encadrement normatif et réglementaire de l'usage des LED. Enfin, le CES souligne les efforts à mener en matière de recherche.

Recommandations pour la protection de la population et de l'environnement, à destination des pouvoirs publics

Le CES recommande de développer des actions, notamment d'information, sur :

- la nécessité de limiter l'exposition à des lumières riches en bleu (issues de LED ou d'autres technologies), en privilégiant le recours à des éclairages de couleur chaude (température de couleur inférieure à 3 000 K) avant le coucher et pendant la nuit, particulièrement pour certains groupes de populations : enfants, adolescents, femmes enceintes (voir listes par effets sanitaires dans la partie 3). Notamment, le CES recommande de ne pas utiliser de veilleuse à lumière riche en bleu pour les nourrissons et les enfants et de limiter l'exposition des enfants et adolescents aux sources d'exposition à de la lumière riche en bleu (écrans d'ordinateurs, de tablettes, de téléphones mobiles, …) la nuit et avant le coucher ;
- l'importance de renforcer le contraste lumineux entre le jour et la nuit en augmentant l'exposition à la lumière naturelle en journée et en limitant l'exposition à la lumière artificielle avant l'heure du coucher et la nuit ;
- l'effet phototoxique de la lumière associé à l'exposition à certains dispositifs d'éclairage à LED (lampes torches, lampes frontales, jouets, phares automobiles, guirlandes décoratives à lumière bleue) disponibles sur le marché, notamment pour les groupes de populations les plus sensibles comme les enfants ;
- l'efficacité très disparate des moyens de protection actuellement proposés vis-à-vis des effets néfastes pour la santé liés à l'exposition à des LED.

Dans un but de protection contre les effets néfastes liés à la pollution lumineuse pour l'humain et son environnement, le CES recommande :

- de mettre en œuvre des actions pour limiter les lumières intrusives dans l'habitat et ainsi réduire les risques de perturbations circadiennes ;
- de limiter le nombre d'installations lumineuses en extérieur, de réduire les surfaces des zones éclairées au strict nécessaire, d'améliorer le contrôle de leur directivité et d'en promouvoir une gestion raisonnée ;
- d'effectuer, là où l'éclairage s'impose, une étude d'impact de cet éclairage sur l'écosystème local dans les zones naturelles et périurbaines ;
- de créer des espaces protégés, sans éclairage artificiel.

Recommandations pour la protection des travailleurs à destination des employeurs et de la médecine du travail

- considérant les effets phototoxiques de la lumière bleue et les effets potentiels de la modulation temporelle de la lumière, le CES rappelle l'obligation de limiter l'exposition des travailleurs à ces sources de lumière et de les informer des dangers associés ;

- par ailleurs, compte tenu des effets observés chez l'animal sur le développement du fœtus liés à l'exposition de la mère à la lumière la nuit, le CES recommande de limiter l'exposition des femmes enceintes à la lumière la nuit.

Recommandations concernant le cadre réglementaire et normatif dans un but de protection de la santé humaine et de l'environnement

Au niveau national :

le CES recommande de faire respecter la réglementation sur l'extinction des éclairages intérieurs émis vers l'extérieur et l'illumination des façades de bâtiments (arrêté[22] du 25 janvier 2013 relatif à l'éclairage nocturne des bâtiments non résidentiels afin de limiter les nuisances lumineuses et les consommations d'énergie), et celle sur l'extinction des enseignes publicitaires (décret n° 2012-118[23] relatif à la publicité extérieure, aux enseignes et aux pré-enseignes).

Au niveau européen :

en ce qui concerne les évolutions normatives à entreprendre, le CES recommande :

- de réviser les valeurs limites d'exposition aux rayonnements optiques proposées par l'Icnirp, de façon à les rendre suffisamment protectrices vis-à-vis du risque phototoxique. Elles devraient prendre en compte une exposition chronique et considérer d'autres indicateurs, notamment ceux de toxicité infra-cliniques[24] ;
- de créer et d'imposer le marquage d'un indice d'efficacité sur les moyens de protection à la lumière bleue (rendant compte du taux d'atténuation) ;
- d'élaborer une norme métrologique, au niveau européen, précisant les conditions de mesure de la modulation temporelle et du calcul des indices associés ;

en ce qui concerne les évolutions réglementaires à entreprendre, le CES recommande :

- d'imposer le marquage du groupe de risque photobiologique (évalué selon la norme NF EN 62471) pour les éclairages domestiques mais aussi pour les objets à LED ;
- de limiter la mise à disposition des systèmes à LED (lampes, luminaires, objets et notamment jouets) auprès du grand public à ceux de groupe de risque inférieur ou égal à 1 ;
- d'harmoniser le cadre réglementaire en modifiant les réglementations spécifiques à des systèmes à LED autres que lampes et luminaires, afin de tenir compte du risque photobiologique, et notamment :

---

[22] « Les éclairages intérieurs de locaux à usage professionnel sont éteints une heure après la fin de l'occupation de ces locaux. Les illuminations des façades des bâtiments sont éteintes au plus tard à 1 heure. Les éclairages des vitrines de magasins de commerce ou d'exposition sont éteints au plus tard à 1 heure ou une heure après la fin de l'occupation de ces locaux si celle-ci intervient plus tardivement. »

[23] « Les publicités lumineuses devront être éteintes la nuit, entre une heure et six heures du matin, sauf pour les aéroports et les unités urbaines de plus de 800 000 habitants, pour lesquelles les maires édicteront les règles applicables. Les enseignes lumineuses suivront les mêmes règles. »

[24] Par exemple, il peut y avoir mort cellulaire dans la rétine sans pour autant que ce soit visible lors de l'examen du fond de l'œil.

  - la Directive européenne n° 2009/48/CE relative à la sécurité des jouets ;
  - les règlements UNECE[25] (*United Nations Economic Commission for Europe*) R112 et R113 relatifs aux prescriptions pour les sources lumineuses des véhicules.
- de limiter la luminance des phares de véhicules (sans forcément réduire le flux global, et donc la distance de visibilité) ;
- de prendre en compte dans la réglementation les spécificités des sources à barrettes ou à matrices de LED nues des dispositifs commercialisés auprès du grand public (agrégations de LED nues sur un même support) ;
- d'établir, au niveau européen, des limites de modulation temporelle de la lumière, afin de limiter les effets biologiques et sanitaires associés à la lumière émise par les lampes et luminaires à LED ;
- de modifier les réglementations existantes afin de tenir compte des risques liés à la modulation temporelle et notamment :
  - la Directive n°2006/25/CE du Parlement européen relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels) ;
  - les règlements UNECE, en imposant une fréquence minimale de modulation de l'ordre de 2 kHz lorsque les feux (feux avant et feux arrière) des véhicules sont utilisés en mode PWM (*Pulse Width Modulation*)[26]. Cette recommandation permet de limiter la visibilité de l'effet de réseau fantôme, source de perturbations visuelles avérées ;
- d'imposer la généralisation de la possibilité d'abaisser automatiquement la température de couleur (passage au blanc chaud) et la luminosité des écrans de téléphones mobiles et tablettes avant l'heure du coucher.

Recommandations en matière de recherches

Si de nombreuses données sont disponibles pour évaluer l'impact de la lumière sur la santé, en particulier de la lumière bleue, les données scientifiques sont encore parcellaires en ce qui concerne l'effet spécifique des LED selon leur géométrie et leur qualité spectrale. Le CES insiste donc sur la nécessité d'améliorer l'évaluation quantitative de l'impact d'un passage général à la technologie LED sur la santé humaine et sur l'environnement.

Le CES encourage à poursuivre et intensifier les recherches sur les perturbations des rythmes circadiens par la lumière et les effets qui en découlent sur la vigilance, le sommeil, l'humeur, le bien-être, la cognition et la santé. Deux aspects encore peu documentés devront être particulièrement pris en compte chez l'humain ou dans des modèles animaux diurnes :

- l'impact de l'environnement lumineux maternel sur le développement du fœtus ;
- l'impact chez l'enfant et l'adolescent de l'environnement lumineux, en fonction de la période (jour, nuit), sur la synchronisation des rythmes biologiques et sur la santé, considérant notamment une transmission lumineuse plus élevée en raison d'un cristallin plus transparent, et d'une pupille plus ouverte.

---

[25] La Division des transports durables de l'UNECE fournit des services de secrétariat au Forum mondial pour l'harmonisation des réglementations sur les véhicules.

[26] Le mode PWM est une modulation de rapport cyclique. La lumière est modulée à une fréquence fixe et le changement de rapport cyclique modifie l'intensité moyenne de la lumière.

Des effets potentiellement bénéfiques d'un fort contraste lumineux entre le jour et la nuit ayant été décrits dans la littérature scientifique, il conviendrait :

- de confirmer les effets de l'exposition à des intensités lumineuses suffisantes le jour sur la qualité de vie, le sommeil, le bien-être et la santé, notamment des personnes souffrant de troubles des rythmes circadiens (sujets âgés, patients hospitalisés, personnes atteintes de démence, …) ;
- d'approfondir les connaissances sur les effets d'une exposition à la lumière bleue le matin pour corriger les désynchronisations circadiennes et en évaluer les risques oculaires ;
- d'étudier, dans le cas des travailleurs de nuit, l'intérêt de favoriser l'exposition à certaines longueurs d'onde en fonction de l'heure pour favoriser d'une part la vigilance, et d'autre part la récupération en réduisant au maximum les effets secondaires néfastes.

Le CES recommande une meilleure évaluation des risques de survenues de sécheresse de l'œil et de pathologies oculaires en lien avec l'exposition à de la lumière dans la gamme phototoxique, en particulier sur le long terme. Une attention particulière devra être portée à certains groupes de populations sensibles (enfants, adolescents, populations souffrant de pathologies oculaires, personnes aphakes, etc.). Le CES recommande aussi d'étudier les facteurs qui pourraient intervenir dans la phototoxicité de la lumière : le moment de l'exposition, la possible modulation temporelle associée, les facteurs de risques liés à des pathologies oculaires. Il sera aussi opportun d'étudier dans quelle mesure l'extrapolation à l'Homme de résultats de phototoxicité obtenus chez le rongeur est possible.

La modulation temporelle de la lumière apparaissant comme un défaut majeur de certaines LED ou systèmes à LED, le CES recommande d'approfondir les connaissances sur ses effets visuels, biologiques et sanitaires. Il recommande en particulier de mener :

- des études pour mieux cerner les variations inter-individuelles de la sensibilité aux contrastes temporels, et mieux connaître la prévalence et l'incidence des effets liés à la modulation temporelle de la lumière dans la population générale ;
- des études permettant de quantifier les risques d'accidents liés à une exposition à un effet stroboscopique ou à un effet de réseau fantôme.

Les divers effets sanitaires des LED mentionnés plus haut rendent nécessaire une meilleure évaluation de l'exposition des populations. Le CES recommande d'effectuer des mesures précises de la distribution des luminances, des répartitions spectrales d'énergie et de la modulation temporelle pour une large gamme de dispositifs à LED auxquels la population est exposée.

Le CES recommande une meilleure prise en compte de l'impact environnemental d'un passage général à la technologie LED, en augmentant les connaissances concernant les effets de la pollution lumineuse sur la faune et la flore et l'écosystème dans son ensemble.

Enfin, le CES recommande de considérer l'ensemble du cycle de vie des LED, en particulier :

- d'accéder aux données détaillées sur les produits entrant dans la fabrication des LED (matières premières, procédés de fabrication) et les produits rejetés dans l'air, l'eau et les sols lors de la fabrication des LED ;
- de documenter la fin de vie des LED : récupération et tri des produits usagés, récupération des matières premières, recyclage de certains composants des LED, traitement des déchets finaux.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Anses reprend les conclusions et recommandations de son comité d'experts spécialisé « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements », rappelées au paragraphe 3 de cet avis.

Une première expertise sur les effets sanitaires liés à une exposition aux lampes à LED a été publiée par l'Anses en 2010, alors que cette technologie commençait seulement à être déployée à grande échelle et que débutait, dans le même temps, le retrait progressif du marché des autres technologies d'éclairage (incandescence notamment). Cette expertise avait notamment souligné la toxicité pour la rétine de la lumière bleue présente dans les éclairages à LED et leur forte capacité d'éblouissement.

Longtemps présente essentiellement dans des applications spécifiques (signalisation, objets électroniques, etc.), la technologie LED est de plus en plus utilisée dans les véhicules automobiles (phares, etc.) et s'est aujourd'hui imposée dans l'éclairage domestique et public, ou encore dans les objets lumineux et les écrans (téléphones, ordinateurs, téléviseurs). L'exposition de la population et de son environnement à la lumière artificielle, auparavant riche en teintes jaune-orange, est ainsi dorénavant plus riche en bleu que celle qui prévalait il y a 10 ans, du fait de l'utilisation aujourd'hui prépondérante des LED dans les applications industrielles et grand public.

La présente expertise s'est attachée à mettre à jour l'état des connaissances depuis 2010 sur les différents effets sanitaires susceptibles d'être associés à l'exposition à la lumière riche en bleu et aux autres caractéristiques de l'éclairage LED. Elle s'est, pour cela, appuyée sur une méthodologie d'évaluation des niveaux de preuve associés aux effets sanitaires considérés.

Du fait du manque de données bibliographiques portant sur l'exposition de la population aux technologies à LED, l'Agence a par ailleurs financé la réalisation de campagnes de mesures spécifiques, notamment pour décrire la nature et la quantité de lumière émise par des systèmes à LED utilisés au quotidien (lampes d'éclairage, objets intégrant des LED, projecteurs automobiles et écrans d'ordinateurs, de tablettes, de téléphones mobiles, etc.).

Les nouvelles données scientifiques examinées viennent conforter le résultat de 2010 sur la phototoxicité et permettent d'établir que l'effet phototoxique sur la rétine d'une exposition aiguë à une lumière riche en bleu est avéré. L'effet sur le long terme d'une lumière riche en bleu sur la contribution à la survenue d'une dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA) est avéré.

L'agence confirme, pour certains dispositifs d'éclairages testés (les lampes torches, les phares automobiles, les spots à LED, les matrices de LED, etc.), qu'ils peuvent induire un éblouissement important.

En 2010, l'Anses avait évoqué la possibilité de perturbation des horloges biologiques induite par l'exposition aux LED. La mise à jour de l'expertise met aujourd'hui en évidence que la perturbation des rythmes circadiens (horloges biologiques) induite par l'exposition à une lumière LED riche en bleu en soirée ou la nuit est avérée. Les enfants et adolescents, exposés dès leur plus jeune âge notamment aux écrans (tablettes, consoles de jeux, téléphone mobiles, etc.), constituent une population particulièrement sensible.

Concernant la modulation temporelle de la lumière émise par les LED, les données examinées, montrent qu'une forte proportion de lampes à LED testées présentent des performances dégradées (modulation temporelle importante). Sans que le risque sanitaire associé à l'exposition à cette modulation ne soit déterminé, certaines personnes (enfants, adolescents et jeunes adultes, opérateurs de machines et conducteurs de véhicules, …) pourraient être plus sensibles aux effets potentiels sur la santé induits par cette modulation de la lumière : maux de tête, fatigue visuelle, risque accidentel, etc.

Concernant l'impact de la lumière sur l'environnement, et en particulier sur la biodiversité, les études disponibles mettent en évidence une augmentation de la mortalité et un appauvrissement

de la diversité des espèces animales et végétales étudiées dans les milieux éclairés la nuit, y compris par des éclairages à LED.

Recommandations de l'Agence

Faire progresser les connaissances

Concernant l'évaluation des risques associés à l'exposition aux LED, l'Anses souligne la nécessité de mieux quantifier les niveaux de risque liés aux effets identifiés, elle recommande ainsi d'engager des recherches complémentaires visant à :

- améliorer la connaissance des expositions de la population générale et professionnelle, ainsi que de l'environnement ;
- mieux caractériser les effets sanitaires liés à la modulation temporelle de la lumière des LED et la phototoxicité à long terme ;
- préciser les relations exposition-réponse entre l'exposition et la survenue des effets sanitaires (notamment ceux associés à la perturbation circadienne, la phototoxicité, …).

Enfin, alertée par les effets sanitaires potentiels liés à l'exposition aux dispositifs de photothérapie à LED, l'Agence recommande aux pouvoirs publics de faire évaluer les risques associés à ces dispositifs au regard des bénéfices attendus par un organisme compétent.

Faire évoluer la réglementation et mieux informer

Compte tenu des nouvelles données expérimentales disponibles concernant les mécanismes de phototoxicité, l'Anses souligne la nécessité de mettre à jour les valeurs limites d'exposition (VLE) à la lumière bleue, notamment afin de tenir compte de la spécificité des enfants, dont le cristallin de l'œil filtre le bleu avec beaucoup moins d'efficacité que les adultes et personnes âgées. Ces VLE sont en effet utilisées pour vérifier la conformité des systèmes à LED aux exigences essentielles en matière de santé et de sécurité des directives européennes.

Considérant les résultats de l'estimation des risques par l'expertise collective, l'Anses recommande de faire évoluer le cadre réglementaire s'appliquant aux systèmes à LED, afin de :

- restreindre la mise à disposition des objets à LED auprès du grand public à ceux de groupe de risque photobiologique 0 ou 1 ;
- limiter l'intensité lumineuse des phares des véhicules automobiles, tout en garantissant la sécurité routière ;
- établir, au niveau européen, des limites réduisant au minimum le niveau de modulation temporelle de la lumière émise par toutes les sources lumineuses (éclairages, écrans, objets à LED), en lien avec une meilleure caractérisation des effets sanitaires associés.

Dans l'attente d'une évolution de la réglementation, l'Anses recommande de sensibiliser et d'inciter les personnes, et tout particulièrement les enfants, à limiter leur exposition :

- à la lumière riche en bleu avant le coucher et pendant la nuit (écrans à LED : téléphones mobiles, tablettes, ordinateurs, …) ;
- aux éclairages riches en bleu, c'est-à-dire les lampes et luminaires de type « blanc froid », en privilégiant un éclairage indirect ou utilisant des diffuseurs ;
- à la lumière directe des objets à LED dont le groupe de risque est supérieur ou égal à 2 (lampes torches, jouets, phares automobiles,…).

L'Anses appelle par ailleurs l'attention sur l'hétérogénéité de l'efficacité des moyens de protection actuels contre la phototoxicité de la lumière bleue (verres traités, lunettes de protection, écrans

spécifiques, …). Elle note par ailleurs leur absence d'action notable sur la préservation des rythmes circadiens, pour laquelle, dans le cas des écrans à LED, seule la diminution de la luminosité et de la température de couleur des écrans permet de limiter l'exposition. Elle encourage l'établissement de normes définissant les critères de performance des équipements de protection individuelle vis-à-vis de la lumière bleue.

Concernant l'environnement et la biodiversité, bien qu'il soit difficile d'évaluer l'impact sanitaire et environnemental global de la transition des technologies d'éclairage existantes vers les LED, l'Anses recommande de renforcer la prévention de la pollution lumineuse. L'Agence souligne ainsi la nécessité de faire respecter la réglementation déjà en vigueur et de la faire évoluer, notamment en limitant le nombre de points lumineux et en diminuant la pollution lumineuse, tout en veillant à assurer la sécurité des personnes.

Dr Roger Genet

MOTS CLES

Lumière bleue, LED, éclairage artificiel, phototoxicité, rythmes circadiens, modulation temporelle de la lumière, biodiversité, pollution lumineuse.

Blue light, LED, artificial lighting, phototoxicity, circadian rhythms, temporal light modulation, biodiversity, light pollution.

ANNEXE

Tableau 1 : principales grandeurs physiques utilisées dans le domaine de l'éclairage.

Grandeur	Unité	Descriptions
Luminance (*L*)	Candela par mètre carré (cd/m²)	Quantité de lumière visible émise par une surface lumineuse ou un objet, par exemple la luminance d'un écran d'ordinateur : environ 200 cd/m²
Éclairement *(E)*	Lux (lx)	Quantité de lumière reçue sur une surface. Exemple : 500 lux sur un bureau
Température de couleur *(T)*	Kelvin (K)	Précise la teinte d'une lumière blanche : une lumière « chaude » aura une température basse (couleur qui tire vers le jaune, T < 3 000 K), une lumière « froide » une température élevée (couleur qui tire vers le bleu, T > 5 000 K)
Indice de rendu de couleur (IRC)	Sans unité	Capacité d'une lumière à rendre compte de la couleur des objets de manière fidèle. Une lumière très fidèle aura un IRC de 100, une lumière de qualité moyenne un IRC inférieur à 80
Efficacité lumineuse	Lumen par Watt (lm/W)	Définit le rendement énergétique d'une source de lumière

Effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des systèmes utilisant des diodes électroluminescentes (LED)

Mise à jour de l'expertise portant sur les effets sanitaires de l'éclairage utilisant des LED (2010)

Saisine « n°2014-SA-0253 »
Saisine liée « n°2008-SA-0408 »

RAPPORT
d'expertise collective

CES « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements »

Groupe de travail « effets sanitaires des systèmes à LED »

Novembre 2018

Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail,
14 rue Pierre et Marie Curie, 94701 Maisons-Alfort Cedex
Téléphone : + 33 (0)1 49 77 13 50 - Télécopie : + 33 (0)1 49 77 26 26 - www.anses.fr

Mots clés

Lumière bleue, LED, éclairage artificiel, phototoxicité, rythmes circadien, modulation temporelle de la lumière, biodiversité, pollution lumineuse.

Blue light, LED, artificial lighting, phototoxicity, circadian rhythms, temporal light modulation, biodiversity, light pollution.

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae,* et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

GROUPE DE TRAVAIL

Présidente

Francine BEHAR-COHEN – Directrice de Recherche à l'Inserm UMR 1138, physiopathologie des maladies oculaires, Professeur en ophtalmologie, Université Paris-Descartes, Praticienne attachée à l'hôpital Hôtel Dieu.

Membres

Samuel CARRÉ – Ingénieur au CSTB, direction « Santé Confort », division « Éclairage et électromagnétisme », spécialisé en simulation numérique de l'éclairage naturel et artificiel.

Olivier ENOUF – Ingénieur en métrologie des rayonnements optiques et essais de sécurité optique des produits à laser et LED - Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE).

Jack FALCÓN – Chercheur émérite du Centre national de la recherche scientifique (CNRS), spécialisé en chronobiologie animale, Biologie des Organismes et Ecosystèmes Aquatiques (BOREA), CNRS 7208, Muséum National d'Histoire Naturelle.

Claude GRONFIER – Chercheur Inserm, Centre de Recherche en Neurosciences de Lyon, Spécialiste du sommeil et des rythmes biologiques – Démission le 20/04/2018.

David HICKS – Directeur de Recherche Inserm, Institut des Neurosciences Cellulaires et Intégratives (INCI) CNRS UPR 3212, Chercheur en chronobiologie et vision.

Christophe MARTINSONS – Physicien, chef de la division Eclairage et Champs Electromagnétiques du CSTB, Grenoble.

Arnaud METLAINE – Médecin du travail, spécialiste du sommeil.

Leena TAHKAMO, chercheur dans le domaine de l'éclairage, « Lighting Unit », Université Aalto, Finlande.

Alicia TORRIGLIA – Médecin, Directeur de recherche en opthalmologie, Centre de Recherches des Cordeliers, Institut National de la Santé et de la recherche médicale (Inserm).

Françoise VIÉNOT – Professeur émérite - Centre de Recherche sur la Conservation (CRC), Muséum national d'Histoire naturelle, CNRS, Ministère de la Culture, 36 rue Geoffroy Saint Hilaire, 75005 Paris, France.

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par le CES « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ».

Mandat 2014-2017

Présidente

Martine HOURS – Médecin épidémiologiste, Directeur de recherche à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Membres

Alexandre BOUNOUH – Chef de projet / Ingénieur de recherche au Laboratoire national d'essais (LNE).

Brigitte DEBUIRE – Professeur des universités émérite.

Jean-François DORÉ – Directeur de recherche émérite à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

Thierry DOUKI – Chef de laboratoire / Ingénieur docteur en chimie, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

Pierre DUCIMETIÈRE – Directeur de recherche honoraire à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

Nicolas FELTIN – Responsable de mission au Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE).

Emmanuel FLAHAUT – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Eric GAFFET – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Murielle LAFAYE – Ingénieur, Coordinatrice applications au Centre national d'études spatiales (Cnes).

Joël LELONG – Directeur adjoint de laboratoire / Docteur en physique, Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Christophe MARTINSONS – Docteur en physique, Chef de pôle au Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB).

Frédérique MOATI – Maître de conférences en biophysique et médecine nucléaire, Université Paris Sud XI / Praticien hospitalier / Radiopharmacienne / Biologiste, AP-HP Hôpital Bicêtre.

Catherine MOUNEYRAC – Directrice de l'Institut de biologie et d'écologie appliquée et Professeur en écotoxicologie aquatique à l'Université catholique de l'ouest (UCO).

Fabien NDAGIJIMANA – Professeur des universités, Université Joseph Fourier, Grenoble.

Alain SOYEZ – Responsable de laboratoires, Ingénieur conseil, Caisse d'assurance retraite et de santé au travail Nord Picardie.

Esko TOPPILA – Professeur, Directeur de recherche à l'Institut finlandais de santé au travail.

Catherine YARDIN – Professeur, chef de service, médecin biologiste à l'Hôpital Dupuytren, CHU de Limoges.

Mandat 2018-2021

Présidente

Anne PEREIRA DE VASCONCELOS – Chargée de recherche, Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm), Laboratoire de neurosciences cognitives et adaptatives - UMR 7364, CNRS – Université de Strasbourg.

Membres

Thomas CLAUDEPIERRE – Enseignant chercheur à l'université de Lorraine

Brigitte DEBUIRE – Professeur des universités émérite.

Jean-François DORÉ – Directeur de recherche émérite à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

Thierry DOUKI – Chef de laboratoire / Ingénieur docteur en chimie, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

Jack FALCÓN – Chercheur émérite du Centre national de la recherche scientifique (CNRS), spécialisé en chronobiologie animale, Biologie des Organismes et Ecosystèmes Aquatiques (BOREA), CNRS 7208, Muséum National d'Histoire Naturelle.

Emmanuel FLAHAUT – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

François GAUDAIRE – Ingénieur au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) –

Martine HOURS – Médecin épidémiologiste, Directeur de recherche à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Chaker LARABI – Enseignant chercheur à l'université de Poitiers

Joël LELONG – Directeur adjoint de laboratoire / Docteur en physique à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Frédérique MOATI – Maître de conférences en biophysique et médecine nucléaire à l'Université Paris Sud XI / Praticien hospitalier / Radiopharmacienne / Biologiste, AP-HP Hôpital Bicêtre.

Catherine MOUNEYRAC – Directrice de l'Institut de biologie et d'écologie appliquée et Professeur en écotoxicologie aquatique à l'Université catholique de l'ouest (UCO).

Fabien NDAGIJIMANA – Professeur des universités, Université Joseph Fourier, Grenoble.

Anne-Lise PARADIS – Chargée de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS)

Marie-Pierre ROLS – Directrice de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS)

Valérie SIMONNEAUX – Chercheuse en neurobiologie des rythmes au Centre national de la recherche scientifique (CNRS)

Alain SOYEZ – Responsable de laboratoires, Ingénieur conseil, Caisse d'assurance retraite et de santé au travail Nord Picardie.

Esko TOPPILA – Professeur, Directeur de recherche à l'Institut finlandais de santé au travail.

Alicia TORRIGLIA – Médecin, Directeur de recherche en opthalmologie, Centre de Recherches des Cordeliers, Institut National de la Santé et de la recherche médicale (Inserm).

Françoise VIÉNOT – Professeur émérite - Centre de Recherche sur la Conservation (CRC), Muséum national d'Histoire naturelle, CNRS, Ministère de la Culture, 36 rue Geoffroy Saint Hilaire, 75005 Paris, France.

Catherine YARDIN – Professeur, chef de service, médecin biologiste à l'Hôpital Dupuytren, CHU de Limoges.

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

Dina ATTIA – Chef de projets scientifiques, Unité d'évaluation des risques liés aux agents physiques – Anses.

Contribution scientifique

Dina ATTIA – Chef de projets scientifiques, Unité d'évaluation des risques liés aux agents physiques – Anses.

Fanny HURET– Chargée de projets scientifiques, Unité d'évaluation des risques liés aux agents physiques – Anses.

Olivier MERCKEL – Chef de l'Unité d'évaluation des risques liés aux agents physiques – Anses.

Aurélie NIAUDET – Adjointe au chef de l'Unité d'évaluation des risques liés aux agents physiques – Anses.

Secrétariat administratif

Mme Sophia SADDOKI

AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

Agence Française de l'Éclairage (février 2016)

- Alain Azaïs, délégué général de l'AFE
- Prof. Christian Corbé, président du Collège Santé de l'AFE
- Richard Zarytkiewicz, responsable du comité d'expertise de l'AFE

Syndicat de l'Éclairage (février 2016)

- Inès De Raguenel, chargée des affaires publiques du Syndicat
- Sebastien Flet Reitz, directeur technique du Syndicat de l'éclairage
- Joël Thomé, directeur de Piséo
- Lionel Brunet, délégué général du Syndicat

Fédération des industries des équipements pour véhicules (avril 2017 et mars 2018)

- Jean-Charles Sarbach, Fiev
- Maïlys Inyuma, Fiev
- Eric Blusseau, Valeo
- Paul Henri Matha, Renault
- Laurent Sereza, groupe PSA

Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environnement Nocturne (avril 2017)

- Anne-Marie Ducroux, Présidente de l'association

Experts scientifiques

- Dr. John O'Hagan (février 2016), Group Leader, Laser and Optical Radiation Dosimetry Group, Public Health England
- Prof. David Sliney (juin 2016), Department of Environmental Health Sciences, Bloomberg School of Public Health, Johns Hopkins University, Baltimore

SOMMAIRE

Présentation des intervenants 3

Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions 10

Sigles et abréviations 34

Liste des tableaux 35

Liste des figures 37

1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise 42

1.1 Contexte 42

1.2 Objet de la saisine 43

1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation 44

1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts 44

2 Évolutions technologiques des systèmes à LED et du cadre réglementaire 45

2.1 Définitions, applications et utilisation des LED en France 45

2.2 Caractérisation de lampes pour l'éclairage domestique 52

2.3 Évolutions normatives et réglementaires 56

3 Effets des lumières riches en lumière bleue et des systèmes à LED sur la santé humaine 62

3.1 Expertises internationales 62

3.2 Méthodologie d'évaluation du niveau de preuve des effets sur la santé des LED 66

3.3 Effets de la lumière sur les rythmes circadiens 72

3.4 Effets des LED sur le sommeil et la cognition 113

3.5 Effets des LED sur l'œil 124

3.6 Effets de la modulation temporelle de la lumière émise par les lampes et luminaires à LED 147

3.7 Effets des LED sur le confort et les performances visuelles 181

3.8 Effet des LED sur les pathologies cutanées 214

4 Caractérisation des expositions 226

4.1 Données d'expositions instantanées avec mise en relief sur la gamme du bleu 226

4.2 Données d'expositions cumulées 256

4.3 Conclusions 266

5 Évaluation des dispositifs de protection contre la lumiere bleue destinés au grand public 268

5.1 Objectif et méthode 268

5.2 Efficacité des dispositifs pour filtrer les rayonnements bleus phototoxiques 269

5.3 Efficacité des dispositifs pour filtrer les rayonnements bleus dans la bande mélanopique 270

5.4 Conclusion 271

6 LED et pollution lumineuse 273

6.1 La pollution lumineuse 273

6.2 Facteurs d'influence de la pollution lumineuse 275

6.3 Évaluation de l'impact des LED sur le halo nocturne 276

6.4 Évaluation de l'impact des LED sur les nuisances pour l'Homme 280

6.5 Lumières ayant un impact sur les écosystèmes et la biodiversité 283

6.6 Synthèse des conclusions sur les impacts du passage aux LED sur la pollution par catégorie 286

7 Impact des LED sur l'environnement et la biodiversité 287

7.1 Introduction 287

7.2 Modalités de la capture du signal lumineux chez les êtres vivants 288

7.3 Photopigments & perception visuelle 295

7.4 Horloges biologiques 303

7.5 Phototropisme, phototaxie 311

7.6 Impact des LED sur le vivant 312

7.7 Résumé - conclusions - recommandations 340

8 Analyse du cycle de vie des LED 343

8.1 Introduction 343

8.2 Analyses du cycle de vie des sources lumineuses à LED 344

8.3 Discussion 352

8.4 Conclusion 353

9 Conclusions du groupe de travail 355

10 Recommandations du groupe de travail 363

11 Bibliographie 368

Annexe 1 : Lettre de saisine 418

Annexe 2 : Synthèse sur la réglementation et la normalisation applicables aux LED 420

Annexe 3 : Éblouissement et inconfort visuel : notions supplémentaires en photométrie 421

Annexe 4 : Les données d'expositionss issues du logiciel Lumexpo 422

Annexe 5 : Analyse du cycle de vie 423

Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions

EXPERTISE COLLECTIVE : SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

Relatives aux « effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des systèmes utilisant des diodes électroluminescentes (LED) »

Ce document synthétise les travaux du comité d'experts spécialisé « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » et du groupe de travail « Effets sanitaires des systèmes à LED ».

Présentation de la question posée

La Direction générale de la prévention des risques (DGPR), la Direction générale de la santé (DGS), la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF) et la Direction générale du travail (DGT) ont saisi l'Anses le 19 décembre 2014 afin de mettre à jour les connaissances sur les effets sanitaires liés à l'exposition aux systèmes d'éclairage utilisant des LED.

La demande portait plus précisément sur l'évaluation des risques liés à l'exposition aux systèmes à LED pour la population générale et les professionnels, en distinguant les différents types d'application des systèmes d'éclairage ou objets en disposant (éclairage domestique, usages professionnels, phares de véhicules, jouets, écrans, etc.) et en prenant en compte des situations réelles d'exposition. Par ailleurs, un examen des éventuels risques pour l'environnement que pourraient poser ces systèmes tout au long de leur cycle de vie était demandé.

Contexte scientifique

En application de la Directive européenne n° 2005/32/CE sur l'éco-conception, dite Directive « EuP » (*Energy using Products*), le retrait programmé des lampes à incandescence (étalé entre 2009 et 2012) et des lampes halogènes classiques (fixé à septembre 2018) du marché de l'éclairage, a induit un fort développement des éclairages à LED sur le marché grand public, augmentant ainsi l'exposition de la population à cette technologie. Les domaines d'application des systèmes à LED se sont élargis, ils concernent aujourd'hui non seulement un nombre important d'applications professionnelles, mais aussi des applications pour l'affichage et la signalisation, certains objets et dispositifs (jouets, objets de décoration, etc.), le rétro-éclairage d'écran (téléphone mobile, tablettes, télévisions, …) et l'éclairage intérieur et extérieur.

Lors de la publication de son premier avis sur les effets sanitaires liés aux LED (rapport d'expertise collective de l'Anses publié en 2010[1]), l'Agence attirait l'attention sur les effets toxiques pour la rétine de la lumière bleue. Elle avait, à cette occasion, émis des recommandations relatives notamment à la mise sur le marché des LED et à l'information des consommateurs. Les LED ont en effet, la caractéristique particulière d'émettre une lumière riche en courtes longueurs d'onde : il s'agit d'une lumière dite riche en bleu.

En raison des mutations rapides de cette technologie et d'un marché en pleine expansion sous l'impulsion des directives européennes, la mise à jour de l'expertise de l'Anses menée en 2010 est apparue nécessaire. Les effets sanitaires potentiels liés à l'exposition à la lumière émise par les LED sont désormais mieux documentés. Depuis l'avis émis par l'Agence en 2010, de nouvelles données ont été publiées sur les effets liés à la phototoxicité, avec notamment des données expérimentales chez l'animal, liées à une exposition de longue durée à la lumière bleue. De nouvelles données concernant la dérégulation de l'horloge biologique par la lumière bleue, l'éblouissement, les effets sanitaires liés à la modulation temporelle de la lumière (fluctuation du niveau lumineux de l'éclairage potentiellement perceptible visuellement selon sa fréquence) ont aussi été publiées.

Concernant les effets éventuels sur l'environnement, des données existent et interrogent sur les déséquilibres potentiellement induits sur les espèces et les écosystèmes avec des conséquences sur l'Homme et sa santé. L'ajout ou la substitution d'une lumière artificielle à la lumière solaire naturelle pose la question des effets sanitaires potentiels qui pourraient en découler, du fait de l'accumulation ou de la modification de l'environnement lumineux. En quelques décennies, l'Homme a notablement augmenté son exposition à la lumière bleue le soir avec des éclairages artificiels ou des rétro-éclairages riches en lumière bleue. Auparavant, les éclairages utilisés tendaient plutôt vers la couleur jaune-orange (bougie, lampes à incandescence).

La mise à jour de l'expertise a considéré l'ensemble des effets sur la santé humaine mais aussi sur l'environnement (faune et flore) qui pourraient être liés à l'exposition à la lumière des lampes à LED.

Organisation de l'expertise

La présente expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ». L'Agence a mandaté le groupe de travail « Effets sanitaires des systèmes à LED » pour réaliser cette expertise, sous l'égide du CES.

Groupe de travail

Le groupe de travail a été constitué à la suite d'un appel à candidatures public lancé le 28 avril 2015. Les experts de ce groupe ont été recrutés pour leurs compétences scientifiques et techniques dans les domaines de la physique, de la métrologie des rayonnements optiques, de l'optique, de l'ophtalmologie, de la chronobiologie, de la biologie, de l'environnement et de la réglementation dans le domaine des éclairages. Le groupe de travail a été créé en septembre 2015. Il s'est réuni 25 fois en séances plénières entre septembre 2015 et mai 2018.

L'expertise collective s'est principalement appuyée sur une analyse critique et une synthèse des données publiées dans la littérature scientifiques (articles, rapports, etc.).

Le groupe de travail a également auditionné des experts et des personnalités extérieures ainsi que des représentants de l'industrie de l'éclairage et des associations pour la protection

[1] https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2008sa0408.pdf.

de l'environnement, afin d'apporter des informations et des données complémentaires aux données disponibles pour l'expertise.

Contributions extérieures

Afin de pallier le manque de données relatives à la caractérisation des expositions aux systèmes à LED, trois études financées par l'Agence ont été mises en œuvre.

Caractérisation des éclairages artificiels disponibles sur le marché français

Une première « convention de recherche et de développement » a été établie entre l'Anses et l'Institut national de la consommation (INC) afin de procéder à une étude comparative actualisée des caractéristiques techniques des différents éclairages disponibles sur le marché.

Documentation de l'exposition des populations à la lumière

Une seconde étude a été mise en place avec le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), afin de caractériser l'exposition de la population aux différents éclairages artificiels et systèmes à LED, dans des conditions réelles d'exposition. Un logiciel, développé à cet effet, a permis d'évaluer l'exposition lumineuse pour quelques scénarios d'exposition (enfants, travailleurs, personnes âgées, …).

Évaluation des dispositifs de protection contre la lumière bleue destinés au grand public

Une troisième étude a été menée avec le CSTB, pour évaluer la capacité des moyens de protection à destination du grand public à filtrer la lumière bleue (filtres pour écrans, verres traités, lunettes filtrantes, protections logicielles).

Expertise collective

Les travaux d'expertise ont été soumis régulièrement au CES (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques). Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires discutés avec les membres du CES. Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise ».

Les liens d'intérêts déclarés par les experts ont été analysés par l'Anses avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise. Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques *via* le site internet : https://dpi.sante.gouv.fr/.

Méthodologie d'expertise

Cette expertise vise à recenser et évaluer les effets de la lumière émise par les LED sur l'Homme, la faune et la flore.

Effets sanitaires considérés

Les lampes à LED émettent généralement une lumière riche en courtes longueurs d'onde, c'est à dire dans la partie bleue du spectre lumineux. La composition spectrale des LED est donc différente de la lumière naturelle et des autres sources de lumière (à incandescence, halogène, fluo-compactes, etc.). L'expertise s'est ainsi intéressée aux effets sanitaires qui pourraient être liés à l'exposition à cette lumière riche en bleu (phototoxicité, perturbation des rythmes circadiens notamment) et au déséquilibre spectral induit (rapport des intensités lumineuses entre le bleu et le rouge). Les effets sanitaires liés aux autres caractéristiques de l'éclairage LED, comme leur aspect ponctuel (éblouissement) ou la variation de l'intensité lumineuse dans le temps ont également été investigués.

Les effets biologiques et sanitaires étudiés ont été regroupés en six catégories :

- perturbation des rythmes circadiens ;
- effets sur le sommeil, la vigilance et la cognition ;

- effets sur l'œil ;
- effets liés à la modulation temporelle de la lumière ;
- effets sur le confort visuel et l'éblouissement ;
- effets sur la peau.

Recherche et analyse bibliographique

Cette expertise repose principalement sur une analyse de la littérature scientifique internationale disponible portant sur les effets sanitaires liés à une exposition aux systèmes à LED. Une recherche bibliographique a ainsi été menée sur une période qui s'étend de janvier 2010 à juillet 2017. Certaines études clés, parues entre juillet 2017 et février 2018, ont également été incluses lorsqu'elles ont été jugées pertinentes et de qualité satisfaisante. De plus, si cela semblait nécessaire, les experts ont inclus dans la bibliographie toute étude parue avant 2010, notamment pour alimenter l'état de l'art des sections introductives des chapitres relatifs aux effets sanitaires. Au total, plus de 1 500 publications ont été recensées, parmi lesquelles environ 200 ont été jugées pertinentes et retenues pour analyse détaillée.

Dans un premier temps, un thesaurus directement lié à la technologie LED (pertinent pour les éclairages à LED mais aussi pour les rétro-éclairages d'écrans à LED) a été défini pour réaliser la recherche bibliographique par catégorie d'effet sanitaire. Les experts ont procédé à l'analyse des publications identifiées par ce biais en sous-groupe, par catégorie d'effet.

En complément, les publications scientifiques pertinentes, permettant de décrire les effets de la lumière artificielle (quelle que soit la technologie considérée) ou naturelle sur la santé, ont été utilisées afin d'étayer les différentes parties relatives aux effets sanitaires évalués. En complément des effets cités précédemment, le groupe de travail s'est intéressé aux effets photoprotecteurs possibles de la lumière rouge et à l'action d'une lumière composée à la fois de rouge et de bleu.

Analyse des études scientifiques et évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires

La pertinence des publications par rapport à la question traitée a été évaluée sur la base de leur titre et de leur résumé. Les articles retenus ont ensuite été analysés a minima par deux experts. Ces analyses ont été discutées en réunions plénières, afin de définir collectivement le niveau de qualité de la publication sur le plan méthodologique.

La méthode d'évaluation des niveaux de preuve, mobilisée pour l'expertise, s'inspire des travaux antérieurs de l'Anses réalisés notamment pour l'expertise « Exposition aux radiofréquences et santé des enfants » publiée en 2016. Pour chaque effet sanitaire, les études disponibles chez l'Homme d'une part, et chez l'animal d'autre part, ont été considérées séparément afin de caractériser les éléments de preuve apportés sur le lien entre l'exposition à la lumière des LED, et en particulier la lumière riche en bleu, et la survenue de l'effet sanitaire. Au final, les éléments de preuve chez l'Homme et chez l'animal ont été combinés afin d'établir une évaluation globale du niveau de preuve de l'effet sanitaire d'une exposition à la lumière des LED, dans une des catégories suivantes :

- effet avéré ;
- effet probable ;
- effet possible ;
- les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet ;
- probablement pas d'effet.

En ce qui concerne les effets sur l'environnement, le rapport présente une description de l'interaction de la lumière avec la faune et la flore. Les publications analysées sont à la fois des publications qui s'intéressent à la lumière issue de LED, et des publications jugées pertinentes permettant d'argumenter les effets de l'exposition à la lumière artificielle la nuit sur la faune et la flore.

L'influence du passage à la technologie LED dans différentes applications d'éclairage (éclairage public, enseignes lumineuses, *etc.*) sur la pollution lumineuse[2] a également été évaluée.

Caractérisation de l'exposition

Le manque de données bibliographiques portant sur l'exposition de la population aux technologies à LED a justifié la mise en œuvre de campagnes de mesures spécifiques par l'Anses.

Mesures d'émission visant à caractériser la lumière des LED

Plusieurs campagnes de mesures ont été menées pour décrire la nature et la quantité de lumière émise par des systèmes à LED du quotidien (lampes d'éclairage, objets intégrant des LED, projecteurs automobiles et écrans d'ordinateurs, de tablettes, de téléphones mobiles etc.). Ces campagnes de mesures sur des objets ou éclairages à LED ont permis d'obtenir des données concernant :

- le niveau d'émission en lumière bleue (température de couleur et groupe de risque phototoxique) ;
- le niveau d'éblouissement (notamment au travers de la mesure de la luminance) ;
- le niveau de modulation temporelle de la lumière émise.

Scénarios d'exposition à la lumière bleue

Les expositions à la lumière riche en bleu, induites par les systèmes à LED, ont été évaluées dans le cadre de scénarios de vie, grâce à des mesures réalisées *in situ* dans des environnements spécifiques. Les scénarios d'exposition étudiés dans la présente expertise correspondent à des situations réalistes à différentes sources de lumière de différents groupes de population (personnel de bureau, travailleurs de nuit, enfants en maternelle, adolescents, personnes âgées). Ces scénarios journaliers d'exposition ont été construits par les experts pour chaque population (une journée type par population) en s'appuyant, quand cela était possible, sur des données statistiques d'emploi du temps (source Insee). Ensuite, pour chaque situation décrite, l'environnement lumineux a été caractérisé grâce à des mesures *in situ* pour 3 technologies différentes d'éclairage : lampes fluocompactes, lampes halogènes, lampes à LED.

Les sources de lumières contenant du bleu sont multiples (lumière naturelle, éclairages, écrans d'ordinateurs, de tablettes, de téléphones mobiles,…) et les niveaux d'expositions variables d'une situation à l'autre. Un scénario « pire cas », mais réaliste, a été envisagé en considérant un éclairage artificiel constitué exclusivement de LED très riches en lumière bleue (6 500 K).

Ces scénarios choisis ne couvrent pas pour autant toutes les situations d'exposition de la population générale ou professionnelle. L'évaluation des risques sanitaires proposée tient donc compte de l'incertitude générée par les données d'exposition recueillies.

Évaluation des risques pour la santé humaine

En combinant l'évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires étudiés dans les articles scientifiques analysés et les données issues des scénarios d'exposition, l'expertise a cherché à caractériser les éventuels risques associés à l'exposition à des systèmes utilisant des LED, pour l'Homme. Ainsi, le groupe de travail a classé le risque de survenue des effets sanitaires chez l'Homme suivant les quatre niveaux définis ci-dessous :

---

[2] L'article 41 de la loi n°2009-967 du 3 août 2009 (loi dite Grenelle I) définit ces nuisances comme étant « les émissions de lumière artificielle de nature à présenter des dangers ou à causer un trouble excessif aux personnes, à la faune, à la flore ou aux écosystèmes, entrainant un gaspillage énergétique ou empêchant l'observation du ciel nocturne ».

- risque élevé.
- risque modéré ;
- risque faible ;
- sans risque prévisible ;

Pour chaque effet sanitaire, les populations particulièrement sensibles ont été identifiées. Les niveaux de risque vont par exemple pouvoir varier en fonction de l'âge, celui-ci étant lié au processus de développement et de maturation de l'œil (niveau de transparence du cristallin, sensibilité au contraste, etc.).

Moyens de protection contre les effets potentiels de l'exposition aux LED sur la santé

En parallèle à la diffusion de la technologie LED, en s'appuyant notamment sur les effets suspectés de la lumière bleue sur la santé, de nombreux moyens de « protection » ont été développés et sont aujourd'hui disponibles aussi bien pour le grand public que pour la population en milieu de travail. À la demande de l'Anses, une évaluation de la capacité à filtrer le bleu de certains moyens de protection mis à disposition sur le marché a été réalisée par le CSTB.

Résultats et conclusions de l'expertise collective

Le comité d'experts spécialisé « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » a adopté les travaux d'expertise collective ainsi que ses conclusions et recommandations, objets de la présente synthèse, lors de sa séance du 23/11/2018 et a fait part de cette adoption à la direction générale de l'Anses.

1. Spécificités de la lumière émise par les lampes à LED

Les spécificités des LED résident d'une part dans le type de rayonnement émis et, d'autre part, dans les caractéristiques physiques des lampes utilisant cette technologie.

D'une part, le spectre de lumière émis par des LED peut être plus riche en lumière bleue (il existe des lampes avec des températures de couleur[3] très élevées, supérieures à 6 000 K, fournissant une lumière très riche en bleu) mais aussi plus pauvre en lumière rouge que la plupart des autres sources lumineuses, naturelles ou artificielles. L'excès de lumière bleue dans le spectre des LED par rapport aux autres sources lumineuses (déséquilibre spectral) pose la question des effets de la lumière des lampes à LED sur la rétine (effets phototoxiques) mais aussi sur les rythmes circadiens et le sommeil (effets mélanopiques). Le déficit en lumière rouge des LED pourrait par ailleurs priver des effets photoprotecteurs potentiels de ce rayonnement, notamment lors du processus physiologique d'emmétropisation[4] qui se produit dans l'enfance.

D'autre part, en raison de leur forte luminance[5] et de leur caractère ponctuel, les lumières à LED peuvent être plus éblouissantes que les lumières émises par d'autres technologies (incandescence, fluo-compactes, halogènes, etc.). Cela peut être le cas notamment des

---

[3] La température de couleur est une caractérisation des sources de lumière par comparaison à un matériau idéal émettant de la lumière uniquement par l'effet de la chaleur. Elle indique en kelvin (unité du système international dont le symbole est K) la température du corps noir dont l'apparence visuelle serait la plus proche de la source de lumière.

[4] L'emmétropisation est le processus de développement oculaire normal qui conduit à focaliser une image nette sur la rétine.

[5] La luminance est une grandeur correspondant à la sensation visuelle de luminosité d'une surface. Une surface très lumineuse présente une forte luminance, tandis qu'une surface parfaitement noire aurait une luminance nulle.

matrices de LED (agrégats de LED ponctuelles sur un même support), des lampes spots à LED, des feux d'éclairage automobile et des lampes torches.

Enfin, les LED sont très réactives aux fluctuations de leur courant d'alimentation. Ainsi, des variations de l'intensité lumineuse peuvent apparaître selon la qualité du courant injecté. Ces phénomènes sont regroupés sous la terminologie de « modulation temporelle de la lumière ». L'Homme peut subir des effets néfastes de ces variations, qu'elles soient ou non visuellement perceptibles.

2. Évolutions réglementaires et normatives depuis 2010

2.1. Réglementations et normes relatives à la phototoxicité de la lumière

- Valeurs limites d'exposition

Concernant l'exposition aux rayonnements optiques, et en particulier la sécurité photobiologique, la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (Icnirp) a publié, en 2013, de nouvelles recommandations sur l'exposition aux rayonnements optiques visibles et infrarouges (Icnirp, 2013)[6]. Les valeurs limites d'exposition à la lumière bleue, inchangées par rapport à celles proposées en 1997, ne concernent que les expositions aiguës (exposition unique, continue et inférieure à 8 h).

- Textes réglementaires encadrant les usages de dispositifs, produits d'éclairage ou rayonnements optiques artificiels applicables notamment aux LED
    - Population générale

La Directive européenne « basse tension » (2014/35/UE) a pour objectif d'assurer que le matériel électrique se trouvant sur le marché européen satisfait aux exigences assurant un niveau élevé de protection de la santé et de la sécurité des personnes. Les fabricants peuvent s'appuyer sur la conformité de leurs produits à des normes harmonisées afin de garantir le respect des exigences essentielles de cette directive.

Cependant, les éclairages portatifs (lampes torches, lampes frontales) n'entrent pas dans le champ de la Directive basse tension. Ils utilisent pourtant des sources LED pouvant atteindre des intensités lumineuses très élevés.

De même, pour l'éclairage automobile (feux extérieurs), il n'existe pas de réglementation destinée à garantir la sécurité photobiologique par exemple en limitant les intensités d'émission des feux ou l'exposition des personnes.

Le cas des jouets intégrant des LED n'est pas suffisamment couvert par la Directive européenne sur la sécurité des jouets (2009/48/CE), car elle fait référence, pour les risques liés à la santé, à la norme de sécurité laser (IEC 608251-1), inadaptée aux éclairages à LED. Cette norme ne considère par ailleurs pas la sensibilité plus élevée des enfants à la lumière bleue en raison d'un cristallin plus clair.

    - Travailleurs

La Directive européenne 2006/25/CE du 5 avril 2006 relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels-ROA) inclut le risque lié à la lumière bleue. Pour ce risque particulier, elle s'appuie sur les recommandations de l'Icnirp de 1997. En France, la Directive ROA a été transposée dans le Code du travail par décret en 2010[7]. Un

[6] Icnirp *Guidelines on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation* publié dans : Health Physics 105(1):74-96;2013.

[7] Décret n° 2010-750 du 2 juillet 2010 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements optiques artificiels, JORF n°0153 du 4 juillet 2010 page 12149, texte n° 11.

arrêté de 2016[8] définit les modalités d'évaluation de risque, en s'appuyant sur des normes européennes relatives à l'exposition des personnes aux rayonnements optiques.

- Normes

Les normes relatives à l'évaluation de la sécurité photobiologique (CIE S009, IEC 62 471 et NF EN 62 471) se réfèrent aux valeurs limites de l'Icnirp et proposent une classification des lampes en groupes de risque : groupe de risque 0 : « sans risque », groupe de risque 1 : « risque faible », groupe de risque 2 : « risque modéré » et groupe de risque 3 : « risque élevé ».

En 2014, un rapport technique (IEC TR 62778 : 2014) accompagnant la norme NF EN 62471 a été publié par la Commission électrotechnique internationale (IEC). Ce rapport décrit une méthode pour évaluer le groupe de risque photobiologique dans le cas de la lumière bleue. Ce rapport reprend plusieurs recommandations de l'Anses, notamment une procédure pour transférer le groupe de risque d'une LED individuelle à un module de LED et à un produit fini (luminaire), ainsi que la spécification d'une distance minimale de vision pour les personnes exposées à des sources de lumière de groupe de risque supérieur ou égal à 2.

Depuis 2015, des normes harmonisées relatives à l'éclairage incluent des exigences de sécurité photobiologique[9] qui limitent les effets possibles du rayonnement sur l'œil et la peau. Une distinction existe entre les lampes d'une part, et les luminaires[10] alimentés par le réseau électrique (luminaires non portatifs) d'autre part. Pour ce qui concerne les lampes, les exigences consistent à limiter le groupe de risque photobiologique au niveau 0 ou 1 selon la norme NF EN 62471. Pour ce qui concerne les luminaires non portatifs, il n'existe pas de limitation du groupe de risque, mais uniquement une obligation d'avertir le consommateur en cas de groupe de risque supérieur ou égal à 2[11].

2.2. Réglementations et normes relatives aux autres effets sanitaires

Il n'existe pas, à ce jour, de réglementation spécifique concernant les effets liés à la perturbation des rythmes circadiens, à l'éblouissement et à la modulation temporelle de la lumière.

- *Perturbation des rythmes circadiens*

En 2004, la Commission internationale de l'éclairage (CIE) a publié un document, remis à jour en 2009 (CIE, 2009)[12], qui définit notamment des courbes de sensibilité spectrale des cellules ganglionnaires à mélanopsine de la rétine[13].

---

[8] Arrêté du 1er mars 2016 relatif aux modalités de l'évaluation des risques résultant de l'exposition aux rayonnements optiques artificiels en milieu de travail, JORF n°0066 du 18 mars 2016, texte n° 30.

[9] Ces exigences sont précisées notamment dans la norme NF EN 62 560– Lampes à DEL autoballastées pour l'éclairage général fonctionnant à des tensions > 50 V – Spécifications de sécurité et la norme NF EN 60 598-1 Luminaires – Partie 1 : exigences générales et essais (partie générale commune à tous les luminaires).

[10] Un luminaire est l'association d'une lampe (souvent appelée « ampoule ») avec un ornement décoratif ou l'association de plusieurs lampes.

[11] Pour les luminaires non portatifs appartenant au groupe de risque 2, les normes de sécurité (par exemple la norme NF EN 60598-1 portant sur les exigences générales des luminaires) imposent un marquage de la distance seuil et des mentions suivantes : « *il convient que le luminaire soit positionné de telle manière que la vision prolongée du luminaire à une distance inférieure à x m ne soit pas attendu » et « ne pas fixer la source lumineuse en fonctionnement* ».

[12] CIE 158:2009 : *ocular lighting effects on human physiology and behavior*.

[13] La mélanopsine est un photopigment présent dans la rétine et les cellules ganglionnaires sensibles à la lumière.

- *Éblouissement*

Les normes concernant l'éblouissement n'ont pas évolué depuis 2010. L'industrie de l'éclairage utilise les indices normatifs d'éblouissement définis par la CIE, notamment l'UGR (*Unified Glare Rating*). La formule de l'UGR a été initialement élaborée pour des luminaires intérieurs équipés de tubes fluorescents. La validité de la mise en application de l'UGR aux systèmes d'éclairages intégrant des LED pose question. La publication en 2013 de la CIE, « *Review of Lighting Quality Measures for Interior Lighting with LED Lighting Systems* » CIE 205:2013, conclut qu'un nouveau système d'évaluation de l'éblouissement est nécessaire pour l'éclairage à LED.

- *Effets sanitaires liés à la modulation temporelle de la lumière*

Depuis 2015, de nouvelles normes et documents techniques ont été élaborés ou remis à jour par la plupart des organismes de normalisation pour décrire les phénomènes liés à la modulation temporelle de la lumière. Cependant, il n'existe pas de réglementation européenne ou française limitant la modulation temporelle de la lumière émise par les lampes et les luminaires. La réglementation sur l'éclairage (en matière d'écoconception et d'étiquetage) est en cours de révision par la Commission européenne ; des aspects concernant la modulation temporelle de la lumière devraient figurer dans le texte en préparation.

3. Risques pour la santé humaine liés à l'exposition à la lumière des LED

Les risques pour la santé humaine liés à l'exposition à la lumière des LED sont essentiellement dus à la composition spectrale d'une part et à la modulation temporelle de la lumière d'autre part.

Parmi les effets sanitaires des LED, ceux liés à la lumière bleue que sont la phototoxicité et la perturbation des rythmes circadiens sont très dépendants de l'âge de la personne exposée. En effet, le cristallin joue notamment le rôle de filtre à lumière bleue dans l'œil et sa transmittance évolue fortement avec l'âge. Les enfants naissent avec un cristallin clair, laissant passer toute la lumière bleue pour atteindre un taux de filtrage optimal vers l'âge de 20 ans. Les personnes de plus de 60 ans ont un taux de filtrage de la lumière bleue environ deux fois supérieur à une personne de 20 ans.

On distingue les sources lumineuses (ou objets lumineux) émettant de la lumière bleue, des objets qui ont une couleur bleue. Dans le premier cas, le spectre lumineux reçu par l'œil est (souvent) enrichi en lumière bleue. La quantité de lumière reçue par la rétine dans la bande bleue peut être importante et avoir des effets phototoxiques sur l'œil et un effet perturbateur sur les rythmes biologiques. Dans le second cas, la couleur bleue des objets et matériaux environnants, sous un éclairage classique, résulte de la réflexion d'une partie du spectre et a pour effet d'absorber une partie de la puissance lumineuse. La puissance de la source lumineuse est globalement atténuée, et la perception colorée peut avoir des effets apaisants.

3.1. Perturbation des rythmes circadiens, perturbation du sommeil, effet sur les performances cognitives et le niveau de vigilance

3.1.1. Caractérisation du danger

- *Perturbations des rythmes circadiens*

La lumière reçue par la rétine a deux effets majeurs : elle permet la formation d'images (effets visuels) et transmet à l'organisme une indication du moment de la journée (effet non visuel). Cet effet non visuel implique les cellules ganglionnaires à mélanopsine (CGM) de la rétine qui ont une sensibilité spectrale particulière : elles sont fortement stimulées par la lumière bleue, avec un pic de sensibilité aux environs de 480 nm. Les CGM envoient leurs messages vers les noyaux supra-chiasmatiques de l'hypothalamus, siège de l'horloge circadienne centrale. Cette horloge centrale distribue le message vers le reste du corps, afin de synchroniser l'ensemble des fonctions biologiques avec le rythme jour/nuit. Ainsi, une régulation adéquate de l'activité des CGM est primordiale pour la bonne synchronisation des

rythmes biologiques des organismes avec leur environnement. La bande de longueurs d'ondes dite « mélanopique » (bleu turquoise, 480 - 490 nm) est ainsi liée à des effets sur la rythmicité circadienne.

L'horloge biologique centrale détermine la production d'une hormone, appelée mélatonine, dont la sécrétion commence en soirée environ deux heures avant le coucher, atteint un niveau maximum vers le milieu de la nuit, pour revenir à des niveaux très bas voire indétectables le matin et le reste de la journée. Ainsi, le rythme journalier des concentrations circulantes de mélatonine est un indicateur fiable de l'activité de l'horloge biologique et de ses perturbations.

La synchronisation efficace de l'horloge circadienne centrale, et donc des fonctions biologiques qui en dépendent, notamment le rythme de veille/sommeil, nécessite une intensité de lumière importante durant la journée et une obscurité totale pendant la nuit. Le mode de vie actuel, notamment urbain, tend de plus en plus à déréguler le rythme journalier naturel lumière/obscurité avec d'une part une journée passée à l'intérieur (accompagnée par une baisse d'intensité lumineuse) et d'autre part une soirée et une nuit exposées à de multiples sources lumineuses (éclairages, écrans).

Il existe un nombre important de publications étudiant la perturbation des rythmes circadiens liée à une exposition à la lumière en soirée ou la nuit. Les résultats de plusieurs études expérimentales menées chez l'Homme, au cours desquelles les personnes étaient soumises à des lumières riches en bleu issues d'éclairages artificiels ou d'écrans (ordinateurs, téléphones, tablettes, …) convergent et indiquent que la synthèse nocturne de mélatonine est retardée ou inhibée par une exposition, même très faible, à de la lumière riche en bleu.

L'intensité de la perturbation circadienne semble dépendre de l'intensité lumineuse, du moment et de la durée d'exposition, mais également de l'historique de l'exposition de l'individu à la lumière dans la journée. Cependant, une valeur aux alentours de 10-40 lux, voire en dessous (niveau très faible pouvant être largement dépassé en éclairage domestique) suffit pour observer un impact sur l'horloge circadienne (témoigné par la suppression de la sécrétion nocturne de la mélatonine).

En conclusion, compte tenu des éléments de preuve suffisants apportés par les études réalisées chez l'Homme, la perturbation des rythmes circadiens induite par l'exposition à une lumière riche en bleu en soirée ou la nuit est considérée comme avérée.

Par ailleurs, des travaux expérimentaux chez l'animal ont démontré que la mélatonine circulante de la mère traverse la barrière placentaire pour entrer dans la circulation du fœtus, qui possède des récepteurs à la mélatonine. Ainsi, la mélatonine maternelle peut agir sur le développement du fœtus, notamment sur la mise en place de son système circadien. La nuit, l'exposition de la mère à la lumière modifie les niveaux de mélatonine et induit un effet prénatal dont les conséquences persisteraient chez l'adulte (effets sur les rythmes circadiens, effets métaboliques, etc.). On peut raisonnablement supposer que chez l'Homme l'effet de l'éclairage moderne la nuit sur la sécrétion de mélatonine maternelle impacte négativement le développement du fœtus in utero.

La perturbation des rythmes circadiens est par ailleurs associée à d'autres effets sanitaires (perturbation de la qualité et de la quantité de sommeil, troubles métaboliques, risque augmenté de cancer - notamment le cancer du sein -, pathologies cardiovasculaires, effets sur la santé psychique). Cependant, le lien direct entre l'exposition à la lumière riche en bleu en soirée ou la nuit et la survenue de ces effets sanitaires, bien que fortement suspecté, n'est pas établi à ce jour chez l'Homme.

- *Perturbation du sommeil*

La plupart des travaux scientifiques disponibles montrent que la lumière bleue altère la régulation du sommeil par le biais des perturbations circadiennes. Les éléments de preuve apportés par les études réalisées chez l'Homme sont suffisants pour conclure à un effet avéré de l'exposition à une lumière riche en bleu en soirée sur la latence à l'endormissement, la durée et la qualité du sommeil.

- *Effet sur le niveau de vigilance et les performances cognitives*

Plusieurs études ont montré que l'exposition à la lumière bleue (notamment issues de LED) de jour comme de nuit améliore les performances cognitives et augmente le niveau de vigilance. Ainsi, un certain nombre d'études se sont intéressées aux effets de l'éclairage, et en particulier à la lumière bleue, sur les performances de travailleurs de nuit. L'objectif est l'optimisation à court terme de la vigilance et la baisse de la somnolence afin de réduire les accidents industriels ou routiers et d'améliorer les performances et la productivité. Il s'agit d'un enjeu important de nos sociétés contemporaines. Cependant, la question d'impacts éventuels sur la santé, en raison notamment d'une possible phototoxicité accrue de la lumière la nuit, reste à définir.

3.1.2. Caractérisation des sources lumineuses à LED et des expositions

L'évaluation de l'exposition à la lumière bleue pour ses effets sur la mélatonine et les rythmes circadiens est étudiée dans la bande dite « mélanopique » (bleu turquoise, 480 - 490 nm).

La quantité de lumière bleue émise par un objet à LED peut être estimée à partir de sa température de couleur, exprimée en Kelvin (K), et de son niveau d'éclairement sur une surface, exprimé en lux (notamment sur le plan de l'œil).

Les campagnes de mesures menées pour décrire la nature et la quantité de lumière émise par des systèmes à LED ont montré que la lumière émise par des écrans de téléviseurs, d'ordinateurs, de téléphones mobiles ou encore de tablettes présentait un faible niveau d'éclairement mais était riche en bleu. En effet, les écrans d'ordinateurs à LED présentaient des températures de couleur variant de 4 500 K à 6 900 K et des éclairements sur le plan de l'œil variant de 20 à 60 lux. Pour les écrans à LED de *smartphones* ou de tablettes électroniques, les températures de couleur variaient de 4 100 K à 7 000 K et les éclairements sur le plan de l'œil de 2 à 10 lux. Pour ce qui est de l'éclairage domestique, les lampes à LED disponibles sur le marché peuvent proposer des températures de couleur variant de 2 500 K (lumière peu riche en bleu) à 6 900 K (lumière très riche en bleu).

Concernant l'exposition des personnes à la lumière bleue dans la bande mélanopique, aucune donnée n'a été identifiée dans la littérature scientifique. Les scénarios d'exposition à la lumière développés pour cette expertise, représentant des conditions de vie typiques pour différentes populations, ont mis en évidence que l'exposition dans la bande mélanopique est similaire avec des éclairages à LED modérément riches en bleu (température de couleur variant de 2 700 K à 4 000 K), des lampes fluocompactes ou des lampes halogènes. Néanmoins, avec des scénarios de vie intégrant des situations de type « pire cas » (LED très riches en bleu, température de couleur autour de 6 500 K), l'exposition dans la bande mélanopique est augmentée par rapport aux autres technologies d'éclairage, et ce quelle que soit la population concernée. Par ailleurs, l'utilisation d'écrans et d'objets à LED est susceptible d'augmenter l'exposition à la lumière bleue dans la bande mélanopique.

3.1.3. Estimation du risque sanitaire

Les données disponibles ne permettent pas de quantifier précisément le risque de perturbation des rythmes circadiens, ou de perturbation du sommeil lié à l'exposition aux LED. Les experts du groupe de travail, sur la base d'une approche qualitative, estiment néanmoins, au vu de ce qui précède, que le risque de perturbation circadienne associé à l'exposition aux lumières à LED riches en bleu en soirée ou la nuit est élevé.

En particulier, l'exposition avant le coucher aux éclairages et écrans à LED de téléviseurs et technologies de communication, enrichis en lumière bleue, serait susceptible de nuire à la durée et à la qualité du sommeil et d'avoir un impact sur les fonctions cognitives.

3.1.4. Populations sensibles

Les études disponibles ont montré des effets de retardement de l'heure du coucher, dus à l'altération de fonctions non-visuelles et notamment la suppression de la mélatonine, encore

plus marqués chez les enfants, les adolescents et les jeunes adultes (avant 20 ans). Un facteur évident est la transparence du cristallin, plus importante chez les jeunes, qui laisse passer plus de lumière que chez les adultes. En plus de l'utilisation très répandue d'appareils à écrans à LED chez les adolescents, les changements comportementaux, hormonaux et circadiens qui interviennent à cet âge (allongement de la période endogène du cycle circadien) sont probablement aussi impliqués.

De manière plus générale, plusieurs populations ont pu être identifiées comme étant plus spécifiquement sensibles au risque de perturbation circadienne et du sommeil associés à une exposition aux LED :

- les nourrissons, les enfants et les adolescents, les jeunes adultes (en raison d'un cristallin clair) ; les personnes aphakes (sans cristallin) et pseudo-phakes (ayant un cristallin artificiel) ;
- les femmes enceintes (effets sanitaires potentiels sur l'enfant à naître) ;
- les travailleurs de nuit[14] ;
- les personnes souffrant de pathologies ou d'anomalies oculaires, les personnes souffrant de troubles du sommeil.

3.2. Effets et pathologies oculaires

3.2.1. Caractérisation du danger

La phototoxicité est un mécanisme d'altération cellulaire induit par la lumière qui peut conduire à la mort cellulaire. L'exposition à une lumière intense et aiguë est phototoxique car elle entraine la perte irréversible de cellules rétiniennes qui peut conduire à une baisse de l'acuité visuelle partielle, définitive (scotome[15], diminution du champ visuel, baisse de la résolution) ou totale (cécité). Une exposition chronique à des lumières phototoxiques de faible intensité accélère le vieillissement des tissus rétiniens, pouvant conduire à une baisse de l'acuité visuelle et à des maladies dégénératives telles que la DMLA (dégénérescence maculaire liée à l'âge).

En ce qui concerne les effets toxiques d'une lumière riche en bleu sur l'œil, les données disponibles mettent en évidence le fait que :

- l'effet phototoxique sur la rétine d'une exposition aiguë (inférieure à 8 heures) à une lumière riche en bleu est avéré ;
- l'effet de l'exposition chronique de la rétine (plusieurs années) à la lumière riche en bleu sur la contribution à la survenue de dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA) est avéré ; les effets à long terme des éclairages artificiels sur l'œil n'étant pas étudiés à ce jour, ces conclusions se basent sur des études épidémiologiques prenant en compte l'exposition à la lumière solaire (lumière riche en bleu) ;
- au-delà de la dose phototoxique reçue, le moment de l'exposition joue un rôle important. Certaines études expérimentales, aujourd'hui limitées à l'animal, démontrent une vulnérabilité augmentée de la rétine à la phototoxicité pendant la nuit, en raison d'un rythme journalier de photosensibilité et des effets perturbateurs sur l'horloge rétinienne endogène.

De nombreuses études montrent que les valeurs limites d'exposition (VLE) retenues par l'Icnirp pour la toxicité rétinienne de la lumière ne sont pas suffisamment protectrices.

[14] Les travailleurs de nuit sont particulièrement sensibles dans le sens où ils sont potentiellement exposés de manière importante aux éclairages à LED.

[15] Lacune dans le champ visuel due à l'insensibilité de certains points de la rétine.

Certains auteurs (Hunter *et al.*, 2012)[16] ont estimé que ces VLE étaient supérieures d'un facteur 20 par rapport à des VLE protectrices. De plus, l'expertise a permis de souligner que ces VLE ne sont proposées que pour une exposition aigüe (exposition inférieure à 8 h) et éludent la question d'une exposition à long terme. Les experts ont par ailleurs mentionné l'existence de nouveaux systèmes UV-LED[17] qui pourraient présenter des risques phototoxiques.

Par ailleurs, l'examen de la littérature scientifique sur la myopie et le syndrome sec[18] a conduit à conclure que :

- l'effet de la lumière riche en bleu sur la myopie est possible (positif ou négatif) ;
- l'effet de la lumière riche en bleu sur la survenue du syndrome sec est possible.

3.2.2. Caractérisation des sources lumineuses à LED et des expositions

L'évaluation de l'exposition à la lumière bleue est étudiée dans la bande dite « phototoxique » (bleu profond, 450 – 470 nm).

Les mesures physiques effectuées dans le cadre de cette expertise montrent que certains dispositifs lumineux à LED testés (des lampes-torches, des lampes frontales, des jouets ou certains phares automobiles - notamment les feux de croisement -, etc.), émettent une lumière riche en bleu (dispositifs classés en groupe de risque 2, temps d'exposition admissible inférieur à 100 s, selon les valeurs limites d'exposition définies par l'Icnirp). Certains écrans de téléphones et tablettes électroniques utilisant la technologie LED émettent une lumière à des niveaux d'intensité assez bas, mais là aussi systématiquement riche en bleu. On note par ailleurs l'apparition sur le marché de LED bleues décoratives et l'utilisation de LED dans un nombre croissant d'applications (par exemple dans l'éclairage agricole, pour l'éclairage d'aquarium, …).

L'addition d'un éclairage artificiel à l'éclairage naturel est de nature à modifier les doses oculaires reçues par la cornée et par la rétine dans la bande phototoxique (jusqu'à 50 % d'augmentation). La comparaison de la contribution des éclairages à LED à l'exposition globale des personnes, par rapport à d'autres technologies d'éclairage et selon des scénarios définis, a permis de mettre en évidence les éléments suivants :

- de façon générale, les éclairages à LED augmentent le déséquilibre des longueurs d'onde en faveur de la lumière bleue par rapport à la lumière rouge, en comparaison à d'autres éclairages, à température de couleur égale ;
- l'exposition dans la bande phototoxique est d'autant plus importante que la température de couleur est élevée (lumière riche en bleu), quelle que soit la technologie d'éclairage (LED ou non).

Pour ce qui concerne la dose phototoxique reçue par la rétine, les résultats issus de l'étude des scénarios d'exposition montrent que les LED ne se distinguent des autres technologies que dans le scénario « pire cas », dans lequel les éclairages à LED utilisés sont très riches

[16] Hunter, Jennifer J., Jessica I. W. Morgan, William H. Merigan, David H. Sliney, Janet R. Sparrow, et David R. Williams. 2012. « The Susceptibility of the Retina to Photochemical Damage from Visible Light ». Progress in Retinal and Eye Research 31 (1): 28-42.

[17] Nouvelle génération de LED dont le pic de lumière bleue est décalé dans le domaine de l'ultraviolet (vers 410 nm).

[18] Le syndrome sec se manifeste par un mauvais fonctionnement du système lacrymal qui entraîne une sécheresse au niveau de la surface oculaire (cornée, conjonctive, etc.). Ce syndrome se manifeste par un inconfort oculaire avec des sensations de picotements ou une impression de corps étranger dans l'œil.

en bleu (température de couleur élevée autour de 6 500 K). Pour autant, les experts soulignent que ce scénario « pire cas » peut correspondre au cas de certaines populations très peu exposées à la lumière naturelle et soumises à des éclairages riches en bleu sur leur lieu de travail (par exemple, en hiver, il fait nuit le matin au départ du domicile et le soir au retour du domicile, la journée étant passée sous un éclairage exclusivement artificiel riche en bleu).

Les experts du groupe de travail signalent le développement commercial important de petites LED décoratives nues émettant de la lumière bleue (guirlandes, éclairages d'ambiance, …). Ces LED peuvent augmenter l'exposition dans la bande phototoxique et ce même à de faibles luminances. En effet, les photons composant la lumière bleue sont plus énergétiques que les photons associés à des longueurs d'onde plus grandes. Ainsi, ils peuvent induire des réactions photochimiques comparables à celles provoquées par les rayonnements ultraviolets. De plus, la perception visuelle humaine est moins sensible à la lumière bleue. Des niveaux d'énergie élevés de lumière bleue peuvent donc être reçus par la rétine sans que cela ne crée une forte sensation visuelle. Cette lumière de couleur bleue n'étant pas nécessairement éblouissante, sa fixation prolongée est possible, notamment par les enfants.

3.2.3. Estimation du risque sanitaire

Les données disponibles ne permettent pas de quantifier précisément le risque de survenue de pathologies oculaires lié à l'exposition aux LED. Cependant, sur la base d'une approche qualitative, les experts estiment au vu de ce qui précède que le risque de toxicité aiguë des LED à usage domestique « blanc chaud » (basse température de couleur) est faible.

Il faut noter que des dispositifs lumineux appartenant à un groupe de risque 2 (lampes-torches, lampes frontales, jouets ou certains phares automobiles) sont disponibles sur le marché. Le risque de survenue de pathologies oculaires lié à l'exposition à ces dispositifs est augmenté et ce d'autant plus pour les populations sensibles. De même, des objets émettant spécifiquement de la lumière bleue (par exemple les LED décoratives), même à faible intensité, peuvent augmenter l'exposition dans la bande phototoxique.

En raison du manque de données sur les effets chroniques d'une exposition à la lumière froide à faibles doses (écrans, par exemple), le niveau de risque associé à une exposition chronique à des LED riches en bleu ne peut être évalué à ce jour.

3.2.4. Populations sensibles

Plusieurs populations sensibles ont pu être identifiées au vu des données de la littérature, s'agissant du risque lié aux pathologies oculaires :

- les nourrissons, les enfants, les adolescents, les jeunes adultes (cristallin clair) ; les personnes aphakes (absence de cristallin) et pseudo-phakes (cristallin artificiel) ;
- les personnes souffrant de pathologies oculaires (œil sec, DMLA, glaucome, rétinopathies…) ; les personnes souffrant de troubles moteurs ou cognitifs qui réduisent les capacités d'évitement ou de prise de décision face à une lumière trop intense ; les personnes prenant des médicaments photosensibilisants ou exposés à des polluants photosensibilisants ;
- les travailleurs de nuit ou tout professionnel potentiellement exposé de manière importante aux éclairages à LED (les chirurgiens, les dentistes, les éclairagistes, les revendeurs d'éclairages, les métiers des arts de la scène, les personnes travaillant dans les installations sportives, les personnes travaillant dans l'agroalimentaire utilisant des LED (serres, aquaculture), etc.).

3.3. Éblouissement et confort visuel

3.3.1. Caractérisation du danger

L'éblouissement se définit par des conditions de vision dans lesquelles une personne éprouve une gêne ou une réduction de l'aptitude à distinguer des détails ou des objets, par suite d'une répartition défavorable des luminances ou d'un contraste excessif. Il convient de

distinguer l'éblouissement perturbateur (éblouissement d'incapacité), qui diminue les capacités et les performances visuelles du sujet, de l'éblouissement inconfortable qui apporte une sensation de gêne au sujet, sans provoquer de baisse de performance visuelle.

Plusieurs facteurs modulent l'incapacité due à l'éblouissement : la quantité de lumière envoyée dans l'œil par la source elle-même, mais aussi la distance à la source éblouissante et l'âge de l'observateur. La composition spectrale de la lumière, en revanche, ne modifie pas le phénomène d'éblouissement d'incapacité.

Il apparaît que la multiplicité des sources ponctuelles visibles dans les luminaires (matrices à LED), aggrave notablement l'inconfort. Toutes les études s'accordent à montrer que (1) les sources non-uniformes sont plus éblouissantes que les sources uniformes de même luminance moyenne et (2) plus le contraste est élevé, plus la sensation d'inconfort est grande. De plus, la diffusion de la lumière dans les milieux oculaires augmentant avec l'âge, l'inconfort augmente également. Pour ce qui concerne tant les sources à LED que les sources lumineuses « traditionnelles », la température de couleur ne semble pas être un facteur déterminant du confort visuel. Cependant, à température de couleur égale, la composition spectrale et en particulier l'enrichissement en bleu du spectre a des conséquences probables sur l'inconfort visuel.

Les effets à long terme de la répétition des éblouissements ne sont pas connus à ce jour. Il existe par ailleurs une grande variabilité interindividuelle dans la population générale quant à l'appréciation des situations éblouissantes.

3.3.2. Caractérisation des sources lumineuses à LED et des expositions

La luminance, mesurée en vision directe d'une source lumineuse à courte distance, exprimée en cd/m² [19], permet d'évaluer le niveau d'éblouissement que peut provoquer cette source de lumière. Les lampes à LED testées dans le cadre de cette expertise présentent des niveaux de luminance disparates, certaines étant très éblouissantes, notamment dans les spots à LED.

Un autre aspect du confort visuel est lié au rendu des couleurs. L'indice de rendu de couleur (IRC) représente la capacité d'une lumière à rendre compte d'une couleur de manière fidèle. Un IRC égal à 100 désigne une lumière optimale, et il est admis qu'un IRC est jugé acceptable au-dessus de 80. Les lampes à LED ne sont pas encore à ce jour au niveau des lampes halogènes, dont les IRC avoisinent 100, mais présentent des performances similaires aux lampes fluocompactes, avec des IRC mesurés parfois au-dessus de 80. Par rapport à la précédente expertise de l'Anses publiée en 2010, la technologie à LED propose aujourd'hui un rendu de couleur de meilleure qualité.

3.3.3. Estimation du risque sanitaire

Les données disponibles ne permettent pas de quantifier précisément le risque d'éblouissement perturbateur ou d'inconfort visuel lié à l'exposition aux LED. Cependant, les experts, sur la base d'une approche qualitative, estiment au vu de ce qui précède que certains dispositifs d'éclairage incluant des LED peuvent conduire à un risque d'éblouissement important : les lampes torches, les phares automobiles, les spots à LED, matrices de LED, etc. De plus, même si certaines lampes à LED ont un meilleur rendu de couleur qu'il y a quelques années, celui-ci reste perfectible.

3.3.4. Populations sensibles

L'âge est un facteur aggravant le risque d'éblouissement associé aux LED, de jour comme de nuit. La dégradation de l'acuité visuelle s'accélère au-delà de l'âge de 60 ans, de façon plus ou moins prononcée selon les personnes. Le voile de luminance généré autour des

[19] cd/m² : candelas par mètre carré.

sources augmente considérablement avec l'âge, abaissant la perception du contraste des objets et, de ce fait, les performances visuelles.

Les sujets migraineux semblent être spécifiquement sensibles à l'éblouissement causé par certaines irrégularités de la répartition spectrale d'énergie de la lumière.

3.4. Effets cutanés

3.4.1. Caractérisation du danger

La lumière bleue pourrait avoir un effet nocif sur la peau, accélérant le vieillissement et retardant les processus de cicatrisation, alors que l'exposition à des longueurs d'onde comprises entre 590 et 700 nm (lumière rouge) aurait des effets inverses. Les experts concluent que l'effet d'une exposition à la lumière riche en bleu sur la survenue de pathologies cutanées est possible.

Par ailleurs, l'effet cancérogène (induction de mélanome) retardé induit par une photothérapie à LED bleues pour traiter l'ictère néonatal devrait faire l'objet d'une attention particulière. Des cinq études réalisées pour évaluer le risque de développer des lésions mélanocytaires bénignes ou malignes suite à une photothérapie néonatale à la lumière bleue, trois ont montré un nombre accru de nævi communs ou atypiques chez les enfants exposés.

3.4.2. Caractérisation des sources lumineuses à LED et des expositions

Il n'existe pas de données d'exposition spécifiques aux émissions de lumières bleues sur la peau. Néanmoins, le groupe de risque photobiologique renseigne sur la quantité de lumière bleue émise par les éclairages à LED (*cf.* § portant sur la caractérisation de l'exposition pour les pathologies oculaires).

3.4.3. Estimation du risque sanitaire

Les données disponibles ne permettent pas de quantifier l'existence d'un risque pour la peau, lié à l'exposition aux LED. Les experts estiment, sur la base d'une approche qualitative, compte tenu des niveaux d'exposition associés à un usage domestique des éclairages à LED et de la faible profondeur de pénétration des rayonnements optiques bleus dans la peau, que le risque de survenue de pathologies cutanées lié à une exposition à la lumière bleue issue des LED est faible.

3.4.5. Populations sensibles

Les experts ont identifié certaines populations potentiellement sensibles :

- les nouveau-nés dans le cas d'une photothérapie à LED bleues prescrite pour traiter l'ictère néonatal ;
- les personnes atteintes de certaines pathologies cutanées (lésions épithéliales, plaies, …) ; ces populations auraient un risque accru de voir survenir ou s'aggraver des lésions cutanées lors d'une exposition à la lumière bleue.

3.5. Autres troubles (migraines, maux de tête, fatigue visuelle, accidents, crises d'épilepsie)

3.5.1. Caractérisation du danger

La modulation temporelle d'un système d'éclairage est principalement caractérisée par sa fréquence de modulation et le taux de modulation associé, exprimé en pourcentage de l'intensité lumineuse (valeurs comprises entre 0 et 100 %). Selon sa fréquence, cette modulation peut être perceptible ou non par le système visuel humain. Trois effets visuels (perception consciente de la modulation) distincts ont été décrits : le papillotement (*flicker*), l'effet stroboscopique et l'effet de réseau fantôme. Des effets sanitaires peuvent être induits directement par ces effets visuels, ou apparaître sans perception consciente d'une quelconque modulation. Les effets sanitaires qui peuvent découler de la perception consciente ou non de la modulation sont les crises d'épilepsie, les accidents de la route et

ceux liés à l'utilisation de machines, ainsi que les migraines, les maux de tête et la fatigue visuelle.

Les effets comme les maux de tête, les migraines, la fatigue visuelle, peuvent être associés à des fréquences de modulation temporelle comprises entre 80 et 120 Hz. Les éléments de preuve associés apportés par les études sont limités chez l'Homme.

Des phénomènes comme l'effet stroboscopique (immobilité ou ralentissement apparent d'un objet en mouvement) ou l'effet de réseau fantôme (rémanence de l'image lors d'une saccade visuelle) peuvent se produire à des fréquences élevées de modulation (supérieures à environ 80 Hz). Dans un contexte industriel ou domestique, il est vraisemblable que l'effet stroboscopique impacte la sécurité lors de l'usage de machines ou d'outils.

La modulation temporelle de la lumière peut également être associée au déclenchement de crises chez les personnes souffrant d'épilepsie. Cependant, les fréquences de modulation des lampes et luminaires à LED disponibles sur le marché sont trop élevées pour déclencher des crises chez ces personnes. Il subsiste néanmoins une possibilité de déclenchement de crises dans la population des sujets épileptiques lors d'une exposition à des lampes et luminaires à LED présentant une modulation temporelle anormale (produits défectueux ou incompatibilité avec le variateur).

Par ailleurs, certains éclairages autonomes sur les vélos (rechargement par induction magnétique) sont très fortement modulés (pourcentage de modulation de 100 %) à des fréquences variant avec la vitesse du cycliste. À certaines vitesses, les modulations temporelles se situent dans la bande la plus critique pour le déclenchement de crises d'épilepsie, autour de 15 Hz.

Dans tous ces cas, la modulation temporelle de la lumière est associée à un inconfort visuel et à une diminution de l'ergonomie visuelle, notamment aux postes de travail dans le cadre professionnel.

3.5.2. Caractérisation des sources lumineuses à LED et des expositions

Des résultats issus de la littérature scientifique portant sur la modulation temporelle de lampes à LED ont été agrégés avec des mesures réalisées dans le cadre de cette expertise ; sur les 53 lampes testées :

- 18 lampes (environ 34 %) ont une modulation temporelle très faible (pourcentage de modulation inférieur à 1 %) ;
- 12 lampes (environ 23 %) ont un pourcentage de modulation temporelle compris entre 1 % et 15 %, semblable à celui des lampes halogènes et fluocompactes ;
- 14 lampes (environ 26 %) ont un pourcentage de modulation compris entre 12 % et 70 %, des valeurs significativement plus élevées que celles des technologies halogènes et fluocompactes ;
- 9 lampes (environ 17 %) ont un pourcentage de modulation très élevé, supérieur à 70 % et pouvant atteindre 100 %.

On estime qu'environ 43 % des lampes à LED à usage domestique ont des performances dégradées (taux de modulation supérieur à 15 % à 100 Hz) en matière de modulation temporelle par rapport aux technologies halogènes et fluocompactes.

L'effet stroboscopique est particulièrement visible avec des lampes et luminaires à LED ayant une forte modulation temporelle à 100 Hz.

Certaines lampes et luminaires à LED possèdent des niveaux de modulation suffisamment élevés pour que l'effet de réseau fantôme soit perceptible, spécialement en situation de conduite automobile.

3.5.3. Estimation du risque sanitaire

Pour les personnes souffrant d'épilepsie, les données disponibles ne permettent pas de quantifier le risque de déclenchement de crise associé à une modulation temporelle d'un système d'éclairage à LED.

Les experts estiment par ailleurs qu'en raison du nombre limité de données d'exposition, le risque associé aux effets (maux de tête, migraine, fatigue visuelle) intervenant dans la gamme de fréquences (80 – 120 Hz) associé à une exposition aux LED n'est pas connu.

Les données scientifiques ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet de la perception de l'effet stroboscopique ou de réseau fantôme sur l'accidentologie lors de la manipulation de machines ou d'outils, ou sur les routes.

3.5.4. Populations sensibles

Les études portant sur la maturation du système de perception visuelle des contrastes chez l'Homme indiquent que la sensibilité maximale aux contrastes temporels est atteinte chez l'adolescent et le jeune adulte. Il s'agit donc d'une catégorie de population particulièrement sensible aux lumières modulées.

Les études épidémiologiques montrant une association entre lumière modulée et déclenchement de migraines désignent les personnes souffrant de migraine comme une population sensible aux lumières modulées.

Les travaux menés en utilisant des tubes fluorescents d'anciennes générations ont montré que certaines personnes ont une sensibilité accrue aux modulations temporelles de la lumière à la fréquence de 100 Hz. De plus, des études montrent que certains individus perçoivent visuellement le papillotement à 100 Hz.

Ainsi, plusieurs groupes de populations sensibles ont pu être identifiés concernant certains effets sanitaires liés à la modulation temporelle de la lumière :

- pour ce qui concerne les maux de tête, la migraine et la fatigue visuelle :
  - les enfants, adolescents et jeunes adultes ;
  - les personnes souffrant de migraines ;
- pour ce qui concerne le risque d'accident lié à l'effet stroboscopique ou à l'effet de réseau fantôme :
  - les opérateurs de machines et d'outils et les conducteurs de véhicules ;
  - les personnes souffrant de troubles moteurs ou cognitifs réduisant leurs capacités d'évitement ou de prise de décision ;
  - les enfants, adolescents et jeunes adultes ;
- pour ce qui concerne le déclenchement de crises d'épilepsie, les personnes souffrant d'épilepsie.

4. Efficacité des moyens de protection

Différentes solutions revendiquant une atténuation ou une suppression des effets de la lumière bleue existent : filtres incorporés aux écrans d'ordinateurs ou s'adaptant aux lunettes correctrices, systèmes d'éclairage programmables qui modulent la quantité de lumière mélanopique (longueur d'onde située autour de 480 - 490 nm) en fonction de l'heure.

D'après les mesures réalisées pour la présente expertise :

- les lunettes spécifiques de protection contre la lumière bleue ont une efficacité de filtrage plus importante que les verres ophtalmiques traités. Aucun de ces deux systèmes n'est cependant assez efficace pour être considéré comme un équipement de protection

individuelle[20] (EPI) contre le risque de phototoxicité rétinienne aiguë résultant d'une exposition prolongée à une source LED d'intensité lumineuse importante ;

- selon les moyens de protection testés, la capacité de filtrage du rayonnement bleu dans la bande mélanopique est très variable : elle est très faible pour les verres traités, voire inexistante, malgré les revendications avancées par les fabricants ou distributeurs de ces produits. Il est impossible d'affirmer que ce filtrage est suffisant pour empêcher la diminution de la sécrétion de mélatonine induite par une exposition lumineuse en soirée et les effets de retard à l'endormissement qui peuvent être associés ;
- pour les écrans testés revendiquant une limitation de l'émission de lumière bleue, aucune efficacité réelle n'a été observée. La diminution de la température de couleur (passage au blanc chaud) et de la luminosité des écrans a, en revanche, montré une certaine efficacité sur la diminution de la quantité de bleu dans le spectre.

5. Impact des LED sur l'environnement

5.1. Danger pour la biodiversité

La diversité du vivant se reflète dans la grande diversité des réponses métaboliques, physiologiques et comportementales de la faune et de la flore à la lumière. Ainsi, ce qui peut être un avantage pour une espèce donnée (animale ou végétale) peut s'avérer un inconvénient pour une autre. Des modifications des rythmes biologiques (journaliers et annuels), de l'orientation, de la répartition géographique, et de la migration des espèces peuvent ainsi être observées, à la suite d'une exposition à la lumière artificielle. Des effets indirects sont observés (à moyen et long termes), sur ces populations et leurs écosystèmes.

Les travaux de recherche sur l'impact de la lumière émise par les LED la nuit sur le vivant s'appuient encore beaucoup sur ceux se rapportant à la lumière artificielle en général. Ils concernent d'ailleurs un nombre encore très limité d'espèces. Quel que soit l'écosystème étudié, la tendance générale relevée dans la littérature scientifique montre, à long terme, une augmentation de la mortalité et un appauvrissement de la diversité des espèces animales et végétales étudiées dans les milieux éclairés la nuit, y compris par des éclairages à LED.

Selon la littérature scientifique, les effets de la lumière la nuit, notamment issue d'éclairages à LED, sur la faune et la flore et les écosystèmes, sont avérés pour toutes les espèces étudiées. Ces effets correspondent globalement à ceux de l'éclairage nocturne, parmi lesquels il faut distinguer ceux qui pourraient être spécifiquement liés à des caractéristiques propres aux LED (intensité, composition spectrale). Ces effets viennent s'ajouter aux autres pressions anthropiques (pollution chimique, barrières géographiques, réduction de l'espace vital, surexploitation…). L'extension continue des activités humaines, industrielles et de loisir, les nuisances physiques et chimiques auxquelles viennent s'ajouter les effets du changement climatique constituent autant de facteurs auxquels certaines populations animales et végétales seront probablement incapables de faire face, ce qui entraînera une accélération de la diminution de la biodiversité. Cependant, les données impliquant l'action combinée de ces multiples facteurs perturbants sont encore rarissimes.

5.2. Pollution lumineuse

Le rapport d'expertise collective associé à cette synthèse propose une évaluation de l'effet du déploiement des LED (sources d'éclairage et d'affichage extérieurs notamment) sur la pollution lumineuse. Différents aspects ont été considérés, comme les effets sur le halo nocturne, les nuisances pour l'Homme (lumière intrusive, débordements lumineux, éblouissement, rythmes circadiens) et les nuisances pour les écosystèmes et la biodiversité.

[20] À ce jour, il n'existe pas de norme fixant les méthodes d'essai et les exigences de performance pour des EPI vis-à-vis de la lumière bleue.

Selon les experts du groupe de travail, le changement des technologies d'éclairage par des LED pourrait augmenter ou diminuer la pollution lumineuse, en fonction des choix retenus pour l'éclairage public, d'intérieur, de mise en valeur architecturale et paysagère, etc. Les catégories de systèmes d'éclairage à LED qui pourraient être responsables des plus grandes augmentations de la pollution lumineuse sont : les enseignes, les affiches et publicités lumineuses, ainsi que l'éclairage des zones commerciales, des zones agricoles (y compris les serres horticoles) et aquacoles et des zones industrielles. L'éclairage des parkings extérieurs de ces zones est également concerné. Dans ces catégories, la tendance est à l'augmentation du nombre et de l'intensité des points lumineux.

Le remplacement des lampes de l'éclairage public (sur la voirie) et d'intérieur par des LED pourrait contribuer à réduire la pollution lumineuse, en ciblant davantage les zones à éclairer (et donc en limitant la diffusion) et en modulant la qualité (longueur d'onde) et l'intensité de la lumière émise, ce que permet la technologie LED ; la condition associée est que le nombre de points lumineux à LED ne soit pas augmenté comparativement au nombre de points lumineux remplacés.

Malgré les résultats mis en avant ci-dessus, il est difficile d'évaluer l'impact global de la transition de l'éclairage existant vers les LED sur la pollution lumineuse.

5.3. Impacts liés au cycle de vie

Plusieurs catégories d'impacts environnementaux sont définies lors de l'analyse du cycle de vie d'un produit : la consommation d'énergie, la quantité de déchets dangereux produite, la quantité d'eau utilisée, l'impact sur le réchauffement climatique, les effets toxiques sur la santé humaine, etc. Les résultats des études d'analyse du cycle de vie (ACV) des sources lumineuses analysées montrent que les lampes et luminaires à LED causent les impacts environnementaux les plus bas en comparaison avec d'autres technologies d'éclairage. Ceci est lié à une plus haute efficacité lumineuse des éclairages à LED par rapport aux autres sources. Le contenu des études d'ACV portant sur des lampes et luminaires varie cependant, en particulier dans les produits analysés et les méthodes choisies (l'unité fonctionnelle, les catégories d'impact, les étapes du cycle de vie incluses). Malgré des différences notables dans les méthodes d'ACV, les analyses ont généralement abouti à des résultats très similaires : c'est l'utilisation des LED qui est majoritairement (70 à 99 %) responsable des impacts environnementaux, en raison de leur consommation d'énergie. Leur fabrication est responsable de la plupart des autres impacts.

Le CES note comme limitation, dans les ACV, l'absence de méthodologie pour évaluer les impacts de la lumière sur la santé humaine et l'environnement (faune et flore).

Recommandations du CES

Sur la base des conclusions et recommandations du groupe de travail, le CES formule les recommandations suivantes visant à mieux protéger la santé humaine (population générale et travailleurs) et l'environnement vis-à-vis des effets liés à l'exposition aux systèmes à LED. Ces recommandations visent à limiter les effets néfastes liés à l'exposition aux LED en développant l'information de la population générale et en milieu de travail, et en améliorant l'encadrement normatif et réglementaire de l'usage des LED. Enfin, le CES souligne les efforts à mener en matière de recherche.

Recommandations pour la protection de la population et de l'environnement, à destination des pouvoirs publics

Le CES recommande de développer des actions, notamment d'information, sur :

- la nécessité de limiter l'exposition à des lumières riches en bleu (issues de LED ou d'autres technologies), en privilégiant le recours à des éclairages de couleur chaude (température de couleur inférieure à 3 000 K) avant le coucher et pendant la nuit,

particulièrement pour certains groupes de populations : enfants, adolescents, femmes enceintes (voir listes par effets sanitaires dans la partie 3). Notamment, le CES recommande de ne pas utiliser de veilleuse à lumière riche en bleu pour les nourrissons et les enfants et de limiter l'exposition des enfants et adolescents aux sources d'exposition à de la lumière riche en bleu (écrans d'ordinateurs, de tablettes, de téléphones mobiles, …) la nuit et avant le coucher ;

- l'importance de renforcer le contraste lumineux entre le jour et la nuit en augmentant l'exposition à la lumière naturelle en journée et en limitant l'exposition à la lumière artificielle avant l'heure du coucher et la nuit ;
- l'effet phototoxique de la lumière associé à l'exposition à certains dispositifs d'éclairage à LED (lampes torches, lampes frontales, jouets, phares automobiles, guirlandes décoratives à lumière bleue) disponibles sur le marché, notamment pour les groupes de populations les plus sensibles comme les enfants ;
- l'efficacité très disparate des moyens de protection actuellement proposés vis-à-vis des effets néfastes pour la santé liés à l'exposition à des LED.

Dans un but de protection contre les effets néfastes liés à la pollution lumineuse pour l'humain et son environnement, le CES recommande :

- de mettre en œuvre des actions pour limiter les lumières intrusives dans l'habitat et ainsi réduire les risques de perturbations circadiennes ;
- de limiter le nombre d'installations lumineuses en extérieur, de réduire les surfaces des zones éclairées au strict nécessaire, d'améliorer le contrôle de leur directivité et d'en promouvoir une gestion raisonnée ;
- d'effectuer, là où l'éclairage s'impose, une étude d'impact de cet éclairage sur l'écosystème local dans les zones naturelles et périurbaines ;
- de créer des espaces protégés, sans éclairage artificiel.

Recommandations pour la protection des travailleurs à destination des employeurs et de la médecine du travail

- considérant les effets phototoxiques de la lumière bleue et les effets potentiels de la modulation temporelle de la lumière, le CES rappelle l'obligation de limiter l'exposition des travailleurs à ces sources de lumière et de les informer des dangers associés ;
- par ailleurs, compte tenu des effets observés chez l'animal sur le développement du fœtus liés à l'exposition de la mère à la lumière la nuit, le CES recommande de limiter l'exposition des femmes enceintes à la lumière la nuit.

Recommandations concernant le cadre réglementaire et normatif dans un but de protection de la santé humaine et de l'environnement

- Au niveau national :
- le CES recommande de faire respecter la réglementation sur l'extinction des éclairages intérieurs émis vers l'extérieur et l'illumination des façades de bâtiments (arrêté[21] du 25 janvier 2013 relatif à l'éclairage nocturne des bâtiments non résidentiels afin de limiter les nuisances lumineuses et les consommations d'énergie),

[21] « Les éclairages intérieurs de locaux à usage professionnel sont éteints une heure après la fin de l'occupation de ces locaux. Les illuminations des façades des bâtiments sont éteintes au plus tard à 1 heure. Les éclairages des vitrines de magasins de commerce ou d'exposition sont éteints au plus tard à 1 heure ou une heure après la fin de l'occupation de ces locaux si celle-ci intervient plus tardivement. »

et celle sur l'extinction des enseignes publicitaires (décret n° 2012-118[22] relatif à la publicité extérieure, aux enseignes et aux pré-enseignes).

- Au niveau européen :
- en ce qui concerne les évolutions normatives à entreprendre, le CES recommande :
- de réviser les valeurs limites d'exposition aux rayonnements optiques proposées par l'Icnirp, de façon à les rendre suffisamment protectrices vis-à-vis du risque phototoxique. Elles devraient prendre en compte une exposition chronique et considérer d'autres indicateurs, notamment ceux de toxicité infra-cliniques[23] ;
- de créer et d'imposer le marquage d'un indice d'efficacité sur les moyens de protection à la lumière bleue (rendant compte du taux d'atténuation) ;
- d'élaborer une norme métrologique, au niveau européen, précisant les conditions de mesure de la modulation temporelle et du calcul des indices associés ;
- en ce qui concerne les évolutions réglementaires à entreprendre, le CES recommande :
- d'imposer le marquage du groupe de risque photobiologique (évalué selon la norme NF EN 62471) pour les éclairages domestiques mais aussi pour les objets à LED ;
- de limiter la mise à disposition des systèmes à LED (lampes, luminaires, objets et notamment jouets) auprès du grand public à ceux de groupe de risque inférieur ou égal à 1 ;
- d'harmoniser le cadre réglementaire en modifiant les réglementations spécifiques à des systèmes à LED autres que lampes et luminaires, afin de tenir compte du risque photobiologique, et notamment :
    - la Directive européenne n° 2009/48/CE relative à la sécurité des jouets ;
    - les règlements UNECE[24] (*United Nations Economic Commission for Europe*) R112 et R113 relatifs aux prescriptions pour les sources lumineuses des véhicules.
- de limiter la luminance des phares de véhicules (sans forcément réduire le flux global, et donc la distance de visibilité) ;
- de prendre en compte dans la réglementation les spécificités des sources à barrettes ou à matrices de LED nues des dispositifs commercialisés auprès du grand public (agrégations de LED nues sur un même support) ;
- d'établir, au niveau européen, des limites de modulation temporelle de la lumière, afin de limiter les effets biologiques et sanitaires associés à la lumière émise par les lampes et luminaires à LED ;
- de modifier les réglementations existantes afin de tenir compte des risques liés à la modulation temporelle et notamment :
    - la Directive n°2006/25/CE du Parlement européen relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels) ;

---

[22] « Les publicités lumineuses devront être éteintes la nuit, entre une heure et six heures du matin, sauf pour les aéroports et les unités urbaines de plus de 800 000 habitants, pour lesquelles les maires édicteront les règles applicables. Les enseignes lumineuses suivront les mêmes règles. »

[23] Par exemple, il peut y avoir mort cellulaire dans la rétine sans pour autant que ce soit visible lors de l'examen du fond de l'œil.

[24] La Division des transports durables de l'UNECE fournit des services de secrétariat au Forum mondial pour l'harmonisation des réglementations sur les véhicules.

- o les règlements UNECE, en imposant une fréquence minimale de modulation de l'ordre de 2 kHz lorsque les feux (feux avant et feux arrière) des véhicules sont utilisés en mode PWM (*Pulse Width Modulation*)[25]. Cette recommandation permet de limiter la visibilité de l'effet de réseau fantôme, source de perturbations visuelles avérées ;

- d'imposer la généralisation de la possibilité d'abaisser automatiquement la température de couleur (passage au blanc chaud) et la luminosité des écrans de téléphones mobiles et tablettes avant l'heure du coucher.

Recommandations en matière de recherches

Si de nombreuses données sont disponibles pour évaluer l'impact de la lumière sur la santé, en particulier de la lumière bleue, les données scientifiques sont encore parcellaires en ce qui concerne l'effet spécifique des LED selon leur géométrie et leur qualité spectrale. Le CES insiste donc sur la nécessité d'améliorer l'évaluation quantitative de l'impact d'un passage général à la technologie LED sur la santé humaine et sur l'environnement.

Le CES encourage à poursuivre et intensifier les recherches sur les perturbations des rythmes circadiens par la lumière et les effets qui en découlent sur la vigilance, le sommeil, l'humeur, le bien-être, la cognition et la santé. Deux aspects encore peu documentés devront être particulièrement pris en compte chez l'humain ou dans des modèles animaux diurnes :

- l'impact de l'environnement lumineux maternel sur le développement du fœtus ;
- l'impact chez l'enfant et l'adolescent de l'environnement lumineux, en fonction de la période (jour, nuit), sur la synchronisation des rythmes biologiques et sur la santé, considérant notamment une transmission lumineuse plus élevée en raison d'un cristallin plus transparent, et d'une pupille plus ouverte.

Des effets potentiellement bénéfiques d'un fort contraste lumineux entre le jour et la nuit ayant été décrits dans la littérature scientifique, il conviendrait :

- de confirmer les effets de l'exposition à des intensités lumineuses suffisantes le jour sur la qualité de vie, le sommeil, le bien-être et la santé, notamment des personnes souffrant de troubles des rythmes circadiens (sujets âgés, patients hospitalisés, personnes atteintes de démence, …) ;
- d'approfondir les connaissances sur les effets d'une exposition à la lumière bleue le matin pour corriger les désynchronisations circadiennes et en évaluer les risques oculaires ;
- d'étudier, dans le cas des travailleurs de nuit, l'intérêt de favoriser l'exposition à certaines longueurs d'onde en fonction de l'heure pour favoriser d'une part la vigilance, et d'autre part la récupération en réduisant au maximum les effets secondaires néfastes.

Le CES recommande une meilleure évaluation des risques de survenues de sécheresse de l'œil et de pathologies oculaires en lien avec l'exposition à de la lumière dans la gamme phototoxique, en particulier sur le long terme. Une attention particulière devra être portée à certains groupes de populations sensibles (enfants, adolescents, populations souffrant de pathologies oculaires, personnes aphakes, etc.). Le CES recommande aussi d'étudier les facteurs qui pourraient intervenir dans la phototoxicité de la lumière : le moment de l'exposition, la possible modulation temporelle associée, les facteurs de risques liés à des

[25] Le mode PWM est une modulation de rapport cyclique. La lumière est modulée à une fréquence fixe et le changement de rapport cyclique modifie l'intensité moyenne de la lumière.

pathologies oculaires. Il sera aussi opportun d'étudier dans quelle mesure l'extrapolation à l'Homme de résultats de phototoxicité obtenus chez le rongeur est possible.

La modulation temporelle de la lumière apparaissant comme un défaut majeur de certaines LED ou systèmes à LED, le CES recommande d'approfondir les connaissances sur ses effets visuels, biologiques et sanitaires. Il recommande en particulier de mener :

- des études pour mieux cerner les variations inter-individuelles de la sensibilité aux contrastes temporels, et mieux connaître la prévalence et l'incidence des effets liés à la modulation temporelle de la lumière dans la population générale ;
- des études permettant de quantifier les risques d'accidents liés à une exposition à un effet stroboscopique ou à un effet de réseau fantôme.

Les divers effets sanitaires des LED mentionnés plus haut rendent nécessaire une meilleure évaluation de l'exposition des populations. Le CES recommande d'effectuer des mesures précises de la distribution des luminances, des répartitions spectrales d'énergie et de la modulation temporelle pour une large gamme de dispositifs à LED auxquels la population est exposée.

- Le CES recommande une meilleure prise en compte de l'impact environnemental d'un passage général à la technologie LED, en augmentant les connaissances concernant les effets de la pollution lumineuse sur la faune et la flore et l'écosystème dans son ensemble.

Enfin, le CES recommande de considérer l'ensemble du cycle de vie des LED, en particulier :

- d'accéder aux données détaillées sur les produits entrant dans la fabrication des LED (matières premières, procédés de fabrication) et les produits rejetés dans l'air, l'eau et les sols lors de la fabrication des LED ;
- de documenter la fin de vie des LED : récupération et tri des produits usagés, récupération des matières premières, recyclage de certains composants des LED, traitement des déchets finaux.

Date de validation de la synthèse par le comité d'experts spécialisé : 23 novembre 2018.

Sigles et abréviations

CG : cellule ganglionnaire

CGM : cellule ganglionnaire à mélanopsine

DLMO : *dim light melatonin onset* - début de sécrétion de mélatonine dans des conditions de luminosité faible

EPR : épithélium pigmentaire rétinien

ipRGC : *intrinsically photosensitive retinal ganglion cells* – cellules ganglionnaires de la rétine intrinsèquement photosensibles

LED : *light-emitting diode* - diode électroluminescente

NOP : noyaux olivaires prétectaux

NSC : noyau supra-chiasmatique

OLED : *organic light-emitting diode* - diode électroluminescente organique

SVM : *stroboscopic visibility measure* - indice de visibilité de l'effet stroboscopique

RG : *Risk Group* – groupe de risque

DRIL : Dégénérescence rétinienne induite par la lumière

IEEE : *Institute of Electrical and Electronics Engineers* – Institut américain des ingénieurs en électricité et électronique

Liste des tableaux

Tableau 1 : définition des principales grandeurs mesurées 45
Tableau 2 : besoin de sommeil en fonction de tranches d'âge 114
Tableau 3 : mécanismes d'interaction des rayonnements avec les tissus oculaires....129
Tableau 4 : caractérisation des lésions rétiniennes thermiques et photochimiques 132
Tableau 5 : synthèse des différents effets biologiques et du classement des effets de la modulation temporelle 179
Tableau 6 : définitions de l'éblouissement, avec la traduction des termes en anglais 181
Tableau 7 : expression de l'acuité visuelle en différentes unités 187
Tableau 8 : quelques niveaux d'UGR selon les situations 189
Tableau 9 : équivalence entre l'UGR et le VCP (*Visual Comfort Probability*) 189
Tableau 10 : tableau comparatif des indices d'éblouissement inconfortable les plus usités 190
Tableau 11 : résultats des relevés photométriques sur écrans d'ordinateurs 229
Tableau 12 : résultats des relevés photométriques sur téléphones et tablettes graphiques 230
Tableau 13 : récapitulatif des éclairements et températures de couleur mesurés sur sites et objets à LED 233
Tableau 14 : résultats des mesures de modulation temporelle concernant un échantillon de lampes à destination du grand public 246
Tableau 15 : résultats des mesures de la modulation temporelle effectuées par le CSTB en 2015 sur un échantillon de lampes à destination du grand public en France....248
Tableau 16 : résultats des mesures de modulation temporelle de lampes LED domestiques 250
Tableau 17 : résultats des mesures de modulation temporelle effectuées sur des luminaires à LED de bureaux de type plafonniers encastrés....252
Tableau 18 : résultats des mesures de modulation temporelle effectuées sur des luminaires à LED d'éclairage de rue 254
Tableau 19 : bilan moyen journalier de l'exposition lumineuse d'un employé de bureau en hiver....261
Tableau 20 : synthèse des résultats pour le scenario de « employé de bureau » 261
Tableau 21 : synthèse des résultats pour le scénario « travailleur de nuit »....263
Tableau 22 : synthèse des résultats pour le scénario « enfant à la maternelle » 263
Tableau 23 : synthèse des résultats pour le scénario « adolescent »....264
Tableau 24 : synthèse des résultats pour le scénario « personne âgée » 265
Tableau 25 : récapitulatif des capacités de filtration du rayonnement bleu des moyens de protection testés 272
Tableau 26 : évolution possible de la contribution au halo nocturne de différentes catégories de l'éclairage/affichage extérieur....278
Tableau 27 : évolution de la contribution aux nuisances lumineuses sur l'Homme de différentes catégories de l'éclairage/affichage extérieur 281
Tableau 28 : évolution de la contribution aux impacts sur la biodiversité et sur les écosystèmes de différentes catégories de l'éclairage/affichage extérieur. 284
Tableau 29 : effets de la longueur d'onde sur les plantes....318
Tableau 30 : recensement d'ACV de sources lumineuses à LED....345

Tableau 31 : méthodologies d'évaluation des impacts du cycle de vie et catégories d'impact environnemental utilisées en ACV de LED.....349

Tableau 32 : résultats chiffrés pour les indices GWP et HTP dans les 7 ACV analysées exprimées en Mlmh (Méga lumen heure).....352

Liste des figures

Figure 1 : répartition spectrale d'énergie de la lumière du jour 46
Figure 2 : les différents types d'applications des LED par catégorie 48
Figure 3 : différentes formes de lampes à LED 52
Figure 4 : différents types de culots de lampes à LED 52
Figure 5 : température de couleur des lampes testées (échantillon pour Anses, Ademe, INC) 53
Figure 6 : luminance maximale des lampes testées 54
Figure 7 : indice de rendu de couleur des lampes testées 54
Figure 8 : groupe de risque photobiologique des lampes testées 55
Figure 9 : pourcentage de modulation temporelle des lampes testées 55
Figure 10 : matrice de croisement des éléments de preuve chez l'Homme et sur des modèles 70
Figure 11 : contrôle des rythmes circadiens chez l'Homme 73
Figure 12 : architecture rétinienne et connectivité rétine-horloge circadienne 76
Figure 13 : liste partielle des fonctions oculaires contrôlées par l'horloge rétinienne 77
Figure 14 : spectres de lampes fluocompacte et halogène 88
Figure 15 : spectre de lampes à LED froide (6 700 K) et chaude (2 700 K) 88
Figure 16 : rapport entre la lumière et la sécrétion de la mélatonine 89
Figure 17 : évolution du nombre d'articles scientifiques portant sur les rythmes circadiens 91
Figure 18 : phagocytose des photorécepteurs et effets de la lumière chez le rat 93
Figure 19 : dispositif d'enregistrement polysomnographique 116
Figure 20 : hypnogramme d'un adulte jeune comportant 5 cycles de sommeil sur une nuit 117
Figure 21 : principaux processus de régulation du sommeil : homéostatique, circadien et ultradien 118
Figure 22 : spectres effectifs d'illumination des trois situations d'exposition 120
Figure 23 : taux de suppression de la mélatonine après 1 h et 2 h d'exposition à des tablettes 121
Figure 24 : anatomie de l'œil humain - coupe transversale 124
Figure 25 : film lacrymal normal 125
Figure 26 : spectre des rayonnements optiques et sensibilité des milieux oculaires 127
Figure 27 : transmission de la lumière par le cristallin en fonction de l'âge 128
Figure 28 : doses seuil en fonction du nombre de jour d'exposition à des UV de 300 nm 130
Figure 29 : dose pour des dommages rétiniens en fonction de la longueur d'onde. 133
Figure 30 : représentation schématique de l'interaction des photons avec des noyaux dont la structure chromatinienne varie 134
Figure 31 : odds Ratio pour les 14 études épidémiologiques utilisées dans Sui *et al*., 2013 136
Figure 32 : spectre de LED à des niveaux d'éclairage domestiques utilisés dans la publication de Shang *et al., 2014* 139
Figure 33 : spectre des différentes LED utilisées dans Shang *et al,* 2017 140
Figure 34 : valeurs limites d'exposition rétinienne en fonction de la longueur d'onde chez la macaque et le lapin 144

Figure 35 : forme d'onde d'une lampe halogène de puissance 28 W 149
Figure 36 : forme d'onde d'une lampe fluocompacte de puissance 15 W 149
Figure 37 : forme d'onde à peu près constante d'une lampe LED. Il n'y a pas de modulation temporelle détectable 150
Figure 38 : forme d'onde d'une lampe LED présentant une modulation temporelle importante 150
Figure 39 : forme d'onde d'une lampe LED avec une modulation temporelle de forme carrée et un pourcentage de modulation de 100 % (IEEE 1789) 151
Figure 40 : forme d'onde d'une lampe LED utilisée avec un variateur à découpage de phase 152
Figure 41 : formes d'onde carrées de même fréquence mais ayant des rapports cycliques différents 152
Figure 42 : exemple de forme d'onde caractérisant une modulation temporelle anormale et dont la forme est très complexe 153
Figure 43 : limites de modulation temporelle proposées par différents organismes 154
Figure 44 : mesures de modulation temporelle à 100 Hz obtenues sur des lampes grand public et valeurs limites recommandées par différents organismes 155
Figure 45 : courbes de sensibilité au contraste temporel 158
Figure 46 : pourcentage de modulation en fonction de la fréquence de modulation 162
Figure 47 : configuration expérimentale utilisée par Bullough *et al.* 164
Figure 48 : pourcentages moyens de détection de l'effet stroboscopique en fonction de la fréquence et du pourcentage de modulation variable 165
Figure 49 : scores d'acceptabilité moyens de l'effet stroboscopique en fonction de la fréquence et du pourcentage de modulation variable 165
Figure 50 : expérience utilisée pour évaluer la visibilité de l'effet stroboscopique 166
Figure 51 : pourcentage de modulation en fonction de la fréquence de modulation 167
Figure 52 : illustration de l'effet de réseau fantôme 168
Figure 53 : pourcentage des patients ayant un EEG épileptiforme en réponse à une modulation temporelle d'une lampe à décharge en fonction de la fréquence de modulation des impulsions lumineuses 172
Figure 54 : niveaux de risques de déclenchement de crises d'épilepsie par la lumière modulée établis dans la norme IEEE 1789 173
Figure 55 : les dimensions de l'inconfort et de l'éblouissement. 183
Figure 56 : décours temporel de la récupération de la sensibilité après une préadaptation à 4 775 cd/m² 184
Figure 57 : acuité visuelle normale en fonction de la luminance du fond d'adaptation. 185
Figure 58 : variation, selon l'âge, de l'acuité en présence d'une source éblouissante circulaire de 3300 cd/m² 187
Figure 59 : variation, selon l'âge, du temps de récupération de l'acuité à l'obscurité, après un éblouissement par une source de 3 300 cd/m² 188
Figure 60 : décours de la réponse pupillaire à un stimulus photopique 191
Figure 61 : fonctions d'efficacité lumineuse révélant la sensibilité à l'éblouissement inconfortable, déterminées expérimentalement en vision extra-fovéale : à 5° et à 10° d'excentricité 193
Figure 62 : motifs des luminaires à LED étudiés par Sun *et al*, 2014 196

Figure 63 : paramètres d'arrangement des LED, influençant la perception de l'éblouissement 196
Figure 64 : répartition spectrale relative d'énergie des sources utilisées par Yang *et al*., 2016 et Yang *et al.* 2017, synthétisées par Luo *et al*., 2017 197
Figure 65 : fonctions d'efficacité lumineuse relative pour l'éblouissement d'inconfort 198
Figure 66 : caractéristiques physiques de l'affichage des pixels d'un panneau publicitaire 198
Figure 67 : réduction de l'inconfort par un fond coloré 199
Figure 68 : calcul de l'excitation de la mélanopsine pour différentes technologies d'éclairage 200
Figure 69 : distribution des illuminants étudiés par Cao et Barrionuevo, 2014. 200
Figure 70 : répartition spectrale de la lumière obtenue par association de 7 LED de couleur pour maximiser (en bleu) ou minimiser (en rose) l'excitation mélanopique 201
Figure 71 : répartition spectrale d'énergie des sources LED et de la source fluorescente comparées dans l'étude de nuit de Lu *et al*., 2016 202
Figure 72 : valeur limite BCD en fonction de la surface effective (cristallin transparent) de la pupille 204
Figure 73 : répartition spectrale de la paire de lumières blanches métamères excitant au maximum la mélanopsine (lumière HM, High_mel) et une lumière LM (Low_Mel) excitant au minimum la mélanopsine 205
Figure 74 : répartition spectrale d'énergie de lumières orange métamères présentées alternativement comme stimulus pendant 3 s ou comme lumière de fond 206
Figure 75 : valeur de l'indice d'éblouissement *G* (*Glare Constant*), de nuit et de jour 207
Figure 76 : éclairement vertical d'un piéton à différentes distances d'un lampadaire 208
Figure 77 : répartition spectrale d'énergie des sources dans le test comparatif de deux résidences 209
Figure 78 : répartition spectrale d'énergie d'un panneau OLED et d'un panneau à éclairage latéral par LED 212
Figure 79 : répartition spectrale d'énergie des OLED et des LED 212
Figure 80 : pénétration des différentes longueurs d'onde dans la peau 215
Figure 81 : étapes de la cicatrisation. 216
Figure 82 : spectro-photomètre et vidéo-luminancemètre 226
Figure 83 : exemple de cartographies prises dans le séjour 227
Figure 84 : exemple de cartographies prises dans un bureau 228
Figure 85 : exemple de cartographies prises à l'école 228
Figure 86 : groupe de risque des différents objets à LED testés. 235
Figure 87 : luminance pondérée pour les feux de croisement 236
Figure 88 : luminance pondérée pour les feux de route 237
Figure 89 : luminance pondérée pour les feux de jour (DRL) 238
Figure 90 : différentes inclinaisons de véhicules considérées 239
Figure 91 : durée limite d'exposition en fonction de l'âge 240
Figure 92 : durée limite d'exposition pour les différentes technologies de feux de croisement 241
Figure 93 : durée limite d'exposition pour les différentes technologies de feux de route 242
Figure 94 : durée limite d'exposition pour les différents types de système d'éclairage automobile à LED 243

Figure 95 : durée limite d'exposition en fonction de l'âge pour les feux de croisement ___ 244
Figure 96 : durée limite d'exposition en fonction de l'âge et de la technologie pour les feux de route ___ 245
Figure 97 : résultats des mesures de modulation temporelle concernant un échantillon de lampes à destination du grand public en France ___ 247
Figure 98 : résultats de mesures de la modulation temporelle effectuées par le CSTB en 2015 sur un échantillon de lampes à destination du grand public en France ___ 249
Figure 99 : résultats de mesures de modulation temporelle de lampes LED domestiques 251
Figure 100 : résultats des mesures de modulation temporelle effectuées sur des luminaires à LED de bureaux de type plafonnier encastrés ___ 253
Figure 101 : résultats des mesures de modulation temporelle effectuées sur des luminaires à LED d'éclairage de rue ___ 254
Figure 102 : résultats des mesures de pourcentage de modulation obtenus dans 3 études ___ 255
Figure 103 : zones climatiques RT2012 ___ 258
Figure 104 : courbes exploitées pour considérer les différentes bandes : lumineuse, phototoxique, mélanopique et la bande spectrale rouge ___ 259
Figure 105 : exemple de cartographie d'exposition rétinienne : à gauche cartographie vue dans le champ de vision, à droite cartographie sur la rétine ___ 260
Figure 106 : quelques spectres d'éclairage utilisés ___ 260
Figure 107 : contributions des catégories d'éclairage extérieur à l'émission de lumière vers le ciel utilisées dans la ville de Flagstaff (États-Unis) ___ 277
Figure 108 : arbre du vivant : bactéries (bleu), archées (rouge), eucaryotes (marron) ___ 289
Figure 109 : structure du chloroplaste ___ 290
Figure 110 : les différents types de photorécepteurs dans le règne animal ___ 291
Figure 111 : évolution et types d'yeux chez les êtres vivants ___ 292
Figure 112 différents types d'yeux chez les invertébrés ___ 293
Figure 113 : organe pinéal des vertébrés ___ 294
Figure 114 : la vision extra-oculaire des insectes. ___ 295
Figure 115 : sensibilité spectrale des plantes. ___ 296
Figure 116 : la famille des cryptochromes et photolyases. ___ 297
Figure 117 : représentation simplifiée de trois types d'oscillateurs moléculaires ___ 297
Figure 118 : évolution des opsines ___ 299
Figure 119 : évolution des opsines et de la phototransduction et mécanismes de transduction associés ___ 300
Figure 120 : vision chromatique chez les vertébrés ___ 302
Figure 121 : vision chromatique chez les invertébrés ___ 302
Figure 122 : organisation du système circadien ___ 304
Figure 123 : le système circadien des mammifères et la sécrétion de mélatonine ___ 304
Figure 124 : processus rythmiques chez les algues et les plantes ___ 307
Figure 125 : contrôle circadien des grandes fonctions chez les mammifères ___ 308
Figure 126 : variations annuelles de certains paramètres physiologiques ___ 309
Figure 127 : variations annuelles des naissances dans la population espagnole ___ 310

Figure 128 : clarté du ciel nocturne en A et B, puis prédictions pour un passage en éclairage à LED en C. En D : estimation des surfaces non éclairées artificiellement en Europe 314
Figure 129 : éclairage de rue urbain 314
Figure 130 : éclairages dans l'environnement aquatique 317
Figure 131 : photopigments et longueur d'onde photosensible des unicellulaires et plantes terrestres 319
Figure 132 : modification de représentants des populations microbiennes dans les sédiments induites par l'*ALAN* en milieu aquatique naturel (a) ou en laboratoire (b) 320
Figure 133 : évaluation de l'impact de l'exposition aux LED sur la température corporelle, la taille des testicules et les taux sanguins chez le microcèbe 326
Figure 134 : écosystèmes et exemples d'interdépendances dans un écosystème aquatique (étang) en haut et terrestre en bas. L'Homme se situe au sommet des chaines alimentaires dans tous les cas 329
Figure 135 : impact des LED sur l'abondance des poissons et invertébrés sessiles dans le port de Sydney en fonction au cours du cycle de 24 h 330
Figure 136 : impact de l'éclairage nocturne par des LED sur la distribution de populations d'araignées et de coléoptères 331
Figure 137 : effet de l'éclairage LED sur les populations d'insectes pollinisateurs et les plantes concernées 332
Figure 138 : interaction proie / prédateur 334
Figure 139 : effets cumulatifs des facteurs de stress sur les populations de chauves-souris 337
Figure 140 : contrôle multifactoriel des régulations neuroendocriniennes chez les vertébrés 338
Figure 141 : la situation du saumon Atlantique *Salmo salar* - un cas d'école 339
Figure 142 : les étapes du cycle de vie des LED (Tähkämö, 2013) 343

1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise

1.1 Contexte

En octobre 2010, l'Anses a publié un rapport d'expertise et un avis portant sur les effets sanitaires des éclairages utilisant des diodes électroluminescentes (LED). Ce rapport, proposait un état des lieux de l'éclairage en France, une présentation de la technologie LED, une synthèse de la normalisation sur l'éclairage et une analyse des effets sanitaires potentiels des LED principalement axée sur les effets photochimiques de la lumière bleue et sur les effets liés à l'éblouissement des éclairages à LED.

L'agence avait alors recommandé de limiter la mise sur le marché grand public aux seuls éclairages à LED appartenant à des groupes de risques inférieurs à 1[26] selon la norme NF EN 62471 de sécurité photobiologique des lampes et appareils utilisant des lampes. Il avait été également recommandé d'informer les consommateurs sur les groupes de risque des lampes. En ce qui concerne les effets photochimiques, l'agence avait alerté sur le fait que les valeurs limites d'exposition de la rétine à la lumière sont calculées en tenant compte des effets toxiques aigüs connus, et non d'effets cumulés sur des durées prolongées.

Depuis cette parution, le retrait programmé des lampes à incandescence (retrait étalé entre 2009 et 2012) et des lampes halogènes classiques (retrait fixé pour septembre 2018) du marché de l'éclairage a induit un fort développement des éclairages à LED augmentant ainsi l'exposition de la population à cette technologie. Aussi, les domaines d'application des systèmes à LED se sont élargis et concernent non seulement l'éclairage intérieur et extérieur, mais aussi le rétro-éclairage d'écran (téléphone portable, écrans, ..), de nombreux objets et dispositifs (jouets, objets de décoration, etc.), un nombre important d'applications professionnelles ainsi que des applications en affichage et en signalisation, *etc.*

Les effets sanitaires qui pourraient être liés à l'exposition à la lumière émise par les LED sont à la fois des effets liés à la lumière bleue émise (phototoxicité, perturbation des rythmes circadiens notamment) et des effets liés aux caractéristiques de cet éclairage (éblouissement, effets liés à la modulation temporelle). Ces effets sont à présent mieux documentés. Les données relatives aux effets liés à la phototoxicité sont plus nombreuses qu'en 2010 avec notamment des données expérimentales chez l'animal, liées à une exposition longue durée à la lumière bleue. Les données concernant la dérégulation de l'horloge biologique par la lumière bleue se sont également accumulées depuis 2010. Le système circadien humain, qui intervient dans l'ensemble de la physiologie humaine, est régulé par des stimuli environnementaux et des horloges endogènes internes. La lumière, qui est le principal synchronisateur de ce système, joue un rôle clé. Un excès de lumière ou un manque d'obscurité la nuit peut induire des effets sur la santé de l'Homme. Enfin, de nouvelles données sur l'éblouissement sont parues et, depuis 2015, les organismes

[26] Groupes de risque selon la norme NF EN 62471 : Groupe de risque RG 0 « sans risque » : la limite d'exposition n'est jamais atteinte ou est atteinte au-delà de 10 000 s d'exposition continue ; Groupe de risque RG 1 « risque faible » : la limite d'exposition est atteinte pour une durée d'exposition comprise entre 100 s et 10 000 s ; Groupe de risque RG 2 « risque modéré » : la limite d'exposition est atteinte pour une durée d'exposition comprise entre 0,25 s et 100 s ; Groupe de risque RG 3 « risque élevé » : la limite d'exposition est atteinte pour une durée d'exposition inférieure à 0,25 s.

normatifs ont fait le point sur les effets sanitaires liés à la modulation temporelle de la lumière (fluctuation du niveau lumineux de l'éclairage potentiellement perceptible visuellement).

Dans ce contexte, la Direction générale de la prévention des risques (DGPR), la Direction générale de la santé (DGS), la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF) et la Direction générale du travail (DGT) ont saisi l'Anses, le 19 décembre 2014, afin de mettre à jour les connaissances sur les effets sanitaires potentiels liés aux systèmes utilisant des LED.

Dans ce présent rapport, l'objectif est de considérer l'ensemble des effets d'un passage à un éclairage à LED pour l'Homme mais aussi pour son environnement (faune et flore). L'Homme est en interaction perpertuelle avec son environnement et mettre en déséquilibre ce dernier peut avoir des conséquences sur l'Homme et sa santé. L'ajout ou la substitution d'une lumière artificielle à la lumière solaire naturelle doit poser la question des effets sanitaires potentiels associés en matière d'accumulation ou de modification des expositions et en matière de chronicité de ces changements.

Ce rapport tente donc de répondre à plusieurs questions :

- sur la lumière artificielle : quels sont les effets de la lumière artificielle (sur l'Homme et son environnement) à court et long terme et quel est l'état des connaissances sur ces points ? Ceci comprend différents questionnements : quels sont les effets liés à la lumière riche en bleue du spectre et les effets liés aux autres caractéristiques de l'éclairage ?
- sur la technologie LED en particulier : comment la population est exposée aux LED ? Existe-t-il des effets spécifiques liés à une exposition aux LED, sont-ils différents des autres technologies d'éclairage et lesquels sont-ils ? Quelle est la résultante d'une exposition à des sources multiples et aux LED en particulier ?

1.2 Objet de la saisine

Compte tenu des mutations rapides des technologies utilisant des LED, il a été demandé à l'Anses de procéder à la mise à jour de sa précédente expertise, réalisée en 2010, portant sur les effets sanitaires des systèmes d'éclairage à LED.

La demande porte sur l'évaluation des risques liés à l'exposition aux systèmes à LED pour la population générale et les professionnels, en distinguant les différents types d'application des systèmes d'éclairage ou objets en disposant (éclairage domestique, usages professionnels, phares de véhicules, jouets, écrans, etc.) et en prenant en compte des situations réelles d'exposition.

Cette évaluation doit notamment permettre de mettre en perspective les risques spécifiquement liés à la lumière bleue (potentiellement plus présente dans les LED que dans les autres systèmes d'éclairage) et les risques généraux d'éblouissement existant également avec les autres technologies d'éclairage.

Dans le cadre de ces travaux d'expertise, il était également demandé d'analyser le cadre normatif existant et de proposer des améliorations.

Enfin, il a été demandé d'examiner les éventuels risques pour l'environnement que pourraient induire ces systèmes.

Le déploiement des technologies à LED pose aussi la question des éventuelles conséquences sur la disponibilité des ressources rares utilisées pour les produire, ainsi que celle de la gestion des déchets issus des LED. Ces deux questions n'entrant pas directement dans le champ d'expertise de l'agence, elles ont été écartées du cadre de cette saisine.

1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'Anses a confié au groupe de travail (GT) intitulé « effets sanitaires des systèmes utilisant des LED », rattaché au comité d'experts spécialisé (CES) « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » l'instruction de cette saisine. La première réunion du groupe de travail s'est tenue en septembre 2015.

Les travaux d'expertise ont été soumis régulièrement au CES, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

La réalisation des travaux s'est principalement appuyée sur la synthèse et l'analyse critique des données publiées dans la littérature (articles scientifiques, rapports, etc.).

Le groupe de travail a également auditionné des experts et personnalités extérieures susceptibles d'apporter des informations et des données complémentaires utiles pour l'expertise (contexte, effets sanitaires, etc.).

Une revue des travaux réalisés par des agences ou autorités nationales dans les domaines de la sécurité sanitaire a été conduite pour connaître les travaux mis en œuvre à l'étranger et les effets sanitaires particulièrement étudiés.

Une convention de recherche et de développement (CRD) a été établie entre l'Anses et l'Institut National de la Consommation (INC) afin de procéder à une étude comparative des différents éclairages disponibles sur le marché.

Une seconde étude a été mise en place avec le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) afin de caractériser l'exposition de la population aux différents éclairages artificiels et systèmes à LED en développant notamment des scénarios d'exposition pour des populations ciblées.

Une troisième étude portant sur l'évaluation des dispositifs de protection contre la lumiére bleue destinés au grand public a été menée par le CSTB.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été adoptés par le CES le 23 novembre 2018.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) » avec pour objectif de respecter les points suivants : compétence, indépendance, transparence et traçabilité.

1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet de l'agence (www.anses.fr).

2 Évolutions technologiques des systèmes à LED et du cadre réglementaire

2.1 Définitions, applications et utilisation des LED en France

Grandeurs physiques

Le Tableau 1 ci-dessous rappelle les principales grandeurs physiques utilisées dans le domaine de l'éclairage et dans ce présent rapport.

Tableau 1 : définition des principales grandeurs mesurées

Grandeur	Unité	Descriptions
Luminance (*L*)	Luminance exprimée en candela par mètre carré (cd/m²)	Quantité de lumière visible émise par une surface lumineuse ou un objet, par exemple la luminance d'un écran d'ordinateur est de 200 cd/m²
Éclairement *(E)*	Éclairement lumineux exprimé en Lux (lx)	Quantité de lumière reçue sur une surface. Exemple : 500 lux sur un bureau
Température de couleur *(T)*	Kelvin (K)	Précise la teinte d'une lumière blanche. Une lumière chaude aura une basse température (couleur qui tire sur le jaune, T < 3 000 K), une lumière froide une haute température (couleur qui tire sur le bleu, T > 5 000 K)
Indice de rendu de couleur	Sans unité	Capacité d'une lumière à rendre compte de la couleur des objets de manière fidèle. Une lumière très fidèle aura un IRC de 100, une lumière de qualité moyenne, un IRC inférieur à 80
Efficacité lumineuse	Lumen par Watt (lm/W)	Définit le rendement énergétique d'une source de lumière

Température de couleur

Le choix d'une source d'éclairage à LED nécessite de maîtriser la notion de « température de couleur ». La température de couleur d'une lumière blanche permet de figurer sa teinte, plus ou moins chaude ou froide. Conventionnellement, la « température de couleur proximale T_{cp} » d'une source de lumière blanche est la température du radiateur de Planck dont le rayonnement possède la chromaticité la plus voisine de celle de la source considérée (Norme NF X08-017, Juin 2016). Elle s'exprime en Kelvin (K).

- Une lumière blanche dont la température de couleur est inférieure à 3 000 K paraît dorée ou rosée, elle est perçue « chaude ».
- Une lumière blanche dont la température de couleur est située dans la fourchette 4 000 K à 5 500 K est perçue « neutre ».
- Une lumière blanche dont la température de couleur est supérieure à 6 000 K paraît très légèrement bleutée ; elle est perçue « froide ».

Attention, la terminologie « couleur blanc chaud » ou « couleur blanc froid » prête facilement à confusion. Plus la température de couleur augmente, plus la teinte est perçue « froide ».

La température de couleur reflète uniquement la couleur perçue de la lumière, et n'informe en rien sur son spectre ou sur sa qualité.

Les lampes à incandescence et les lampes halogènes ont une température de couleur d'environ 2 700 à 2 900 K et produisent une lumière chaude, à spectre continu et régulier.

Les lampes fluocompactes existent en plusieurs nuances de blanc, selon que la température de couleur est basse, moyenne ou élevée. Leur spectre est discontinu et présente de nombreuses raies.

Les LED blanches sont proposées dans une gamme de température de couleur donnant une grande variété de nuances de blanc. Leur spectre est continu, le plus souvent limité et bimodal.

La lumière du jour, quant à elle, présente un spectre continu (*cf.* figure ci-dessous), de profil caractéristique, qui varie selon l'heure de la journée, l'état du ciel et de l'ensoleillement, et la saison. La lumière en provenance du ciel, notamment au zénith, est riche en courtes longueurs d'ondes, sa température de couleur est nettement supérieure à 6 500 K. Lorsque le soleil est bas sur l'horizon, le spectre est riche en grandes longueurs d'onde et la température de couleur proche de 4 000 K. Par temps couvert, le spectre de la lumière est équilibré, la température de couleur est située entre 5 000 K et 6 500 K (*cf.* Figure 1).

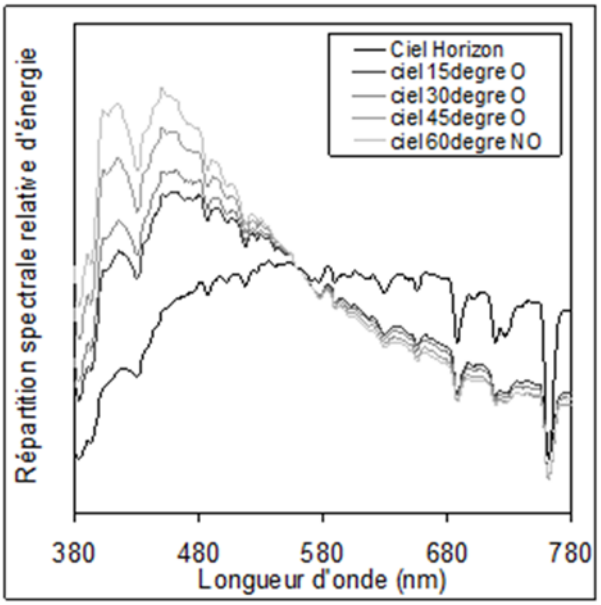


Figure 1 : répartition spectrale d'énergie de la lumière du jour

Mesures du ciel en direction de l'ouest le 20/12/07 au-dessus de Paris, normalisées à 560 nm.

Le retrait du marché des lampes à incandescence a été planifié par deux règlements européens relatifs à l'éco-conception des lampes. Le règlement (CE) 244-2009[27] prévoyait initialement le retrait de toutes les lampes halogènes et de toutes les lampes ayant une classe d'efficacité d'énergie inférieure à B[28] pour 2016. Cette échéance a été modifiée par le

[27] Règlement (CE) n° 244/2009 de la Commission du 18 mars 2009 mettant en œuvre la directive 2005/32/CE du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les exigences relatives à l'écoconception des lampes à usage domestique non dirigées.

[28] Les appareils sont classés en fonction de leur efficacité énergétique sur une échelle de lettres et de couleurs. Les classes énergétiques vont de A+++ (vert, le plus efficace) à D (rouge, le moins efficace).

règlement (UE) 2015/1428 du 25 août 2015[29] de la Commission européenne, qui l'a décalée au 1er septembre 2018. Comme évqoué précédemment, les domaines d'application des systèmes à LED se sont élargis et concernent de nombreuses applications présentées dans la partie qui suit.

2.1.1 Les applications des LED

Les LED sont utilisées dans divers domaines d'application tels que l'automobile, le rétro-éclairage, l'éclairage général, la signalisation, *etc*. Du fait de l'évolution de cette technologie, de nouvelles applications apparaissent comme par exemple des utilisations dans le secteur de la santé (par exemple la luminothérapie).

Les différents types d'applications, répertoriés par le groupe de travail, sont réprésentés dans la Figure 2 ci-dessous. Les pricnipales grandes catégories d'applications sont les suivantes :

- l'éclairage (domestique, extérieur, professionnel, etc.) ;
- les usages professionnels ;
- les écrans ;
- l'automobile ;
- la signalisation ;
- la photographie ;
- la transmission de données ;
- les dispositifs médicaux ;
- Autres (objets de décoration, jouets, vêtements, chaussures, etc.).

[29] Règlement (UE) 2015/1428 de la Commission du 25 août 2015 modifiant le Règlement (CE) nº 244/2009 de la Commission en ce qui concerne les exigences relatives à l'écoconception des lampes à usage domestique non dirigées et le Règlement (CE) nº 245/2009 de la Commission en ce qui concerne les exigences en matière d'écoconception applicables aux lampes fluorescentes sans ballast intégré, aux lampes à décharge à haute intensité, ainsi qu'aux ballasts et aux luminaires qui peuvent faire fonctionner ces lampes, et abrogeant la directive 2000/55/CE du Parlement européen et du Conseil et le Règlement (UE) nº 1194/2012 de la Commission en ce qui concerne les exigences relatives à l'écoconception des lampes dirigées, des lampes à diodes électroluminescentes et des équipements correspondants.

Figure 2 : les différents types d'applications des LED par catégorie

L'éclairage général est le segment ayant rapporté le plus haut chiffre d'affaire en 2013 du fait du développement des ampoules et luminaires à LED. Dans le domaine de l'éclairage général, c'est le secteur de l'éclairage domestique qui est aujourd'hui le plus équipé en lampes à LED. Cependant, dans le secteur professionnel, les LED sont également de plus en plus utilisées pour les bureaux, les hôtels, les hôpitaux et les magasins. Les LED à haute luminosité constituent la technologie la plus utilisée (magasins, enseignes et extérieur).

Dans le secteur automobile, les LED sont utilisées pour l'éclairage intérieur et extérieur. Les LED à haute luminosité sont utilisées pour l'ensemble des feux (phares, feux arrière,…). Bien que ces LED à haute luminosité soient aujourd'hui les plus utilisées, les OLED (LED organiques) devraient l'être de plus en plus notamment pour l'éclairage de l'habitacle.

Le rétro-éclairage concerne les écrans d'ordinateurs, de tablettes, de téléphones mobiles et de téléviseurs. Les LED basiques peuvent également être utilisées pour ces applications, mais elles devraient être remplacées au fur et à mesure par les OLED qui ont une structure plus simple.

Au-delà de l'utilisation pour le rétro-éclairage des écrans, les LED sont utilisées pour le flash et l'affichage des appareils photo des téléphones mobiles. Les LED à haute luminosité sont couramment utilisées dans ce cas, car elles ont la capacité de produire une lumière vive avec peu d'énergie électrique. Cependant, là aussi, les OLED devraient se répandre de plus en plus.

Enfin, la signalisation est un domaine d'application important des LED.

2.1.2 Les différentes technologies des LED

Les données présentées dans cette section sont issus d'un rapport d'étude de la société AlliedMarket[30] (2016). Les différentes technologies LED, présentées ci-après et aujourd'hui utilisées sont les suivantes :

- LED basiques ;
- LED haute luminosité (HB-LED) ;
- LED Organiques (O-LED) ;
- LED ultraviolet (UV-LED) ;
- et LED polymère.

Par ailleurs, les applications sont subdivisées comme suit :

- éclairage intérieur domestique ;
- éclairage d'ambiance ou décorative (intérieur) ;
- éclairage intérieur professionnel ;
- éclairage de sécurité ;
- éclairage scénographique ;
- éclairage extérieur ;
- usages professionnels autres que l'éclairage ;
- éclairage portatif et mobile ;
- rétro-éclairage d'écrans ;
- automobile ;
- affichage et signalisation ;
- photographie ;

[30] https://www.alliedmarketresearch.com/LED-light-emitting-diode-market

- aide à la lecture ;
- transmission de données ;
- dispositif esthétique, médical ou paramédical ;
- Autres applications moins décrites.

LED basiques

Les LED basiques sont sur le marché depuis un long moment. Ce type de LED a un nombre d'applications limité. La simplicité de son installation constitue le principal avantage de cette technologie. Leur taille est comprise entre 3 et 4 mm l'intensité qu'elles peuvent porter va de 15 à 25 mA.

Elles sont principalement utilisées dans la signalisation et l'éclairage. On les retrouve également dans les claviers de téléphone mobile et le rétro-éclairage des écrans, qui ne nécessitent pas l'emploi de hautes luminosités.
Ce type de LED pourraient se développer dans l'éclairage général, puis dans l'automobile. En revanche en ce qui concerne le marché du rétro-éclairage, les LED basiques vont être de moins en moins utilisées au profit des LED organiques qui présentent une meilleure efficacité.

LED à haute luminosité (HB LED)

Les LED à haute luminosité sont présentes sur le marché depuis environ une dizaine d'années. En raison de la diminution de son prix mais aussi de sa capacité à générer différentes couleurs, cette technologie est largement utilisée dans l'affichage. Les LED à haute luminosité offrent une luminance de 5 à 30 lm, quand certaines « à ultra haute luminosité » peuvent aller jusqu'à 100 lm.

Elles sont utilisées dans diverses applications comme les téléphones mobiles, les panneaux d'affichage et l'automobile. En raison de leur forte luminosité, ces LED sont également utilisées en signalisation et signalétique routière.

LED Organique (OLED)

Même si elles reposent sur le même principe de fonctionnement que les LED classiques, les LED organiques (OLED) s'avèrent différentes en de nombreux points, ce sont notamment des sources plus étendues (non ponctuelles).

Le fonctionnement des OLED repose sur le même principe que celui des LED, c'est à dire sur le phénomène d'électroluminescence. La diode est formée à partir de semi-conducteurs, mais contenant de l'oxygène, du carbone, de l'hydrogène et des atomes d'azote, c'est pour cela que l'on parle de LED organique. L'émission de lumière résulte de l'injection de charges électriques dans une couche de matière organique. À l'intérieur de la couche émettrice, un couple électron-trou est à l'origine de l'émission d'un photon.

La structure de base d'une OLED comporte quatre couches :

- le substrat transparent en plastique (PET) ou en verre : c'est le support de la diode ;
- l'anode transparente crée les défauts d'électrons (les trous) lors du passage du courant électrique : elle est faite d'oxyde d'indium-étain (ITO) ;
- la cathode métallique constitue la couche émettrice d'électrons : elle est composée principalement de métaux comme l'aluminium, le calcium ou le magnésium ;
- la couche conductrice organique prise entre l'anode et la cathode.

La flexibilité de ces matériaux permet notamment de les utiliser pour la construction d'un écran souple.

Cette technologie est utile pour la création d'affichages numériques pour différentes applications comme la télévision ou les téléphones mobiles. Par rapport aux télévisions utilisant la technologie LCD / LCD LED, un modèle OLED ne nécessite pas de rétro-

éclairage de la dalle, ce qui permet notamment de réduire l'épaisseur de l'écran tout en optimisant la qualité du rendu des couleurs.

Pour le moment, le développement des OLED est limité en raison du faible rendement de ces diodes, elles présentent environ 20 à 50 lm/W contre 90 à 100 lm/W pour les autres technologies.

Cette technologie est reconnue comme étant plus légère et plus fine que les LED classique ou les systèmes LCD et ne nécessite pas de rétro-éclairage.

LED ultraviolet (UV-LED)

Comme le nom de cette technologie l'indique, la lumière émise par les UV-LED est dans l'ultraviolet, non visible. Les UV-LED sont notamment utilisées pour remplacer d'anciennes technologies utilisant du mercure pour leur rayonnement en UV.

Les UV-LED ont un nombre d'applications limité : il est possible d'évoquer les capteurs optiques, la vérification d'identité, les codes-barres, la stérilisation de surfaces ou de l'eau, la détection de fluides corporels, la médecine légale, la détection de drogues, etc.

Le marché actuel est guidé par la sécurité de cette technologie comparée aux lampes à mercure utilisées pour générer la lumière UV.

L'automobile pourrait également utiliser cette technologie dans les prochaines années, par exemple pour le séchage de peintures UV pour les carrosseries.

LED Polymère (PLED)

Les LED polymères (PLED) sont principalement développées en utilisant un semi-conducteur inorganique. Cette technologie est encore à l'étape de la recherche et du développement dans les différentes régions du monde.

Il s'agit d'une technologie émergente qui possède une plus grande flexibilité et une plus grande résistance. Les LED polymères peuvent être utilisées afin de former des films transparent conducteur, dont les applications peuvent se retrouver en affichage électronique, dans le but d'augmenter la flexibilité. Cette technologie pourrait être utilisée dans les hôpitaux en tant que source lumineuse pour le matériel micronisé, ou pour les ordinateurs, tablettes et téléphones mobiles.

En 2013, l'application qui a généré le plus de revenus est l'affichage pour la téléphonie mobile. Avec l'augmentation de la fabrication d'écrans flexibles, le marché va s'accélérer. Cependant, le secteur qui devrait utiliser de plus en plus de lampes à LED est celui de l'automobile.

2.1.3 Utilisation des LED en France

La consommation annuelle d'énergie liée à l'éclairage en France est de 56 TWh (Ademe, 2017), soit plus de 10 % de la consommation nationale totale d'électricité. L'éclairage représente 19 % de la consommation électrique mondiale et environ 6 % des émissions de gaz à effet de serre (Ademe, 2017).

Le chiffre d'affaire de l'éclairage domestique en France a évolué de 288 millions (M) d'euros en 2007, il atteint 432 M€ en 2012, alors même que les volumes de ventes chutent de 7,3 % sur la même période : 114 M de pièces en 2012 pour 180 M en 2008 (source : Gfk).

Cela reflète la modification du marché : la durée de vie des lampes ayant augmenté, mécaniquement les ventes ont baissé ; le prix moyen a cependant augmenté : si le consommateur trouvait auparavant des ampoules à incandescence à moins de 1 €, depuis l'arrêt de leur commercialisation, les modèles (halogènes) les moins chers avoisinent les 3 € (pour un prix moyen de 5 €).

Les 114 M de pièces écoulées en 2012 se répartissaient de la sorte :

- LED : 9,3 % ;
- Fluo-compactes : 31,5 % ;

- Halogènes : 48,2 %.

La part des LED dans l'éclairage domestique en France est plus faible qu'en Europe. Le faible coût de l'électricité française minimiserait le retour sur investissement et les consommateurs se tourneraient plus volontiers vers des technologies moins coûteuses à l'achat.

Comme l'illustre la figure ci-dessous, les LED existent désormais sous toutes les formes (*cf.* Figure 3 et Figure 4), avec des angles de diffusion réduit ou large.

Figure 3 : différentes formes de lampes à LED

De même, elles existent montées sur tous types de culots :

Figure 4 : différents types de culots de lampes à LED

Selon une étude de marché réalisée par l'Institut national de la consommation (INC, 2016), il existe 14 marques principales d'éclairage à LED commercialisées en France. Le prix moyen des ampoules à LED est de 11 euros ; le flux lumineux le plus proposé est de 470 lm (pour une puissance électrique équivalente de 4 W), plus de 80 % de l'offre correspond à des lampes de couleur chaude, et les lampes à culot à vis E27 sont les plus vendues.

2.2 Caractérisation de lampes pour l'éclairage domestique

Une campagne de mesure visant à comparer les caractéristiques physiques des lampes à LED à d'autres technologies d'éclairage disponibles sur le marché français (lampes fluocompactes, lampes halogènes) a été financée par l'Anses, l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) et l'INC. Un échantillon de 7 lampes

halogènes, 7 lampes fluocompactes et 10 lampes à LED, couvrant ainsi les différentes technologies d'éclairage domestique disponibles sur le marché, a été constitué[31].

La température de couleur, la luminance, l'indice de rendu de couleur et l'efficacité lumineuse ont été mesurés. Les résultats de ces tests sont présentés ci-dessous.

Température de couleur

Les LED de l'échantillon testé présentent des températures de couleur inférieures à 3 000 K, sauf pour deux d'entres elles, beaucoup plus froides, entre 6 000 et 7 000 K (*cf.* Figure 5). Les résultats montrent que les températures de couleur des lampes à LED disponibles sur le marché semblent désormais moins froides qu'auparavant et que le pic de lumière bleue tend à diminuer en intensité relative par rapport au reste du spectre. En effet, en 2010, les données recensées lors de l'expertise sur les risques liés aux éclairages à LED montraient que la température de couleur des lampes à LED était dans la plupart des cas froide (Anses, 2010).

Les lampes halogènes testées présentent elles, par nature, des lumières « chaudes ».

Les lampes fluocompactes présentent autant de lumières « froides » que de lumières « chaudes ».

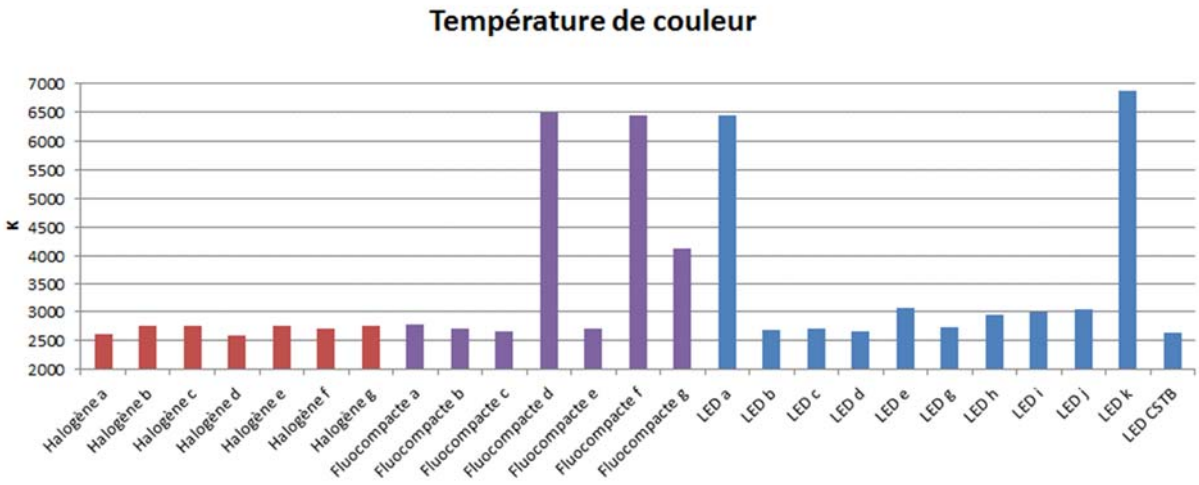


Figure 5 : température de couleur des lampes testées (échantillon pour Anses, Ademe, INC)

Luminance

La luminance, mesurée en vision directe d'une source lumineuse à courte distance, exprimée en cd/m², permet d'évaluer le niveau d'éblouissement que peut provoquer cette source de lumière. Les lampes à LED testées présentent des niveaux de luminance assez disparates, certaines étant très éblouissantes, notamment dans les spots à LED.

Les lampes halogènes sont, elles, souvent éblouissantes, alors que les lampes fluocompactes le sont moins (*cf.* Figure 6).

[31] Les références incluent des lampes dirigées (de type « spot ») et non-dirigées (de type « ampoule ») ; les lampes ne sont pas équipées de contrôle électronique de variation de couleur ou de flux ; les lampes émettent de la lumière blanche et, pour la plupart, de teinte dite chaude ; dans l'échantillon distributeurs se retrouvent 10 références de marques nationales, 8 références d'enseigne de bricolage, 6 marques de distributeurs.

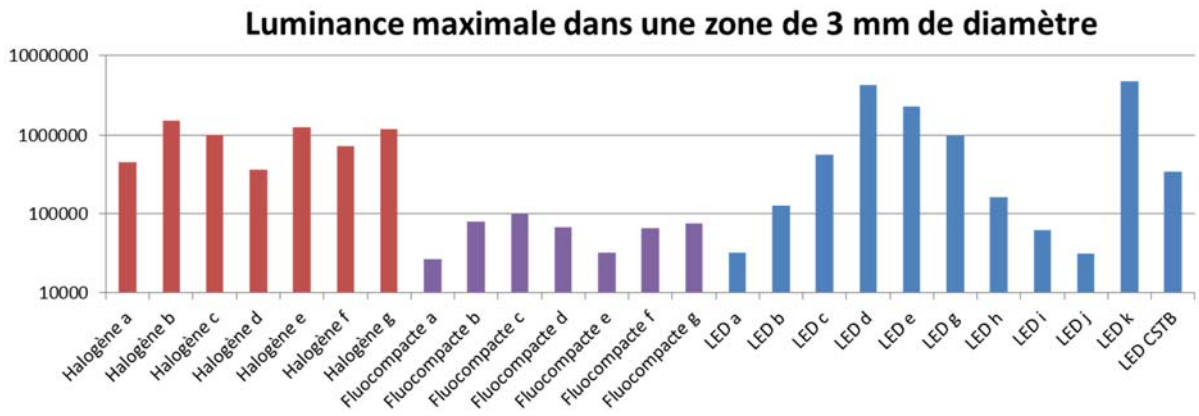


Figure 6 : luminance maximale des lampes testées

Indice de rendu de couleur

L'indice de rendu de couleur représente la capacité d'une lumière à rendre compte d'une couleur de manière fidèle. Un IRC égal à 100 désigne une lumière optimale, et il est admis qu'un IRC est jugé acceptable au-dessus de 80. Les lampes à LED ne sont pas encore à ce jour au niveau des lampes halogènes, dont les IRC avoisinent 100, mais présentent des performances similaires aux lampes flucompactes, avec des IRC mesurés parfois au-dessus de 80. L'une d'entre elles a été mesurée à 91 (*cf.* Figure 7).

Par rapport à la précédente expertise de l'Anses (Anses 2010), la technologie à LED propose aujourd'hui une couleur de lumière de meilleure qualité.

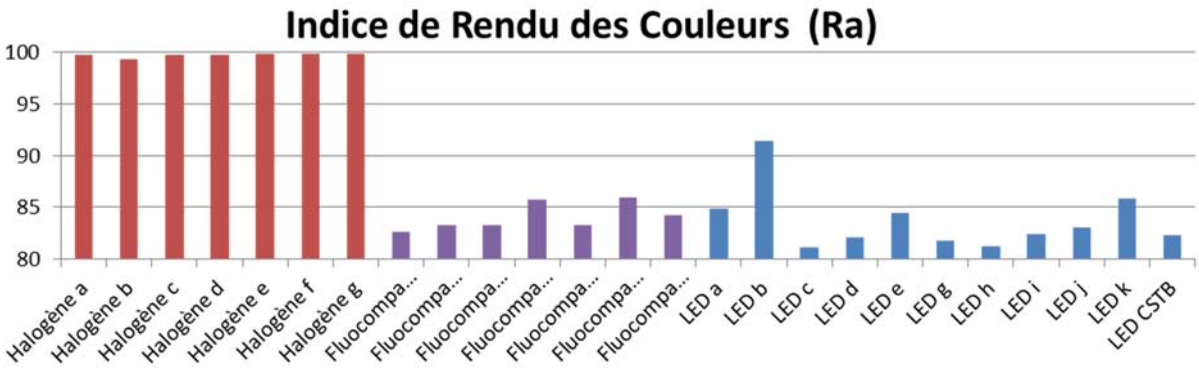


Figure 7 : indice de rendu de couleur des lampes testées

Efficacité lumineuse

L'efficacité lumineuse exprimée en lm/W est toujours plus favorable pour les technologies à LED. Les lampes halogènes ont une efficacité lumineuse allant de 8 à 14 lm/W (11 lm/W en moyenne). Les lampes fluocompactes ont une efficacité lumineuse allant de 47 à 70 lm/W (62 lm/W en moyenne). Les LED ont une efficacité lumineuse allant de 70 à 113 lm/W (87 lm/W en moyenne).

Groupe de risque photobiologique

Le groupe de risque photobiologique (*cf.* rapport Anses 2010) des différentes lampes de l'échantillon a été déterminé selon la procédure technique décrite dans la norme NF EN 62471 de sécurité photobiologique (voir 2.3.2).

Les groupes de risques photobiologiques mesurés sont tous soit égal à 0 (sans risque), soit inférieur à 1 (risque faible) (*cf.* Figure 8). En 2010, certaines des LED testées par l'Anses et accessibles au grand public avaient été classées dans le groupe de risque 2 (risque modéré).

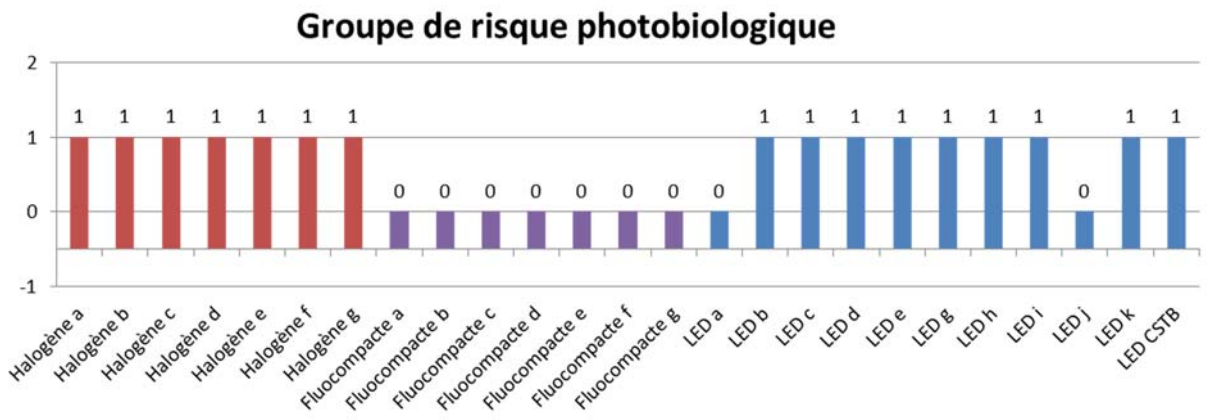


Figure 8 : groupe de risque photobiologique des lampes testées

Modulation temporelle de la lumière

La modulation temporelle de la lumière à 100 Hz est toujours mesurable sur les lampes halogènes et lampes fluocompactes mais son taux de modulation est toujours inférieur à 8 % (d'après la recommandation de l'IEEE[32] P1789 (2015), le risque sanitaire est considéré comme faible si le pourcentage est inférieur à 8 %). Les résultats pour la technologie LED sont très disparates, avec des LED qui ne présentent aucune modulation et d'autres qui présentent des pourcentages de modulation élevés, entre 15 et 25 % (*cf.* Figure 9).

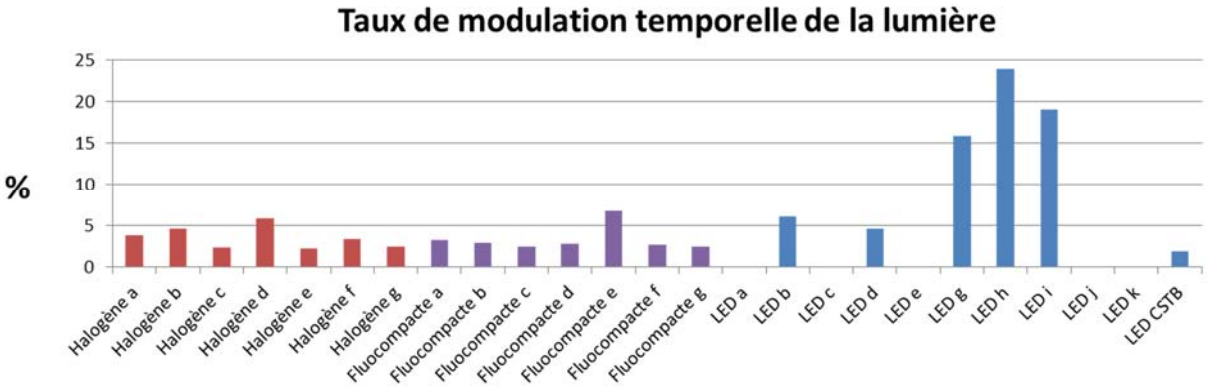


Figure 9 : pourcentage de modulation temporelle des lampes testées

Émission de champs électromagnétiques

Les lampes halogènes n'émettent pas de champ électromagnétique autre que celui lié au passage du courant (50 Hz) dans le filament.

[32] IEEE : *Institute of Electrical and Electronics Engineers* – Institut des ingénieurs en électricité et électonique.

L'exposition aux champs électromagnétiques émis par la plupart des lampes à LED testées est négligeable, seules deux lampes émettent un champ électrique d'environ 6 V/m à 82 kHz pour l'une et d'environ 3 V/m à 110 kHz pour l'autre, à une distance de 30 cm.

Les lampes fluocompactes émettent, elles, des champs électromagnétiques dans une bande de fréquence située entre 40 et 45 kHz à des intensités toujours inférieures à 15 V/m à la distance de 30 cm, pour le champ électrique. Ces niveaux d'exposition sont très inférieurs aux valeurs limites d'exposition (pour la population générale) recommandées par la Commission européenne (Recommandation de l'Union européenne n° 1999/519/CE).

2.3 Évolutions normatives et réglementaires

Depuis la parution en 2010 du rapport d'expertise de l'Anses sur les LED, de nouvelles normes, ou des compléments de normes existantes, ont été publiés en lien avec des volets sanitaires. La synthèse présentée ci-dessous reprend les principales évolutions des recommandations, normes et réglementations portant sur quatre catégories d'effets sanitaires : éblouissement, sécurité photobiologique (endommagement de la rétine par la lumière bleue), effets de la modulation temporelle et effets non-visuels.

2.3.1 Concernant l'éblouissement

Les normes concernant l'éblouissement n'ont pas évolué depuis 2010. L'industrie de l'éclairage utilise les mêmes indices normatifs d'éblouissement définis par la Commission internationale de l'éclairage (CIE). Ces indices sont l'UGR (*Unified Glare rating*) en éclairage intérieur, le TI (*Threshold increment*) et le GR (*Glare rating*) en éclairage extérieur. Les conditions d'application de ces indices ne sont pas toujours satisfaites pour les LED, notamment lorsqu'une lampe ou un luminaire est composé d'un module LED de petite taille ou d'une matrice de LED. L'indice UGR_{small} introduit par la CIE en 2002, qui peut être utilisé dans le cas de l'éblouissement par des petites sources, n'est pas entré dans les normes et n'est pas utilisé par l'industrie, bien qu'il semble adapté à certains types de luminaires et lampes à LED. Le cas de l'éblouissement crée par des matrices de LED fait l'objet de travaux à la CIE depuis 2013 et n'a pas encore abouti à des recommandations.

La limitation de l'éblouissement est un des aspects fondamentaux de la conception des installations d'éclairage et a toujours figuré dans les normes d'éclairagisme. Les normes européennes d'éclairagisme concernent l'éclairage professionnel (lieux de travail, espaces publics, installation sportives). Les recommandations en matière de limitation de l'éblouissement au sein de ces normes sont toujours exprimées sur la base des indices UGR, TI et GR. En France, la norme d'ergonomie visuelle (NF X 35-103), remise à jour en 2016, est adaptée à l'éclairage des lieux de travail intérieurs par des LED. Les recommandations de limitation de l'éblouissement sont exprimées en matière de contrastes de luminance et prennent en compte de nombreux facteurs comme l'âge ou la tâche visuelle.

La seule réglementation française concernant l'éblouissement produit par l'éclairage général est l'article R4223-8 du Code du Travail concernant les obligations de l'employeur à propos de l'éclairage des lieux de travail. Une disposition impose de limiter l'éblouissement et la fatigue visuelle des travailleurs, provoqués par des surfaces à forte luminance ou par des rapports de luminance trop importants entre surfaces voisines. Aucun critère quantitatif n'est cependant donné.

2.3.2 Concernant la sécurité photobiologique (risque pour la rétine lié à l'exposition à la lumière bleue)

Valeurs limites d'exposition

De nouvelles recommandations de la Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants, l'Icnirp[33], sur les rayonnements optiques visibles et infrarouges ont été publiées en 2013. Les évolutions sont mineures en ce qui concerne le risque rétinien lié à la lumière bleue, qui reste le seul risque photobiologique associé aux LED dans la liste des risques définis par ces recommandations. Les valeurs limites d'exposition à la lumière bleue, proposées en 1997, sont inchangées et concernent une exposition aiguë (exposition unique, continue et prolongée). Au regard des connaissances actuelles, les valeurs limites d'exposition ne permettent pas d'évaluer le risque de phototoxicité lié à une exposition chronique quotidienne. Cela n'exclut donc pas que des expositions répétées et prolongées puissent induire, à long terme, un risque cumulé potentiellement supérieur à celui évalué sur la base des valeurs limites actuelles. Par ailleurs, les valeurs limites sont basées sur un diamètre pupillaire de 3 mm. Or la diminution du réflexe de contraction pupillaire (quand la pupille est dilatée), lorsque la lumière a une faible excitation mélanopique, ce qui est le cas des LED, n'est pas prise en compte par l'Icnirp. L'Icnirp définit néanmoins une population sensible à la lumière bleue de courte longueur d'onde : les aphaques, les pseudophaques ainsi que les enfants de 2 ans et moins. Un spectre d'action spécifique (courbe A définie dans la norme NF EN 62471) est recommandé par l'Icnirp pour évaluer l'exposition de cette population. On note néanmoins que la maturation du cristallin, qui n'est pas achevé à 2 ans, se poursuit jusqu'à l'âge adulte.

Textes normatifs

Les normes de sécurité photobiologique, comme la norme NF EN 62471, sont également alignées avec les recommandations de l'Icnirp et se réfèrent donc aux valeurs limites proposées par cet organisme. Ces normes proposent une classification des lampes en groupes de risque : RG0 : « sans risque », RG1 : « risque faible », RG2 : « risque modéré ». Elles ne prennent pas en compte des situations d'exposition particulières (par exemple expositions chroniques répétées), ni les personnes sensibles (pas de prise en compte de courbe de sensibilité des enfants à la lumière bleue recommandée par l'Icnirp, pas de prise en compte de pathologies oculaires).

Depuis l'expertise réalisée par l'Anses en 2010, le rapport technique IEC TR 62778:2014 a été publié par l'IEC pour que les industriels puissent mieux évaluer le groupe de risque photobiologique dans le cas de la lumière bleue. Ce document est utile pour les fabricants puisqu'il définit un protocole très précis d'évaluation, basé sur une mesure à 200 mm de distance, associé à des limites de luminance et d'éclairement protectrices pour qu'un produit soit classé en groupe de risque 0 ou 1. Il remplace la notion de groupe de risque 2 par les notions d'éclairement seuil et de distance, seuil correspondant à la frontière entre les groupes de risques 1 et 2. Des conditions de transfert de groupe de risque entre composant et produit final sont données.

Le rapport technique IEC TR 62778 :2014 a acquis une valeur normative et réglementaire puisqu'il est référencé comme méthode de base dans les normes de sécurité des produits d'éclairage général (lampes et luminaires), normes attestant une conformité avec la directive Basse tension (norme harmonisée). Depuis 2015, toutes les normes européennes relatives à la sécurité des produits d'éclairage à LED incluent des exigences de sécurité photobiologique, afin de limiter les effets possibles du rayonnement sur l'œil et la peau. Des prescriptions obligatoires de limitation et d'affichage de sécurité photobiologique (pour les luminaires appartenant au groupe de risque 2) pour les lampes et luminaires d'éclairage général sont formulées dans ces normes. Les lampes destinées à cet usage doivent appartenir aux groupes de risque « 0 illimité » ou « 1 illimité » (l'association de plusieurs lampes dans un luminaire ne modifie pas le groupe de risque associé au luminaire). Les

[33] *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* – Commission de protection contre les rayonnements non ionisants.

luminaires classés dans le groupe de risque 2 doivent être associés à un marquage de la distance seuil et à la mention « ne pas regarder fixement la source ».

Textes réglementaires

En ce qui concerne la population générale, la Directive basse tension (2014/35/UE) a pour objectif de garantir que le matériel électrique se trouvant sur le marché satisfait aux exigences garantissant un niveau élevé de protection de la santé et de la sécurité des personnes. Lorsque ces conditions sont remplies, les fabricants établissent une déclaration de conformité et apposent le marquage CE. Le matériel électrique conforme à des normes harmonisées de l'Union européenne est présumé conforme aux objectifs de sécurité de la Directive basse tension.

Dans l'éclairage automobile (feux extérieurs), il n'existe pas de prescriptions de sécurité photobiologique visant à limiter l'émission ou l'exposition des personnes. Il existe à présent dans l'éclairage automobile une technologie basée sur l'utilisation de laser. L'évaluation de ces projecteurs est susceptible de donner des résultats très différents selon la norme utilisée (norme laser ou norme de sécurité photobiologique). Il est nécessaire d'utiliser les deux normes pour l'évaluation des niveaux d'émission de ces sources.

Le domaine des éclairages portatifs (lampes torches, lampes frontales) reste en-dehors des normes de sécurité des produits d'éclairage général. Ils utilisent pourtant des sources LED pouvant atteindre des niveaux de flux très élevés.

Le cas des jouets intégrant des LED n'est pas suffisamment couvert par la Directive européenne sur la sécurité des jouets (2009/48/CE), car elle fait référence, pour les risques liés à la santé, à la norme de sécurité laser (IEC 608251-1), inadaptée aux éclairages à LED car ne considèrant pas la sensibilité plus élevée des enfants à la lumière bleue.

La directive européenne ROA de 2006[34] concernant l'exposition des travailleurs aux rayonnements optiques artificiels inclut le risque lié à l'exposition à la lumière bleue. Pour ce risque particulier, elle est alignée sur les précédentes recommandations de l'Icnirp. En France, la directive ROA a été transposée par décret en 2010[35]. Un arrêté publié en 2016[36] définit les modalités d'évaluation de risque, en s'appuyant sur des normes européennes d'exposition des personnes aux rayonnements optiques.

2.3.3 Concernant la modulation temporelle de la lumière

Jusqu'à 2015, il n'existait que des normes anciennes et incomplètes décrivant les phénomènes liés à la modulation temporelle de la lumière. De nouvelles normes et documents techniques ont été élaborés ou remis à jour par la plupart des organismes de normalisation depuis 2015.

Le papillotement

[34] Directive 2006/25/CE du Parlement européen et du Conseil du 5 avril 2006 relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels) (dix-neuvième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE).

[35] Décret n° 2010-750 du 2 juillet 2010 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements optiques artificiels.

[36] Arrêté du 1er mars 2016 relatif aux modalités de l'évaluation des risques résultant de l'exposition aux rayonnements optiques artificiels en milieu de travail.

Dans ces documents récents, le papillotement[37] (*flickering* en anglais) est l'effet le mieux décrit et les indices relatifs à ce phénomène sont très bien établis. En éclairage intérieur, l'indice de visibilité du papillotement (PstLM) est très bien adapté à la quantification de cet effet pour des lampes et des luminaires. Il repose sur des bases scientifiques solides et sa définition est bien établie. Par contre, le domaine de validité de l'indice PstLM est très limité. Ainsi, cet indice n'est pas bien adapté à décrire la visibilité du papillotement des grandes surfaces éclairées par des sources de lumière modulée : plans de travail, murs, plafonds, etc. En vision périphérique, la résolution spatiale du système visuel est plus faible. Pour que le papillotement soit visible, il doit provenir de sources ou de surfaces de plus grande taille. De plus, en vision périphérique, la fréquence critique de fusion[38] est inférieure. Par contre, la sensibilité aux contrastes est plus élevée en vision périphérique qu'en vision centrale. Par conséquent, la visibilité du papillotement de grandes surfaces observées en vision périphérique (écrans, luminaires, plans de travail éclairés par des lumières modulées, etc.) peut paraître plus importante qu'en vision centrale. L'indice PstLM n'est donc pas adapté pour décrire la visibilité du papillotement en vision périphérique.

La fréquence critique de fusion est plus faible en condition de faible éclairement. Ainsi, le papillotement perçu avec des anciennes générations de lampes à décharge en éclairage public n'a jamais été un sujet de controverses, alors que la modulation temporelle de la lumière émise était largement supérieure à celle des lampes utilisées en éclairage intérieur. Les indices de papillotement actuels comme le PstLM ne sont pas adaptés à l'éclairage extérieur en condition de faible éclairement. Il n'existe actuellement pas d'indice dans ce domaine, et *a fortiori* pas de limite définie.

L'effet stroboscopique

La prise en compte de travaux de recherche récents sur l'effet stroboscopique a permis de normaliser un nouvel indice décrivant sa perception lors de mouvements de la main. Il s'agit de l'indice SVM de perception de l'effet stroboscopique qui a été introduit en 2014 et a été rapidement adopté dans la normalisation après 2015. Il manque cependant des études pour valider cet indice, notamment dans d'autres conditions expérimentales que le travail de bureau et le mouvement de la main.

Effet de réseau fantôme

L'effet de réseau fantôme (*phantom array effect*) est une modification de la forme ou de la position d'un objet induit par la modulation de la lumière pour un observateur non statique dans un environnement statique. L'effet de réseau fantôme apparaît notamment lorsque l'œil effectue une saccade visuelle[39] en présence d'une source de lumière modulée dans le champ de vision.

Il n'existe actuellement pas de normes concernant l'effet de réseau fantôme, néanmoins cet effet été décrit par la CIE et l'IEEE.

Effets sanitaires associés à la modulation temporelle de la lumière

Au niveau international

---

[37] Le papillotement est la perception du contraste temporel produit par une source lumineuse immobile émettant de la lumière modulée et placée dans le champ de vision d'un observateur statique.

[38] Lorque l'œil est stimulé par une succession de lumières brèves, il ressent tout d'abord le papillotement, puis, avec l'élévation de la fréquence, il éprouve l'impression d'une luminance stable. La fréquence à laquelle l'œil perçoit une luminance stable est appelée fréquence critique de fusion.

[39] Une saccade oculaire est un bref et rapide mouvement des yeux entre deux positions stables (vitesse variant de 400 à 800 °/s et durée inférieure à 50 ms).

Certains indices ont été construits pour tenter d'agréger les effets visibles (liés à la perception) et les effets sanitaires de la modulation temporelle (indice NM de IEEE 1789, indice CFD de DerLichtPeter par exemple). Aucune étude n'a été menée pour valider ou invalider cette approche globale des phénomènes.

Les normes de sécurité et de performance des produits LED n'incluent à l'heure actuelle aucune limitation de la modulation temporelle de la lumière émise. De plus, les normes relatives aux dispositifs de contrôle et de commande des lampes et luminaires ne garantissent pas la compatibilité et le bon fonctionnement de ces produits avec les systèmes à LED.

La seule norme qui émet des recommandations précises destinées à protéger la santé humaine est la norme américaine IEEE 1789 publiée en 2015. Les recommandations reposent sur une expertise sanitaire incluant des analyses de risques. Cependant, les valeurs limites de cette norme sont fortement contestées par l'industrie car elles lui paraissent trop exigeantes.

Il existe actuellement des lacunes dans les documents normatifs en ce qui concerne les mesures physiques de la modulation temporelle de la lumière. Les conditions de mesures ne sont pas toutes précisées, notamment en ce qui concerne la mesure de la forme d'onde. Il s'agit notamment des fréquences d'échantillonnage des signaux, de la bande passante des équipements, de la géométrie de la mesure, des paramètres et des méthodes utilisés pour effectuer l'analyse spectrale de la forme d'onde (décomposition en composantes fréquentielles de Fourier). L'application numérique des formules de calcul des différents indices mériterait également d'être mieux décrite dans les normes.

Au niveau européen

En ce qui concerne la réglementation européenne, aucun règlement ne fournit à l'heure actuelle de limitation de la modulation temporelle de la lumière des lampes et des luminaires.

Au niveau français

La seule réglementation française concernant la modulation temporelle de l'éclairage général est l'Article R4223-8 du Code du Travail concernant les obligations de l'employeur à propos de l'éclairage des lieux de travail. Une disposition impose que les phénomènes de fluctuation de la lumière ne doivent pas être perceptibles ni provoquer d'effet stroboscopique. Aucun critère quantitatif n'est donné.

2.3.4 Concernant les effets non-visuels

Un effort important a été entrepris par les industriels de l'éclairage pour introduire dans la normalisation les connaissances concernant le système de sensibilité non-visuelle de l'Homme à la lumière, reposant sur l'excitation des cellules ganglionnaires à mélanopsine de la rétine. Ainsi, une courbe de sensibilité de ces cellules a été « normalisée ». Il s'agit de la courbe d'excitation mélanopique, ayant une forme en cloche avec un maximum à 490 nm (note technique de la CIE TN-003 : 2015).

Il n'existe actuellement aucune réglementation portant sur les effets non visuels de la lumière, sauf pour les lampes utilisées en luminothérapie, couvertes par la réglementation relative aux dispositifs médicaux. La technologie LED a en effet remplacé les sources fluorescentes dans les lampes utilisées en luminothérapie.

Au-delà de la luminothérapie, la prise en compte des effets non-visuels de la lumière dans la normalisation a été entreprise par l'industrie pour soutenir le développement commercial de nouvelles offres de produits d'éclairage général basés sur la variation de l'excitation mélanopique. Ces produits sont qualifiés d'éclairages « biodynamiques » en France, une traduction du terme anglais « *human-centric lighting ».*

La CIE a émis officiellement des réserves en 2015 (*CIE statement on non visual effects of light*) contre les revendications abusives de l'éclairage dit « biodynamique » (revendications sanitaires non fondées, efficacité et effets indésirables non évalués). Le corpus actuel de

publications scientifiques, examinées par la CIE, ne permet pas de valider à ce jour l'efficacité de cet éclairage « biodynamique » et les bienfaits revendiqués par les industriels et les installateurs. En effet, les variables impliquées dans les mécanismes neuro-physiologiques liés à l'excitation lumineuse et à son influence sur les rythmes circadiens, les performances visuelles, le sommeil et d'autres fonctions métaboliques sont nombreuses, complexes, corrélées et dépendantes des individus. La CIE a souligné l'importance de paramètres tels que le moment de l'exposition, les doses, l'historique des expositions lumineuses antérieures, la phase de l'horloge biologique de l'individu, etc. Parmi les nombreux aspects qui sont à l'heure actuelle mal compris et font l'objet de recherches fondamentales, on peut notamment citer les couplages entre les photorécepteurs participant à la vision et les cellules ganglionnaires à mélanopsine.

3 Effets des lumières riches en lumière bleue et des systèmes à LED sur la santé humaine

3.1 Expertises internationales

Une revue des travaux menés et publiés par des organismes au niveau national et international a été effectuée. Cette revue a permis de prendre connaissance des travaux existants et de comparer les positions internationales sur chaque aspect de la question des effets sanitaires associés à une exposition aux LED. À la date de fin de prise en compte de la bibliographie (avril 2018), 9 avis ou rapports avaient été publiés depuis 2010 ou étaient en cours. Une description succincte des positions rendues publiques à ce jour portant sur les LED et les effets sanitaires associés est proposée ci-dessous.

3.1.1 Comités scientifiques de la commission européenne (Scenihr et Scheer)

Un avis du Comité scientifique européen sur les effets sanitaires émergents et nouvellement identifiés[40] (Scenihr, 2012) portant sur les effets sanitaires des éclairages artificiels a été publié en 2012. Cet avis faisait le point sur les premières données concernant la thématique des éclairages artificiels. Le rapport mettait l'accent sur les effets sanitaires des lampes fluocompactes en évaluant le risque associé aux ultraviolets. Le sujet des effets sanitaires des LED était brièvement abordé.

Le Scheer, le Comité scientifique européen de la santé, de l'environnement et des risques émergents[41], a poursuivi ses travaux sur les LED et a mis en consultation publique, en juillet 2017, un avis préliminaire portant sur les effets potentiels sur la santé humaine des LED. La publication de l'avis et du rapport final a eu lieu le 12 juillet 2018. Le Scheer précise qu'il n'existe pas de preuve d'effet direct lié à l'exposition aux LED dans le cas d'utilisation en conditions normales par la population générale. Il rappelle que les études disponibles chez l'animal (*in vivo* et *in vitro*) montrant des effets sanitaires avaient été réalisées dans des conditions d'exposition non réalistes (forts niveaux). En ce qui concerne la perturbation des rythmes biologiques, le Scheer classe en niveau de preuve faible la perturbation circadienne en lien avec l'exposition aux LED la nuit y compris aux écrans. Il attire cependant l'attention sur la question des effets à long terme, en recommandant de plus amples travaux sur le sujet.

3.1.2 Institut fédéral allemand pour la sécurité et la santé au travail (BAuA)

Le rapport de l'Institut fédéral allemand pour la sécurité et la santé au travail publié en 2013 (BAuA, 2013) n'est disponible qu'en allemand, mais un résumé en anglais est proposé en début de rapport. Il y est décrit une campagne de mesures visant à déterminer le groupe de risque relatif à la phototoxicité selon la norme DIN EN 62471:2009 pour un échantillon de lampes à LED émettant majoritairement dans le spectre visible. Seules 2 LED émettant dans les domaines de l'ultraviolet et de l'infrarouge ont été testées.

---

[40] *Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks* – Comité scientifique européen des risques sanitaires émergents et nouvellement identifiés.

[41] *Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks* – Comité scientifique européen des risques pour la santé, l'environnement et émergents, anciennement Scenihr.

En ce qui concerne les effets photochimiques sur la rétine, les LED examinées ne dépassaient pas le groupe de risque 2. L'échantillon était composé de 34 lampes à LED, 3 lampes torches à LED, 5 lampes à LED et un reflecteur à LED. Aucun des systèmes ne dépassait les valeurs limites d'exposition de l'Icnirp pour les risques liés aux brûlures thermiques de la rétine. Le risque prédominant dans le spectre visible est bien le risque photochimique. Presque toutes les LED qui dépassaient les valeurs limites pour le groupe de risque 0 étaient des LED blanches ou des LED bleues (à l'exception d'une LED verte). Pour certaines LED, le temps maximal d'exposition admissible n'excédait pas 10 secondes. Il est indiqué que dans certains milieux de travail (employés dans l'industrie des LED, installateurs des systèmes d'éclairages, acteurs au théâtre, éclairagistes, *etc.*), la multi-exposition à différents systèmes à LED peut entraîner un dépassement rapide de ce temps maximal admissible de 10 secondes.

3.1.3 Institut national de la santé publique et de l'environnement des Pays Bas (RIVM)

L'institut national de la santé publique et de l'environnement des Pays-Bas a publié un premier rapport en 2014 (RIVM, 2014) sur les effets sur la santé des nouvelles sources de lumière.

Il est constaté dans ce rapport que les tablettes, les smartphones, les téléviseurs à LED, les éclairages à LED et d'autres produits similaires produisent plus de lumière bleue que les sources d'éclairages plus traditionnelles. Selon les auteurs, ces appareils semblent influencer notre horloge biologique lorsqu'ils sont utilisés en soirée ou la nuit. Les effets sur l'horloge biologique sont observés après une exposition de plusieurs heures, sans pouvoir conclure actuellement sur leur nocivité.

Pour ces raisons, et compte tenu de l'augmentation de la disponibilité et de l'usage de ces produits qui émettent des quantités relativement importantes de lumière bleue, l'Institut recommande que d'avantages d'études s'intéressent au moment et à la durée d'utilisation de ces appareils. En complément, les effets de ces expositions devraient être étudiés, notamment après une longue ou une courte durée d'exposition.

L'institut rappelle que les effets de la lumière bleue sur notre horloge biologique sont liés à la sensibilité de nos rythmes « jour-nuit » en particulier pour les courtes longueurs d'ondes (lumière bleue) et que le système circadien régule de nombreux processus, notamment le cycle « sommeil-éveil », les processus liés aux systèmes métabolique et endocrinien. L'institut précise que les effets à long terme liés à la perturbation du système circadien sont connus (notamment l'obésité, les maladies cardiovasculaires et le cancer du sein) et qu'il reste à savoir si la lumière bleue est liée à ces effets.

L'institut national de la santé publique et de l'environnement des Pays-Bas a publié un second rapport, en 2017 (RIVM, 2017), s'intéressant à l'exposition de la population hollandaise aux écrans (smartphone, tablettes, ordinateurs) avant le coucher et aux effets possibles sur le sommeil et la qualité de sommeil. Cette étude s'appuie sur un suivi épidémiologique de 1 600 personnes. Les spectres d'émission des différents écrans ont été caractérisés, puis différents facteurs démographiques ont été associés aux usages des écrans (sexe, âge, chronotype). Les effets d'une exposition aux écrans sur le sommeil ont été ensuite évalués par le relevé de paramètres subjectifs.

De nombreux adultes (58 %) utilisent une tablette, un smartphone ou un ordinateur durant l'heure qui précède le coucher. Ils le font plusieurs fois par semaine ou tous les jours. L'utilisation de ces appareils peu avant l'heure du coucher est associée à une réduction du temps de sommeil et à une mauvaise qualité du sommeil. Seulement 4 % des personnes suivies regardent un écran moins d'une fois par semaine avant le coucher. Cinq pour cent des adultes ne le font jamais. Le fait de regarder la télévision avant d'aller dormir n'est pas associé à des effets sur le sommeil. Lors de jeux ou lors de visionnage de films, en général,

moins de lumière bleue est transmise par rapport à des activités comme l'envoi de mail ou la consultation de réseaux sociaux.

3.1.4 Office fédéral suisse de la santé publique (OFSP)

L'Office fédéral suisse de la santé publique a publié en mars 2016 (OFSP, 2016), sur son site internet, des informations à l'attention de la population générale. Les aspects sanitaires abordés sont les risques liés à la phototoxicité de la lumière (visible, infrarouge et ultraviolette), les risques liés à la modulation temporelle des LED, les risques de perturbation des rythmes circadiens et les risques liés à l'émission de champ électromagnétique. Les conclusions de l'OFSP sont brièvement décrites ci-dessous pour chaque effet sanitaire.

Risques liés à la lumière bleue

En l'état des connaissances, il semblerait que la lumière bleue émise par les LED ne présente pas de risque pour les yeux. Ce constat vaut également pour les enfants et les personnes dotées d'un cristallin très clair ou sans cristallin. Il convient toutefois de faire preuve de prudence lorsqu'une LED est utilisée à proximité des yeux. Comme la classification actuelle des produits ne fournit que des informations relativement grossières sur le risque lié à la lumière bleue, il est recommandé, en cas de forte exposition des yeux, d'utiliser des lampes ou des tubes à LED appartenant au groupe sans risque. Selon l'OFSP, il n'est pour l'heure pas possible d'évaluer les effets à long terme de la lumière bleue des LED.

Rythmes biologiques

En s'appuyant sur des mesures mandatées par l'OFSP, l'organisme conclut que les LED qui ont des températures de couleur de 3 000 K ont des propriétés analogues à celle des lampes à incandescence ou des lampes à économie d'énergie émettant une lumière blanc chaud. Elles sont adaptées à l'éclairage des locaux dans lesquels séjournent des personnes avant l'heure du coucher. Les LED qui émettent une lumière blanc froid ou blanc bleuté, avec une température de couleur plus élevée de l'ordre de 4 000 à 8 000 K, sont mieux adaptées à l'éclairage de pièces dans lesquelles des personnes se tiennent durant la journée et mènent des activités.

Papillotement

L'étude menée sur mandat de l'OFSP révèle que la modulation temporelle des LED actuellement commercialisées est dépendante du produit, plus que du fabricant ou du type de lampe. Les luminaires à LED, tels que certaines lampes à poser, qui sont souvent utilisées à proximité des yeux, peuvent subir de fortes modulations temporelles de lumière. Le taux de modulation temporelle des LED actuellement sur le marché va de 5 % (faible modulation) à 100 % (modulation importante).

Autres risques

L'OFSP indique que les LED ne présentent pas de risques liés à l'émission de rayonnement ultraviolet ou d'infrarouge, ni à l'émission de champ électromagnétique.

Recommandations

L'OFSP formule par ailleurs un certain nombre de recommandations, en s'appuyant sur des mesures réalisées sur un échantillon de 36 lampes à LED :

- de manière générale, se tenir à plus de 20 cm des lampes à LED ;
- veiller lors d'expositions prolongées à la lumière directe d'une lampe à LED à ce qu'elle appartienne au groupe sans risque (groupe 0) ;
- ne pas observer longtemps les lampes à LED du groupe de risque 1 à usage domestique ;
- ne pas utiliser les lampes à LED des groupes 2 et 3 pour un usage domestique ;

- positionner les luminaires, lampes à poser, lampes de lecture et autres lampes de chevet de telle sorte que la puce de la LED ne soit pas directement visible ;
- dans les pièces où séjournent des personnes durant les heures qui précèdent le coucher, privilégier les lampes à LED ou à économie d'énergie qui émettent une lumière de type « blanc chaud », soit une température de couleur de l'ordre de 3000 kelvins (K) ;
- préférer, pour éclairer les lieux de séjour, des LED sans modulation temporelle de lumière.

3.1.5 Association médicale américaine

L'Association médicale américaine (AMA) a publié en juin 2016 (AMA, 2016) un rapport de son conseil en sciences et en santé publique portant sur les effets sur l'Homme et sur l'environnement des éclairages urbains utilisant des LED.

L'AMA rappelle qu'il existe un argument économique fort poussant au remplacement des éclairages urbains par des éclairages à LED. Il est constaté que les premières générations d'éclairages à LED émettaient une lumière excessivement riche en bleu et que des conséquences sur l'Homme et sur la faune pouvaient être suspectées.

La méthodologie employée par l'institution pour produire ce rapport a consisté en une recherche bibliographique sur les rapports publiés en langue anglaise entre 2015 et 2016 en utilisant les moteurs de recherche pubmed et google scholar. Les mots suivants « light, lighting methods, color, photic stimulation, adverse effects » ont été croisés avec les mots « circadian rhythm/physiology/radiation effects, radiation dosage/effects, sleep/physiology, ecosystem, environment, environmental monitoring ». D'autres recherches incluant le mot LED et « community, street, roadway lighting » ont été aussi lancées. Des informations supplémentaires ont aussi été obtenues auprès d'experts du domaine.

L'AMA indique dans son rapport que des éclairages à LED froid (autour de 4 000 K) peuvent produire un éblouissement d'inconfort et d'incapacité, qui serait lié au fait que la source de lumière est ponctuelle et riche en bleu. Il est précisé que, depuis peu, des éclairages à LED « chauds » (température de couleur autour de 3 000 K) sont disponibles et peuvent diminuer ces effets. Il est aussi rappelé que l'utilisation de diffuseurs peut moduler les effets d'éblouissement des éclairages à LED.

L'AMA rappelle qu'une exposition aux lumières « froides » en soirée ou la nuit peut avoir des conséquences sur la santé, avec notamment une réduction du temps de sommeil et une diminution de sa qualité. Il est indiqué que d'autres effets (effets endocrinologiques, effets sur le système cardiovasculaire, effets liés à la survenue de cancer) sont étudiés notamment dans le cadre d'études s'intéressant aux travailleurs de nuit.

L'AMA explique que des effets sur plusieurs espèces animales (oiseaux, tortues, insectes) ont pu être contastés en raison de la pollution lumineuse, notamment pour les lumières froides.

Pour conclure, l'AMA soutient les politiques visant à diminuer la pollution lumineuse. En ce qui concerne l'éclairage urbain, l'AMA soutient l'installation de technologies visant à réduire l'éblouissement des éclairages routiers. Ainsi, le conseil recommande que les villes songeant au remplacement de leurs éclairages urbains pour des éclairages à LED choisissent des éclairages de température de couleur chaude, qui minimiseront les effets sanitaires potentiels pour l'Homme et les effets sur l'environnement. L'AMA rappelle aussi, en s'appuyant sur un de ses précédents rapports portant sur l'effet d'une exposition à la lumière la nuit, que l'usage envahissant de l'éclairage la nuit perturbe différents processus biologiques, créant potentiellement des effets néfastes sur la santé liés à l'éblouissement d'incapacité et à la perturbation du sommeil.

3.1.6 *Lighting Research Center* (LRC)

En réaction au rapport de l'Association médicale américaine portant sur le remplacement des éclairages urbains par des éclairages à LED, le Centre de recherche sur l'éclairage, (*Lighting Research Center*), a publié un document (LRC, 2016) dans lequel cet organisme indique que les conséquences sanitaires des éclairages en général ne peuvent être prédites de manière fiable qu'en ayant une connaissance juste du stimulus physique. Le LRC reproche notamment à l'AMA le raccourci rapide de l'utilisation de la température de couleur pour estimer les effets sanitaires.

Phototoxicité des éclairages à LED

Le LRC conclut qu'il n'y a pas lieu de s'inquiéter de la phototoxicité des éclairage à LED, compte tenu de la réponse photopique naturelle de l'être humain, mais que certaines sous populations méritent une attention particulière.

Éblouissement d'inconfort ou d'incapacité

Le LRC précise que l'éblouissement d'inconfort et d'incapacité est plus lié à la quantité de lumière et à sa distribution spatiale qu'à sa composition spectrale.

Suppression de la sécrétion de mélatonine

Selon le LRC, les éclairages à LED dominés par de courtes longueurs d'onde peuvent potentiellement avoir un effet plus important sur la suppression de la sécrétion de la mélatonine la nuit que des éclairages de type « lampes à sodium ». Cependant, la quantité et la durée doivent être spécifiées avant de pouvoir affirmer que les éclairages à LED suppriment la sécrétion de mélatonine la nuit.

Perturbation circadienne

Le LRC précise que tant que les effets des longueurs d'ondes longues sur la perturbation des rythmes circadiens ne sont pas mieux documentés, il est inapproprié de stigmatiser les rayonnements aux courtes longueurs d'ondes des éclairages à LED comme facteur causal dans l'apparition des maladies modernes.

3.2 Méthodologie d'évaluation du niveau de preuve des effets sur la santé des LED

3.2.1 Revue de la littérature scientifique

La présente expertise repose principalement sur une analyse de la littérature scientifique internationale sur le thème des effets sanitaires liés à une exposition aux systèmes à LED. Pour ce faire, une recherche bibliographique a été menée.

3.2.1.1 Période de référence

La recherche bibliographique a été réalisée pour la période qui s'étend de janvier 2010 à juillet 2017. Certaines études clés, parues de juillet 2017 à janvier 2018 ont aussi été incluses lorsqu'elles ont été jugées pertinentes et de qualité satisfaisante. De plus, les experts ont pu, si besoin, inclure dans la bibliographie toute étude parue avant 2010 si cela semblait nécessaire, notamment pour présenter un état de l'art dans les parties introductives des chapitres relatifs aux effets sanitaires.

3.2.1.2 Moteurs de recherche

Le moteur de recherche utilisé lors de cette expertise est *Scopus* (*http://www.scopus.com/home.url), moteur* qui recherche dans une base de données bibliographiques scientifiques pluridisciplinaire répertoriant notamment des publications biologiques, médicales mais aussi relatives aux sciences humaines et sociales.

3.2.1.3 Typologie des documents expertisés

Les documents pris en compte dans l'expertise sont de natures diverses :

- des articles et revues scientifiques publiés dans des revues à comité de lecture, sans préjuger de leur facteur d'impact ;
- des rapports d'expertise d'organismes nationaux ou internationaux (RIVM, Scheer, etc.) ;

Les articles originaux rédigés en anglais ou en français ont été systématiquement analysés par le groupe de travail.

Les revues descriptives ou narratives, qui consistent à synthétiser l'ensemble des études publiées sur un sujet donné, n'ont pas, quant à elles, été analysées. Néanmoins, quand cela s'est avéré nécessaire, notamment pour étayer les introductions scientifiques en amont de la description d'un effet, les experts se sont parfois appuyés sur des revues présentant des données scientifiques faisant consensus. En complément, des rapports d'expertise d'organismes nationaux ou internationaux ont été consultés.

3.2.1.4 Bibliographie

Les lampes à LED émettent une lumière riche en courtes longueurs d'onde, c'est à dire dans la partie bleue du spectre lumineux. L'expertise a évalué les effets sanitaires qui pourraient être liés à cette lumière riche en bleu (phototoxicité, perturbation des rythmes circadiens notamment), au déséquilibre spectral (rapport des intensités lumineuses entre le bleu et le rouge) et les effets liés aux autres caractéristiques de l'éclairage LED, comme leur aspect ponctuel (éblouissement) ou la variation de l'intensité lumineuse dans le temps. Les effets biologiques et sanitaires ont été classés en 5 catégories :

- effets sur la perturbation des rythmes circadiens ;
- effets sur le sommeil et la cognition ;
- pathologies oculaires ;
- effets liés à la modulation temporelle de la lumière ;
- effets sur le confort visuel et éblouissement ;
- effets sur la peau.

En premier lieu, un thesaurus directement lié à la technologie LED (pertinent pour les éclairages à LED mais aussi pour les rétro-éclairages d'écrans à LED) a été défini pour réaliser la recherche bibliographique par type d'effets sanitaires. Les experts ont procédé à l'analyse des publications en sous-groupe, par type d'effet.

Les effets sanitaires potentiels de la lumière (naturelle ou artificielle) sont liés à la densité énergétique et au spectre de la lumière considérée. Les caractéristiques de la lumière émise par différentes technologies d'éclairage (halogène, fluo-compacte, LED) peuvent varier de façon très importante. Et au sein même d'une technologie, les caractéristiques de la lumière sont variables (voir par exemple les différences de température de couleur en fonction des lampes à LED, impliquant des densités énergétiques spectrales différentes). En complément, toute publication pertinente permettant de décrire les effets de la lumière artificielle (quelle que soit la technologie considérée) ou naturelle sur la santé a donc été analysée même si elle sortait du champ de la technologie à LED. Par exemple, un certain nombre de publications relatives aux effets sanitaires de la lumière bleue (artificielle ou naturelle) ont été ajoutées. De même, des publications relatives à la modulation temporelle de la lumière antérieures à la technologie à LED ont été exploitées.
En complément des effets cités précédemment, le groupe de travail s'est intéressé aux effets photoprotecteurs de la lumière rouge et à l'action d'une lumière composée à la fois de rouge et de bleu. C'est pour cela que dans la partie du rapport d'expertise consacrée aux scénarios d'exposition, le ratio de lumière bleue par rapport à la lumière rouge est mentionné. Les

publications majeures sur l'effet photoprotecteur de la lumière rouge, recueillies par le groupe de travail, ont été décrites brièvement dans ce rapport.

3.2.2 Une analyse collective

Les experts du groupe de travail ont analysé et discuté collectivement les articles recensés, au sein de cinq sous-groupes correspondant aux différents effets sanitaires précités.

Chaque article a été sélectionné sur la base de son titre et de son résumé afin de juger de sa pertinence par rapport à la question traitée. Les articles retenus ont ensuite été analysés en détail par deux experts. Ces analyses ont ensuite été discutées en réunions plénières, afin d'évaluer collectivement le niveau de qualité méthodologique de la publication.

3.2.3 Critères de qualité retenus pour l'analyse des études

Lors de l'analyse des publications, les experts ont exclu celles qui présentaient des faiblesses méthodologiques majeures, comme par exemple des facteurs de confusion trop importants non pris en compte. Dans l'ensemble, après un tri sur la pertinence des publications, compte tenu pour certains aspects étudiés du peu de ressources bibliographiques disponibles, la plupart des publications apportant des éléments utiles à la discussion ont été conservées.

3.2.4 Présentation des résultats issus de la revue de la littérature

Les résultats des études considérées par les experts du groupe de travail comme utiles à l'évaluation des effets sanitaires des LED sont présentés de manière succincte pour chaque effet étudié.

3.2.5 Évaluation du niveau de preuve d'un effet sanitaire ou biologique donné

Le groupe de travail a élaboré une méthode pour évaluer le niveau de preuve associé à un effet donné et tenter de se prononcer sur le risque de survenue des effets au regard de l'exposition attendue.

Cette méthode consiste en 2 étapes :

Étape 1 : évaluation des éléments de preuve relatifs à « un effet donné » apportés par les études ;

Étape 2 : classification de l'effet selon une matrice de croisement des effets chez l'Homme et des effets chez l'animal ou sur des modèles.

Étape 1 : évaluation des éléments de preuve relatifs à un effet donné

Les termes qualificatifs du Centre international de recherche sur le cancer (Circ) ont été adoptés pour désigner le niveau de preuve apporté par les études épidémiologiques et cliniques chez l'Homme d'une part et par les études sur des modèles expérimentaux d'autre part. Pour chaque effet et pour chaque type d'étude, le groupe de travail a établi l'une des conclusions suivantes :

- **les éléments de preuve sont suffisants pour conclure à l'existence d'un effet** : une relation de cause à effet est probable entre l'exposition à la lumière riche en bleu et l'effet étudié. En d'autres termes, une relation positive a été établie entre l'exposition et la survenue de l'effet, dans le cadre d'études où les biais et facteurs de confusion ont pu être exclus avec suffisamment de certitude.
- **les éléments de preuve sont limités pour conclure à l'existence d'un effet** : une association a été établie entre l'exposition à la lumière riche en bleu et la survenue de l'effet étudié. Le groupe de travail estime qu'une interprétation causale de cette

association est plausible, mais considère qu'on ne peut totalement éliminer l'existence de biais ou de facteurs de confusion dans les études analysées.

- **les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet** : les études disponibles ne sont pas d'une qualité, d'une concordance ou d'une puissance statistique suffisante pour permettre de conclure à la présence ou à l'absence d'effet entre l'exposition à la lumière riche en bleu et l'effet étudié.
- **les données disponibles ne montrent pas d'effet** : plusieurs études suffisantes, couvrant la totalité des niveaux d'exposition connus pour être rencontrés chez l'Homme, et dont les résultats convergent, ne font pas ressortir d'association positive entre l'exposition à la lumière riche en bleu et l'effet étudié, et ce, quel que soit le niveau d'exposition examiné. Les résultats de ces études, seuls ou combinés, devraient disposer d'intervalles de confiance étroits, dont la limite supérieure devrait être proche d'une valeur nulle (par exemple un risque relatif de 1,0). Biais et facteurs de confusion doivent être exclus avec une certitude raisonnable, et les études devraient avoir un suivi suffisamment long. Lorsque les renseignements disponibles suggèrent « une absence d'effet », cette conclusion ne peut s'appliquer qu'à l'effet lié à une exposition à la lumière riche en lumière bleue aux conditions et niveaux d'exposition et à la durée d'observation pris en considération dans les études dont on dispose. Au demeurant, l'éventualité de l'existence d'un risque très faible aux niveaux d'exposition étudiés ne peut jamais être totalement exclue.

Étape 2 : classification de l'effet selon une matrice de croisement des études chez l'Homme et des études sur modèles

Au final, tous les éléments d'appréciation sont examinés dans leur ensemble afin d'aboutir à une évaluation globale pour l'Homme de l'impact d'une exposition à la lumière riche en bleu pour chaque effet étudié.

La matrice de croisement des éléments de preuve chez l'Homme et chez l'animal (*cf*. Figure 10) a été utilisée pour classer l'effet lorsque cela était possible. Pour certains effets, par exemple ceux liés à l'éblouissement, lorsque les études chez l'animal n'étant pas pertinentes, le groupe de travail s'est appuyé sur le niveau de preuve apporté par les études chez l'Homme. La matrice de croisement a été reprise de l'expertise de l'Anses sur les effets des champs électromagnétiques radiofréquences chez l'enfant (Anses, 2016).

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2"></th><th colspan="5">Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles</th></tr>
<tr><th>Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet</th><th>Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet</th><th>Éléments de preuve non conclusifs</th><th>Absence de données de qualité</th><th>Les données disponibles ne montrent pas d'effet</th></tr>
<tr><td rowspan="5">Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques</td><td>Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet</td><td colspan="5">Effet avéré</td></tr>
<tr><td>Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet</td><td>Effet probable</td><td colspan="4">Effet possible</td></tr>
<tr><td>Éléments de preuve non conclusifs</td><td rowspan="2">Effet possible</td><td colspan="4" rowspan="3">Les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de l'effet étudié</td></tr>
<tr><td>Absence de données de qualité</td></tr>
<tr><td>Les données disponibles ne montrent pas d'effet</td><td colspan="2"></td><td>Probablement pas d'effet</td></tr>
</table>

Figure 10 : matrice de croisement des éléments de preuve chez l'Homme et sur des modèles

Chaque effet étudié est classé dans l'une des catégories ci-après. Le classement d'un effet résulte d'un avis scientifique et s'appuie sur le caractère plus ou moins probant des éléments d'appréciation tirés d'études sur l'Homme et d'autres informations pertinentes comme les études sur les mécanismes biologiques, les fonctions physiologiques ou les altérations des systèmes vivants. L'évaluation globale a été discutée en groupe de travail et a fait l'objet d'un avis collégial. Les effets peuvent être classés comme suit :

- l'effet étudié est avéré pour l'Homme ;
- l'effet étudié est probable pour l'Homme ;
- l'effet étudié est possible pour l'Homme ;
- les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de l'effet ;
- probablement pas d'effet pour l'Homme.

L'effet étudié est avéré pour l'Homme

Cette catégorie n'est utilisée que lorsque l'on dispose d'*éléments de preuve suffisants* de l'existence de l'effet étudié pour l'Homme.

L'effet étudié est probable ou possible pour l'Homme

Si l'effet étudié n'est pas avéré dans les études chez l'Homme, alors les études sur les modèles (*in vivo ou in vitro*) sont prises en compte, en complément des études épidémiologiques, afin d'aboutir à l'évaluation globale pour l'Homme de l'exposition lumineuse à la lumière riche en lumière bleue.

Cette catégorie comprend les effets pour lesquels, au maximum, on a obtenu des éléments de preuve *limités* pour conclure à l'existence de l'effet étudié dans les études expérimentales ou épidémiologiques et, au minimum, on ne dispose d'aucune étude expérimentale ou épidémiologique, mais on dispose d'éléments de preuve *suffisants* pour conclure à l'existence de l'effet étudié dans les études *in vitro* ou *in vivo*. Les dits effets sont classés soit dans la catégorie *effet probable pour l'Homme*, soit dans la catégorie *effet possible pour l'Homme* sur la base d'éléments de preuves issus des études épidémiologiques et expérimentales, de données mécanistiques et d'autres renseignements pertinents.

L'*effet probable* traduit un niveau de preuve plus élevé qu'*effet possible*.

Effet probable pour l'Homme

On fait appel à cette catégorie lorsque l'on dispose d'*éléments de preuve limités pour conclure à l'existence de l'effet* étudié dans les études chez l'Homme et d'*éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet* dans les études *in vitro ou in vivo*.

Effet possible pour l'Homme

Cette catégorie concerne les effets pour lesquels on dispose d'*éléments de preuve limités pour conclure à l'existence de l'effet* étudié dans les études chez l'Homme, et lorsque les éléments de preuve sont au maximum *limités* dans les études *in vivo* et *in vitro.* On peut également y faire appel lorsque l'on dispose d'*éléments de preuve non conclusifs* dans les études chez l'Homme ou en l'absence d'études de qualité, mais que l'on dispose d'*éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence de l'effet* dans les études *in vivo et in vitro* corroborés par des données mécanistiques et d'autres données pertinentes.

Les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de l'effet

Cette catégorie concerne les effets pour lesquels les éléments de preuve en faveur de l'existence de l'effet étudié sont *non conclusifs* ou *en l'absence de données de qualité* dans les études chez l'Homme et dans les études *in vivo et in vitro*.

On classe aussi dans cette catégorie les effets qui ne correspondent à aucune des autres catégories.

Une classification dans cette catégorie n'est pas un constat d'absence d'effet ou de sûreté globale. Cela signifie souvent que davantage de recherches sont nécessaires, notamment lorsque les données sur l'effet étudié peuvent être interprétées différemment.

Probablement pas d'effet pour l'Homme

Relèvent de cette catégorie les effets étudiés pour lesquels on dispose d'éléments de preuve suggérant *une absence d'effet* dans les études chez l'Homme, ainsi que dans les études *in vivo* et *in vitro* pour un grand nombre de conditions ou de scénarios d'exposition. Il est néanmoins très difficile de démontrer une absence d'effet.

3.3 Effets de la lumière sur les rythmes circadiens

3.3.1 La lumière, principal synchronisateur des rythmes circadiens

3.3.1.1 Mécanismes d'interaction de la lumière avec les rythmes circadiens

3.3.1.1.1 L'horloge circadienne

La vie sur Terre a évolué dans des conditions environnementales cycliques, à savoir l'alternance jour-nuit due à la rotation de la Terre autour de son axe, et l'alternance des saisons due à la rotation de la Terre autour du Soleil. Il est capital pour leur survie que les organismes vivants anticipent ces changements afin d'ajuster leur métabolisme, leur physiologie et leurs comportements à ces changements cycliques. De là, la mise en place d'une « horloge biologique » capable de mesurer le temps et de préparer l'organisme aux variations environnementales cycliques à venir s'est opérée. Les rythmes biologiques constituent une propriété fondamentale du vivant. Ils sont retrouvés dans les bactéries, les champignons, les plantes, les animaux, et chez l'Homme. Entre 10 et 20 % du génome du vivant montre une expression rythmique, soit environ 3 000 gènes chez l'humain.

Les rythmes circadiens possèdent trois caractéristiques fondamentales : la première est leur durée ou période, le terme « circadien » vient du latin - *circa* (autour de), et *dies* (jour) - parce que ces rythmes ont une périodicité d'environ 24 heures. La deuxième caractéristique concerne leur nature autonome – même en l'absence de stimulus environnemental, les rythmes continuent de s'exprimer avec une période proche de 24 h et se décalent progressivement par rapport à l'heure solaire. À titre d'exemple, des personnes enfermées dans des grottes souterraines et coupées de toute source de lumière naturelle maintiennent un rythme d'éveil-sommeil d'environ 24 heures, mais les périodes d'activité et de repos ne correspondent plus aux mêmes heures que les personnes en plein jour (Mills, 1964). La troisième caractéristique est que ces rythmes peuvent être resynchronisés par une nouvelle entrée sensorielle. Ceci s'apparente au phénomène de décalage d'horaire, où l'arrivée par avion dans un pays lointain décale nos horloges biologiques qui vont s'aligner progressivement (il faut plusieurs jours) avec la nouvelle heure.

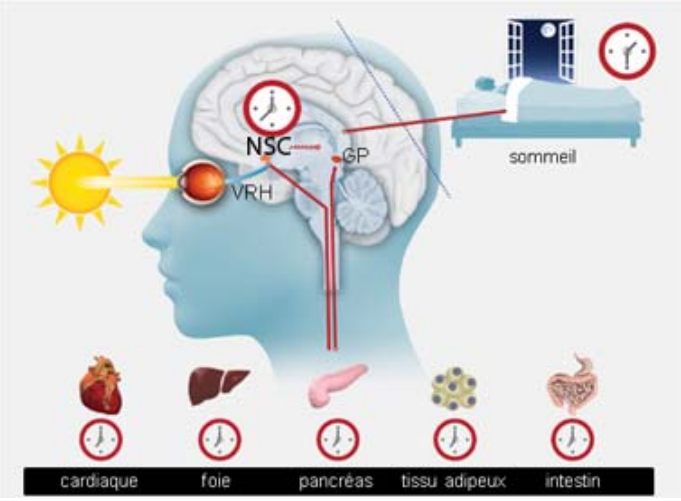


Figure 11 : contrôle des rythmes circadiens chez l'Homme

L'entrée de la lumière vers la rétine génère un signal qui est envoyé le long de la voie rétino-hypothalamique (VRH) vers l'horloge centrale localisée au niveau des noyaux supra-chiasmatiques (NSC). Ce signal synchronise l'horloge du NSC avec l'environnement. Ce message temporel est ensuite distribué aux divers organes (cœur, foie, pancréas…) afin de synchroniser leurs horloges « périphériques » à la même heure.

De manière générale, une horloge biologique est caractérisée par trois éléments :

- une entrée sensorielle, dite « zeitgeber », de l'allemand « donneuse de temps », qui synchronise le rythme de l'horloge à l'environnement ;
- l' « horloge » elle-même, composée d'un ensemble de gènes qui fonctionnent en boucle pour générer une activité rythmique ;
- les signaux de sortie de l'horloge qui synchronisent nos activités métaboliques (par ex : digestion des lipides, des sucres), physiologiques (par ex : sécrétion hormonale) et comportementales (par ex : cycle d'éveil-sommeil).

L'entrée sensorielle la plus importante est la lumière, dont l'intensité et la qualité spectrale reflètent l'heure environnementale (surtout les transitions entre le jour et la nuit, c'est-à-dire l'aube et le crépuscule). L'organisation de l'ensemble du système circadien – de l'entrée aux sorties en passant par l'horloge – diffère selon l'espèce considérée, mais pour les mammifères, y compris l'Homme, un schéma général peut être proposé, basé sur de nombreuses études scientifiques. Alors que l'information visuelle codée par la rétine est acheminée en grande majorité vers le cortex visuel à travers les cellules ganglionnaires (CG), un petit nombre d'entre elles (voir la section « cellules ganglionnaires à mélanopsine ») envoient leurs messages vers les noyaux supra-chiasmatiques (NSC) de l'hypothalamus, siège de l'horloge circadienne centrale. En effet, l'ablation chirurgicale de cette petite structure abolit le cycle éveil-sommeil régulier chez le rat, l'activité d'un animal ainsi opéré étant totalement aléatoire (Stephan et Zucker, 1972). Cette horloge centrale distribue le message temporel vers le reste du corps, afin de synchroniser à leur tour les « horloges périphériques ». La notion d'horloges biologiques a évolué pour prendre en compte le fait que pratiquement toutes les cellules – dans le foie, les reins, les poumons, etc. - contiennent les gènes nécessaires pour créer la rythmicité, mais néanmoins ces horloges périphériques ne sont pas synchronisées sans le contrôle supérieur de la « maitre horloge » (*cf.* Figure 11). On dit souvent que l'horloge centrale agit comme un « chef d'orchestre », permettant d'harmoniser l'activité de l'ensemble des organes. Les horloges périphériques sont également sensibles aux signaux métaboliques venant de l'alimentation. Ainsi, les divers organes sont tous synchronisés entre eux et avec l'heure de la journée, assurant une physiologie efficace et coordonnée (Hastings *et al.*, 2007 ; Dibner *et al.*, 2010).

3.3.1.1.2 Les cellules ganglionnaires à mélanopsine (CGM)

Depuis les premiers travaux sur la rétine au XIXe siècle, les scientifiques pensaient qu'il n'existait que deux types de photorécepteurs, les bâtonnets, responsables de la vision en conditions de faible intensité lumineuse (vision scotopique) et les cônes, responsables de la vision de jour, dite photopique. Cette notion a été totalement bouleversée ces 20 dernières années et les connaissances actuelles reconnaissent l'existence de nombreux pigments visuels, exprimés dans différents types cellulaires aussi bien dans la rétine qu'ailleurs dans l'organisme, et dont chacun exerce un rôle distinct. Parmi ces pigments nouvellement identifiés, celui qui a suscité le plus d'intérêt est la mélanopsine. Chez les mammifères, 2 à 4 % des cellules ganglionnaires (CG) sont directement sensibles à la lumière. Cette photo-sensibilité intrinsèque résulte de l'expression de la mélanopsine, originalement découverte dans les mélanocytes (d'où son nom) de la peau du crapeau *Xénope* (Provencio *et al.*, 1998, 2002). Appelées « cellules ganglionnaires à mélanopsine » (CGM), également connues sous le nom des « CG intrinsèquement photosensibles », ou ipRGC en anglais, cette troisième catégorie de cellules photoréceptrices est totalement différente des bâtonnets et cônes à pratiquement tous les égards - génétique, développemental, structural, physiologique et au niveau de la connectivité cérébrale. Depuis leur mise en évidence, ces cellules ont été le sujet de recherches intenses, et l'état des connaissances évolue tous les jours. La situation peut donc évoluer rapidement, mais il convient de situer les fondamentaux de ce système, si important par rapport à l'objet de ce rapport. La très grande majorité des données existantes sur le sujet concerne les mammifères, surtout la souris ; mais il faut souligner que les vertébrés non-mammaliens, ainsi que les invertébrés, sont peut-être encore plus affectés par l'éclairage artificiel en raison des différences importantes dans l'organisation des systèmes sensoriels et circadiens, qui varient considérablement d'une espèce à l'autre (voir chapitre LED et biodiversité).

Chez les mammifères, les axones des CGM constituent environ 80-90 % de la voie rétino-hypothalamique (la voie neurale qui projette vers la région du cerveau où se trouve l'horloge circadienne centrale) (Gooley *et al.*, 2001 ; Hattar *et al.*, 2006). Il est admis que les CGM sont primordiales pour la bonne synchronisation des rythmes biologiques avec l'environnement, mais que les bâtonnets et les cônes sont également impliqués (Hattar *et al.*, 2003). L'ensemble des CG reçoit des informations synaptiques venant des voies intra-rétiniennes activées par les bâtonnets et les cônes. La différence majeure concernant les CGM, bien qu'elles soient informées elles aussi par les bâtonnets et les cônes, est qu'elles manifestent également la capacité de répondre directement à la lumière en l'absence des bâtonnets et des cônes, *via* la mélanopsine. À l'heure actuelle, il est admis que les CG « classiques » contrôlent la vision formelle, c'est-à-dire la perception imagée du monde qui nous entoure, alors que les CGM sont impliquées surtout dans la vision « non-imagée », c'est-à-dire les rôles joués par la lumière dans les aspects divers tels que la synchronisation de l'horloge circadienne mais aussi la dilatation pupillaire, la cognition, la mémoire, la vigilance, l'humeur… (Van Gelder, 2003 ; Fu *et al.*, 2005 ; Peirson *et al.*, 2009 ; Lucas *et al.*, 2014). Comparée aux bâtonnets et cônes, la réponse électro-physiologique à la lumière des CGM isolées est lente et peu sensible, des caractéristiques mal adaptées à une vision précise (Berson, 2003). Mais ces caractéristiques sont souhaitables pour un système qui mesure l'intensité lumineuse ambiante tel un photomètre. Il est important de noter que cette distinction nette entre vision « imagée » et « non-imagée » s'estompe de plus en plus. En effet, les CGM ont récemment été impliquées dans la discrimination de l'intensité lumineuse, la détection des contrastes et l'adaptation photique (Lucas *et al.*, 2014 ; Dobb *et al.*, 2017).

3.3.1.1.2.1 Les différentes formes de la mélanopsine

Il faut souligner que l'expression restreinte de la mélanopsine dans seulement quelques pourcents des CG -encore est-il que des études récentes indiquent sa présence dans le système nerveux périphérique (Matynia *et al.*, 2016), et même les vaisseaux sanguins (Sikka *et al.*, 2014), ce qui suggère des rôles très divers- est spécifique aux mammifères, et que dans d'autres groupes de vertébrés, la mélanopsine est distribuée de façon beaucoup plus

large - dans d'autres neurones rétiniens, dans le cerveau, voire d'autres organes. En fait, les espèces vertébrées non-mammifères possèdent au moins deux gènes codant pour des mélanopsines distinctes, dites les formes « m » (pour mammifère) et « x » (pour *xenopus*) (Bellingham *et al.*, 2006). Dans la rétine du poulet, ces deux mélanopsines sont localisées dans des cellules différentes, la forme « m » uniquement dans une sous-population des cellules ganglionnaires déjà décrite, alors que la forme « x » change de site d'expression lors du développement pour devenir fortement exprimée dans les cellules horizontales (Verra *et al.*, 2011). De plus, des expériences de transfection cellulaire montrent que la mélanopsine « m » est plus sensible à la lumière que la mélanopsine « x » (Bellingham *et al.*, 2006). Tout récemment, une étude a montré que des souris génétiquement modifiées qui n'expriment ni mélanopsine, ni pigments visuels, maintenaient toujours une réponse circadienne à la lumière, celle-ci étant contrôlée par l'expression d'un autre pigment visuel, la neuropsine, localisée dans d'autres cellules ganglionnaires qui ne projettent pas vers les noyaux supra-chiasmatiques NSC (Buhr *et al.*, 2015). La situation est encore différente chez les invertébrés, qui expriment à la fois des photorécepteurs apparentés aux CGM et aux bâtonnets et cônes. L'organisation du système circadien a été très étudiée chez les mouches *Drosophile* (Grima *et al.*, 2004). En résumé, le système sensoriel synchronisateur de l'horloge circadienne est très ancien et présent sous des formes distinctes dans tout le vivant. Chez les vertébrés, le réseau mélanopsinergique est très étendu, il assure des rôles multiples et variés et constitue le lien essentiel entre l'environnement et l'horloge centrale.

3.3.1.1.2.2 Les différents sous-types et projections cérébrales des cellules ganglionnaires à mélanopsine (CGM)

Une autre facette de la complexité est l'existence, chez les mammifères, de cinq sous-types des CGM (« M1 » à « M5 ») en fonction du niveau d'expression de la mélanopsine, de la morphologie des CG et de leurs sites de projection au cerveau. Le sous-type M1 est le mieux caractérisé, représentant 40 à 50 % des CGM totales. Ces cellules ont un fort niveau d'expression de mélanopsine et projettent principalement vers les NSC et les noyaux olivaires prétectaux (NOP). Le sous-type M2 exprime nettement moins de mélanopsine, il est positionné plus profondément dans la rétine et montre un *pattern* d'innervation distinct. Les rôles précis de chaque sous-population de CGM restent à déterminer, même si l'étude des cibles nerveuses et des expériences d'ablation sélective démontrent un rôle important des M1 dans la synchronisation de l'horloge circadienne et de la constriction pupillaire. Bien que le sous-type ne soit pas toujours connu, les CGM projettent aussi vers des structures impliquées dans la régulation du sommeil, dans la cognition et la mémoire, l'humeur (amygdale), et des structures impliquées dans la production de neurotransmetteurs (Raphé : 5HT, VTA : DA) (Hattar *et al.*, 2006).

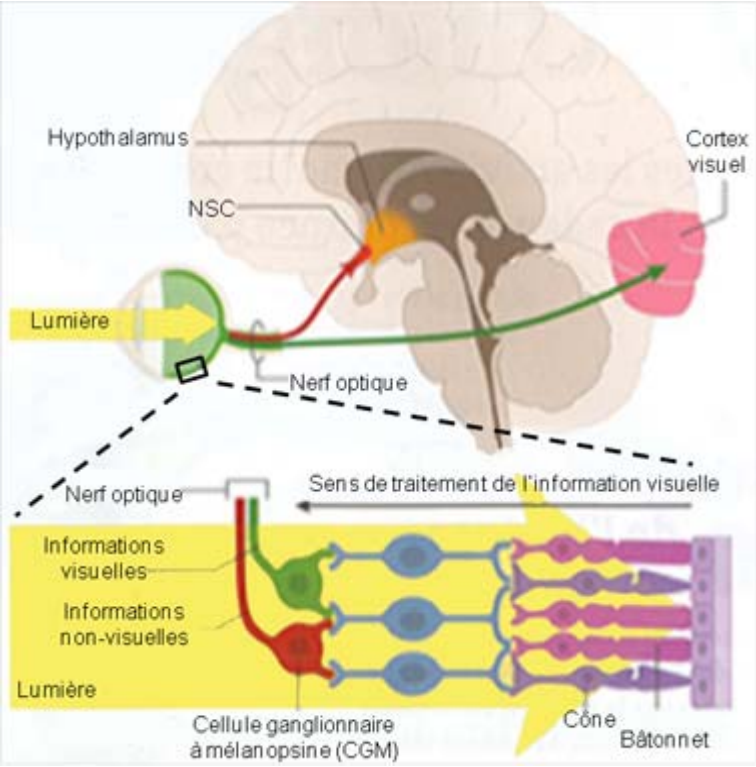


Figure 12 : architecture rétinienne et connectivité rétine-horloge circadienne

Quand la lumière (flèche jaune) pénètre dans l'œil, elle traverse la rétine, structurée en couches cellulaires, pour atteindre les photorécepteurs « classiques », cônes et bâtonnets, qui envoient leurs signaux dans le sens inverse aux neurones intermédiaires (en bleu) et ensuite vers les cellules ganglionnaires (CG). La grande majorité des CG (en vert) intègre ces informations et les envoie vers le cortex visuel pour assurer la vision « formelle ». En revanche, les CGM (en rouge), en plus de recevoir des informations intra-rétiniennes, sont directement stimulées par la lumière. Elles envoient ces informations vers l'horloge circadienne localisée dans les NSC de l'hypothalamus.

3.3.1.1.2.3 Cellules ganglionnaires à mélanopsine et lumière bleue

Une particularité critique des CGM concerne leur sensibilité spectrale : elles sont fortement stimulées par la lumière bleue[42], et présentent un pic de sensibilité aux environs de 480 nm, éloigné des trois types de cônes (communément appelés « bleu », « vert » ou « rouge » selon leur sensibilité spectrale, respectivement de 420, 534 et 564 nm) ou des bâtonnets (498 nm) (Bowmaker et Dartnall, 1980). La lumière du soleil contient un pourcentage important d'émissions de longueurs d'ondes courtes, surtout en raison du phénomène de diffusion de Rayleigh, par les particules suspendues dans l'atmosphère (Strutt, 1899). L'augmentation très importante de l'intensité lumineuse lors du lever du soleil, ainsi que les changements spectraux dominés par ces émissions de courtes longueurs d'ondes, expliquent la synchronisation de l'horloge circadienne avec l'heure solaire (Walmsley, 2015).

3.3.1.1.2.4 Conclusions

La lumière sert non seulement à voir le monde qui nous entoure, mais influence également une grande variété de processus non-visuels, tels que la synchronisation de l'horloge biologique circadienne, la constriction pupillaire, le sommeil, l'humeur, la cognition, la

[42] Dans le contexte de ce rapport, le terme « lumière bleue » couvre deux aspects distincts. En ce qui concerne la lumière bleue et les rythmes circadiens, les longueurs d'ondes d'émissions se situe autour de ~480 ±20 nm, (vers le bleu turquoise). En ce qui concerne la lumière bleue et sest effets phototoxiques, les longueurs d'ondes d'émissions sont plus vers l'ultra-violet, autour de 410 nm.

mémoire, la vigilance, etc. Beaucoup de ces processus sont réglés indirectement à travers la synchronisation de l'horloge centrale qui coordonne le sommeil, la vigilance, etc. Mais les dernières recherches indiquent que les CGM projettent également directement aux divers centres du cerveau impliqués dans l'humeur, la migraine, etc., qui peuvent être par conséquent affectés sans passer par une perturbation de l'horloge. L'ensemble de ces informations est vital pour anticiper les changements environnementaux à venir et adapter l'organisme en accord. Le niveau de la luminosité et la qualité spectrale sont mesurés par des neurones uniquement dédiés à cette fonction, les CGM (ou ipRGC). Ces derniers permettent de se positionner par rapport à l'heure de la journée, représentant ainsi une interface d'importance majeure entre l'environnement et l'organisme.

3.3.1.1.3 Horloge rétinienne endogène et processus physiologiques

Comme mentionné dans l'introduction générale, des horloges circadiennes périphériques existent dans tout le corps, et la rétine elle-même en contient au moins une (voire plusieurs). En fait, chez les mammifères, la rétine fut le premier tissu en dehors de l'hypothalamus à être clairement identifié comme étant capable de soutenir une activité rythmique autonome, puisqu'un explant rétinien montre une synthèse rythmique et régulière de la mélatonine en absence totale de contact avec d'autres tissus (Tosini et Menaker, 1996). La rétine modifie son fonctionnement tout au long de la journée, afin de pouvoir opérer dans les différentes conditions de luminosité ambiante. En conditions naturelles, il faut gérer deux extrêmes d'intensité lumineuse : en pleine nuit les yeux doivent être les plus sensibles afin d'être capables de détecter le moindre photon et d'utiliser cette information pour réagir, alors qu'en plein jour l'intensité ambiante est très élevée et permet une vision photopique, chromatique et détaillée. L'intensité lumineuse du jour est telle que la rétine est menacée d'atteintes photo-oxydatives, et elle met en place des mécanismes de protection pour limiter le stress oxydatif. La rétine ajuste sa sensibilité à travers des modifications moléculaires et cellulaires sous contrôle de l'horloge endogène. Par exemple, en phase nocturne, les bâtonnets et cônes s'entre-connectent entre eux *via* des jonctions communicantes, augmentant ainsi la sensibilité du système ; dans la journée, les photorécepteurs sont isolés les uns des autres (Ribelayga *et al.*, 2008). De même, l'affinité des canaux ioniques augmente la nuit, et la sensibilité visuelle est plus importante (Bassi et Powers, 1987 ; Ko *et al.*, 2001). Enormément de processus cruciaux de la physiologie visuelle sont sous contrôle d'une horloge endogène rétinienne : synthèse des pigments visuels, synthèse de mélatonine et de dopamine, phagocytose des photorécepteurs, synthèse de la mélanopsine (McMahon *et al.*, 2014) (*cf.* Figure 13Figure 13).

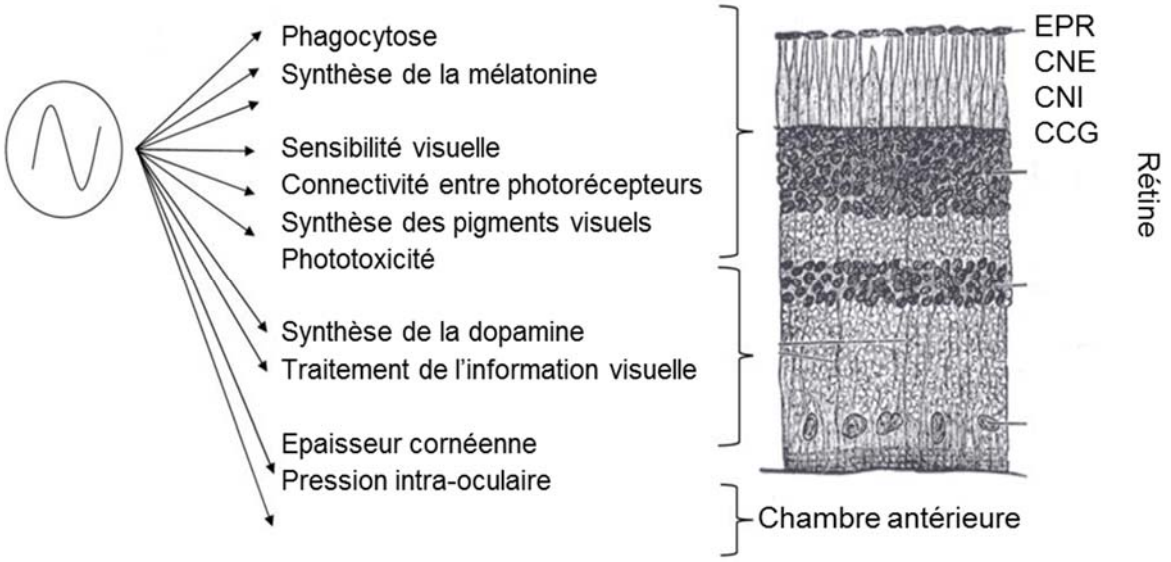


Figure 13 : liste partielle des fonctions oculaires contrôlées par l'horloge rétinienne

Ces processus ne concernent pas seulement les photorécepteurs, mais tout type cellulaire de l'œil, y compris la chambre antérieure et la pression intra-oculaire. Modifié d'après McMahon et coll., 2014.

3.3.1.2 Mise en évidence de la synchronisation des rythmes circadiens par la lumière

3.3.1.2.1 Introduction

Les données scientifiques disponibles permettent d'illustrer la perturbation du système circadien engendrée par une exposition à la lumière pendant la nuit, (ou « LAN » d'après l'expression anglaise « *Light At Night* ») et plusieurs articles indiquent que l'horloge circadienne est également perturbée par une exposition lumineuse insuffisante dans la journée. Smolensky *et al.* (2015) présentent un article de revue mettant en cause le double problème d'une expostion lumineuse trop faible de jour (absence des émissions bleu-violet (446-484 nm) qui synchronisent le système circadien, et des émissions UV-B (290-315 nm) qui stimulent la synthèse de vitamine D) et trop forte de nuit. L'insuffisance ou la carence en vitamine D peut s'expliquer chez les enfants et les adultes par une exposition inadéquate au soleil. Les études épidémiologiques antérieures ont porté sur l'exposition à trop peu d'UV-B ou à trop de lumière la nuit, respectivement, sans prendre en compte les deux à la fois. Bonmati-Carrion *et al.* (2014) ont également souligné le problème de ce déséquilibre et ses possibles implications pour la santé humaine. Martinez-Nicolas *et al.* (2013) stipulent que les sociétés modernes se caractérisent par un mode de vie 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, sans différences environnementales notables entre jour et nuit (lumière du jour faible, absence d'obscurité pendant la nuit, température ambiante constante, mode de vie sédentaire et collations fréquentes) et, par conséquent, un système circadien altéré par un processus connu sous le nom de chrono-disruption. Plusieurs travaux relient les perturbations du système circadien aux pathologies humaines (certains cancers, syndrome métabolique et troubles affectifs et cognitifs), mais peu de travaux suggèrent comment contrecarrer ces effets perturbateurs. Une approche logique est de renforcer le contraste entre jour et nuit. Dans l'étude de Martinez-Nicolas et ses collaborateurs, 131 jeunes sujets (66 H, 65 F âgés de 19 à25 ans) étaient recrutés et leur température du poignet (TP), l'activité générale, la position du corps, l'exposition à la lumière, la température ambiante et le sommeil ont été enregistrés en conditions réelles pendant 1 semaine. Les sujets furent divisés en groupes de « contraste élevé » (CE) et « contraste faible » (CF) pour chaque variable et les effets sur la TP quantifiés. Il a été constaté que le groupe CE montre de meilleurs rythmes que le groupe CF pour chaque variable, sauf le sommeil. Les sujets soit CE soit CF pour la TP ont également montré des différences dans le mode de vie, les sujets CE avaient un début de phase nocturne légèrement avancé.

3.3.1.2.2 Exposition à la lumière naturelle, effet sur le cortisol, la mélatonine et sur le psychisme

L'objectif de l'étude de Harb *et al.* (2015) était d'évaluer les effets de l'exposition (ou de l'absence d'exposition) à la lumière naturelle sur le rythme de repos/activité, sur les niveaux de cortisol et de mélatonine et sur les effets psychologiques chez l'Homme dans des conditions naturelles. Les sujets ont été répartis en deux groupes selon leur espace de travail (10 employés dans un groupe « avec fenêtre » et 10 dans un groupe « sans fenêtre »). Tous les participants étaient des femmes et portaient un actimètre qui mesure l'activité et l'exposition à la lumière ambiante, pendant sept jours. Les concentrations de mélatonine et de cortisol ont été mesurées à partir de la salive, collectée à 08h00, 16h00 et 22h00. Les sujets ont répondu à un questionnaire pour déceler l'éventuelle présence de troubles psychiatriques mineurs ; l'échelle de Montgomery-Asberg (MA) a été utilisée pour mesurer les symptômes de la dépression et l'indice de Pittsburgh (PSQI) a été utilisé pour évaluer la qualité du sommeil. L'analyse de Rayleigh indique que les deux groupes présentent des activités et des pics du cycle lumière similaires. En ce qui concerne l'exposition à la lumière, le niveau d'exposition moyen à la lumière était significativement plus élevé ($p = 0,023$) dans le groupe « avec fenêtre » (191,04 ± 133,36) que dans le groupe

« sans fenêtre » (73,8 ± 42,05). De même, le groupe « avec fenêtre » a présenté la plus grande amplitude d'exposition à la lumière (298,07 ± 222,97). Les niveaux de cortisol étaient significativement différents entre les groupes à 22h00 (« sans fenêtre » 4,01 ± 0,91, « avec fenêtre » 3,10 ± 0,30, p = 0,008 ;). Les niveaux de mélatonine dans les groupes différaient à deux points horaires : 08h00 (p = 0,018) et 22h00 (p = 0,009). Le groupe « avec fenêtre » avait un niveau de mélatonine inférieur à 08h00 (3,54 ± 0,60) mais supérieur à 22h00 (24,74 ± 4,22) que le groupe « sans fenêtre » traduisant une bonne rythmicité. Les niveaux supérieurs de cortisol étaient positivement corrélés avec les troubles psychiatriques mineurs et les symptômes dépressifs à 22h00. Le niveau de mélatonine inférieur à 22h00 était corrélé avec les symptômes dépressifs et la mauvaise qualité du sommeil (PSQI). L'étude montre d'une part que plus l'exposition à la lumière naturelle est importante, plus les rythmes de sécrétion des hormones cortisol et mélatonine sont marqués et correspondent aux cycles métaboliques ; et d'autre part il existe une corrélation entre une exposition à la lumière naturelle réduite en journée et des niveaux plus élevés du cortisol et des niveaux inférieurs de mélatonine la nuit, ceux-ci à leur tour étant liés aux symptômes dépressifs et à une mauvaise qualité du sommeil. *[Limites : peu de sujets, pas d'hommes inclus dans l'analyse, les taux de cortisol ne sont pas très différents entre les 2 groupes].*

3.3.1.2.3 Employés de bureau, exposition à la lumière artificielle, effet sur l'humeur, sur le sommeil et l'efficacité circadienne

Selon l'article de Figueiro *et al.* (2017a), dans les sociétés industrialisées, les gens passent plus de 90 % de leurs temps d'éveil à l'intérieur, mais la lumière dans l'environnement construit n'est pas conçue pour stimuler les rythmes circadiens. Ils ont donc utilisé un dispositif étalonné pour mesurer la « lumière efficace pour le système circadien » (LESC), afin de récolter les expositions à la lumière des employés de bureau et les relier à leur sommeil et à leur humeur. La recherche a été menée dans 5 bâtiments gérés par l'Administration des Services Généraux des États-Unis, et cette étude a recruté 109 participants (40H, 69F), dont 81 (27H, 54F, âge non rapporté) ont participé l'hiver et l'été. Ils ont recueilli des mesures subjectives de l'humeur et du sommeil, et des mesures objectives de l'efficacité circadienne, la lumière et les rythmes d'activité pendant 7 jours consécutifs. Par rapport aux employés de bureau recevant de faibles niveaux de LESC le matin, ceux qui reçoivent des niveaux élevés le matin ont une latence réduite du sommeil (surtout en hiver), l'entrainement circadien augmenté et une augmentation de la qualité du sommeil. Les niveaux élevés de LESC pendant toute la journée sont également associés à une diminution de la dépression (selon une questionnaire validée, le « Center for Epidemiologic Studies Depression Scale » où les participants répondent à 20 questions concernant leur humeur dans la semaine écoulée) et une augmentation de la qualité du sommeil. En conclusion, cette étude souligne l'importance de l'exposition diurne à des intensités lumineuses importantes pour la santé et la qualité du sommeil.

3.3.1.2.4 Effet stimulateur de la lumière bleue en début de journée

Deux études par Gabel *et al.* (2013, 2015) ont exploré les effets d'une exposition à la lumière enrichie en bleu lors du réveil matinal sur la performance durant la même journée. Les deux travaux ont comparé les effets, par rapport à une lumière de faible intensité (< 8 lx), d'une exposition soit à la lumière polychromatique simulant l'aurore matinale (augmentation graduelle d'intensité de 0 à 250 lux sur 50 minutes), soit à la lumière bleue monochromatique (470 nm, 100 lx). Dans les deux études, les participants (17 hommes âge moyen 23,1 ± 0,8 ans) étaient en légère restriction de sommeil (6 h) pendant deux nuits successives. Les participants devaient effectuer plusieurs tâches cognitives toutes les 2 h, ainsi que remplir un questionnaire chaque heure afin d'évaluer leur humeur. La panoplie des tests cognitifs (plus importante pour l'article publié en 2015) fut conçue pour donner des informations sur les performances mnésiques et éxecutives. En parallèle, des échantillons de salive étaient collectés toutes les 30 minutes pendant les 4 heures suivant le réveil, et toutes les heures ensuite jusqu'au moment de s'endormir. Dans les deux cas, les données montrent que la lumière « aurore » améliore le bien-être subjectif, l'humeur et les performances cognitives,

sans avoir un impact significatif sur la phase circadienne (mesurée en tant que profils de sécrétion de mélatonine et de cortisolcot). En revanche, bien que la lumière bleue ait eu elle aussi un effet stimulateur sur la performance cognitive, mais moins important que l'aurore artificielle, elle exercait des effets plus importants sur le profil temporel de sécrétion de la mélatonine (Gabel *et al.*, 2013). Les deux paradigmes lumineux étaient sans effet sur le ressenti subjectif de la somnolence ou de la motivation. Ainsi, l'exposition à une « aurore artificielle » constituerait une stratégie potentielle pour améliorer certains paramètres subjectifs et objectifs en cas de restriction légère de sommeil.

Pour explorer les effets stimulateurs possibles d'une exposition à la lumière bleue le matin, Munch *et al.* (2016) ont recruté 18 jeunes adultes (12 femmes, 6 hommes, moyenne d'âge 23,2 ans) en bonne santé. Utilisant un *design* expérimental de type *cross-over* et entre-individuel, suite à 5 journées à domicile servant de référence aux paramètres d'endormissement (vérifiés par le port d'un actimètre), les participants sont restés au laboratoire pendant 3 jours où ils furent exposés à plusieurs conditions d'éclairage : le matin, de 08h00 à 11h00 soit à de la lumière « contrôle » (40 lx, 2 600 K de lumière blanche chaude provenant des ampoules à incandescence), soit à de la lumière enrichie en bleue, choisie pour être proche de la lumière naturelle (LED blanche polychrome brillante, 750 lx au niveau des yeux, 3 537 K). Et de nouveau le soir, une heure avant de se coucher, ils ont été exposés pendant 30 min à de la lumière blanche polychromatique faible (DL; < 7 lx; 2 700 K) ; de la lumière brillante enrichie en bleu (BL; 6 500 K; 500 lx) ; ou de la lumière orange (OL, 1 500 K, 100 lx) dans un ordre aléatoire. Les paramètres enregistrés furent la qualité et la quantité de sommeil, la somnolence et la vigilance, ainsi que des mesures salivaires de la concentration de mélatonine. Les effets des expositions à la lumière ont été analysés selon trois aspects principaux : (1) les effets aigus le matin et le soir, (2) les effets à plus longue durée (sur 3 jours consécutifs), et (3) les effets du matin / du soir directement affectés par les expositions à la lumière des soirées / matins précédents. Par rapport à la lumière contrôle, l'exposition matinale à l'éclairage enrichi en bleu diminue significativement la sensation de somnolence, aussi bien le matin même ($F_{1, 290} = 16,53$; $p < 0,0001$) que sur les 3 jours de l'expérience ($F_{2, 278} = 3,23$; $p = 0,04$). En ce qui concerne la performance cognitive (mesure de la vigilance), la lumière enrichie en bleu augmente l'éveil (réduit le temps de réaction). Pour l'éclairage du soir, la condition BL réduit la somnolence comparée aux deux autres conditions (DL et OL). Il y avait des répercussions distinctes des conditions de lumière du matin sur la somnolence subjective du soir : pendant l'exposition DL le soir, les participants se sentaient significativement moins somnolents, et avaient des temps de réaction significativement plus rapides lorsqu'ils avaient été exposés à la lumière bleue le même matin comparé au contrôle ($F_{1, 16} = 5,66$; $p = 0,03$). Sans surprise, la condition BL du soir avait un effet de suppression sur la mélatonine comparée à la situation en DL. Un résultat qui interpelle concerne l'amplitude des changements de phase circadienne induits par différentes combinaisons de 3 conditions d'éclairage le soir et les 2 conditions du matin : ces changements de phase étaient significativement plus faibles quand les sujets étaient exposés à la lumière matinale enrichie en bleu. Ce résultat est potentiellement d'intérêt parce qu'il suggère qu'une exposition adéquate à la lumière riche en bleu le matin est capable de « corriger » des désynchronisations circadiennes provoquées par l'éclairage du soir. Les auteurs parlent d'un effet « stabilisateur » sur le système circadien. *[Limitations : difficile de dire si les effets sont dus au spectre de la lumière ou à son intensité, non-corrigée entre les différents essais].*

3.3.1.2.5 Effet stimulateur de la lumière rouge en journée

Plusieurs études ont montré que l'exposition à une lumière rouge pendant l'après-midi augmente la vigilance alors que les niveaux de mélatonine circulante sont au plus bas (Sahin et Figueiro, 2013). Cependant, ni cette étude ni les précédentes n'ont pleinement élucidé les mécanismes physiologiques associés. Le circuit des CGM n'est probablement pas impliqué, du moins pas directement. Mais l'excitation des cônes rouges pourrait néanmoins activer une voie qui converge vers les CGM. De même, la nature photo-chimique bi-stable de la mélanopsine indique qu'elle pourrait être sensibilisée par des émissions rouges (Mure *et al.*

2009). Il est possible que l'effet stimulateur de la lumière rouge soit lié à un réseau cérébral qui a une sensibilité spectrale différente de celui qui est lié à la suppression de la mélatonine, par exemple *via* des projections des CGM vers les structures cérébrales impliquées dans l'éveil (*locus coeruleus*, neurones à orexine) en les activant, ou *via* des projections vers des structures impliquées dans le sommeil (VLPO) en l'inhibant.

3.3.1.2.6 Effet bénéfique pour les travailleurs de nuit de dormir pendant la journée sous un éclairage intense

Il apparaît logique de penser qu'il serait recommandé aux travailleurs de nuit de dormir après leur travail, pendant la journée, dans un environnement sombre. Cependant, il a été montré que rester dans un environnement sombre pendant la journée réduit la sécrétion de mélatonine le soir suivant, et retarde son apparition (Takasu *et al.*, 2006). Et parce qu'un facteur de risque pour la santé pourrait être la suppression de la mélatonine nocturne, dormir à l'obscurité dans la journée pourrait être déconseillé. En réalité, l'exposition à la lumière vive diurne après le travail de nuit est importante pour bien stimuler l'horloge circadienne et maintenir la synthèse de la mélatonine la nuit suivante à des niveaux élevés. Le but de l'étude de Nagashima *et al.* (2017) était d'évaluer l'effet de l'exposition à la lumière intense durant le sommeil de jour sur la sécrétion nocturne de mélatonine après un travail de nuit simulé. Douze sujets masculins en bonne santé, de moyenne d'âge 24,8 ± 4,6 ans, ont participé à des séances de trois jours dans deux conditions expérimentales différentes : lumière intense (> 3 000 lx, mesuré au niveau des yeux) ou de faible luminosité (< 50 lx), dans un ordre aléatoire. Le premier jour, les sujets sont entrés dans la salle d'expérimentation à 16h00 et des échantillons de salive ont été prélevés toutes les heures entre 18h00 et 00h00 dans des conditions de faible luminosité. Entre 00h00 et 08h00, ils ont participé à des tâches simulant le travail de nuit. À 10h00 le lendemain matin, ils ont dormi pendant 6 heures dans des conditions de lumière soit intense, soit tamisée. Pour la condition de lumière faible, toutes les sources de lumière dans la pièce d'expérimentation étaient éteintes et la fenêtre obscurée. En condition de lumière intense, la pièce était ouverte à la lumière naturelle (à travers une fenêtre ouverte), supplémentée par deux lampes placées de chaque coté du lit. Le soir, des échantillons de salive ont été prélevés comme le premier jour. Les échantillons de salive ont été analysés pour la concentration de mélatonine. Les temps d'activité et de sommeil ont été enregistrés par un actimètre au poignet porté pendant toute l'expérience. Les profils temporels de la concentration de mélatonine ont été comparés entre les deux conditions par des mesures répétées à trois voies ANOVA (lumière, jour et heure de la journée). Le changement du « *dim light melatonin onset* »[43] (DLMO) entre le premier et le deuxième jour, et les paramètres du sommeil diurne et nocturne après le travail de nuit simulé ont été comparés entre les deux conditions de lumière en utilisant des tests *t* appariés. Les résultats ANOVA ont indiqué une interaction significative (condition de lumière et 3 jours) (p = 0,006). Des tests statistiques *post hoc*[44] ont indiqué que dans la condition de faible luminosité, la concentration de mélatonine était significativement plus faible le deuxième jour que la veille (p = 0,046) ; en revanche, dans la condition de lumière intense, il n'y avait pas de différence significative dans la concentration de mélatonine entre les deux jours (p = 0,560). Il y avait une différence significative de DLMO entre les conditions (p = 0,015) : le sommeil a été avancé de 11,1 ± 17,4 min dans des conditions de forte luminosité, mais retardé de 7,2 ± 13,6 min après avoir dormi dans des conditions de faible luminosité. Aucune différence significative n'a été trouvée dans aucun paramètre de

[43] Le *dim light melatonin onset,* en français « le début de sécrétion de la mélatonine dans des conditions de luminosité faible », est considéré comme le marqueur le plus fiable de la phase circadienne chez l'Homme (Pandi-Perumal *et al.,* 2007).

[44] Les tests post-hoc, ou « a posteriori » ne présupposent pas l'existence d'une hypothèse expérimentale préalablement définie.

sommeil. L'étude montre que dormir dans des conditions de forte luminosité après le travail de nuit maintient à des niveaux normaux la sécrétion de mélatonine le soir suivant, et suggère dans un sens plus large qu'une exposition à la lumière intense dans la journée stimule l'horloge circadienne et synchronise les processus métaboliques de l'organisme.

3.3.1.2.7 Effet de l'intensité de l'exposition lumineuse sur le bien-être de patients atteints de démence

Plusieurs études concernant l'importance d'un niveau lumineux suffisant pendant le jour ont été réalisées dans des situations cliniques. Munch *et al.* (2017) ont testé l'impact d'un système d'éclairage dynamique par rapport à celui de l'éclairage conventionnel sur les effets tels que l'émotion, le comportement agité, la qualité de vie, la sécrétion de la mélatonine et les cycles circadiens de repos-activité chez les patients atteints de démence. En comparaison, un groupe de patients témoins du même âge a été exposé à des éclairages conventionnels. La cohorte de patients (n = 89) était partagée en deux groupes, uniquement en fonction de la moyenne de leur exposition individuelle quotidienne à la lumière. Les patients ayant une moyenne plus élevée d'exposition lumineuse (417 lx) ont montré significativement plus de plaisir quotidien que les patients avec une exposition lumineuse inférieure. De plus, ils avaient une meilleure qualité de vie, ont passé moins de temps au lit, se sont couchés plus tard et ont commencé leurs épisodes de sommeil plus tard, bien que les deux groupes ne diffèrent pas en fonction de l'âge, de la gravité de la déficience cognitive et de la mobilité. L'étude a démontré que les hommes étaient plus agités, avaient un sommeil plus court avec plus d'épisodes de réveil, et une stabilité circadienne diminuée par rapport aux femmes. En particulier, les faibles expositions quotidiennes à la lumière prédisaient significativement les amplitudes circadiennes plus faibles des cycles repos-activité chez les hommes, mais pas chez les femmes. Cela peut indiquer une susceptibilité spécifique du sexe aux expositions quotidiennes à la lumière en ce qui concerne la régulation de l'activité éveil-repos chez les patients déments âgés. En résumé, ces résultats indiquent qu'une exposition à la lumière forte durant la journée peut avoir des effets bénéfiques en situation de maladie mentale grave.

Wahnschaffe *et al.* (2017) ont suivi un groupe de patients atteints de démence (n = 20, 1 H, 19 F, moyenne d'âge 83,8 ± 8,8 ans) pendant 3 ans, afin de déterminer s'il y avait des corrélations entre les conditions météorologiques (durée du jour, niveau d'ensoleillement) et le comportement. Il y avait une interaction significative entre l'activité nocturne (agitation) et la durée du jour et le niveau de nébulosité ($F1, 1174 = 4.39$; $p = 0{,}036$). L'activité nocturne fut plus importante quand les jours furent courts et nuageux que pendant les jours longs et clairs. De même, ce paramètre fut plus important pour des jours courts et nuageux comparés aux jours longs et nuageux ($p = 0{,}032$). Une fois de plus, ces résultats soulignent l'importance d'un signal lumineux suffisamment fort dans la journée, et les auteurs préconisent le recours à l'illumination artificielle supplémentaire durant des périodes nuageuses et hivernales.

3.3.1.2.8 Exposition à la lumière de patients en soins intensifs, effets sur la sécrétion de la mélatonine

Fan *et al.* (2017) ont examiné la lumière ambiante dans l'environnement d'une unité de soins intensifs, pour identifier les profils d'exposition à la lumière pertinents pour la régulation circadienne. Un moniteur de lumière a été apposé sur le lit des sujets au niveau des yeux, enregistrant continuellement l'illumination pendant au moins 24 h par sujet. Des échantillons de sang ont été prélevés chaque heure pour doser la mélatonine plasmatique. Des bilans vitaux et des évaluations neurologiques ont été effectués. L'intensité lumineuse était enregistrée toutes les 30 secondes auprès de 17 sujets (6 H, 11 F, moyenne d'âge 62 ans). L'intensité lumineuse était maximale en fin de matinée, en moyenne de 64,1 (19,7-138,7) lx. Il n'y avait pas de corrélation entre l'amplitude de la mélatonine et l'exposition de jour, de nuit ou de lumière totale (coefficients de corrélation de Spearman). En conclusion, l'exposition à la lumière environnementale des patients dans cette unité de soins intensifs est systématiquement faible et suit un schéma diurne. Aucun effet de l'exposition nocturne à la

lumière n'a été observé sur la sécrétion de la mélatonine. L'insuffisance d'une exposition journalière à la lumière peut contribuer à générer des rythmes circadiens anormaux, facteur potentiellement aggravant pour la maladie.

3.3.1.2.9 Exposition à la lumière de patients en cardiologie, effets sur le sommeil et le bilan médical

Gimenez *et al.* (2017) ont mené un essai clinique contrôlé chez 196 patients en cardiologie (moyenne d'âge de 66,5 ± 13,1 ans), afin d'étudier la façon dont l'éclairage affecte le sommeil, le bilan médical et l'humeur lors des hospitalisations. Les patients ont été affectés soit à une chambre éclairée de façon standard, soit à une salle avec un système d'éclairage dynamique - cycle sombre avec faible éclairage nocturne et 2 h de lumière forte (1 750 lx) pendant la journée. Les mesures incluaient l'actigraphie et des questionnaires évaluant la vigilance, la qualité du sommeil, l'anxiété, la dépression et une appréciation de l'éclairage. La durée moyenne de l'hospitalisation était de 5 jours dans les deux groupes. Les scores subjectifs sur le sommeil, la vigilance, l'anxiété et la dépression n'étaient pas différents entre les deux. L'évaluation subjective de l'éclairage était meilleure pour les chambres dynamiques que celles à éclairage standard, tant chez les patients ($p < 0,001$) que le personnel ($p < 0,005$). La durée du sommeil des patients était améliorée de 5,9 min ($p = 0,03$) par jour d'hospitalisation dans les salles dynamiques comparées à aux salles avec éclairage standard. Après 5 jours d'hospitalisation, la durée du sommeil dans les salles d'éclairage dynamique avait augmenté de 29 min, soit environ 7,3 % de plus par rapport aux chambres avec éclairage standard. Selon les auteurs, un système d'éclairage de luminosité nocturne réduite et une illumination forte de jour pourrait donc améliorer certains aspects comme le sommeil chez les patients hospitalisés.

3.3.1.2.10 Effets bénéfiques de l'exposition d'organes d'animaux à la lumière bleue lors de transplantation

Une étude expérimentale a établi un lien causal entre l'exposition à la lumière bleue et l'état physiologique des organes lors d'actes de chirurgie chez l'animal (Du Yuan *et al.*, 2016). Des souris ont été exposées soit à de la lumière blanche (400 lx), soit à de la lumière bleue (442 nm, 1 400 lx) soit à de la lumière rouge (617 nm, 1 400 lx) pendant 24 h avant l'ischémie-reperfusion du foie (une procédure chirurgicale utilisée dans les cas de résection hépatique ou de transplantation). Les auteurs montrent que seule l'exposition à la lumière bleue induit une protection significative contre la nécrose et la rupture cellulaire. De même, dans un autre modèle de pathologie, l'exposition à la lumière bleue diminue spécifiquement les dommages aux reins, témoignés par une baisse de cystatine C dans le sérum et une réduction de la nécrose des tubules rénaux. Ces effets passent par une voie visuelle intacte, puisque des souches de souris dont le nerf optique est atrophié ne montrent pas les effets. Les auteurs n'ont pas observé de changements ni dans la concentration de mélatonine ni dans celle des corticoïdes *(nota bene : l'absence d'effet de la lumière bleue sur la mélatonine s'explique par le fait que la grande majorité des souches de souris de laboratoire a une mutation dans l'enzyme de synthèse de la mélatonine, qui fait qu'elles ont un niveau faible constitutif et invariant).* Les auteurs ont montré que l'effet passe par le système nerveux sympathique, parce que l'inhibition pharmacologique des récepteurs adrénergiques bloque la protection. Ils suggèrent qu'un axe rétine-cerveau-système sympathique régule l'inflammation et l'invasion des organes par des cellules immunes. Si une voie analogue existe chez l'Homme, cette découverte ouvre une toute nouvelle application de la lumière bleue en chirurgie.

3.3.1.2.11 Conclusions

Bien que les études examinées au sein de ce chapitre soient assez hétérogènes en matière de *design* expérimental (observations en situation réelle ou proche de la nature, en milieu hospitalier, organes isolés, etc.), les résultats sont assez concordants sur l'importance d'une exposition suffisante à la lumière pendant la journée pour améliorer le bien-être, voire la santé, aussi bien chez des participants sains que chez des personnes malades. Les études

indiquent que les conditions de vie contemporaines conduisent souvent à une uniformisation de l'exposition lumineuse – pas assez dans la journée en raison du travail à l'intérieur, et trop le soir en raison des éclairages domestiques – alors que nos horloges biologiques ont besoin de signaux forts pour différencier le jour de la nuit et ce afin de fonctionner correctement. Certaines études indiquent même qu'une exposition à la lumière forte en journée pourrait réduire les effets négatifs d'une exposition lumineuse en soirée (Munch *et al.*, 2016 ; Figueiro *et al.*, 2017b ; Nagashima *et al.*, 2017). Ces observations renvoient également à l'augmentation de la myopie dans les pays développés, où l'insuffisance de l'exposition lumineuse pendant la journée est suspectée comme élément fondamental (*cf.* chapitre sur la phototoxicité).

3.3.1.3 Les effets stimulateurs de l'éclairage de nuit sur la vigilance

3.3.1.3.1 Introduction

Les données scientifiques suggérent que l'exposition à la lumière la nuit est probablement liée à des problèmes de santé tels que le cancer, le diabète, le stress cardio-vasculaire, la fertilité. Ce sont des conséquences à long terme, résultant des déséquilibres hormonaux et métaboliques engendrés par la désynchronisation de l'horloge circadienne. En revanche, la capacité de la lumière à diminuer la somnolence pendant la nuit est une approche souvent jugée intéressante pour réduire les accidents industriels et routiers de nuit. Le recours au travail de nuit est présent dans de nombreux secteurs d'activité (industrie, médical, militaire et sécuritaire, agro-alimentaire, transport interurbain, etc.). On estime que 20 à 30 % des personnes actives travaillent pendant la nuit, au moins à temps partiel. Les problèmes majeurs imposés par ces conditions de travail sont, à court terme, la fatigue et le manque de vigilance, entraînant des accidents et une productivité réduite. Aux États-Unis les dommages liés aux accidents causés par une vigilance réduite liée à la somnolence sur la route et sur le lieu de travail sont estimés à 93 milliards de dollars par an (Culpepper, 2010). Une attention réduite est la troisième cause d'accidents de la route après la vitesse excessive et l'alcoolémie. Près de 20 % de toutes les blessures graves causées par les accidents de la circulation dans la population générale sont associées à une attention réduite, indépendamment des effets de l'alcool et des drogues. Toujours aux USA, plus de 30 millions de véhicules commerciaux et 80 millions de passagers sont utilisés chaque jour, avec environ 5 millions d'accidents chaque année, environ 40 000 impliquant des pertes de vie. Alors que seulement 10 % du trafic routier total se fait de nuit, cette même période concerne 50 % des accidents mortels. De même, 11 millions de personnes travaillent la nuit et sont sujettes à une vigilance réduite, ce qui entraîne, selon certains auteurs, 60 % d'accidents de plus par rapport à un travailleur de jour équivalent (Rajaratnam *et al.*, 2013). On a estimé que, au moins une fois par semaine, entre 32 % et 36 % des travailleurs de nuit (enquête réalisée auprès de 687 infirmières à Massachusetts, USA) se sont endormis pendant la période de travail de nuit (Gold *et al.*, 1992). Dans la même étude, comparé aux travail de jour, le travail de nuit augmentait le risque de s'endormir au volant de la voiture au cours du trajet domicile-lieu de travail d'un facteur 3-4, et augmentait le risque d'avoir un accident sur place de 2-3 fois.

L'optimisation de la vigilance à court terme est donc une question critique dans la société contemporaine.

3.3.1.3.2 Lumière bleue, suppression de la mélatonine et augmentation de la vigilance

Une des voies par lesquelles la lumière peut stimuler la vigilance et la performance de nuit est *via* sa capacité à supprimer la mélatonine, qui marque la nuit et signale la période de sommeil chez les espèces diurnes telles que l'Homme, ou bien *via* un effet sur d'autres structures non visuelles impliquées dans la veille (en les activant) et le sommeil (en les inhibant). Comme les nombreux articles présentés dans ce rapport le montrent, les longueurs d'ondes courtes (bleu), proches de 460-480 nm, sont les plus efficaces pour supprimer la mélatonine nocturne et affecter d'autres fonctions non visuelles (réflexe pupillaire, humeur, cognition, …). Les études ont également montré que la lumière bleue,

même à intensité modérée (< 100 lx à la cornée), peut également augmenter la vigilance de nuit. Bien entendu, cette suppression de la mélatonine peut elle-même être une manifestation d'un décalage de l'horloge circadienne, et celle-ci influence également l'état de vigilance, la température corporelle, la fréquence cardiaque et la performance mentale et physique, qui sont normalement basses pendant la nuit. Il est donc logique que des efforts aient été fournis pour étudier comment la lumière pourrait stimuler la vigilance de nuit (Boivin & James, 2005; Sasseville & Hébert, 2010).

Chellappa *et al.* (2011) ont comparé les effets de la lumière fluorescente de deux températures de couleur différentes, 2 500 K et 6 500 K, et de la lumière d'une lampe à incandescence (3 000 K), sur la performance cognitive et exécutive de 16 participants (hommes de moyenne d'âge 24,3 ans). La luminance a été réglée pour avoir une intensité d'environ 40 lx au niveau cornéen, et l'exposition a duré 2 h en fin de soirée. La lumière à 6 500 K est enrichie en longueurs d'onde courtes de 420 à 520 nm. Pour déterminer l'état de vigilance, les investigateurs ont fait appel à des paramètres subjectifs de somnolence (réponses au « Karolinska Sleepiness Scale »), de bien-être (rapporté par un « visual analogue scale ») et de confort visuel (estimé selon un « mental effort rating scale), ainsi qu'à des tests expérimentaux de vigilance psychomotrice, visuelle et exécutive. Enfin, des échantillons salivaires ont été collectés pour quantifier la concentration de la mélatonine. Les résultats montrent que la lumière à 6 500 K entraîne une plus grande suppression de la mélatonine (et diminution de la somnolence, $p < 0,01$), ainsi qu'une vigilance subjective, un sentiment de bien-être et de confort visuel accru ($p < 0,04$). En ce qui concerne la performance cognitive, la lumière à 6 500 K a conduit à des temps de réaction plus courts pour les tâches associées à une attention soutenue (psychomotricité, visuelle : $p < 0,04$), mais pas pour les tâches associées à des fonctions exécutives. Il y avait une corrélation négative forte entre l'état de vigilance et la concentration de mélatonine circulante, mais pas de démonstration que les deux soient causalement liés.

Motamedzadeh *et al.* (2017) ont examiné les effets d'un éclairage enrichi en bleu sur la vigilance et la performance des contrôleurs de nuit dans l'industrie pétrochimique. Les participants (n = 30 hommes, âge moyen 30,2 ans, de bonne santé et habitués au travail de nuit) étaient suivis pendant une semaine soit en condition standard d'illumination (4 000 K), soit sous deux régimes de lumière bleue augmentée, à 6 500 K ou 17 000 K. L'intensité au niveau des yeux pour les trois conditions était très similaire, environ 500 lx. Au bout d'une semaine, ils furent analysés par rapport à la somnolence subjective (*Karolinska Sleepiness Scale*) et la performance (*Conners Continuous Performance Test II*). La mélatonine fut dosée dans des échantillons de salive. Les données montrent une diminution significative de la somnolence et du niveau de la mélatonine circulante, ainsi que du nombre d'erreurs commises et du temps de réaction. En résumé, il y a un effet net de stimulation de la vigilance en présence de lumière enrichie en bleue.

Un autre article récent pointe le rôle prédominant de la lumière bleue et l'implication des ipRGCs dans la suppression de la mélatonine chez l'Homme. Ostrin *et al.* (2017) ont demandé aux participants (n = 21, sexe non-spécifié, moyenne d'âge 24,5 ans), de porter pendant deux semaines avant de se coucher des lunettes filtrant les émissions spectrales < 540 nm. Des mesures de l'activité locomotrice (par actimètre), de la qualité et de la quantité de sommeil, des concentrations de la mélatonine (salive), et surtout de l'enregistrement des réponses pupillaires (qui précise l'implication des ipRGCs), étaient effectuées avant et après la période expérimentale. Par rapport aux mesures effectuées avant l'expérience, le port des lunettes filtrantes augmente la qualité et la quantité du sommeil, et la concentration de mélatonine. Il y a également un ralentissement de la phase de re-dilatation pupillaire suite à un flash, interprété comme un décalage de phase de l'horloge circadienne.

3.3.1.3.3 Comparaison de l'effet de la lumière bleue, du café et d'un placébo sur la vigilance des routiers

Taillard *et al.* (2012) ont réalisé une étude croisée randomisée, en double aveugle et contrôlée par placebo, de 48 participants masculins en bonne santé (répartis en deux groupes de 24 chacun, « jeunes » âgés de 20-25 ans et « âgés » de 40 à 50 ans). Ils ont parcouru une distance de 400 km sur l'autoroute pendant la nuit, et ils ont reçu de façon aléatoire et consécutive soit une exposition à de la lumière bleue (GOLite, Philips, 468 nm, placée sur le tableau de bord ; luminance au niveau de l'œil d'environ 20 lx, intensité 7,4 µW/cm^2) pendant la conduite, soit 200 mg de caféine, soit un placebo de caféine avant et pendant la pause. Les traitements ont été séparés d'au moins 1 semaine. Les données mesurées étaient le nombre de traversés inappropriées de la ligne médiane (TIL) et l'amplitude de l'écart de la position médiane latérale (PML). Huit participants (17 %) se plaignaient d'éblouissement suite à l'exposition lumineuse et ont été retirés de l'analyse. Les résultats des 40 participants restants montrent que l'utilisation de la lumière bleue réduisait significativement le nombre de passages de la ligne médiane - TIL ($p < 0,05$). Les TIL étaient plus faibles avec du café (12,51, $p = 0,001$) et la lumière bleue (14,58, $p = 0,003$) qu'avec le placebo (26,42). Des résultats similaires ont été trouvés pour le PML. Les traitements n'ont pas modifié la qualité, la quantité ou le *timing* de trois épisodes de sommeil nocturne subséquents. Les auteurs concluent que malgré l'inconfort engendré chez 17 % des participants, une exposition occasionnelle à la lumière bleue pourrait être utilisée pour combattre la somnolence nocturne au volant, quel que soit l'âge du conducteur. *[Limitations : inconfort visuel chez une partie importante des participants, niveau de mélatonine non-mesuré, pas d'information concernant les femmes, risque d'altération de la vision des couleurs et du champ visuel non évalué].*

3.3.1.3.4 Effets stimulateurs de la lumière rouge la nuit comparés à ceux de la lumière blanche

Certaines études indiquent qu'il est faisable de séparer l'effet stimulateur de la lumière de nuit sur la vigilance de ses effets sur la suppression du pic de mélatonine. L'équipe de Figueiro avait réalisé des études préliminaires (Figueiro *et al.* 2009, 2010) montrant que la lumière rouge (630 nm) était aussi efficace que la lumière bleue (430 nm) pour augmenter la vigilance sans pour autant affecter la sécrétion de la mélatonine. La même équipe a repris ces analyses pour les étendre, notamment pour voir si la lumière rouge pouvait aussi augmenter la performance (Figueiro *et al.* 2015). Ils ont recruté 17 jeunes adultes en bonne santé (moyenne d'âge 22,5 ans, 8 hommes, 9 femmes), qui ont effectué des tâches dans des conditions expérimentales contrôlées, soit sous une lumière blanche faible (< 5 lx au niveau cornéen), soit sous une lumière blanche modérée, soit sous une lumière rouge modérée. Les conditions d'éclairage rouge et blanc ont été calculées selon les niveaux d'irradiance : lumière blanche 361 ± 4 lx à la cornée (1,1 ± 0,01 W/m^2) ; lumière rouge 213 ± 12 lx (1,1 ± 0,06 W/m^2). Des enregistrements EEG étaient réalisés avant et pendant les tests, qui consistaient en trois tâches de mesure de l'attention, de la psychomotricité et du temps de réaction à un signal auditif. En parallèle, des mesures subjectives de somnolence et des échantillons salivaires pour doser la mélatonine furent collectés. En ce qui concerne les résultats, l'activité EEG des bandes *alpha* et *alpha-theta* était significativement plus basse après l'exposition à la lumière rouge par rapport à la lumière faible. En effet, de multiples études montrent qu'une augmentation dans la vigilance est corrélée avec une baisse de ces paramètres. De plus, les données suggèrent que la lumière rouge augmente la vigilance en début de soirée, alors que la lumière blanche n'est efficace que pendant la dernière partie de la nuit. Les temps de réaction étaient significativement plus courts avec la lumière blanche ou rouge par qu'avec la lumière faible ($p < 0,05$), mais seule une exposition à la lumière blanche réduisait le nombre d'erreurs. En résumé, la lumière rouge permettrait d'améliorer la rapidité des gestes mais non la précision. Les auteurs discutent ce résultat intriguant, évoquant la possibilité de différences motivationnelles provoquées par la couleur rouge. Globalement, la lumière blanche stimule la performance

plus que la lumière rouge, alors que la lumière rouge est sans effet sur la suppression de la mélatonine.

Sahin et Figueiro (2013) ont étendu ces observations concernant le rapport entre éclairage et stimulation de la vigilance nocturne, aux heures de l'après-midi où la vigilance est connue pour être diminuée (Mitler et ., 1988). Utilisant un protocole très similaire à celui de Figueiro *et al.* (2015), mais où les sujets (13 jeunes adultes, 8 H, 5 F, moyenne d'âge 20,5-21 ans) ont été exposés à trois situations (obscurité (<2 lux), lumière bleue (470 nm, 40 lux, 18,9 µW/cm^2) ou lumière rouge 630 nm, 40 lux, 18,9 µW/cm^2) pendant 48 minutes entre 14h30 et 15h30. Tout comme les enregistrements réalisés pendant la nuit (Figueiro *et al.*, 2015), l'exposition à la lumière rouge dans l'après-midi augmente significativement la vigilance (mesurée par EEG). Par contre, une exposition à la lumière bleue n'avait pas d'effet significatif. Ces résultats montrent que la lumière peut aussi stimuler la vigilance au creux de la journée, sans pour autant diminuer la mélatonine, car dans la journée la mélatonine n'est pas sécrétée. Cette observation concernant la lumière rouge est intriguante parce qu'elle indique que la voie mélanopsinérgique n'est pas toujours nécessaire, et que d'autres circuits neuronaux doivent exister.

3.3.1.4 Conclusions

Les études citées ici, réalisées en conditions très contrôlées, indiquent qu'à court terme l'utilisation de la lumière – surtout enrichie en bleue mais aussi les émissions de longueur d'onde > 600 nm –stimule la vigilance pendant le travail de nuit et pourrait réduire ainsi le risque d'accident. Toujours est-il que les conditions optimales (intensité, durée, spectre) restent à définir, et qu'un tel traitement pourrait néanmoins être préjudiciable pour la santé s'il était utilisé trop souvent en raison notamment d'un effet accru de la photoxicité la nuit.

3.3.2 Lumière artificielle et rythmes circadiens

3.3.2.1 Considérations sur les spectres et l'intensité d'éclairages artificiels et leurs effets potentiels sur les rythmes circadiens

Comme indiqué précédemment, les CGM sont activées par la lumière bleue présente dans les rayonnements solaires, surtout en début de journée. Or, l'éclairage artificiel, en particulier émanant de LED ou de tubes fluorescents froids (aussi appelés « lumière du jour ») contient lui aussi des rayonnements de longeurs d'ondes courtes, qui peuvent altérer la synchronisation de l'horloge centrale, qui à son tour perturbe l'alignement des organes périphériques et *in fine* peut provoquer des troubles de santé à plus long terme. Ce composé bleu est assez faible pour des sources lumineuses telles que les lampes halogènes, fluorescentes chaudes ou incandescentes, mais peut être relativement important dans les lampes LED et fluorescentes de température de couleur élevée (*cf.* Figure 14 et Figure 15). Comme évoqué ci-dessus, (*cf.* § 3.3.1.1.2.3), les CGM sont très sensibles à la lumière bleue, et à travers leur stimulation tout le système circadien sera affecté. Ceci souligne la nécessaire considération particulière des effets induits par une exposition aux LED, spécialement en soirée ou de nuit, chez l'Homme, la faune et la flore. En ce qui concerne les liens entre les rythmes circadiens et la lumière artificielle, les données scientifiques disponibles portent sur trois aspects :

i) les effets sur la physiologie, le métabolisme et le comportement humain ;

ii) les effets sur la physiologie, le métabolisme et le comportement des animaux (traités dans le chapitre « LED et biodiversité ») ;

iii) les effets sur les rythmes biologiques oculaires et intra-rétiniens.

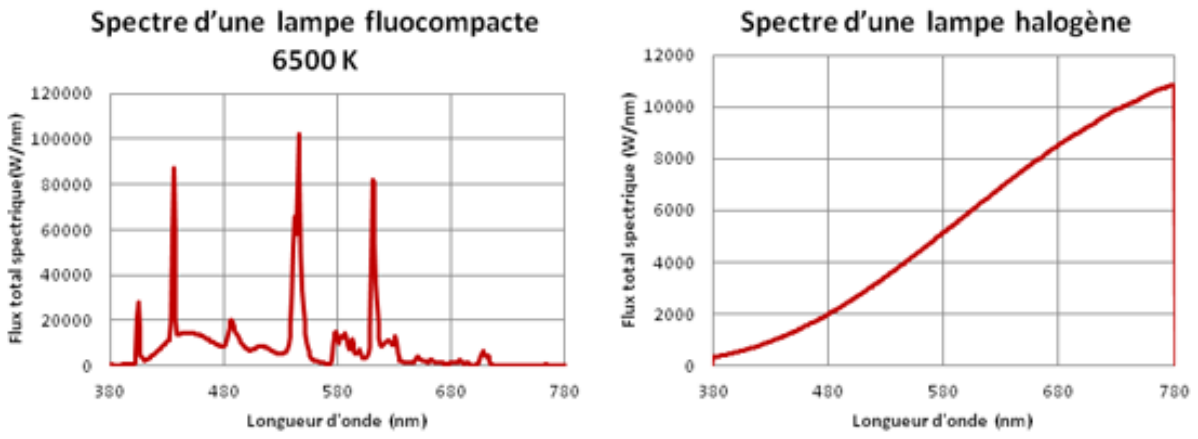


Figure 14 : spectres de lampes fluocompacte et halogène

(source : CSTB)

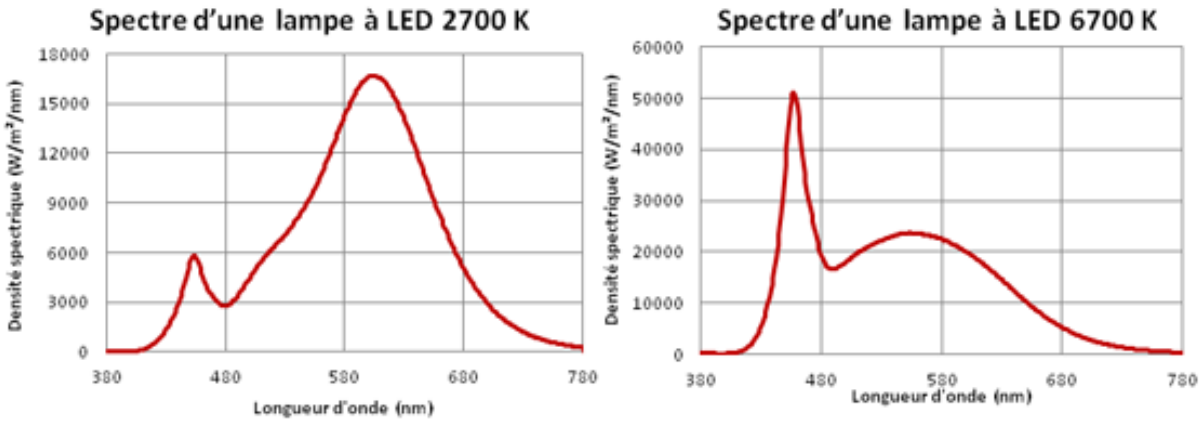


Figure 15 : spectre de lampes à LED froide (6 700 K) et chaude (2 700 K)

(source : CSTB)

Les niveaux typiques d'éclairage nocturne dans les villes (~10 lx) sont, pour le système visuel photopique humain, au moins 10 fois supérieurs à ce que donne une nuit de pleine lune en environnement naturel (Falchi *et al.*, 2011). Selon la source de ces illuminations, cela équivaut à > 10^{12} photons $cm^{-2}.s^{-1}$ (pour l'éclairage fluorescent ou à LED : Brown, 2016). Chez les animaux nocturnes, les réponses circadiennes observées sont généralement très marquées, en raison de la sensibilité accrue de leurs rétines à la lumière, adaptées à détecter de faibles niveaux de luminosité. L'intensité d'un éclairage, même paraissant relativement faible, est donc suffisante pour perturber de manière significative leurs rythmes biologiques. Les données expérimentales rapportent de tels effets chez la souris ainsi que chez les rongeurs diurnes et les oiseaux (Bedrosian *et al.*, 2011, Da Silva *et al.*, 2015, Fonken *et al.*, 2013, 2012, 2010). Chez l'Homme, les études montrent que la sensibilité est aussi très élevée, puisque des effets sur l'horloge, la mélatonine, le sommeil et la vigilance sont observés avec des intensités lumineuses inferieures à 40 lx (Chang *et al.* 2014, Cajochen *et al.* 2010).

En ce qui concerne les effets d'une exposition la nuit à la lumière, les résultats de l'expertise de l'Anses de 2016 (Anses, 2016) mettent en évidence des effets sur la santé du travail posté incluant la nuit :

- effets avérés sur la somnolence, la qualité de sommeil et la réduction du temps de sommeil total et le syndrome métabolique ;
- effets probables pour le cancer, la santé psychique, les performances cognitives, l'obésité et la prise de poids, le diabète de type 2 et les maladies coronariennes (ischémie coronaire et infarctus du myocarde) ;
- et effets possibles sur les dyslipidémies, l'hypertension artérielle et l'accident vasculaire cérébral ischémique.

La lumière inhibe la sécrétion de la mélatonine par le biais d'un circuit poly-synaptique. La mise en évidence de ce circuit date des années 1970/80. Dans un cycle lumière-obscurité normal, sous contrôle de l'horloge circadienne, la mélatonine est peu ou pas sécrétée le jour ; en revanche elle est abondamment produite et libérée de nuit. Chez un sujet aveugle (absence des bâtonnets et cônes) mais capable de se synchroniser correctement par rapport aux cycles jour-nuit, une exposition à la lumière de longueur d'onde 460 nm (correspondant au pic de sensibilité des CGM) peut inhiber la sécrétion de la mélatonine, ce qui n'est pas le cas avec une lumière de 555 nm (Zaidi *et al.*, 2007).

Falchi *et al.* (2011, 2016) ont rapporté que la composante bleue de la lumière artificielle modifie les processus naturels, interfère avec la production de la mélatonine et perturbe les rythmes circadiens.

L'exposition à des émissions de longueurs d'onde courtes provenant de sources lumineuses artificielles - une lampe LED enrichie en bleu, un rétro-éclairage pour les écrans à cristaux liquides (LCD) et à diodes électroluminescentes organiques (OLED) par exemple - lors de la soirée et la nuit est donc susceptible de perturber le bon déroulement des cycles circadiens et éventuellement de nuire à la santé humaine (Rimmer *et al.*, 2000). Cette sensibilité importante aux émissions de longueurs d'onde courtes est due à la physiologie cellulaire distincte des CGM, qui ont évolué pour détecter ces gammes de rayonnement.

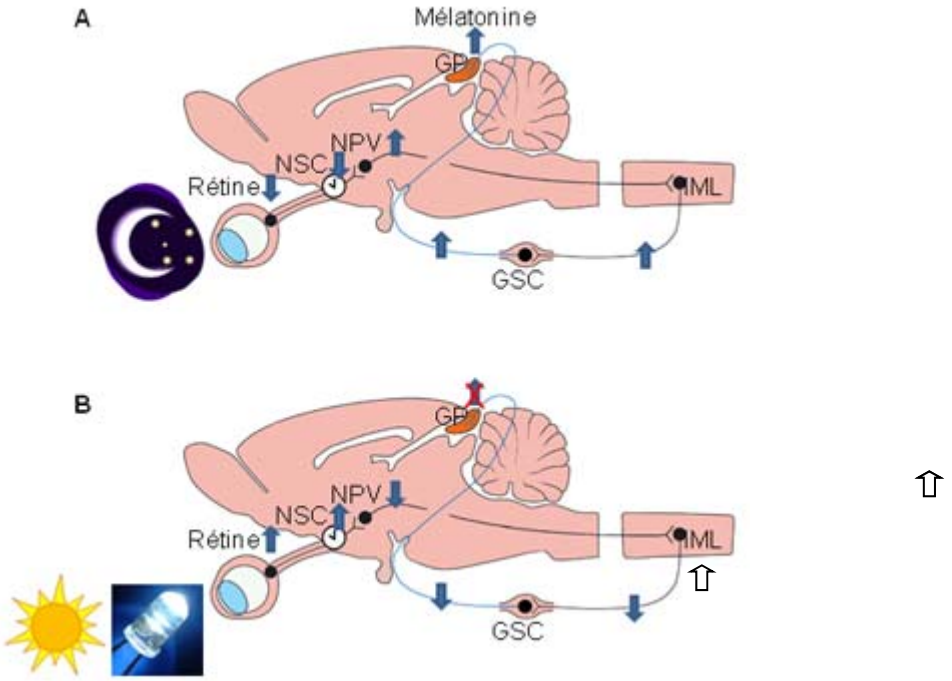


Figure 16 : rapport entre la lumière et la sécrétion de la mélatonine

Schéma A : pendant la nuit, les CGM sont « silencieuses », le NSC n'est pas stimulé et n'envoie pas de signal inhibiteur au NPV. L'enchainement de l'activation de la voie se poursuit jusqu'à la GP et la libération constitutive de la mélatonine.

Schéma B : la stimulation lumineuse (naturelle ou artificielle) active les CGM et le NSC, qui inhibe le NPV et bloque la voie de stimulation de la GP. Les flèches indiquent soit l'activation soit l'inhibition/la

non-activation. Le schéma représente le cerveau du rat, mais les mêmes voies neuronales existent chez l'Homme.

Une dépendance croissante à l'utilisation de l'éclairage artificiel durant la journée est également à prendre en compte (~2 ordres de magnitude plus faible que la lumière du jour). Beaucoup d'entre nous pourraient ne plus recevoir de signaux quotidiens suffisamment forts (Wyse *et al.*, 2014). La synchronisation efficace de l'horloge circadienne nécessite des entrées marquées et robustes – une intensité lumineuse élevée le jour et minime la nuit – et notre vie sociétale étalée sur 24 heures a tendance à atténuer le gradient de ces alternances. Un certain nombre d'études considèrent que ceci pourrait avoir un impact négatif sur la santé (Archer et Oster, 2015; Pan *et al.*, 2011; West et Bechtold, 2015). À l'avenir, une meilleure compréhension du contrôle sensoriel de l'horloge circadienne et des fonctions non-visuelles, aussi bien chez les humains que chez les animaux et les plantes, sera nécessaire pour concevoir des environnements lumineux plus sains.

En ce qui concerne les études analysées, malgré l'introduction étendue assez récente de la technologie LED, de nombreux articles portant sur les effets biologiques de l'éclairage de nuit traite de sources lumineuses en général. Comme explicité ci-dessus, le groupe de travail a principalement ciblé les articles donnant des paramètres précis en ce qui concerne le spectre, la source lumineuse, l'intensité., Les études expérimentales portent uniquement sur des conséquences à court terme d'une exposition lumineuse, alors que les études épidémiologiques disponibles (cf. rapport d'expertise collective de l'Anses sur les effets sanitaires du travail de nuit) portent sur les effets à long terme, il est donc difficile d'établir un lien direct entre les deux.

3.3.2.2 Considérations sur les études analysées

En partant d'une recherche bibliographique utilisant les mots clés anglais comme « *LED* », « *light at night* », « *artificial light* », « *health* », « *circadian rhythms* », « *melatonin* » et « *light exposure* », effectuée sur les 7 dernières années (après la publication de l'expertise de l'Anses sur les effets des LED en 2010), un total de 463 articles publiés dans des journaux scientifiques a été recensé. La lecture de ces articles a permis d'écarter la majorité d'entre eux, jugés peu pertinents (les études exclues étaient les suivantes : études focalisées principalement sur l'exposition diurne ou aux rayons ultraviolets, liées aux effets d'une exposition à la lumière du matin pour traiter la dépression et la démence, liées aux travailleurs de nuit sans mention des conditions d'éclairage et études portant sur la pollution lumineuse avec une évaluation des émissions lumineuses sans prendre en compte les influences biologiques). D'autres articles jugés insuffisamment détaillés sur le plan méthodologique ont été rejetés (manque d'informations méthodologiques, effectifs trop limités). Au total plus de 100 articles abordant les effets de la lumière artificielle sur les rythmes circadiens et pour lesquels les détails expérimentaux étaient suffisamment explicites et précis ont été retenus pour analyse.

La Figure 17 montre l'évolution du nombre de publications dans ce domaine depuis l'an 2000, pris comme point de départ en raison de la découverte de la mélanopsine à cette période. Il faut noter que le nombre de publications a augmenté d'un facteur 2 à 3 depuis les années 2000, et que cette tendance va probablement continuer.

Il est cependant important de noter que les études sont souvent réalisées exclusivement chez les hommes (apparemment les mêmes individus dans certaines études), avec des effectifs toujours assez restreints (entre ~10 et 20), ou chez de jeunes adultes en très bonne santé. Ces limitations font que l'on manque d'informations étendues et solides concernant les réponses d'autres populations telles que les femmes, les enfants et les personnes âgées, les travailleurs de nuit, etc. Ces autres groupes pourraient bien avoir des réponses différentes, sachant notamment que la transmission oculaire de la lumière est plus élevée chez les enfants en raison du cristallin plus transparent (Turner et Mainster, 2017), que le reflexe pupillaire est plus sensible chez les jeunes (Higuchi 2014) et chez les femmes (Fan

et al., 2009), et que les sujets âgés ont une sensibilité à la lumière qui dépend de la durée de l'exposition (Najjar *et al.* 2014).

Cho *et al.* (2015) ont effectué un travail similaire, cherchant plusieurs bases de données bibliographiques afin de répertorier tous les articles concernant les risques potentiels de la lumière de nuit sur la santé humaine. Leur revue porte sur 85 articles sélectionnés à partir de 412 initialement consultés, et leurs analyses portent sur trois aspects récurrents : l'intensité lumineuse, les caractéristiques de l'exposition et les caractéristiques spectrales de la lumière. Leurs critères d'exclusion furent légèrement différents de ceux considérés dans la présente expertise car ils ont exclu les articles traitant de l'exposition à la lumière artificielle dans la journée. De même, ils n'ont pas pris en considération les analyses concernant les effets de la pollution lumineuse sur la faune et la flore (chapitre 7).

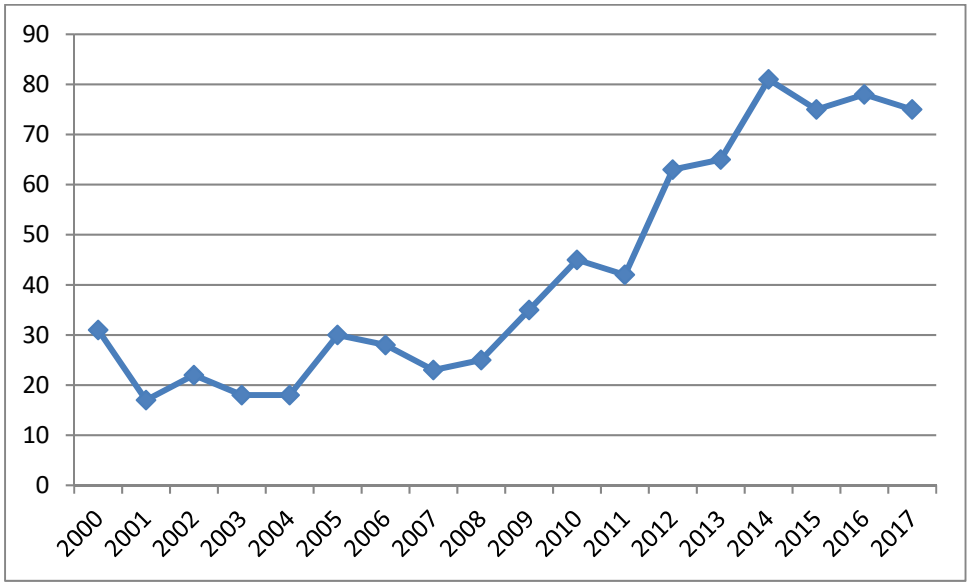


Figure 17 : évolution du nombre d'articles scientifiques portant sur les rythmes circadiens

Évolution du nombre d'articles scientifiques contenant les mots clés anglais (light at night OU dim light OU artificial light OU LED) ET (light pollution OU light exposure OU health) ET (LED OU artificial light OU light at night OU health), publiés dans des journaux internationaux à comité de lecture depuis 2000

Le nombre d'études prenant comme question centrale les effets de l'exposition à la lumière pendant la nuit, surtout la lumière de courte longueur d'onde, sur le fonctionnement de l'horloge circadienne a grandement augmenté depuis 2010 (Figure 17). Cette augmentation s'explique par les connaissances générales grandissantes par rapport à la lumière bleue et les rythmes biologiques et l'enjeu posé par l'introduction massive de l'éclairage LED dans le monde. De nombreux articles scientifiques portent sur les liens entre perturbation de la sécrétion nocturne de la mélatonine par l'éclairage artificiel et les mécanismes moléculaires impliqués dans la pathophysiologie de ces perturbations. Les travaux ont adressé principalement les effets sur le sommeil (traités dans ce rapport dans la section 3.4), le cancer et le métabolisme, et en moindre mesure la reproduction/fertilité. Ces aspects de santé publique, et les mécanismes associés, ont été traités récemment dans le cadre de l'expertise de l'Anses portant sur l'évaluation des risques sanitaires liés au travail de nuit, dont les résultats ont été publiés en juin 2016.

Cette section est structurée par tranches d'âge de la population concernée (fœtus, enfants, adolescents, adultes, personnes âgées) et uniquement sur les études expérimentales chez l'Homme ou l'animal faisant mention explicite des conditions et la nature de l'éclairage (sont donc exclues les publications sur le travail posté *stricto sensu*). Un découpage est donc proposé selon l'âge de la population en question – fœtus/nouveau-né, jeune

enfant/adolescent, adulte et personne âgée – parce que les effets observés et les éléments de preuve associés aux effets observés diffèrent.

3.3.2.3 Les effets de l'éclairage nocturne sur les rythmes biologiques oculaires

3.3.2.3.1 Dérèglement de l'horloge rétinienne par la lumière le soir

Tout comme pour l'horloge centrale, l'évidence expérimentale montre que l'horloge rétinienne est vite déréglée par une exposition à la lumière durant la nuit : par rapport aux profils d'expression des gènes horloges en cycle normal jour/nuit, un seul cycle de 24 heures en lumière constante d'intensité modérée est suffisant pour perturber les rythmes (Bobu *et al.*, 2013). À son tour, ce dérèglement de l'horloge va provoquer des perturbations de l'expression de nombreux gènes visuels cibles, tels que la rhodopsine, les opsines des cônes, la mélanopsine, l'aralkylamine-N-acétyltransférase (ou AA-NAT, l'enzyme nécessaire pour synthétiser la mélatonine) (Bobu *et al.*, 2013).

La Figure 18 ci-dessous présente le processus de phagocytose des photorécepteurs et les effets de la lumière chez le rat. En condition standard (12 h de lumière et 12 h d'obscurité (L/O, rangée du haut), les gènes de la rhodopsine (colonne de gauche, A), de l'opsine des cônes (colonne du milieu, B) et de l'acétyl transférase (aa-nat) (l'enzyme responsable de la synthèse de la mélatonine) (colonne de droite, C) montrent des profils d'expression rythmiques sur 24 heures avec des pics situés au moment de l'allumage de la lumière (défini par convention comme « *heure zeitgeber* 0 », ou ZT 0 (pour la rhodopsine et opsine des cônes) et ZT 20 (correspondant au milieu de la nuit) pour l'AA-NAT, respectivement). En condition d'obscurité constante (O/O, rangée du milieu), ces profils ne sont guère affectés, simplement légèrement estompés. Mais en condition de lumière constante (L/L, rangée du bas), les profils sont soient très désynchronisés (les pics d'expression pour la rhodopsine et l'opsine des cônes sont avancés d'environs 8 heures, vers le mileu de la nuit), soient peu rythmiques (AA-NAT) (Bobu *et al.*, 2013). Par ailleurs, le processus normalement très rythmique de la phagocytose est totalement modifié (Bobu et Hicks, 2009 ; Mehdi et Hicks, 2010).

La phagocytose des segments externes des photorécepteurs est un processus physiologique universel, son rôle est de réparer les photorécepteurs à la suite de stress environnementaux. Les segments externes contiennent la machinerie moléculaire essentielle à la détection de la lumière et à sa traduction en signaux électriques, enclenchant ainsi le processus de la vision. Mais ils sont sujets à des agressions de type photo-oxydatif, par une exposition à la lumière elle-même (très énergétique), par une tension élevée en oxygène, ou un environnement lipidique qui favorise la propagation des endommagements moléculaires. Afin de limiter ces altérations, ils sont régénérés en permanence par un cycle de synthèse des membranes nouvelles en équilibre avec l'élimination des membranes anciennes. L'élimination des membranes des photorécepteurs est assurée par l'épithélium pigmentaire rétinien (EPR) apposé aux segments externes, qui internalise (« phagocytose ») les membranes endommagées (*cf.* Figure **18**). Une fois internalisés, ces déchets membranaires sont digérés et les composés moléculaires sont pour la plupart recyclés. L'ampleur de ce processus n'est pas à sous-estimer : quelques 2 000 paquets de membranes sont phagocytés par cellule par jour, ce qui fait que chez une personne de 80 ans, chaque cellule de l'EPR (qui au contraire des photorécepteurs ne se renouvellent pas) aura traité environ 100 millions de déchets. Une partie de ces produits ne peut être métabolisée et s'accumule à l'intérieur de l'EPR. Ces résidus contribuent à la formation de la lipofuscine, des dépôts insolubles qui interfèrent avec le fonctionnement normal de l'EPR et qui sont photo-sensibilisants et impliqués dans la survenue de pathologies rétiniennes. La phagocytose est un processus éminemment circadien, avec un fort pic d'activité le matin dans toutes les espèces examinées. Mais après 24 heures en lumière constante il n'y a plus de synchronisation et l'activité de phagocytose est aléatoire toute au long de la journée, voir augmentée pour les cônes (Bobu et Hicks, 2009 ; Mehdi et Hicks, 2010).

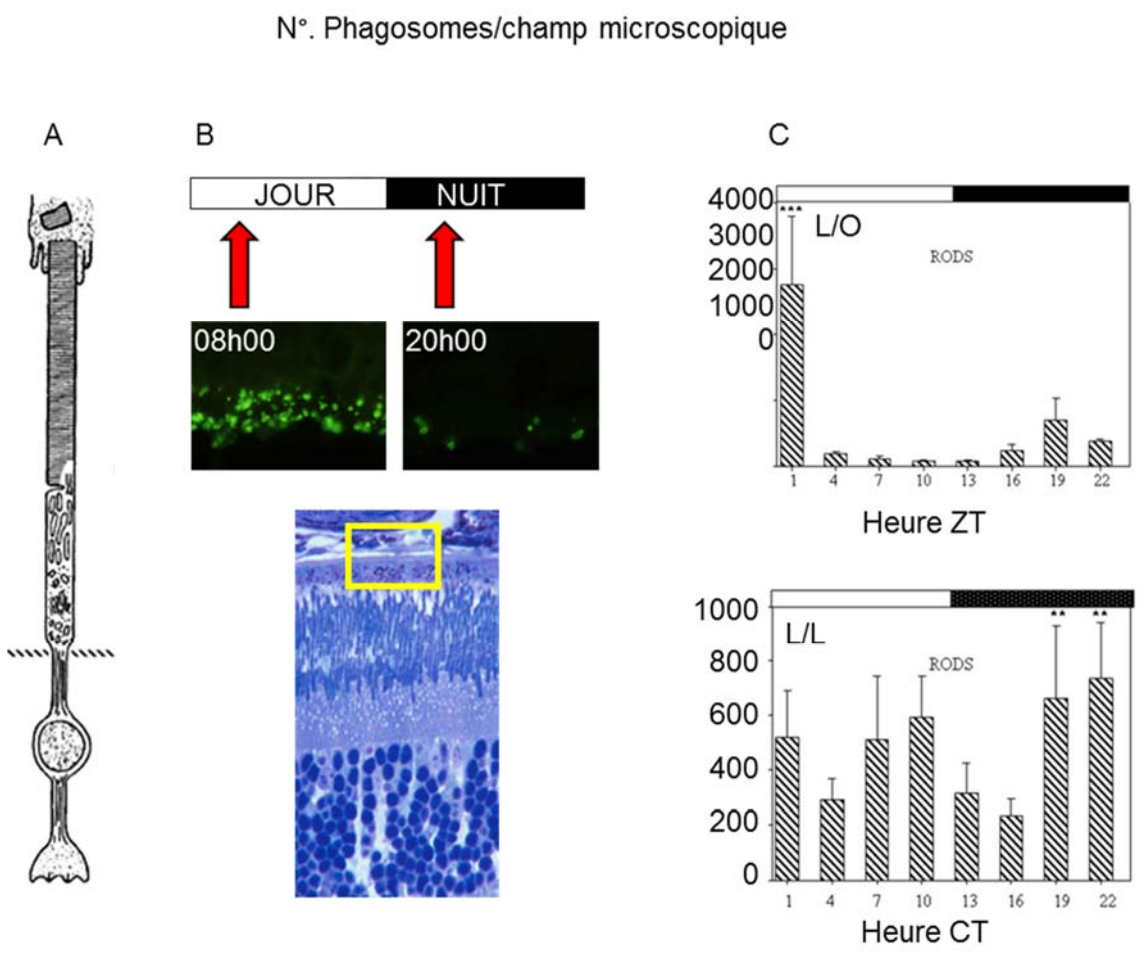


Figure 18 : phagocytose des photorécepteurs et effets de la lumière chez le rat

Schéma A *: schéma montrant comment chaque jour le bout du photorécepteur se détache pour être ensuite internalisé (« phagocyté ») par l'épithélium pigmentaire de la rétine (EPR) adjacente.*

Schéma B *: schéma montrant que ce processus est fortement rythmique. Si on réalise un prélèvement de tissu à 08h00 du matin (une heure après l'allumage des lumières), l'EPR est rempli de points fluorescents correspondant aux débris des photorécepteurs phagocytés (« phagosomes »). Une rétine prélevée à 20h00 (une heure après l'extinction des lumières) ne présente pratiquement plus de phagosome. Le cadre jaune dans la photo du bas montre la région observée par la microscopie à fluorescence au-dessus.*

Schéma C *: ce processus peut être quantifié en comptant les points fluorescents sur coupe histologique. En condition de lumière/obscurité standard (L/O, histogramme du haut) un grand pic d'activité est observé à ZT 1, correspondant à une heure après allumage, alors que sur le reste de la période de 24 heures on ne détecte que très peu de phagosomes. Or, en condition de lumière constante (L/L, histogramme du bas), l'activité est distribuée tout au long de la journée sans pic apparent. (Source : Bobu et Hicks, 2009, image modifée).*

Un dernier point important concerne la susceptibilité à la phototoxicité (sujet traité dans la section 3.5) qui dépend également d'une horloge circadienne. Plusieurs études exposant des rats montrent qu'une exposition au stress lumineux à 01h00 du matin induit significativement plus de dégâts rétiniens (perte des photorécepteurs, diminution du contenu de la rhodopsine) que chez les groupes exposés à 09h00 ou à 16h00 (Organisciak *et al.*, 2000 ; Vaughan *et al.*, 2002, Organisciak et Vaughan, 2010). Ces analyses furent réalisées en conditions d'obscurité constante pendant 24 heures (absence totale de l'éclairage de la pièce), permettant de conclure que l'effet est piloté par une horloge circadienne. L'explication physiologique de cette vulnérabilité augmentée vient probablement de la modification cellulaire de la rétine pendant la période de nuit, lui permettant de détecter la lumière

normalement très faible à ce moment (*cf.* ci-dessus). Bien que l'extrapolation de ces résultats à l'Homme soit hasardeuse (utilisation de souche albinos, espèce nocturne, conditions expérimentales artificielles), un parallèle avec le travail de nuit en conditions d'éclairage soutenu peut être évoqué. Il est possible de d'interroger si, à force de travailler répétitivement pendant la nuit sous un éclairage fort (qui pourrait être rencontré en milieu hospitalier ou industriel, par exemple), les yeux ne sont pas régulièrement exposés à un moment où ils sont particulièrement vulnérables ; la santé rétinienne humaine pourrait être ainsi compromise. Une étude clinique dont les résultats vont dans ce sens montre bien un lien direct entre le travail de nuit et l'apparition de la choriorétinopathie séreuse centrale (Bousquet *et al.*, 2016). Mais des analyses approfondies sur le plan ophtalmologique chez une population théoriquement à risque n'ont pas à ce jour été réalisées.

Pour récapituler, le dérèglement de l'horloge circadienne centrale au niveau du cerveau conduit à son tour à des perturbations au niveau des horloges périphériques d'organes telles que le pancréas (Lee *et al.*, 2011) ou le foie (Lamia *et al.*, 2008), qui peuvent provoquer des troubles métaboliques et physiologiques responsables à moyen ou long terme de maladies chroniques, telle que le diabète. Donc il est plausible que le dérèglement de l'horloge rétinienne par une exposition à la lumière en dehors des heures normalement éclairées conduise à des problèmes à long terme. Quelles pourraient être les conséquences pour la santé visuelle humaine ? En se basant sur des données expérimentales acquises sur des modèles (études animales), les yeux sont dans un état de sensibilité accrue pendant la nuit, et donc de fragilité augmentée, le stress engendré par l'exposition lumineuse à cette période pourrait donc être majoré en raison des effets perturbateurs sur l'horloge rétinienne.

3.3.2.3.2 Conclusions

Les études portant sur des liens possibles entre le moment de l'exposition à la lumière et le dérèglement de l'horloge circadienne endogène de la rétine sont limitées aux modèles animaux et réalisées en conditions artificielles. Mais la situation de la rétine, en première ligne pour être impactée par la lumière, les données issues des expériences chez l'animal, et la susceptibilité d'autres horloges circadiennes périphériques à la lumière renforcent l'hypothèse selon laquelle les effets de l'éclairage sur la santé visuelle seraient sous-estimés. Des investigations sur des corrélations possibles entre travail de nuit et état de la rétine mériteraient d'être réalisées.

3.3.2.4 Effets de l'environnement lumineux maternel sur le développement et la maturation des descendants : études chez l'animal

3.3.2.4.1 Généralités

Plusieurs études expérimentales étudient les possibles liens entre l'exposition lumineuse de la mère et les effets sur leur progéniture, soit au court terme (aux stades embryonnaire et nouveau-né), soit au long terme (qui perdurent jusqu'à l'âge adulte atteinte). En condition de cycle jour-nuit normal, la glande pinéale maternelle produit de la mélatonine de façon circadienne, avec des taux plasmatiques élevés la nuit et de très faibles niveaux diurnes (Richter *et al.*, 2004). La mélatonine a la capacité de traverser toutes les barrières physiologiques telles que le placenta. Chez plusieurs espèces, la glande pinéale fétale ne synthétise pas de mélatonine (Okatani *et al.*, 1998), et l'embryon est uniquement exposé au rythme maternel de la mélatonine, nécessaire pour synchroniser les horloges périphériques présentes dans les organes foétaux telles que la glande surrénale (Mendez *et al.*, 2012). L'exposition à la lumière la nuit supprime ou diminue le pic nocturne de la mélatonine maternelle, privant ainsi le fœtus d'un signal biologique important. En conséquence, il a été montré que la chronodisruption maternelle, et en particulier la suppression de la mélatonine, induit plusieurs effets négatifs sur le fœtus (retard de croissance, sécrétion hormonale réduite…) (Mendez *et al.*, 2012).

3.3.2.4.2 Lien entre l'environnement lumineux de la mère et le développement cognitif et métabolique des descendants

Les considérations et arguments scientifiques qui suivent s'appuient en partie sur plusieurs études expérimentales menées chez les rats et les souris. Le travail de Vioculescu *et al.* (2015) concerne l'exposition de rates gestantes à une illumination constante (500 lx) pendant la nuit. Immédiatement après la naissance, les mâles furent identifiés et exposés à un cycle lumière-obscurité normal ; les analyses moléculaires (niveaux cérébraux de mélatonine ou sérotonine, concentration de radicaux libres) ont été effectuées soit chez les ratons, soit chez les rats de 60 jours. Le groupe de 60 jours a également subi une batterie de tests comportementaux pour mesurer l'état d'anxiété et la mémoire à court terme. Le groupe issu des mères ayant été exposées à la lumière de nuit montrait des signes d'anxiété (appréhension à traverser un espace ouvert, appréhension à entrer dans des couloirs illuminés, diminution de l'exploration) et une diminution des capacités mnésiques. Ce même groupe montrait un déficit dans le contenu cérébral en mélatonine et en sérotonine, et une augmentation du taux des radicaux libres, par rapport aux rats de 60 jours dont les mères étaient élevées en cycle jour-nuit standard. En résumé, cette étude montre que l'environnement lumineux de la mère (exposition à un éclairage de nuit) a des répercussions négatives à long terme sur le développement cognitif des descendants. *[Limitations : pas de contrôle de la mélatonine chez la mère, pas d'information spectrale ni de valeurs de luminance au niveau oculaire. Pertinence d'un modèle animal nocturne par rapport à l'Homme].*

Les travaux de Varcoe *et al.* (2011) portent sur les conséquences métaboliques chez les descendants de rates soumises à des cycles de lumière-obscurité inversés, tantôt éclairées le jour, tantôt la nuit (modèle animal du travail posté). La progéniture montrait de multiples perturbations métaboliques, y compris une obésité (+29 % à 3 mois), de l'hyperinsulémie (+83-110 % à 12 mois), de l'hyperleptinémie (+99 % à 3 mois) et une intolérance au glucose (+18 % à 12 mois), caractéristiques d'un syndrome métabolique et d'un diabète de type 2. De plus, certains paramètres mesurés étaient différents entre mâles et femelles, indiquant un effet spécifique selon le genre. *[Limitations : pas d'information concernant l'exposition lumineuse de la mère – ni l'intensité, ni le spectre ni de valeurs de luminance au niveau oculaire. La pertinence d'un modèle animal nocturne par rapport à l'Homme n'est pas évidente].*

3.3.2.4.3 Les effets négatifs de l'environnement lumineux de la mère sur ses descendants à l'âge adulte

Le travail de Vilches *et al.* (2014) va plus loin dans l'identification des anomalies neurales chez les descendants des rates soumises à un stress lumineux. Ils ont comparé les changements moléculaires au niveau de l'hippocampe (structure neurale cruciale pour la mémoire et l'apprentissage) des petits dont la mère a subi une exposition nocturne à la lumière (« mère-LAN ») et des petits dont la mère était élevée en conditions jour-nuit normales (« mère-JN »). D'une part, les différents éléments de l'horloge circadienne ainsi que plusieurs gènes contrôlés par l'horloge des petits d'une mère-JN montraient des rythmes d'expression normaux, alors que les mêmes gènes chez des ratons issus d'une mère-LAN étaient sans rythmicité. D'autre part, à l'âge adulte les descendants de mère-LAN n'avaient aucun profil rythmique ni de mélatonine ni de corticoïdes. Et enfin, l'expression génique de l'hippocampe fut réduite, et ces animaux faisaient preuve d'une mémoire spatiale déficitaire.

Mendez *et al.* (2012) ont utilisé un protocole expérimental similaire (exposition de la mère à la lumière pendant la nuit) pour examiner la croissance intra-utérine du fœtus (significativement réduite par rapport aux contrôles : 1,696 ± 0,13 g venant d'une mère-JN, 1,376 ± 0,05 venant d'une mère-LAN, $p < 0,05$), le profil d'expression des gènes circadiens de la glande surrénale embryonnaire (tous modifiés par rapport aux contrôles, soit aplatis soit décalés), et la réponse des glandes surrénales aux hormones (significativement altérée chez les petits dérivés d'une mère-LAN). Les mêmes auteurs montrent que la progéniture des mères-LAN recevant une injection de mélatonine lors de la nuit subjective est normale

par rapport à ces différentes mesures. *[Limitations : pas d'information concernant l'exposition lumineuse de la mère – ni l'intensité, ni le spectre ni de valeurs de luminance au niveau oculaire. Pertinence d'un modèle animal nocturne par rapport à l'Homme].* Une étude récente chez la souris, réalisée par Smarr *et al.* (2017), a utilisé une approche modifiée pour distinguer les effets dus à la gestation *per se* des effets post-nataux (altérations possibles des interactions mère-portée), en utilisant des souris porteuses soient élevées en cycle jour-nuit normal, soient exposées à la lumière la nuit. Le niveau d'éclairage utilisé était d'environ 400 lx pendant toute la nuit durant la deuxième moitié de la période de gestation. Ils ont ainsi déterminé que les effets post-nataux concernent une diminution de la masse corporelle à l'âge adulte, des interactions sociales réduites et un état d'hyperactivité. Ces effets sont liés à un comportement maternel altéré. Les effets strictement *in utero* ont exacerbé les problèmes sociaux. En résumé, la perturbation circadienne chronique pendant la gestation affecte le comportement maternel et le phénotype comportemental de la progéniture à l'âge adulte, indépendamment du stress post-natal.

Une étude récente de Cissé *et al.* (2017) examine les effets immuns chez les portées issues des hamsters des deux sexes soumis à un éclairage de nuit faible (5 lx), par rapport aux nuits totalement obscures. Les hamsters furent traités ainsi pendant 9 semaines, puis accouplés ensemble dans les conditions de nuit totale. De même, les portées étaient nées et élevées sans lumière de nuit. Or, le système immun des petits était altéré par rapport aux animaux témoins selon plusieurs paramètres (« hypersensibilité retardée », présence d'anticorps circulants, expression des récepteurs endocriniens au niveau de la rate). Les auteurs avancent que ces effets qui perdurent à travers les générations sont dus aux modifications épigénétiques induites par une exposition à la lumière la nuit. *[Limitations : pas d'information concernant l'exposition lumineuse de la mère – ni le spectre ni de valeurs de luminance au niveau oculaire. Pertinence des modèles animaux nocturnes par rapport à l'Homme].*

3.3.2.4.4 Conclusions

En conclusion, les données expérimentales chez l'animal semblent indiquer que l'exposition lumineuse de la mère influence le devenir de ses descendants, sur les plans métaboliques et cognitifs. Ces effets peuvent être ressentis à la naissance (descendants en sous poids, difficultés d'accouchement), mais perdurent jusqu'à l'âge adulte (déficiences cognitives, problèmes métaboliques). Cependant l'extrapolation vers l'Homme reste délicate en raison de l'utilisation des espèces nocturnes et des conditions expérimentales souvent extrêmes. Néanmoins, en extrapolant à l'Homme, les perturbations circadiennes pourraient être très répandues dans la société actuelle, si elles sont induites par l'éclairage moderne, où elles pourraient impacter négativement le développement de l'embryon (*in utero*). Dans ce contexte, en 2004, 12,6 % des femmes âgées de plus de 16 ans aux États-Unis étaient des travailleuses postées, et donc susceptibles d'être exposées à la lumière la nuit. Étant donné les impacts négatifs potentiels sur la santé reproductive féminine, la perturbation circadienne pourrait représenter une menace environnementale pour les femmes et leurs enfants.

Les résultats comportementaux d'hyperactivité et d'évitement social chez les animaux sont compatibles avec les observations chez les adolescents humains : la perturbation du sommeil chez les adolescents est associée au désordre de l'hyperactivité de l'attention et aux troubles du spectre autistique, les deux étant à la hausse au cours des dernières années, tout comme le diabète et le surpoids. Ces résultats soutiennent l'hypothèse selon laquelle une perturbation circadienne accrue au début de la vie pourrait jouer un rôle important sur le devenir physique et mental.

3.3.2.5 Effets chez les jeunes (enfant, adolescent)

3.3.2.5.1 Généralités

Les études concernant la désynchronisation de l'horloge circadienne par la lumière la nuit réalisées chez les jeunes sont controversées en raison d'un manque de rigueur

procédurale : utilisation d'échantillons de sang recueillis uniquement au cours de la journée ou de la nuit, absence des caractéristiques temporelles de la sécrétion de mélatonine, manque de contrôle de la durée et de l'intensité réelles de l'exposition à la lumière, utilisation de caractéristiques cliniques floues pour définir la puberté, différentes tailles d'échantillons, horaires de sommeil-réveil non contrôlés. Néanmoins, certaines analyses sont concluantes.

3.3.2.5.2 Étude chez l'enfant, mesure du rapport entre l'intensité lumineuse et la sécrétion de mélatonine, comparaison avec des adultes

Higuchi *et al.* (2014) ont mené une étude sur 33 enfants (moyenne d'âge 9,2 ± 1,5 ans) et 29 adultes (leurs parents, moyenne d'âge 41,6 ± 4,7 ans), en deux temps. La première expérience, en conditions contrôlées de laboratoire impliquait 13 enfants (5 hommes, 8 femmes) et 13 adultes (3 hommes, 10 femmes). Lors d'une première soirée en salle expérimentale, les participants ont été exposés à une lumière faible (< 30 lx au niveau des yeux) ainsi qu'à une lumière plus forte (580 lx) pendant environ 3 à 5 heures avant de se coucher, et des mesures de diamètre pupillaire et de concentration de mélatonine dans la salive ont été réalisées. Les conditions furent similaires lors de la deuxième séance, les participants étaient exposés à une lumière faible (30 lx au niveau des yeux) puis à des conditions lumineuses réelles, proches de celles que l'on peut retrouver à la maison (mesurées comme étant 140 ± 82,7 lx). Les résultats de la première expérience montraient que les enfants et les adultes furent tous affectés par la lumière de 580 lx, avec une suppression de 88,2 % de la mélatonine chez les enfants, et de 46,3 % chez les adultes. La différence entre les deux groupes était significative, $p < 0,01$, bien que le nombre de participants fut très limité ($n = 5$ et 6 respectivement) car certaines personnes n'avait pas commencé à être sécrétée de mélatonine au moment des tests. La deuxième expérience a confirmé ces résultats, dans le sens où les enfants furent plus sensibles que les adultes à l'intensité lumineuse. En effet, à domicile, les enfants avaient une diminution significative de sécrétion de la mélatonine ($n = 15$, $p < 0,05$) qui n'étaient pas retrouvée chez les adultes ($n = 11$).

Akacem *et al.* (2016) ont examiné une cohorte de très jeunes enfants, de moyenne d'âge 4,7 ± 0,2 ans ($n = 21$, 12 garçons, 9 filles), en conditions réelles, dans un contexte familial en soirée pendant les heures précédant le coucher. Afin de suivre leur activité, les enfants portaient un actimètre (capteur de mouvement) au poignet et un photomètre pendentif afin de mesurer objectivement l'exposition lumineuse de chaque habitation (en moyenne 710 lx), la préparation au sommeil, et le « DLMO » (début de sécrétion de mélatonine dans des conditions de luminosité faible). Les mesures ont été prises à la 5ème journée, et ont mis en évidence une faible corrélation positive entre l'éclairage et un DLMO plus tardif, mais seulement si l'heure de coucher était également prise en compte ($r = 0,46$, $p < 0,02$). Ces données mettent donc en évidence que l'intensité de l'éclairage en soirée est un des facteurs capable d'influencer l'endormissement des petits enfants. *[Limitations : pas d'information sur la température de couleur, beaucoup de variabilité dans l'intensité, manque de précision d'un photomètre en pendentif pour évaluer l'intensité lumineuse au niveau oculaire].*

3.3.2.5.3 Étude chez l'enfant de la suppression de mélatonine et du DLMO en fonction de la température de couleur, comparaison avec les adultes

Une deuxième étude de la même équipe a regardé le lien potentiel entre la température de couleur de l'éclairage domestique et la suppression de la mélatonine chez l'enfant (Higuchi *et al.*, 2016). Dans une cohorte de 20 enfants (7 H, 13 F, moyenne d'âge 9,7 ans) et de 17 adultes (3 H, 14 F, moyenne d'âge 41,9 ans), les auteurs ont examiné l'heure de début de la sécrétion de la mélatonine (*dim light melatonin onset*, ou DLMO, marqueur fiable de l'horloge circadienne, Lewy *et al.*, 1999) à la maison, en conditions de faible éclairage (< 30 lx) ou d'éclairage normal (couleur de température 3 812,3 ± 1 041,5 K et 4 019,6 ± 925,7 K pour adultes et enfants respectivement). Malgré des variations inter-individuelles importantes dans les deux groupes, les auteurs ont mis en évidence : i) un DLMO avancé d'une heure chez les enfants (DLMO moyen adulte – 21h50 ; DLMO moyen enfant – 20h55) ; ii) le fait

que le délai entre le DLMO et l'endormissement est plus court chez les enfants (moyenne de 96,8 min chez les adultes, 40,1 min chez les enfants ; iii) une corrélation positive entre la température de couleur des sources lumineuses à domicile et le DLMO, aussi bien chez les adultes ($r = 0,735$, $p < 0,01$) que chez les enfants ($r = 0,479$, $p < 0,05$) ; iv) pas de corrélation entre l'intensité lumineuse et le DLMO, ni chez les adultes ni chez les enfants. Ainsi, selon cette étude, plus la proportion de lumière bleue avant le coucher (indiquée par la température de couleur) est élevée, plus la suppression de la mélatonine est importante. *[Limitations : durée d'exposition à la lumière variable (relative à l'heure d'endormissement de chaque individu) ; ~50 % des participants écartés des analyses statistiques en raison d'un profil de mélatonine trop retardé ; d'autres facteurs potentiels non pris en compte].*

3.3.2.5.4 Études chez l'adolescent reliant mélatonine, horloges circadiennes et lumière

Des résultats allant dans le même sens ont été obtenus dans deux études réalisées par Crowley *et al.* (2014, 2015), la première concernant les caractéristiques du sommeil et l'horloge circadienne chez deux groupes d'adolescents, « jeunes » (21 H, 17 F, âgés de 9-10 ans) et « âgés » (30 H, 26 F, âgés de 15-16 ans), et la deuxième comparant des cohortes d'enfants en début-milieu de puberté (déterminé par l'échelle de Tanner, tranche d'âge 9,1 - 14,7 ans ; $n = 38$) et en phase tardive-fin de puberté (tranche d'âge 11,5 - 15,9 ans ; $n = 29$). Dans le premier article (Crowley *et al.*, 2014), les participants ont porté un actigraphe au poignet pendant au moins une semaine à la maison pour mesurer le temps de sommeil, et le DLMO a été mesuré au laboratoire. Les mesures montrent qu'avec l'âge, le début de sommeil est retardé, ainsi que le réveil et l'heure du DLMO. Dans la deuxième étude (Crowley *et al.*, 2015), les différents groupes devaient respecter un rythme éveil-sommeil régulier pendant 10 jours avant le début de l'expérience. Les enfants et adolescents furent repartis en deux groupes, exposés à 1 heure de lumière de 15, 150 ou 500 lx à 23h00 (groupe de soirée), ou à 03h00 (groupe du matin). Le taux de mélatonine circulante était évalué dans la salive toutes les 30 minutes pendant l'état d'éveil, et pendant la nuit les participants ont été suivis par EEG, ECG, électro-oculographie et électromyographie. Les données montrent qu'une exposition à la lumière en soirée (23h00) provoque une suppression significative de la mélatonine dans tous les cas (sauf dans le groupe « post-pubère » à 15 lx), et que cette suppression est d'autant plus importante chez le groupe « pré-pubère » ($p < 0,05$). En revanche, une exposition à 03h00 n'a pas d'effet à 15 lx, alors que des expositions de 150 ou 500 lx suppriment la mélatonine autant dans les deux groupes. Donc, dans l'ensemble, ces études montrent une sensibilité à la lumière plus importante chez les jeunes adolescents, mais indique une relation plus complexe entre l'heure de sommeil et la désynchronisation circadienne chez les adolescents post-pubères. *[Limitations : pas d'information sur la nature de la source de lumière ni la température de couleur, ni les valeurs d'exposition au niveau des yeux].*

3.3.2.5.5 Conclusions

En conclusion, les différents articles soutiennent l'hypothèse selon laquelle les enfants et adolescents seraient plus sensibles aux effets de l'éclairage nocturne que les adultes, ceci potentiellement en raison de la transparence du cristallin laissant entrer plus de lumière. La transmission des rayonnements de longueur d'onde courte serait particulièrement importante, parce que le jaunissement progressif du cristallin en fonction de l'âge filtre ensuite plus efficacement cette gamme. Certaines études ont été réalisées en conditions réelles dans un contexte familial, et mettent en évidence un effet significatif de l'intensité et du spectre de l'éclairage sur les cycles d'éveil et de sommeil et la synchronisation de l'horloge circadienne. À l'heure actuelle, il n'existe pas d'informations claires concernant les systèmes à LED qui projettent des images sur le mur pendant la nuit, les veilleuses à LED qui sont bleues ainsi que les jouets de type lampes de poche à LED.

3.3.2.6 Effets chez les adultes

3.3.2.6.1 Étude expérimentale chez le jeune adulte : éclairage domestique et sécrétion de mélatonine

Les analyses réalisées chez les personnes adultes retrouvent en grande partie les tendances observées chez les jeunes. Gooley *et al.* (2011) ont examiné les effets de l'éclairage typique de domicile sur la sécrétion de la mélatonine dans le cadre d'une étude expérimentale. Cent seize jeunes adultes (18 - 30 ans, genre non-spécifié) ont été recrutés pour l'étude, conduite en conditions contrôlées au laboratoire. Suite à un bilan de santé physique et mentale, les participants ont passé deux semaines à respecter un rythme d'éveil-sommeil de 16 h et 8 h respectivement. La source de lumière (plafonniers fluorescents), l'intensité (jusqu'à environ 200 lx au niveau de la cornée) et la température de couleur (4 100 K) furent toutes contrôlées. Les participants ont suivi un protocole selon lequel ils étaient exposés avant de se coucher soit à de la lumière faible (< 3 lx pendant 8 h), soit à de la lumière d'intensité de 200 lx pendant 8 h, comparable aux niveaux domestiques standards. La concentration plasmatique de mélatonine était mesurée par des prises de sang automatisées, toutes les 30 à 60 minutes. Les résultats montrent qu'une exposition de 20 lx retarde significativement le DLMO (> 1 h) chez 99 % des participants, et que la durée totale de sécrétion est amputée de 60 minutes. De plus, une exposition à 200 lx pendant le sommeil réduit la concentration de mélatonine de 50 %. En résumé, des conditions d'éclairage typiquement rencontrées à la maison peuvent affecter la sécrétion de la mélatonine et possiblement la régulation de l'horloge, ce qui pose la question des conséquences sur la santé à long terme.

3.3.2.6.2 Étude expérimentale chez le jeune adulte : exposition forte à la lumière la nuit et paramètres glycémiques

Les effets aigus d'une exposition à la lumière la nuit ont été mis en évidence par Gimenez *et al.* (2017). Leur étude comprenait 17 participants jeunes adultes (moyenne d'âge 22,5 ans, 9 hommes, 8 femmes) qui ont été suivis pendant 11 h (de 18h00 à 05h00) en conditions d'intensité lumineuse basse (< 5 lx) ou forte (500 lx). La source lumineuse était une lampe fluorescente, dont les caractéristiques spectrales d'émission sont présentées dans l'article (trois pics principaux vers 430, 550 et 610 nm, chacun d'irradiance ~3,5 W/m^2), et les intensités au niveau cornéen étaient mesurées dans le sens vertical (basse, 1,21 ± 0.13 lx ; forte 552,7 ± 16 lx) et horizontal (basse, 1,06 ± 0,06 lx ; forte, 305 ± 10,1 lx). Des prises de sang et de salive ont été obtenues avant, pendant et après l'exposition à la lumière, lors de laquelle (23h00) ils ont mangé un repas isocalorique, sans carbohydrates. Les échantillons ont été testés pour la présence d'insuline, de glucose, de mélatonine et d'acides gras. Les résultats montrent qu'avant le repas, les acides gras étaient significativement plus élevés en lumière basse qu'en lumière forte ($p < 0,01$). Après le repas, les taux de glucose et d'insuline étaient significativement plus élevés en lumière forte qu'en lumière basse ($p = 0,02$, $p = 0,001$, respectivement). Les niveaux de mélatonine salivaire étaient significativement plus élevés en lumière basse qu'en lumière forte ($p = 0,005$). L'exposition à la lumière forte pendant la nuit était associée à une augmentation significative du glucose plasmatique et de l'insuline, suggérant une intolérance au glucose et une insensibilité à l'insuline. Ces résultats peuvent expliquer certains des problèmes de santé signalés chez les travailleurs postés, et suggèrent que les déséquilibres métaboliques interviennent très rapidement lors d'un éclairage nocturne.

3.3.2.6.3 Études expérimentales chez l'Homme : sensibilité de l'horloge circadienne à une exposition à la lumière la nuit courte mais intense

La sensibilité de l'horloge circadienne même lors d'expositions lumineuses de nuit de très courte durée a été mise en évidence par les travaux de Chang *et al.* (2012) et Rahmann *et al.* (2017a) (et de plus anciennes publications de Gronfier *et al.* (2004) et Rimmer *et al.* (2000)). Chang *et al.* ont montré que des participants (39 jeunes adultes, moyenne d'âge 22 ans, 23 hommes, 16 femmes) exposés à respectivement 12 minutes, 1 h, 2,5 h et 4 h de

lumière intense (éclairement lumineux de 8 000 à 9 000 lx mesuré au niveau de l'œil, plafonniers fluorescents de température de couleur 4 100 K) pendant la période d'obscurité, montraient tous un retard de phase de l'horloge circadienne, comme en témoigne le retard du DLMO. De plus, le rapport entre la durée et l'amplitude du décalage est non-linéaire, puisque si les données sont analysées sous la forme d'amplitude d'effet par rapport au temps d'exposition, l'exposition de 12 minutes est 5 fois plus efficace qu'une exposition de 4 h. Ces données ont été encore affinées par Rahmann *et al.*, qui montrent qu'une exposition aussi courte que 15 secondes de lumière intense (comme avant, plafonniers fluorescents, éclairement lumineux de 9 500 lx, température de couleur de 4 100 K) est suffisante pour retarder l'horloge (paramètre mesuré : DLMO) chez des jeunes adultes volontaires (n = 26, moyenne d'âge 23,6 ans, 11 hommes, 15 femmes).
Plus surprenant encore, Najjar *et al.* (2016) ont montré que des flashs de 2 ms de lumière, lorsqu'ils sont présentés pendant 1 h au cours de la nuit avec une fréquence de 7,4 secondes, retardent l'horloge circadienne encore plus efficacement qu'une exposition à la lumière d'intensité équivalente pendant 1 heure. En résumé, ces résultats montrent qu'il est suffisant d'être exposé à une source lumineuse intense pendant la nuit pendant un petit laps de temps pour affecter l'horloge circadienne centrale.

3.3.2.6.4 Lumière à LED et dépendance spectrale de la désynchronisation circadienne

Rahmann *et al.* (2017b) ont également examiné la dépendance spectrale de la désynchronisation circadienne, en comparant les effets de la lumière fluorescente utilisée dans leurs études précédentes (température de couleur 4 100 K) et les effets d'une source LED sélectivement filtrée pour ne pas émettre entre 470 et 500 nm (qui correspond donc au pic mélanopique).

Les intensités utilisées furent d'environ 50 lx, estimées comme standard dans un contexte familial. Seize participants (moyenne d'âge 24,2 ans, 8 hommes, 8 femmes) ont été exposés à l'une ou l'autre des deux conditions lumineuses, à intensité de luminance égale (et pour les témoins à de la lumière faible, < 3 lx), pendant 8 h avant de se coucher, avec comme mesures effectuées le DLMO, un EEG et plusieurs caractéristiques du sommeil (« efficacité du sommeil » définie comme le temps passé actuellement endormi par rapport au temps total passé au lit, et le profil des ondes lentes comme un paramètre de la qualité du sommeil). Comme attendu, la suppression de la mélatonine fut moindre sous une lumière < 3 lx, et la source LED filtrée fut moins perturbatrice que la lumière de 4 100 K (24,6 ± 10,3 % comparé à 56,5 ± 4,9 % respectivement ; $p < 0,01$). De même, la concentration totale de mélatonine plasmatique quantifiée pendant la période expérimentale était significativement plus importante pour les personnes exposées à la source LED filtrée qu'à la lumière de 4 100 K (72,4 ± 19,9 pg/mL comparé à 41,4 ± 7,7 pg/mL ; $p < 0,05$). Bien que la somnolence subjective ne fut pas différente entre les deux groupes, la mesure objective de l'attention l'était (temps de réaction à un stimulus auditif, $p < 0,05$). Les corrélats de vigilance basés sur l'EEG ont corroboré la vigilance réduite en conditions d'éclairage avec LED, comme le montre une augmentation significative de la puissance spectrale en EEG dans les bandes delta-theta (0,5-8,0 Hz). Ce résultat est similaire à celui de deux études plus anciennes réalisées par le groupe de Cajochen (Cajochen *et al.* 2011, Chellappa *et al.* 2011), montrant d'une part que la température de couleur est similairement corrélée aux effets non visuels de la lumière sur la mélatonine, la somnolence et le bien être (plus d'effet avec 6 500 K que 2 700 et 3 000 K) (Chellappa *et al.* 2011), et d'autre part que la lumière émanant des écrans à LED, riches en longueurs d'ondes courtes, induit des réponses plus intenses des mêmes fonctions non visuelles par rapport à des écrans cathodiques (Cajochen *et al.* 2011).

3.3.2.6.5 Travail de nuit, sécrétion et cinétique de la mélatonine

Papantoniou *et al.* (2014) ont examiné deux cohortes de travailleurs, l'une de jour et l'autre de nuit, en conditions réelles de travail. Les participants (117 dont 75 de nuit, 42 de jour ; âgés de 22 à 64 ans, hommes et femmes) furent équipés d'appareils de mesure pour

quantifier l'exposition lumineuse au cours de la période de 24 h, des échantillons d'urine furent également collectés (analysés pour la concentration de 6-sulfatoxymélatonine (6-SM) le métabolite majeur de la mélatonine et un bon indicateur de la phase de l'horloge circadienne). Par ailleurs leurs caractéristiques sociales, professionnelles, de modes de vie et leurs chronotypes furent établies. Entre minuit et 05h00, les travailleurs de nuit étaient exposés à une intensité lumineuse médiane de 38 lx (variation de 15 à 246 lx), émise principalement par des lampes fluorescentes aériennes. En moyenne, les travailleurs de nuit montraient des taux nocturnes de 6-SM inférieurs aux travailleurs de jour (10,9 *vs* 15,4 ng/mg de créatine, $p < 0,05$), et la différence était encore plus importante chez les personnes de chronotype matinal (6,4 ng) ; le pic de mélatonine était décalé de 3 h environ chez les travailleurs de nuit et il y avait une corrélation positive entre l'intensité lumineuse de l'environnement du lieu de travail et la suppression de mélatonine. En résumé, cette étude a évalué l'association du travail posté avec la sécrétion et la cinétique de la mélatonine, un mécanisme potentiellement impliqué dans le risque accru de cancer. Dans cette étude, le travail de nuit chronique est associé à des concentrations réduites et à un retard de phase de la 6-SM, par rapport aux travailleurs de jour.

Le rapport entre travail de nuit, exposition lumineuse et santé humaine est repris par un article de revue de Touitou *et al.* (2017a), qui fait le point sur les publications portant sur le cancer (surtout du sein et de prostate), les problèmes du sommeil, les pathologies cardio-vasculaires, le diabète, l'obésité, les problèmes cognitifs et la dégénérescence maculaire liée à l'âge. Cette dernière catégorie est très spéculative, renvoyant le lecteur sur des études de phototoxicité (voir la section 3.5.3). De même, une étude de Haim et Zubidat (2015) propose un mécanisme moléculaire potentiel qui pourrait relier mélatonine et susceptibilité aux cancers par le biais des modifications épi-génétiques. Ils notent que le fait que ces modifications soient réversibles souligne l'importance d'un diagnostic précoce afin d'intervenir le plus rapidement possible en amont de la maladie.

3.3.2.6.6 Conclusions

Suffisamment d'études rigoureuses chez l'Homme ont été conduites pour établir des liens forts entre d'une part l'intensité lumineuse et/ou la dépendance spectrale, et d'autre part la cinétique de sécrétion de la mélatonine et sa concentration plasmatique.

3.3.2.7 Effets chez les personnes âgées

3.3.2.7.1 Spécificités des personnes âgées en rapport avec l'exposition lumineuse

De nombreuses études ont adressé l'importance de l'éclairage artificiel pour le bien-être et la santé des personnes âgées. Sachant que le vieillissement du cristallin diminue la transmission lumineuse à l'intérieur de l'œil (une personne de 60 ans a une transmission des longueurs d'onde courtes réduite de prêt de 50 % par rapport à une personne de 20 ans, Najjar *et al.* 2016), certains auteurs avancent le fait que cela pourrait impacter négativement l'horloge circadienne. Toutefois, les études très contrôlées sur le sujet ne sont pas consensuelles. Si Duffy *et al.* (2007) montrent que l'effet de la lumière sur la synchronisation du système circadien chez le sujet âgé est réduit par rapport au sujet jeune entre 50 et 1 000 lx, Sletten *et al*. (2009) ne trouvent pas que les sujets âgés sont moins sensibles au décalage de phase en réponse à un stimulus lumineux à 460 nm, et Danault *et al.* (2012) observent une sensibilité du réflexe pupillaire équivalente entre les adultes jeunes ou âgés à la lumière bleue ou verte. Plus récemment, Najjar *et al.* (2014) montrent que, même si la transmittance du cristallin est effectivement réduite chez les sujets âgés, leur réponse circadienne à la lumière (quantifiée via la suppression de mélatonine) n'est pas différente des jeunes. En revanche, une étude récente de Gabel *et al*. montre que la température de couleur de l'éclairage (et notamment la proportion des longueurs d'onde courtes) exerce des effets différentiels sur la physiologie circadienne chez les individus jeunes et âgés (Gabel *et al.*, 2017). Dans leur analyse, un groupe de jeunes adultes (n = 26, dont 15 H, 11 F, moyenne d'âge 26 ans) fut comparé à un groupe de personnes âgées (n = 12, dont 9 H, 3 F, moyenne d'âge 63,6 ans) au regard de leur réactivité dans le cadre d'un test d'éveil

prolongé. Les participants sont restés éveillés pendant 40 heures, et la concentration de mélatonine et de cortisol plasmatique, ainsi que la somnolence, la température de la peau et l'activité locomotrice étaient mesurées toutes les heures. Les deux groupes ont été exposés à trois conditions d'éclairage différentes : soit de la lumière d'intensité faible (« DL », 8 lx), soit de la lumière blanche d'intensité modérée (« WL », 250 lx, température de couleur 2 800 K), soit de la lumière enrichie en bleu (« BL », 250 lx, température de couleur 9 000 K). Dans les deux groupes, les conditions WL et BL ont augmenté l'état d'éveil par rapport au DL. Par contre, la sécrétion de mélatonine en début de soirée était inhibée uniquement chez les participants jeunes (WL et BL). Les niveaux de cortisol étaient augmentés et les niveaux d'activité diminuaient chez les plus âgés comparés aux jeunes, seulement sous BL (p = 0,0003). Comparativement aux jeunes, la température de la peau était plus basse chez les participants plus âgés sous toutes les conditions d'éclairage.

Ainsi, l'hypothèse selon laquelle les sujets âgés sont moins sensibles à la lumière, en ce qui concerne leur système circadien, n'est pas soutenue par ces études, en dépit de cristallins oxydés qui induisent une diminution de la quantité de lumière bleue qui pénètre dans les yeux. Il en ressort que selon le protocole expérimental employé ou le paramètre examiné, des effets différentiels sur le réseau circadien des adultes jeunes ou âgés peuvent être ou non mis en évidence. Des hypothèses pour expliquer cette contradiction apparente mettent en avant une adaptation du système circadien chez les personnes âgées, par exemple un remaniement de la morphologie des iRGCs ou une augmentation de l'expression de la mélanopsine (Najjar *et al.*, 2014 ; Eliasieh *et al.*, 2007).

Malgré ces incertitudes sur la sensibilité plus ou moins importante des personnes âgées aux effets de la lumière sur la synchronisation de l'horloge circadienne, Ellis *et al.* (2013) émettent l'hypothèse que la mise en œuvre d'un système d'éclairage spécifiquement conçu pour synchroniser les rythmes circadiens dans une population âgée (et sénile) permettrait d'atténuer les symptômes de démence et ainsi améliorer la qualité de vie des résidents et des soignants.

Kim *et al.* (2014) proposent qu'une diminution de la réactivité aux *stimuli* lumineux pourrait expliquer la phase circadienne avancée chez les personnes âgées. Les auteurs prédisent que les personnes âgées auraient des réponses circadiennes amoindries à des intensités lumineuses faibles ou modérées, mais pas à des intensités élevées. Ils ont donc comparé les réponses (changement de phase) à une exposition à 2 h de lumière blanche chez deux groupes d'adultes jeunes (moyenne d'âge 25,1 ± 4,1 ans, 8 hommes, 21 femmes) et âgés (moyenne d'âge 66,5 ± 6 ans, 5 hommes, 11 femmes), en bonne santé. Ils ont participé à deux séjours de 4 et 3 jours au laboratoire, et les sujets ont été assignés au hasard à l'un des trois points de temps différents, 8 h avant (-8), 3 h avant (-3) ou 3 h après (+3) la température minimale du corps (TMCmin), mesurée pendant une nuit de référence. Pour chaque condition, les sujets ont été exposés dans un ordre aléatoire à 2 h de lumière par des séquences de deux intensités (2 000 lx et 8 000 lx). Les changements de phase ont été analysés en fonction du point médian de la concentration de mélatonine mesurée les soirs avant et après l'exposition à la lumière. Les sujets plus âgés avaient une plus petite amplitude du rythme de la mélatonine par rapport aux sujets plus jeunes, mais il n'y avait aucune corrélation entre l'âge du groupe et l'amplitude de la réponse ou la direction des changements de phase en réponse à 2 h de lumière à 2 000 lx ou 8 000 lx. Ces résultats indiquent que l'âge n'affecte pas de manière significative la réponse aiguë au changement de phase à la lumière à large spectre et à intensité modérée ou élevée, en accord avec les résultats que nous mentionnions au début de cette section.

3.3.2.7.2 Exposition de personnes âgées la nuit à la lumière et effet sur la pression artérielle

Obayashi *et al.* (Obayashi *et al.,* 2014) ont réalisé une analyse transversale sur 528 personnes âgées (247 H, 281 F, âge moyen : 72,8 ans) à domicile. Ils ont mesuré l'intensité lumineuse de la chambre à coucher à intervalles de 1 minute sur deux nuits consécutives, qui leur a permis de définir : 1) l'intensité lumineuse moyenne pendant la période passée au

lit, 2) la durée d'intensité lumineuse supérieure à 10 lx, et 3) la durée d'intensité lumineuse supérieure à 100 lx, pendant le temps passé au lit. Ces données ont également permis d'identifier différents groupes séparés par des seuils d'exposition de 3, 5 et 10 lx. En parallèle, la pression artérielle (PA) ambulatoire fut mesurée pendant la nuit, tout comme l'excrétion urinaire (taux de mélatonine) et l'état d'éveil-sommeil (actigraphie). La comparaison des moyennes ajustées par analyse de covariance montre que le groupe des personnes les plus exposées la nuit (> 5 lx, n = 109) a une PA systolique et diastolique nocturne (systolique : 120,8 contre 116,5 mm Hg, p < 0,01 ; diastolique : 70,1 contre 67,1 mm Hg, p < 0,01) nettement plus élevée par rapport au groupe des personnes peu exposées la nuit (< 5 lx, n = 419), indépendamment des facteurs de confusion potentiels pendant la nuit, de l'excrétion de la mélatonine et de la qualité du sommeil actigraphique. Les auteurs ont observé des associations cohérentes entre d'une part la lumière et d'autre part la PA nocturne à différents seuils d'intensité lumineuse (3 et 10 lx). En conclusion, l'étude montre que l'exposition à la lumière la nuit à la maison est significativement associée à une augmentation de 4,3 mm Hg de la PA nocturne chez les personnes âgées, indépendamment de l'excrétion urinaire de mélatonine pendant la nuit. Les auteurs indiquent que cette augmentation de la PA est associée à une augmentation de la mortalité totale de 6,1 %, ce qui correspond à environ 10 000 décès excédentaires annuels chez les personnes âgées japonaises.

3.3.2.7.3 Sécrétion de mélatonine chez les personnes âgées en fonction du genre

La même équipe a également abordé la question de la sécrétion de mélatonine en fonction du genre chez les personnes âgées (Obayashi *et al.* 2015). Ils ont mené une étude transversale sur 528 personnes âgées (247 hommes, moyenne d'âge 73,8 ans ; 281 femmes, moyenne d'âge 72 ans), mesurant la concentration de 6-SM (6-sulphatoxymélatonine) urinaire pendant la nuit et l'intensité de la lumière ambiante. L'étude ne montre pas de relation entre lumière ambiante et taux de mélatonine la nuit, ni chez les hommes ni chez les femmes. En revanche, les taux de 6-SM étaient significativement plus faibles chez les femmes que chez les hommes (p < 0,01), indépendamment de l'âge et de l'exposition à la lumière nocturne. En conclusion, les femmes âgées sécrètent nettement moins de mélatonine que les hommes âgés, ce qui pourrait être un facteur impliqué dans plusieurs maladies associées à la mélatonine chez les personnes âgées.

3.3.2.7.4 Exposition de personnes âgées à la lumière la nuit et dépression

Dans une troisième étude, Obayashi *et al.* (Obayashi *et al.,* 2017) ont suivi la santé mentale d'une population âgée (n = 863, âge moyen 71,5 ans) pendant 4 ans. Au début de l'étude, aucun des participants ne montrait des symptômes dépressifs (selon une grille subjective de dépression chez les personnes âgées), alors qu'à la fin, 73 se signalaient comme affectés par la dépression. Si le niveau d'éclairage pendant la nuit (< ou > 5 lx) était pris en compte, le taux de symptômes dépressifs était significativement associé avec le groupe > 5 lx. Et ceci fut toujours significatif quand plusieurs paramètres confondants (tabagisme, alcoolémie, poids, statut socio-économique, santé métabolique) étaient exclus de l'analyse.

3.3.2.7.5 Qualité spectrale de la lumière et bienfaits neurologiques chez des patients atteints d'Alzheimer

Trois articles de l'équipe de Figueiro (Figueiro *et al.* 2015, 2016, 2017) s'interrogent sur le rapport entre intensité et qualité spectrale de la lumière et bienfaits neurologiques. Celui de Figueiro *et al.* (2015) examine les effets d'une installation lumineuse à la maison de soins pour les personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer (n = 35) et leurs soignants (n = 34), conçue pour augmenter la quantité de lumière artificielle, surtout dans la gamme mélanopique, pendant la journée (du moment d'éveil jusqu'à 18h00). Les participants ont porté des dosimètres pour mesurer la quantité de lumière au niveau des yeux et le *pattern* d'éveil-sommeil ; ils ont aussi répondu à des questionnaires sur la dépression et la qualité du sommeil. Les auteurs calculent le « stimulus circadien », à partir des valeurs enregistrées par les dosimètres, et montrent que ce stimulus augmente significativement lorsque

l'installation est opérationnelle, aussi bien pour les personnes malades que les soignants. De même, l'amplitude des rythmes d'activité motrice était augmentée par rapport aux jours sans utilisation de l'installation. Un autre système permettant d'augmenter l'exposition à la lumière des sujets âgés utilisait une table lumineuse, exploitant le fait que les personnes âgées passent beaucoup de leur temps assisses autour d'une table (Figueiro *et al.* 2016). Les caractéristiques lumineuses des tables sont détaillées dans l'étude, et l'intensité de l'éclairage au niveau des yeux se situe entre 1 200 et 2 800 lx. Par rapport à une semaine de référence (sans table lumineuse), le pourcentage de « sommeil » et l'efficacité de l'entrainement de leur activité motrice étaient considérablement augmentés et les scores d'agitation et de dépression étaient considérablement diminués au cours des quatre semaines d'intervention. L'article de Figueiro *et al.* (2017) est une revue qui regroupe les données concernant l'influence de la lumière et le soin des personnes âgées et démentes. Ils insistent sur l'importance de marquer les périodes de jour et de nuit par une forte différence d'intensité lumineuse (voir la section), afin de stimuler l'horloge circadienne de façon optimale. *[Limites de l'étude : cette étude n'a examiné que 6 patients et n'a pas mesuré de marqueurs objectifs du système circadien*].

3.3.2.7.6 Lumière bleue et bienfaits potentiels chez les personnes séniles

Une étude de Sloane *et al.* évalue les possibles bienfaits d'un éclairage spécifique sur les personnes séniles et sur l'impact de l'âge. Sloane *et al.* (2015) ont comparé les effets d'un éclairage enrichi en bleu-blanc (composé de lumières plafonnières fluorescentes à 13 000 K, et de lampes LED avec un pic d'émission à 470 nm) par rapport à un éclairage contrôle « jaune-rouge » (composé de lumières plafonnières fluorescentes à 2 700 K et de lampes LED rouge de pic d'émission à 638 nm), pendant six semaines chez 34 participants (dont 17 personnes diagnostiquées comme souffrant de la maladie d'Alzheimer (6 H, 11 F, âgées de 65 à 80 ans), et leurs 17 soignants (4 H, 13 F, âgés de 18 à 60 ans). D'après les auteurs, la source lumineuse bleu-blanc devait stimuler le système circadien plus de 5 fois plus que la source de lumière jaune-rouge au même niveau de lumière (400 lx au niveau de la cornée), et la boîte à lumière LED bleue devait stimuler le système circadien plus de 1 000 fois plus que la LED rouge au même niveau de lumière (100 lx) au niveau de la cornée. Toutefois, les résultats de l'étude ne montrent pas d'effets des différentes lumières sur la qualité du sommeil, évaluée soit subjectivement (questionnaire) soit objectivement (actigraphie) chez les personnes malades. En revanche, l'étude montre que ces paramètres furent améliorés chez les soignants. Les auteurs suggèrent que soit des périodes plus longues, soit des intensités plus fortes, devraient être testées pour étudier leur efficacité potentielle. Il faut noter que cette étude ne comportait pas de condition contrôle sans lumière, et qu'elle ne permet pas d'exclure un effet différent des 2 lumières. Tout récemment, Hopkins *et al.* (2017) ont étudié les effets d'un environnement enrichi en lumière bleue sur le bien-être des patients souffrant de la maladie d'Alzheimer. Les espaces communaux de 7 maisons de soins ont été modifiés par l'installation de lumières fluorescentes enrichies en bleue (température de couleur 17 000 K, intensité 900 lx). Les participants (80 personnes, moyenne d'âge 86 ans, 69 femmes) ont été exposés à ces conditions lumineuses pendant 4 semaines (pendant les périodes d'utilisation des espaces communs), et les effets ont été comparés àceux en conditions standards (température de couleur 4 000 K, intensité de 200 lx) pour une même durée. Les paramètres étudiés furent la qualité du sommeil et l'état de l'humeur (par évaluation subjective, questionnaires), des tâches de psychomotricité et de vigilance, mesurés par le port d'actimètres et de luminancemètre. Comparée aux conditions contrôles (4 000 K), la lumière enrichie en bleue provoquait une avance de phase du rythme éveil/sommeil ($p < 0.05$), augmentait l'activité locomotrice aussi bien le jour que la nuit, et diminuait l'anxiété subjective et la qualité du sommeil. Il y avait donc des effets « bénéfiques » (augmentation d'activité de jour, diminution de l'anxiété) mais aussi néfastes (augmentation d'activité de nuit, baisse de qualité du sommeil).

3.3.2.7.7 Conclusions

Les études réalisées soit en situation réelle domestique, soit en milieu hospitalier, mettent en évidence des effets nets de la lumière la nuit sur des paramètres tels que la suppression de la mélatonine, la pression sanguine et le sommeil. Ces observations sont à considérer indépendemment de la question de la sensibilité du système circadien chez les personnes âgées. Dans l'ensemble, les données sont solides et apportent des conclusions bien fondées.

3.3.3 Évaluation de l'effet de la lumière bleue sur les rythmes circadiens

3.3.3.1 Écrans à LED et rythmes circadiens

La population générale étant de plus en plus sujette au visionnement d'écrans (téléviseurs, téléphones portables, tablettes…), de nombreuses études se sont intéressées aux effets liés à une exposition aux rayonnements de longueurs d'ondes courtes émis par ces écrans d'appareils connectés. Le laboratoire de Cajochen a été particulièrement actif dans le domaine, avec plusieurs études rigoureuses concernant la capacité de la lumière bleue à stimuler l'activation de l'horloge centrale aux heures de nuit par simple observation d'un écran d'ordinateur. L'exposition le soir aux écrans (téléviseurs, ordinateurs, téléphones portables) qui utilisent majoritairement les LED est de plus en plus importante.

3.3.3.1.1 Écran à LED vs Écran CCFL, vigilance et suppression de mélatonine

Comme il avait été montré par le passé que la lumière bleue est un puissant signal de suppression de la libération nocturne de la mélatonine (Brainard *et al.*, 2001, Thapan *et al.* 2001, Najjar *et al.* 2014), les chercheurs ont voulu savoir si la lumière émise par les écrans à LED, enrichie en émissions de longueurs d'ondes courtes, pouvait plus impacter l'horloge que la lumière émise par des écrans non-LED (« CCFL », lampe à cathode froid fluorescent). Ces études ont été conduites en mesurant la suppression de la mélatonine et l'augmentation de l'état de l'éveil. Il fut demandé à la cohorte examinée (13 jeunes hommes de 19 à 35 ans volontaires pour l'étude, critères d'inclusion : être en bonne santé générale, avoir une bonne qualité de sommeil sans être un chronotype extrême, et absence de problème oculaire) de respecter des critères stricts de cycle éveil / sommeil. Les conditions expérimentales furent rigoureusement contrôlées, de sorte que la seule source de lumière dans la pièce était les écrans, de taille et définition identiques, soit constitués de LEDs blanches froides (couleur de température 6 953 K), soit de CCFL (couleur de température 4 775 K), émettant ainsi ~3 fois moins de lumière à 454-474 nm en matière d'irradiance (0,241 W/sr.m^2), ou 2,1 x 1013 photons/cm^2.sec pour les LED blanches froides, irradiance de 0,099 W/sr.m^2 (0,7 x 1013 photons/cm^2.sec) pour les CCFL. Les personnes devaient regarder les écrans pendant 5 heures en fin de soirée, et chaque volontaire était son propre contrôle (regardant tantôt un écran LED, tantôt un écran CCFL à 7 jours d'intervalle). Une batterie de tests – somnolence subjective, mouvements oculaires, traces électro-encéphalographiques, vigilance, mémoire - montrait que la personne était plus éveillée suite au visionnement d'écran LED par rapport au même visionnement d'un écran CCFL. Inversement, le visionnement d'un écran LED comparé à un écran CCFL provoquait un retard de sécrétion de mélatonine de ~30 minutes (Cajochen *et al.*, 2011).

3.3.3.1.2 Comparaison des effets sur la somnolence, la mélatonine et la phase du système circadien entre une lecture sur papier et une lecture sur écran à LED

Chang *et al.* (2015) ont comparé les effets de la lecture nocturne d'un livre électronique (« *eBook* ») (dont l'écran émet de la lumière) avec celle du même contenu mais imprimé sur papier (qui réfléchit la lumière ambiante), sur la somnolence, la sécrétion de mélatonine, la phase du système circadien, la latence d'endormissement et la vigilance matinale. Les *eBooks* utilisés possédaient des écrans à LED. Douze jeunes adultes en bonne santé

(moyenne d'âge 24,92 ± 2,87 ans, 6 hommes, 6 femmes) ont complété un protocole d'hospitalisation de 14 jours. Il fallait soit lire sur une liseuse à LED dans une pièce sombre, soit lire un livre imprimé dans la même pièce avec une lumière tamisée pendant environ 4 h avant le coucher, et ce pendant cinq soirées consécutives. Tous les participants ont complété les deux conditions de lecture, mais en ordre aléatoire. Les chercheurs ont comparé les effets sur la suppression de la mélatonine, et la qualité subjective et objective du sommeil, aussi bien immédiatement après la lecture que le lendemain. Analysée la 5ème nuit, la lecture sur *eBook* réduit la mélatonine circulante de 55 % par rapport au niveau normal, alors que la lecture d'un livre imprimé est sans effet ($p < 0,001$). De plus, la lecture sur un *eBook* retarde l'endormissement d'environ 10 minutes et diminue la durée du sommeil et la quantité de sommeil paradoxal. Enfin, la lecture sur *eBook* augmente la vigilance juste après lecture, par rapport à un livre imprimé, mais ce rapport est inversé le lendemain, la personne ayant lu un livre « normal » se signalant comme plus alerte, plus rapidement, par rapport au lecteur d'un *eBook* (vigilance matinale diminuée). Les détails de l'émission spectrale de l'*eBook* fut une irradiance totale de $1,03 \times 10^{-1}$ W/m^2 comparée à $3,23 \times 10^{-3}$ pour le livre imprimé (plus de 30 fois supérieur) et un pic d'émission vers 452 nm (donc enrichie en lumière bleue) comparé à 612 nm pour le livre imprimé (lumière émise par les plafonniers et réfléchie par le livre imprimé), mesuré à une distance d'environ 38 cm.

Une étude analogue a été réalisée par Gronli *et al.* (2015), dans laquelle les caractéristiques du sommeil de 16 étudiants (moyenne d'âge 25,1 ± 2,9 ans ; 4 H, 12 F) ont été suivies à domicile en lisant soit une tablette tactile soit un livre pendant 30 minutes avant de dormir. L'éclairement lumineux était plus élevée avec la tablette qu'avec le livre (58,3 ± 6,9 *vs* 26,7 ± 8,0 lx, $p < 0,001$). Par rapport à la lecture d'un livre, la lecture d'une histoire sur une tablette diminue la somnolence subjective (augmente l'état d'éveil) avant l'endormissement, et après l'endormissement elle retarde la dynamique de l'EEG de l'activité des ondes lentes d'environ 30 minutes, et elle diminue l'activité totale des ondes lentes (c'est-à-dire elle perturbe transitoirement la qualité du sommeil). En revanche, il n'y avait pas de différence dans la latence de début de sommeil, ou le temps passé dans les différentes étapes du sommeil.

En revanche, une étude récente (Rangtell *et al.*, 2016) a démontré qu'une exposition à une illumination forte dans la journée (569 lx pendant 6,5 h correspondant à ~14-20h00), préalable à la lecture en soirée, soit d'un livre conventionnel, soit d'un livre électronique, bloque les effets stimulateurs de l'écran. Dans leur analyse, 14 participants (dont 6 femmes) ont lu le même texte, en conditions contrôlées de laboratoire, en forme papier ou *via* un *eBook*. Les paramètres de poids, de santé physique et mentale, le comportement alimentaire, le tabagisme, les voyages trans-méridiens, ainsi que leurs profils de sommeil, furent tous analysés. Exposés à la lumière « forte » (venant d'une lampe plafonnière, de température de couleur 3 149 K, avec un pic d'émission à 611 nm et un petit pic à 490 nm) pendant 6,5 h durant l'après-midi et le début de soirée, ils lisaient les livres entre 21h et 23h00, avant de se coucher. Pendant les 2 h de lecture, la lampe plafonnière était éteinte et l'éclairage fourni soit par une petite lampe de chevet (livre en papier) soit par la tablette elle-même. Les niveaux d'éclairement dans les deux cas furent mesurés au niveau des yeux : éclairement lumineux moyen de 67,3 ± 49,9 lx, température de couleur 2 674 K pour le livre en papier et 102,1 ± 41,4 lx, température de couleur 7 718 K pour la tablette ($P = 0,045$, Wilcoxon). Des échantillons de salive furent prélevés pour doser la mélatonine et les caractéristiques du sommeil furent enregistrées par polysomnographie. Une semaine plus tard, l'expérience fut répétée mais en inversant le support de lecture (*ie*. *cross-over design*). Malgré les émissions enrichies en bleu émanant de la tablette, l'exposition préalable pendant la journée à une illumination intense bloquait les effets sur la suppression de la mélatonine et la qualité et quantité du sommeil. Ces données soulignent l'importance d'une exposition à la lumière dans la journée suffisamment intense pour bien synchroniser l'horloge circadienne, qui semble ainsi moins susceptible à des facteurs perturbateurs.

3.3.3.1.3 Conclusions

Les études regroupées sous cette rubrique jouissent d'une plus grande reproductibilité en conditions expérimentales (intensité et qualité spectrale des émissions des écrans sont plus simples à contrôler que dans d'autres situations), permettant des mesures fiables des critères physiologiques. De même cette catégorie contient le plus d'informations actuellement disponibles concernant les lampes à LED.

3.3.3.2 Études portant sur des LED et utilisant des moyens de filtrage de la lumière bleue

Les articles publiés se divisent en deux groupes : l'un impliquant un filtrage de la lumière bleue au niveau de l'écran ou *via* des lunettes, et l'autre par des approches plus générales, avec une modulation du spectre bleu incorporée directement dans le dispositif d'éclairage.

3.3.3.2.1 Comparaison de la suppression de la mélatonine entre une vision directe d'un écran, une vision avec des lunettes filtrantes et une vision avec des lunettes équipées de LED bleue.

Chez un groupe de jeunes adultes (n = 21, sexe non-spécifié, moyenne d'âge 28 ± 9,9 ans), Figueiro *et al.* (Figueiro *et al.,* 2011) mettent en évidence une suppression de la mélatonine mesurée dans la salive après visionnement d'écrans ou tablettes à travers des lunettes équipées d'émetteurs de lumière bleue (470 nm, 40 lx (40 mW/cm^2) au niveau de la cornée), alors que le port de lunettes filtrant les rayonnements de courte longueur d'onde (teintées en orange, sans émission < 525 nm), ou le visionnement sans lunettes, n'a pas d'effet significatif sur les taux de mélatonine.

Wood *et al.* (Wood *et al.*, 2013) ont réalisé une étude sur les effets de l'utilisation des tablettes sur la suppression de la mélatonine sur un groupe de jeunes adultes (n = 13, sexe non-spécifié, moyenne d'âge 18,9 ± 5,2 ans). Il était demandé aux personnes de visionner les tablettes selon trois conditions : i) tablette seule sans lunettes, en position d'intensité d'écran maximale, ii) tablette après avoir mis les lunettes émettant 40 lx de lumière bleue, iii) tablette avec lunettes filtrant les émissions en dessous de 525 nm, comme décrit ci-dessus. Ils ont mis en évidence une relation « dose-réponse » entre l'intensité lumineuse et la suppression de la mélatonine, de sorte que le port de lunettes supplémentées en lumière bleue supprime la mélatonine après 1 ou 2 heures d'observation, la tablette seule sans lunettes après 2 heures mais pas 1 heure d'observation, et les lunettes filtrantes ni à 1 ni à 2 heures d'observation. Les auteurs proposent que ces données permettent aux fabricants de fixer des limites d'émission à ne pas dépasser.

3.3.3.2.2 Obtention d'une courbe réponse de suppression de mélatonine par stimulation à la lumière à LED bleue

West *et al.* (West *et al.*, 2011) ont construit une courbe dose-réponse pour la suppression de la mélatonine plasmatique chez les sujets sains (8 sujets, 5 H, 3 F, moyenne d'âge de 23,9 ± 0,5 ans) exposés à une gamme d'intensités de lumière LED bleue. Les participants devaient visionner un panneau d'éclairage entre 2h00 et 3h30. Des échantillons de sang ont été prélevés avant et après exposition à la lumière et la concentration de la mélatonine a été mesurée. Les résultats montrent que l'augmentation de l'intensité de la lumière bleue entraîne une augmentation de la suppression de la mélatonine plasmatique chez les sujets sains ($p < 0,0001$). Une comparaison de la suppression moyenne de la mélatonine avec 40 µW/cm^2 de lumière fluorescente blanche à 4 000 K, actuellement utilisée dans la plupart des appareils d'éclairage général, suggère que la lumière bleue est plus forte que la lumière fluorescente blanche pour supprimer la mélatonine. De plus, lorsque les pupilles sont exposées à une lumière fluorescente de 40 µW/cm^2, leur diamètre n'était pas significativement différent comparé aux intensités des LED les plus faibles (de 0,1, 0,5 et 2,0 µW/cm^2), mais fut nettement plus petit comparé aux expositions aux rayonnements de 10 à 600 µW/cm^2. La constriction pupillaire est fortement influencée par les CGM, (Lucas *et al.*, 2003), et la mesure de ce paramètre donne une indication précise de l'activation du système

circadien *[Limitations : faible nombre de participants].*

3.3.3.2.3 Port de lunettes filtrantes en soirée devant des écrans à LED et sommeil

Van Der Lely *et al.* (Van Der Lely *et al.,* 2015) ont étudié si l'utilisation de lunettes filtrant la lumière bleue pendant la soirée, alors que le sujet était assis devant un écran à LED d'ordinateur, favorise les mécanismes d'initiation du sommeil aux niveaux subjectif, cognitif et physiologique. Avant d'être examiner (treize volontaires de sexe masculin en bonne santé, âgés de 15 à 17 ans), les personnes étaient suivies pendant deux semaines au cours desquelles le cycle de veille/sommeil, l'exposition à la lumière du soir et l'utilisation de l'écran multimédia ont été surveillés. Des lunettes filtrantes ou des verres clairs (pour définir une situation de contrôle) ont été portés pendant une semaine pour visionner des écrans à LED en soirée. La mélatonine salivaire, la somnolence subjective et la vigilance ont été régulièrement dosées, et le sommeil qui a suivi a été enregistré par polysomnographie. En comparaison avec les verres transparents, l'utilisation des filtres a considérablement atténué la suppression de la mélatonine induite par les LED le soir et a atténué la vigilance subjective avant le coucher. Les stades du sommeil et les mesures comportementales recueillies le matin suivant n'ont pas été modifiés. Donc les verres filtrants peuvent être utiles chez les adolescents afin de contrecarrer les effets induits par l'exposition à la lumière à travers des écrans à LED, et donc potentiellement réduire les effets négatifs que l'éclairage moderne impose à la physiologie circadienne le soir. Pour les deux modèles de lunettes utilisés dans cette étude, les spectres de transmission sont connus avec précision, et il faut souligner qu'en plus de bloquer les rayonnements de courte longueur d'onde, les lunettes bleues diminuent également la transmission lumineuse, de l'ordre de 30 % comparées aux lunettes claires (92 %). *[Limitations : les auteurs soulignent eux-mêmes les deux limitations majeures de ces analyses, notamment la différence de transmission lumineuse entre les deux paires de lunettes, et la petite taille de la cohorte].*

Des travaux réalisés par Oh *et al.* (Oh *et al.,* 2015) et Heo *et al.* (Heo *et al.,* 2017) ont concerné les effets des rayonnements bleus émis par les *smartphones* sur le système circadien. L'exposition à la lumière bleue émise par les écrans des *smartphones* diminue la mélatonine circulante de nuit, de façon d'autant plus importante en fonction du modèle de téléphone et de l'éclairage de la pièce. Les auteurs suggèrent une méthode pour contrecarrer ces effets négatifs en altérant le pourcentage de lumière bleue émise.

3.3.3.2.4 Filtrage des émissions bleues de l'éclairage de nuit et rythmes circadiens

Regente *et al.* (Regente *et al.,* 2017) ont recruté 24 étudiants en médecine (15 hommes, 9 femmes, âge moyen 22,6 ans) pour participer à une étude de travail de nuit simulé en conditions d'éclairage soit très faible, servant de contrôle (< 3 lx), soit de lumière forte (317 lx, température de couleur 1 870 K) mais dont les émissions de courtes longueurs d'ondes (< 520 nm) étaient filtrées. Le groupe a respecté un cycle régulier jour-nuit pendant la semaine avant de commencer l'expérience, leur sommeil étant enregistré par polysomnographie. Le sommeil de la veille était considéré comme ligne de base, et les participants ont effectué du travail de nuit pendant 9 h, en commençant vers minuit. Lors de cette période, des mesures subjectives et objectives de vigilance et de somnolence furent collectées toutes les heures. Au milieu de l'expérience, le confort visuel subjectif fut noté. Les tâches à accomplir pour simuler le travail de nuit comprenaient de la lecture et de la conversation, et l'obligation d'enregistrer eux-mêmes les mesures électro-encéphalographiques par ordinateur à chaque heure. Les participants ont effectué le travail dans les deux conditions lumineuses (*cross-over design*). Par ailleurs, la quantité et la qualité du sommeil dans la journée suivant le travail de nuit étaient également enregistrées. Les résultats montrent que les états de vigilance et de somnolence, la suppression de la mélatonine et le sommeil du lendemain ne sont pas différents entre un éclairage faible et un éclairage fort avec filtrage des émissions bleues (voire une légère amélioration de la vigilance en deuxième partie de nuit). En résumé, si le composé bleu de l'éclairage est filtré, cette illumination ne décale pas l'horloge circadienne et n'a pas d'incidence négative pour une seule nuit de travail.

3.3.3.2.5 Éclairages de modules à LED variables selon l'heure de la journée

Oh *et al.* (Oh *et al.,* 2014) ont comparé les propriétés d'un éclairage artificiel du commerce, à savoir des LED blanches à quatre modules (constituées de LED rouges, ambrées, vertes et bleues), à la lumière du jour. Ces LED, dites « intelligentes » par les auteurs, ont des effets moindres sur la suppression et la sécrétion de la mélatonine, parce que la composante bleue peut être sélectivement filtrée aux heures précises par programmation. De plus, elles donnent une haute qualité de couleur pour la perception et la reproduction des couleurs, et une efficacité élevée en ce qui concerne les économies d'énergie pour le marché de l'éclairage LED. Bues *et al.* (Bues *et al.,* 2012) vont plus loin en proposant un système d'éclairage à LED composé d'unités indépendantes de chaque couleur primaire, y compris deux sources de lumière bleue à 420 et 464 nm. En matière de perception, ce mélange est supposé donner l'impression visuelle d'une illumination blanche. Les auteurs proposent qu'un tel dispositif fournisse suffisamment de lumière « mélanopique » (à 464 nm) durant la journée, nécessaire à l'activation de l'horloge, puis à l'arrivée de la soirée, cette émission pourrait être sélectivement remplacée par de la lumière bleue à 420 nm (qui correspond au pic de sensibilité des cônes sensibles aux longueurs d'ondes courtes), entretenant ainsi la perception d'une émission globale blanche. *[Limitations : cet article reste théorique par rapport à l'efficacité d'alterner entre les deux émissions spectrales de bleu].*

3.3.3.2.6 Adaptation du système circadien à un environnement lumineux altéré

Gimenez *et al.* (2014) ont fait porter aux participants (à partir de 50 recrutés initialement, seulement 15 ont participé à l'étude : moyenne d'âge 23,5 ans, 7 hommes 8 femmes) des lunettes filtrant environ 50 % des émissions spectrales entre 450 et 550 nm. Elles étaient portées en continu pendant deux semaines, et durant ce temps les volontaires étaient libres de leurs mouvements. Afin de tester l'efficacité filtrante des lunettes, des participants les ont portées dans un test parallèle uniquement pendant l'exposition à la lumière forte (voir dessous). Ils se rendaient au laboratoire aux 15ème et 16ème jours pour quantifier l'amplitude et le profil de sécrétion de la mélatonine (DLMO), mesurer la suppression de mélatonine suite à une exposition à la lumière intense (~600 lx, pics d'émission spectrale à 430, 550 et 610 nm), ainsi que différents paramètres liés au sommeil. Les résultats montrent que, comme attendu, porter des lunettes filtrantes seulement au moment de l'exposition forte réduit la suppression de mélatonine de façon significative par rapport aux témoins (lumière faible). Mais de façon inattendue, les participants ayant porté les lunettes pendant deux semaines ne présentaient aucune différence en matière d'amplitude, de cinétique de DLMO ou de suppression de la mélatonine, par rapport aux témoins. De même, les paramètres mesurant la qualité du sommeil furent peu changés entre les groupes.

D'autres études indiquent également que le système circadien est capable de s'adapter aux conditions lumineuses précédentes. Hébert *et al.* (2002) ont montré que le potentiel de suppression de la sécrétion de mélatonine par une exposition durant la nuit à la lumière blanche (500 lx pendant 3 heures) était significativement plus élevée chez les personnes précédemment exposées à la lumière de faible intensité (< 200 lx) pendant la journée par rapport à celles exposées à la lumière de forte intensité (5 000 lx). Des résultats allant dans le même sens – qu'une exposition initiale à la lumière de faible intensité augmente la suppression nocturne de mélatonine par une exposition secondaire - ont été obtenus par Smith *et al.* (2004) et Jasser *et al.* (2006). Chang *et al.* (2011) ont analysé aussi bien la suppression nocturne de la mélatonine que la magnitude du retard de phase induit par une exposition à la lumière durant la nuit (étude réalisée chez 17 jeunes personnes, 10 hommes et 7 femmes, en bonne santé, moyenne d'âge 23,8 ans ; intensité lumineuse de 90-150 lx (maximum de 0,48 $W.m^{-2}$)), et ceci suite à des expositions pendant les 3 jours précédents soit à de la lumière de faible intensité (1-3 lx, maximum de 0,01 $W.m^{-2}$), soit d'intensité modérée (90-150 lx). Ils ont trouvé que l'exposition initiale à la lumière faible augmentait l'effet de suppression de la mélatonine et du retard de phase, induite par l'exposition nocturne de 68 % et 62 % respectivement par rapport au groupe exposé à la lumière modérée. La même équipe a étendu ces observations aux effets sur l'attention et l'état de

vigilance, utilisant le même protocole expérimental (Chang *et al.*, 2013). Là aussi, une exposition lumineuse précédant celle à la lumière de faible intensité augmente significativement un effet stimulant de la lumière nocturne, par rapport à la même exposition effectuée suite à des expositions en conditions de lumière d'intensité modérée.

Ces observations montrent qu'une adaptation du système circadien aux conditions lumineuses rencontrées précédemment (soit l'intensité, soit la composition spectrale) s'opère, elles mettent notamment en avant une sensibilité augmentée par une exposition en amont à des conditions lumineuses de faible intensité. Ces données suggèrent que la modification spectrale du régime lumineux aurait de moins en moins d'effet avec le temps. *[Limitations : fort désistement des participants dû essentiellement à l'inconfort des lunettes, difficultés d'interprétation].*

3.3.3.2.7 Conclusions

L'enjeu sociétal de trouver des conditions optimales pour limiter l'exposition lumineuse ou exploiter les effets d'une exposition lumineuse en soirée a donné lieu à plusieurs pistes potentielles : le port de lunettes filtrantes ou l'installation des systèmes électroniques pour régler le contenu de la lumière en émission bleue en fonction de l'heure de la journée. Plus de recul est nécessaire pour juger laquelle(s) de ces approches sera/seront la plus efficace, mais la compréhension du mécanisme en jeu (activation du réseau circadien par les émissions de courtes longueurs d'onde) alimente activement les recherches.

3.3.4 Conclusions sur la lumière artificielle, les LED et les rythmes circadiens

3.3.4.1 Rappels synthétiques

Homme et rythmes circadiens

L'Homme est une créature diurne, et sa physiologie générale est adaptée afin d'être éveillé et pleinement actif le jour, et au repos la nuit. Les fonctions corporelles sont étroitement liées à ce cycle alternatif, comme les états de sommeil-réveil, et lors des cycles jour / nuit normaux chaque processus est optimisé pour survenir au moment approprié : pendant l'éveil la vigilance et les performances physiques et cognitives sont optimales, alors que pendant la phase de sommeil la température corporelle et la fréquence cardiaque sont en baisse (McGinnis & Young, 2016) et la concentration circulante de la mélatonine (neurohormone qui prépare l'organisme pour le sommeil, et qui agit également comme un anti-oxydatif puissant) est élevée. La coordination de ce répertoire complexe est contrôlée par une horloge circadienne centrale, elle-même synchronisée au cycle jour / nuit par des connections neurales spécifiques entre rétine et cerveau. Pour la fonction optimale de l'horloge, une différence marquée dans l'intensité et la qualité spectrale de la lumière entre le jour et la nuit est essentielle. Le mode de vie dans les pays industrialisés perturbe grandement cette alternance, avec une nette diminution d'exposition pendant la journée (de par l'activité sédentaire à l'intérieur) et l'éclairage excessif en soirée (de par l'illumination artificielle). Plusieurs conclusions ou tendances peuvent être établies sur la base des connaissances scientifiques rassemblées par ce travail d'expertise.

Les cellules ganglionnaires à mélanopsine (CGM), qui constituent le conduit unique pour véhiculer les informations lumineuses de la rétine vers l'horloge circadienne, sont extrêmement sensibles aux longueurs d'onde courtes (entre 450 et 500 nm), longueurs d'onde correspondant à la région bleue-turquoise du spectre. Dans le monde naturel, ces fréquences sont dominantes durant la journée et fortement présentes dans les rayonnements solaires, mais complètement absentes la nuit.

Dérégulation potentielle de l'horloge circadienne

Toute source de lumière en dehors des heures normales de la journée constitue un signal aberrant potentiel pour l'horloge circadienne, qui peut être désynchronisée de son rythme

naturel et provoquer ainsi des perturbations métaboliques, hormonales et physiologiques. Un tel signal peut aussi comporter des effets négatifs sur les autres fonctions non-visuelles de la lumière, par exemple en stimulant l'éveil et en inhibant l'endormissement en début de soirée. La part bleue de ces émissions est capitale, mais d'autres longueurs d'onde peuvent aussi influencer les CGM à travers leurs contacts synaptiques au sein de la rétine. Les LED de couleur blanc froid (température de couleur > 4 000 K) sont particulièrement impliquées en raison de leur spectre d'émission riche en longueurs d'onde courtes (~460 nm), mais toute source de lumière (fluorescente, halogène, fluocompacte…) qui émet dans ces gammes est concernée.

Aspects dose-réponse

Les études scientifiques disponibles montrent que la valeur seuil pour que la lumière bleue puisse affecter l'horloge circadienne (témoignée par la suppression de la sécrétion nocturne de la mélatonine) est très basse, aux alentours de 10-40 lx (Cajochen *et al.*, 2011 ; Chellappa *et al.*, 2011 ; Green *et al.*, 2017 ; Rahmann *et al.*, 2017a ; Yoshimura *et al.*, 2017) voire en dessous (Prayag *et al.* 2017). D'autre part, l'impact de la lumière sur l'horloge est non-linéaire, de sorte que des expositions aussi brèves que 15 secondes à intensité forte (9 500 lx, Rahmann *et al.*, 2017b), ou même de 2 millisecondes (Najjar *et al.*, 2016), y compris les yeux fermés et durant le sommeil (Zeitzer *et al.* 2011) peuvent la décaler. Il est important de souligner que ces valeurs d'exposition lumineuse sont présentes dans les habitations, où le niveau d'éclairage du soir avoisine ces intensités, voire peut être plus intense (~150 lx), et où plus la lumière a une température de couleur élevée (*i.e.* plus il y a du spectre bleu) plus son impact est négatif sur le sommeil (Higuchi *et al.*, 2014, 2016 ; Gimenez *et al.*, 2017 ; Touitou *et al.*, 2017).

Enfants et adolescents

Ces effets de retardement de l'heure de coucher, dus à la suppression de la mélatonine ou à l'activation de fonctions non-visuelles, sont encore plus marqués chez les enfants et les jeunes adolescents. Un facteur évident est la transparence du cristallin, plus importante chez les jeunes et qui laisse traverser plus de lumière que chez les adultes (> 20 ans), à émission égale. En plus de l'utilisation très répandue des appareils à écran LED chez les adolescents, les changements psychologiques, hormonaux et circadiens qui interviennent à cet âge (allongement de la période endogène), sont probablement aussi impliqués.

Développement in-utero

Des travaux expérimentaux chez l'animal mettent en évidence un effet de l'éclairage de nuit sur la relation mère-fœtus, qui est prolongé au-delà de la naissance pour affecter la descendance même une fois arrivée à l'âge adulte. Or, la mélatonine circulante de la mère traverse facilement la paroi utérine pour entrer dans la circulation embryonnaire, où elle est impliquée dans la mise en place du système circadien en voie de développement. Des expériences réalisées chez les rats montrent qu'une diminution de la mélatonine chez la mère, due à l'exposition lumineuse de nuit, aurait des conséquences à de nombreux niveaux : taille du fœtus, difficulté d'accouchement, anxiété et problèmes mentaux (Okatani *et al.*, 2001 ; Nagai *et al.*, 2008 ; Richter *et al.*, 2009 ; Mendez *et al.*, 2012 ; Vilches *et al.*, 2012). En extrapolant vers l'Homme, les perturbations circadiennes engendrées par l'éclairage moderne pourraient impacter négativement le développement *in utero*. Étant donné les impacts potentiels négatifs sur la santé reproductive féminine, la perturbation circadienne pourrait représenter une menace environnementale pour les femmes et leurs enfants. Les résultats comportementaux d'hyperactivité et d'évitement social sont compatibles avec les observations chez les adolescents humains.

De même, ces effets maternels mis en évidence chez l'animal influencent l'homéostasie métabolique des descendants, les prédisposant ainsi à des problèmes tels que le diabète et l'obésité (Varcoe *et al.*, 2011). Á l'heure actuelle, on ignore si les mêmes effets sont retrouvés chez l'Homme.

Personnes âgées

À l'autre extrémité de la vie, les personnes âgées semblent aussi très perturbées, mais pour des raisons opposées : leurs cristallins étant relativement opacifiés, le passage lumineux est réduit par rapport aux jeunes adultes, et pourrait être même en dessous du niveaux lumineux nécessaire pour faire fonctionner correctement l'horloge circadienne. Même si cela ne semble pas être le cas chez le sujet sain (Najjar *et al.* 2014), les patients atteints de cataracte pourraient être à risque. Le niveau de luminosité dans les maisons de retraite et de soins semble insuffisant dans la journée pour remplacer les rayonnements solaires, et des études menées en conditions réelles montrent que l'exposition à des éclairages plus intenses dans la journée améliore la qualité du sommeil, l'humeur et les émotions des séniors et surtout ceux en état de déclin mental et de déficience cognitive (Obayashi *et al.*, 2014 ; Figueiro *et al.*, 2014, 2015, 2016, Riemersma et van Someren, 2009).

Filtres à lumière bleue

Des solutions pour éviter les effets stimulateurs de la lumière bleue le soir sont déjà proposées : filtres incorporés aux écrans en soirée (Oh *et al.*, 2014) ou filtres s'adaptant aux lunettes (Figueiro *et al.*, 2011 ; Van der Lely, 2015), systèmes d'éclairage programmables qui contrôlent la quantité de lumière mélanopique (activant l'horloge circadienne) aux différentes heures du jour et de la nuit (Bues *et al.*, 2012 ; Heo *et al.*, 2016 ; Oh *et al.*, 2015). À noter, une étude qui suggère qu'à force d'utiliser de telles approches, le réseau circadien pourrait s'adapter et devenir insensible à un filtrage optique des longueurs d'ondes courtes (Gimenez *et al.*, 2014).

Importance du contraste lumineux marqué entre le jour et la nuit

La synchronisation de l'horloge circadienne endogène avec l'heure solaire a évolué dans un cycle incessant d'alternance jour-nuit depuis l'apparition de la vie sur Terre, et les multiples composés de ce système complexe sont parfaitement adaptés à cette alternance. La synchronisation efficace de l'horloge circadienne centrale dépend d'une intensité de lumière importante durant la journée, et de l'obscurité pendant la nuit ; alors que le mode de vie du monde industriel tend de plus en plus vers une journée passée à l'intérieur (accompagnée par une baisse d'intensité lumineuse) et une soirée et une nuit exposées à de multiples sources d'éclairage au domicile, sur le lieu de travail et à l'extérieur (Smolensky *et al.*, 2015 ; Martinez-Nicolas *et al.*, 2013). Plusieurs articles portent sur l'importance de rétablir ces alternances marquées, aussi bien en situation quotidienne (à domicile, au bureau : Figueiro *et al.*, 2017a ; Harb *et al.*, 2015) qu'à l'hôpital en soins intensifs (Munch *et al.*, 2017 ; Gimenez *et al.*, 2017).

Effets long terme et court terme

Alors que les effets à long terme peuvent être considérés comme « néfastes » dans leur ensemble (perturbation du sommeil engendrant des problèmes de fatigue, effets de la suppression de la mélatonine sur la santé physique et mentale, désynchronisation circadienne, etc.), à court terme, la stimulation de l'attention la nuit par la lumière bleue pourrait avoir un intérêt dans un contexte où la vigilance de nuit est capitale pour réduire le risque d'accidents, tels que pour l'utilisation de machines ou le transport routier (Chellappa *et al.*, 2011 ; Sasseville & Hébert, 2010 ; Taillard *et al.*, 2012). Figueiro *et al.*, (2015) suggèrent que l'utilisation de la lumière rouge serait avantageuse de ce point de vue, parce qu'elle stimule la vigilance sans supprimer la mélatonine.
Ce travail d'expertise s'est concentré sur les effets de l'éclairage le soir ou la nuit (pas seulement à LED, bien que cette technologie se généralise) sur l'horloge circadienne, et à travers elle sur la santé physique et mentale à plus ou moins longue échéance. Mais un aspect jusqu'ici complètement négligé concerne la santé visuelle : la rétine contient une horloge circadienne propre à elle, et cette horloge est tout aussi affectée que l'horloge centrale par l'éclairage de nuit. Nous savons, par des études sur des modèles animaux, que la physiologie rétinienne est très altérée par la lumière blanche la nuit, mais nous ne savons pas encore si ces chamboulements sont également présents chez l'Homme et s'ils peuvent

provoquer des problèmes de vue des années plus tard. La phototoxicité (voir la section 3.5.1.5) est elle-même un processus pathologique dépendant de l'horloge rétinienne, et les études expérimentales montrent qu'elle est plus dommageable la nuit.

3.3.4.2 Évaluation du niveau de preuve

- Éléments de preuve chez l'Homme

Les données scientifiques évoquées dans cette section permettent de conclure que les éléments de preuve chez l'Homme sont suffisants quant à l'effet d'une exposition à la lumière riche en lumière bleue en soirée ou la nuit sur la perturbation des rythmes circadiens. Compte tenu de ce niveau de preuve chez l'Homme, il n'y a pas lieu de considérer le niveau de preuve chez l'animal.

- Classement

Compte tenu des éléments de preuve suffisants chez l'Homme, la perturbation des rythmes circadiens par l'exposition à une lumière riche en lumière bleue en soirée ou la nuit est avérée.

La perturbation des rythmes circadiens peut contribuer à la survenue de nombreux effets sanitaires : perturbation de la qualité et de la durée du sommeil, troubles métaboliques, cancer, obésité, pathologies cardiovasculaires, effets sur la santé psychique, ... Cependant, le lien direct entre l'exposition à la lumière riche en lumière bleue la nuit et ces effets sanitaires, bien que fortement suspecté, n'a pas encore été établi à ce jour chez l'Homme.

3.4 Effets des LED sur le sommeil et la cognition

3.4.1 Introduction

Les travaux scientifiques étudiant l'impact direct des LED sur le sommeil et la cognition sont peu nombreux. Néanmoins, il existe aujourd'hui de nombreux arguments dans la littérature scientifique qui plaident en faveur d'un impact physiologique étendu de la lumière, en particulier sur la régulation veille-sommeil (Cajochen *et al.,* 2005 ; Munch *et al.,* 2006). Il existe de plus d'arguments épidémiologiques forts qui montrent que la surexposition lumineuse au cours de la journée (en particulier en soirée) modifie les habitudes de sommeil, en particulier pour les populations vulnérables telles que les enfants et adolescents (Keller *et al.*, 2017).

En raison de l'interdépendance entre le sommeil et les fonctions cognitives, il est naturel d'envisager l'impact de la lumière sur la cognition. Comme pour tous les phénomènes biologiques, le comportement de sommeil est sensible au milieu dans lequel nous évoluons. Il est admis que la lumière est le synchronisateur le plus puissant du cycle veille-sommeil (Lewy *et al*, 1980 ; Boivin *et al*, 1996).

Au cours des 3 dernières décennies, le développement de l'éclairage nocturne a modifié les conditions de vie et de travail. Cette extension temporelle de l'utilisation de la lumière artificielle est couplée à la généralisation de l'utilisation de systèmes d'éclairage à basse consommation d'énergie. Il est de plus important de tenir compte de l'utilisation croissante de nouveaux outils de communication comportant des écrans éclairés (tablettes, ordinateurs, téléphones mobiles, etc.)

Ainsi, l'impact des LED sur la qualité et la durée du sommeil devient une question importante lorsque l'on sait que le spectre de certaines de ces diodes a la particularité d'être riche en

lumière bleue, dont on a déjà signalé l'influence sur le système circadien humain (voir la section 3.3).

La lumière bleue recouvre deux gammes de longueurs d'onde : les courtes (bleu - violet) qui sont dangereuses car phototoxiques, alors que les plus longues (bleu - turquoise) influencent nos fonctions homéostatiques et peut-être cognitives, car elles sont captées par les cellules à mélanopsine. La lumière a donc un impact sur le rythme veille-sommeil non seulement en perturbant le système circadien mais également en affectant la régulation homéostasique du sommeil. Ces perturbations modifient à la longue la qualité et la durée du sommeil, impactant ainsi les besoins de sommeil. Les répercussions sur le fonctionnement diurne (cognition et vigilance) en sont le corollaire.

3.4.1.1 Besoin de sommeil et santé

Le sommeil occupe environ le tiers de notre vie, il est indispensable à la récupération de la fatigue physique et mentale accumulées dans la journée. Il est essentiel à la préservation des capacités cognitives et motrices, à l'ajustement de nombreuses sécrétions hormonales ainsi qu'à la restauration du système immunitaire ou encore au repos du système cardiovasculaire.

De nombreux travaux ont montré le rôle fondamental du sommeil sur la santé physique et mentale des individus à tous les âges de la vie (Giordanella *et al.*, 2005). Il n'est pourtant pas simple de définir le besoin de sommeil. En 2015, la fondation nationale du sommeil américaine (*National Sleep Foundation*) a publié des recommandations issues de l'analyse de plus de 300 publications scientifiques par un panel de 18 experts (M. Hirshkowitz *et al.*, 2015). Ces besoins en sommeil varient d'un individu à l'autre et pour un même sujet en fonction de son âge. L'âge est un facteur modulateur déterminant (*cf.* Tableau 2).

Tableau 2 : besoin de sommeil en fonction de tranches d'âge

	Tranche d'âge	Besoins
Nouveau-nés	0-3 mois	**14 à 17 h**
Nourrissons	4-11 mois	**12 à 15 h**
Bébés	1 à 2 ans	**11 à 14 h**
Jeunes enfants	3 à 5 ans	**10 à 13 h**
Enfants	6 à 13 ans	**9 à 11 h**
Adolescents	14 à 17 ans	**8 à 10 h**
Jeunes adultes	18 à 25 ans	**7 à 9 h**
Adultes	26 à 64 ans	**7 à 9 h**
Seniors	**65 +**	**7 à 8 h**

Source : (*National Sleep Fundation*, 2015)

Le sommeil est considéré aujourd'hui comme un facteur de protection de l'état de santé. À l'inverse, la réduction de la durée quotidienne de sommeil ainsi que les perturbations de la qualité du sommeil ont des conséquences négatives en matière de santé ainsi que sur le fonctionnement social et professionnel (accidents de la route et accidents du travail liés à la somnolence, absentéisme) (Leger *et al.*, 2002 ; Leger *et al.*. 2006 ; Godet Cayré *et al.*, 2006).

La durée moyenne du sommeil des français se situe autour de 7 heures par jour (Beck *et al.*, 2006). Cette durée ne correspond pas nécessairement aux besoins de sommeil. En effet, certains individus (les longs dormeurs) peuvent avoir besoin de 9 heures de sommeil, là où

les courts dormeurs peuvent se contenter de 5 heures par nuit. Il est possible de fixer les besoins physiologiques, c'est-à-dire en matière de norme prophylactique pour un adulte entre 7 et 8 heures par jour au cours de la semaine et de 8 à 9 heures les jours de repos.

3.4.1.2 Facteurs influençant le sommeil

3.4.1.2.1 Facteurs environnementaux

À côté des effets de la lumière, on connaît bien les effets sur le sommeil de la température ambiante, du bruit, des facteurs nutritionnels ainsi que des facteurs psychosociaux (stress). L'addition de ces facteurs environnementaux peut avoir un effet cumulatif conduisant à une perturbation de la durée et de la qualité du sommeil. De plus, la susceptibilité à l'environnement est modulée par certains facteurs, notamment génétiques.

3.4.1.2.2 Les facteurs héréditaires

Génétique du sommeil normal

À ce jour, il n'a pas été mis en évidence de gènes pouvant expliquer la durée ou la structure du sommeil. En effet, d'un point de vue phénotypique, le sommeil est une fonction complexe et élaborée, impliquant de nombreux paramètres (facteurs comportementaux, aspects électroencéphalographique (EEG), circadien, sensibilité à la privation de sommeil). L'architecture d'un sommeil est sous l'influence de plusieurs gènes et plusieurs arguments cliniques et épidémiologiques en attestent. Les études de concordances sur les paires de jumeaux ont ainsi montré que les caractéristiques spectrales du signal EEG (puissance) étaient identiques pour les paires de jumeaux monozygotes en comparaison avec des jumeaux dizygotes (Andretic *et al.*, 2008).

Génétique de l'horloge biologique

Les rythmes circadiens sont en revanche très bien connus d'un point de vue génétique. Notamment les travaux sur la *Drosophila melanogaster* ont permis d'identifier une série de gènes (*clock*) dont l'analogie avec d'autres espèces mammifères et l'Homme a été rapidement confirmée. Aujourd'hui, on identifie plusieurs familles de gènes impliqués dans l'horloge biologique : les gènes *clock* codant les protéines *clock*, *period* 1, 2, 3 (PER1, PER2, PER3) cryptochrome 1 et 2 (CRY 1 et CRY2) (Parish JM,2013).

Génétique et sommeil pathologique

La plupart des maladies du sommeil ont une origine génétique, cependant la mise en évidence des gènes impliqués est complexe. À titre d'exemple, dans le cas de formes familiales de syndrome des jambes sans repos, les études de liens génétiques ont mis en évidence l'implication des *loci*[45] RSL1 situés sur le bras court du chromosome 12 et RSL2 sur le bras court du chromosome 14. Les études d'associations génomiques ont permis de retrouver dans cette maladie un certain nombre de variants génétiques (BTBD9, MAP2K5, *etc.*). Certaines pathologies, comme l'insomnie fatale familiale, sont clairement associées à une mutation sur le gène codant la synthèse de la protéine prion (PRNP) sur la position 178.

Dans le syndrome d'apnées-hypopnées au cours du sommeil, le polymorphisme génétique du gène codant la synthèse d'enzyme de conversion de l'angiotensine serait impliqué chez certains patients apnéiques développant une hypertension.

[45] Un *locus* (pluriel *loci*) est l'emplacement d'un gène sur un chromosome

3.4.2 Physiologie et organisation du sommeil

3.4.2.1 Architecture du sommeil

Le sommeil est organisé de façon cyclique. Un cycle de sommeil dure environ de 1h30 à 2 heures. Une nuit de sommeil est caractérisée par une succession de 4 à 5 cycles de sommeil. La structure du sommeil est appréhendée par l'examen polysomnographique (*cf.* Figure 19) qui permet de définir les différents stades de sommeil.

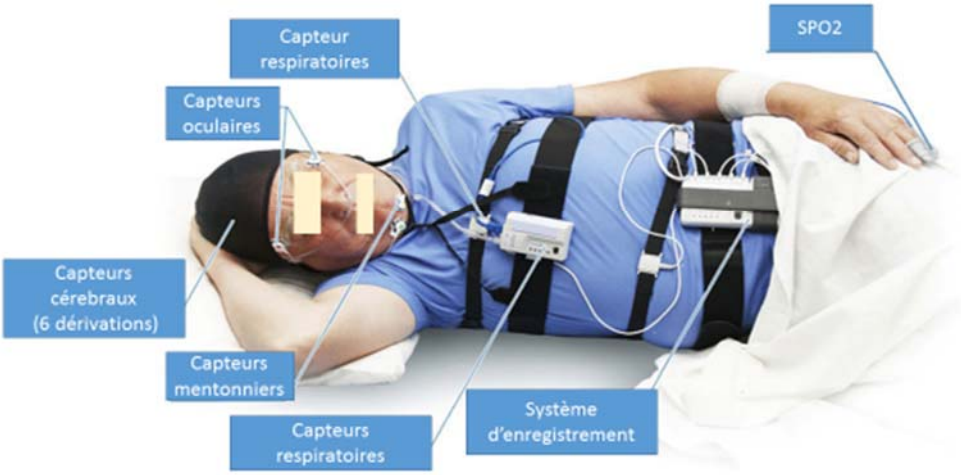


Figure 19 : dispositif d'enregistrement polysomnographique

Polysomnographie : dispositif d'enregistrement permettant d'analyser plusieurs signaux (électroencéphalogramme, tonus musculaire mentonnier, respiration nasale, thoracique et abdominale, électrocardiogramme, saturation en oxygène).

Les stades de sommeil sont déterminés selon une classification des aspects des signaux EEG (électroencéphalogramme), l'EOG (éléctrooculogramme) et l'EMG (electromyogramme) actualisée en 2007 par l'AASM (*American Academy of Sleep Medicine*), qui a publié de nouvelles règles de codage du sommeil (*Iber et al., 2007*).

Il existe trois états de conscience qui constituent le rythme veille-sommeil : la veille, le sommeil lent (léger et profond) et le sommeil paradoxal. Le codage se fait par période de 30 secondes consécutives (encore appelées époques) et permet de définir ainsi chaque stade de sommeil (voir Figure 20).

L'organisation interne du sommeil est stable quelle que soit l'heure d'endormissement et pour tous les sujets d'un âge donné. Chez l'adulte, ce profil -ou hypnogramme- est stable pour un même individu. Il commence par une phase de sommeil lent léger (stades 1 et 2), puis apparait le sommeil à ondes lentes qui correspondent au sommeil lent profond (stade 3). Ce dernier, qui est caractérisé par un ralentissement des fonctions cérébrales et une restauration de l'énergie (cérébrale). Il se prolonge pendant environ 60 à 90 minutes. Après le stade de sommeil lent profond survient le sommeil paradoxal qui dure une dizaine de minutes, et qui correspond au contraire à une hyperactivité du cerveau. La fin de la phase de sommeil paradoxal définit la fin du premier cycle du sommeil de la nuit. Un deuxième, troisième et quatrième cycle suivent, comportant chacun d'abord du sommeil lent puis du sommeil paradoxal (*cf.* Figure 20).

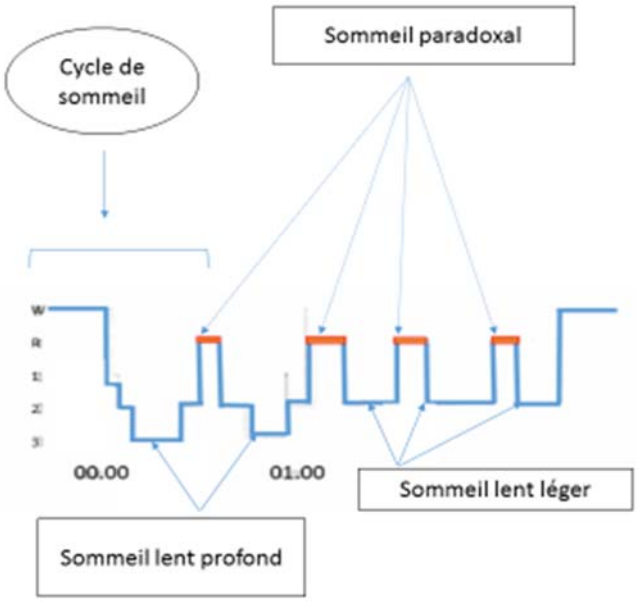


Figure 20 : hypnogramme d'un adulte jeune comportant 5 cycles de sommeil sur une nuit

L'alternance du sommeil lent et du sommeil paradoxal dépend de l'activation de nombreux réseaux neuronaux qui impliquent une multitude de neuromédiateurs comme l'acétylcholine et le glutamate, la sérotonine, la noradrénaline, l'histamine et l'hypocrétine (ou orexine).

Toute perturbation du fonctionnement de ces réseaux neuronaux aura des répercussions, sur la qualité et la durée du sommeil et sur certains troubles spécifiques du sommeil lent et/ou du sommeil paradoxal (Scammell *et al.*, 2017).

3.4.2.2 Régulation du sommeil

Depuis les travaux d'Alexander Borbely (1986), les expériences de privation du sommeil montrent l'existence d'une régulation homéostasique. Ce mécanisme permet un retour à l'équilibre et se manifeste par une augmentation de la somnolence proportionnelle à la durée de l'éveil qui constitue une pression de sommeil. Cette pression de sommeil est caractérisée par un rebond d'efficacité du sommeil compensatoire. Ce rebond est à la fois quantitatif et qualitatif (augmentation du pourcentage en ondes lentes, et par une réduction des phases de transition du sommeil) (Borbely, 2016).

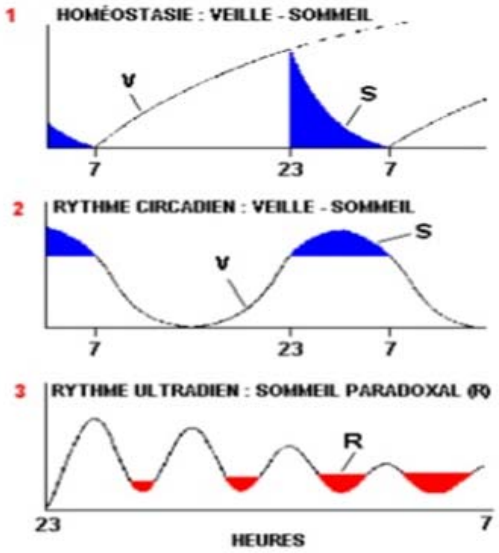


Figure 21 : principaux processus de régulation du sommeil : homéostatique, circadien et ultradien

Source : d'après Borbély, 2016

Trois composantes majeures régulent sommeil et vigilance :

- une composante homéostatique est liée à l'accumulation de la veille précédant le sommeil ;
- une composante circadienne évolue sur 24h ;
- une composante ultradienne explique la survenue du sommeil paradoxal à des moments définis du sommeil.

W : *Wake* (veille), **S** : *sleep* (sommeil), **N** : NREM = sommeil lent, **R** : REM = sommeil paradoxal, (*Elbaz, 2016*)

3.4.3 Sommeil et cognition : rôle de la privation de sommeil

Les effets de la privation de sommeil sur le fonctionnement cognitif commencent à être mieux connus. Nous savons ainsi qu'une privation aiguë de sommeil affecte les performances cognitives. Il existe un large consensus concernant l'impact de la privation de sommeil sur la vitesse de traitement de l'information, sur la vigilance et l'attention. En revanche, l'impact sur des fonctions cognitives complexes comme la perception, la mémoire ou les fonctions exécutives est discuté. Les études en IRM fonctionnelle ont retrouvé une activation du cortex préfrontal chez des sujets privés de sommeil sans montrer une atteinte franche des fonctions exécutives (Killgore *et al.* 2010, Maire *et al.*, 2018).

3.4.4 Effets de la lumière sur le sommeil et la cognition : résultats de la recherche bibliographique

L'exposition à la lumière peut modifier le comportement de sommeil en induisant une privation de sommeil. Aux États-Unis, on estime que 50 à 70 millions d'individus souffrent des conséquences sanitaires (diabète, obésité, maladies cardiovasculaires et neurologiques) et accidentelles (accident de la route) des troubles du sommeil et de la dette de sommeil (Colten *et al.*, 2006). De plus, les expositions lumineuses, notamment nocturnes, ont un impact sur le système circadien, la sécrétion de mélatonine et le sommeil (Czeisler, 2013).

En France, l'étude HBSC 2010 (*Health Behaviour in School-aged Children*) publiée par l'Inpes en septembre 2012 montre que les adolescents qui utilisent un ordinateur ont un temps de sommeil plus court (8 h 06 versus 8 h 50), tout comme ceux disposant d'un téléphone mobile équipé d'internet (7 h 59 versus 8 h 44) ou encore ceux regardant la télévision le soir dans leur chambre (8 h 16 versus 8 h 48). Or, les technologies à LED tendent à devenir les sources lumineuses prépondérantes pour ce type d'application à écran. Cette stimulation lumineuse couplée à une excitation intellectuelle entrainent à la fois un décalage des heures de sommeil et une réduction de sa durée (Godeau *et al.*, 2012).

Une étude anglaise publiée par *Public Health England* (PHE) (Kevin Feston, 2013) indique qu'au-delà de 4 h / jour d'exposition aux écrans (tablette, télévision, jeux videos) les pré-adolescents pourraient souffrir de problèmes socio-affectifs, d'anxiété voire de dépression.

La question des effets directs des LED sur le sommeil et les fonctions cognitives est peu abordée dans la littérature scientifique. Les travaux existants abordent les effets directs des LED sur le rythme circadien et le sommeil (6 publications) ainsi que l'impact sur la cognition (2 publications, Park *et al.*, 2013 ; Borragan *et al.*, 2017), ou encore l'exploration des applications thérapeutiques des LED dans une utilisation peu classique (stimulation extra-oculaire) (Timonen *et al.*, 2014; Naesaer *et al.*, 2014 ; Naesaer *et al.*, 2016).

3.4.4.1 LED et sommeil

3.4.4.1.1 Études portant sur l'utilisation d'une tablette à rétro-éclairage à LED

Les LED peuvent impacter le sommeil, notamment avec l'utilisation de tablettes ou de tout dispositif électronique disposant d'un rétro-éclairage à LED (ordinateur, téléphone mobile, écran de télévision). Wood et ses collaborateurs (Wood *et al.*, 2013) ont étudié l'impact du retro-éclairage de tablettes sur la suppression de mélatonine en raison de leur émission lumineuse dans le spectre proche de la sensibilité de l'horloge biologique (voir la section 3.3 et la section 3.3.3.2.1, où cette étude est décrite). Les auteurs ont étudié 13 sujets adultes sains âgés de 18,9 ± 5,2 ans. Les sources lumineuses ont été testées dans 3 situations différentes :

- tablette avec des lunettes claires équipées de petites sources LED bleues délivrant 40 lx sur la cornée et λ = 470 nm, cette situation correspond à un témoin positif de l'expérience ;
- tablette avec lunettes teintées en orange filtrant les fréquences en dessous de 525 nm ;
- tablette sans filtre.

La Figure 22 présente les spectres effectifs des trois situations.

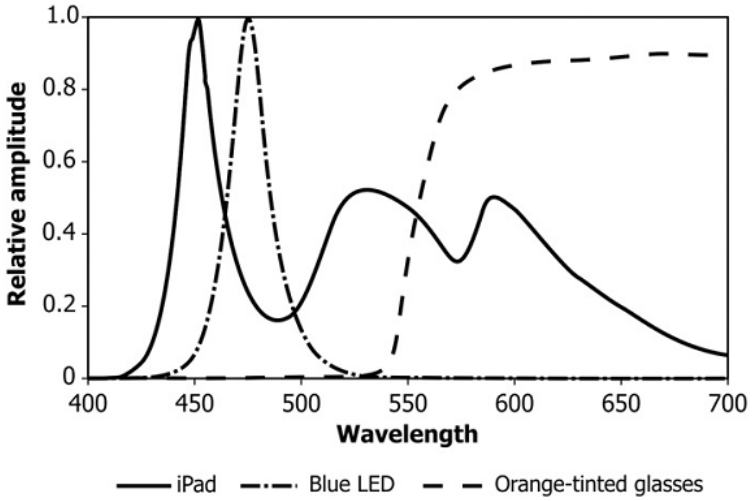


Fig. 1. Spectral transmittance of the orange-tinted glasses, the relative spectral power distribution (SPD) of a 470-nm (blue) LED, and the relative SPD of an iPad 1 (white screen, full brightness) used in the experiment.

Figure 22 : spectres effectifs d'illumination des trois situations d'exposition

Durant les tests, les tablettes sont paramétrées en éclairage maximum. La suppression de mélatonine est significative à 1 h et 2 h d'exposition ($t10 = 15$, $p < 0{,}001$ et $t111 = 16{,}1$, $p < 0{,}001$) pour les tablettes avec lumière bleue. Le taux de suppression de la mélatonine est de 48 ± 4 %, proche du modèle de prédiction[46] (46 %). Pour une exposition aux tablettes sans filtre, la suppression de mélatonine n'est pas significative après 1 heure d'exposition, mais elle le devient après 2 heures. La perception du sommeil est également modifiée avec une altération de la qualité du sommeil. Les auteurs concluent qu'une exposition aux écrans auto-éclairés des tablettes est susceptible d'entrainer non seulement des perturbations circadiennes mais également des troubles du sommeil. La durée d'utilisation avant le sommeil et la distance œil-écran sont des paramètres influents.

[46] Le modèle de prédiction utilisé est celui proposé par Rea et ses collaborateurs (Rea *et al*., 2005, 2010, 2011).

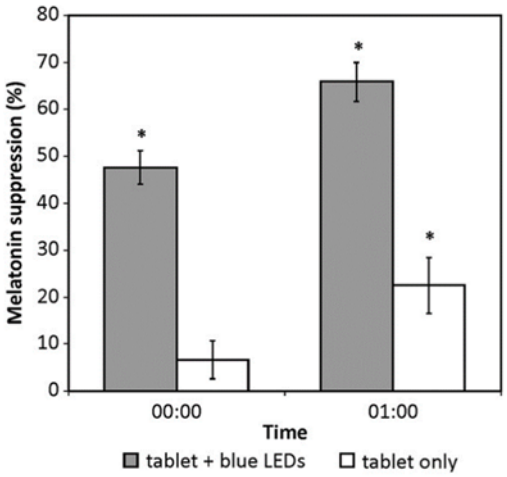


Fig. 2. Mean ± SEM suppression values for the tablet-only and for the tablet with blue LEDs at 00:00 and at 01:00. Suppression after 1-h exposure to the tablet-only condition was not significantly different than zero; all other suppression values (marked with asterisks) were significantly greater than zero ($p < 0.05$). The orange-tinted glasses condition served as the "dark" control condition.

Figure 23 : taux de suppression de la mélatonine après 1 h et 2 h d'exposition à des tablettes

Tablette LED bleues versus tablette utilisée sans filtre.

3.4.4.1.2 Études portant sur l'adolescent, son exposition lumineuse et les caractéristiques du sommeil

Un article de revue par Touitou *et al.* (2017) considère l'impact des appareils connectés (smartphones, portables, téléviseurs…) et leurs émissions lumineuses (enrichies en bleu de par l'utilisation des LED) sur la fragmentation du sommeil et ses conséquences (fatigue, somnolence dans la journée, difficultés scolaires) chez les adolescents. En résumé, à l'ère numérique, les enfants et les adolescents utilisent tous les jours, y compris la nuit, toutes sortes de consoles et d'écrans. Celles-ci montrent des effets néfastes sur le sommeil et la physiologie circadienne, affectant fortement les adolescents et représentant un facteur de risque pour la survenue de troubles sociaux et comportementaux (alcoolisme, échec scolaire,…). Les auteurs précisent que la lumière de nuit dans les espaces de vie devrait donc être réduite et contrôlée, afin de minimiser les effets néfastes associés à une telle exposition. Tout type de tablette (iPads, ordinateurs, smartphones, etc.) émettant de la lumière enrichie en bleu utilisée en soirée (voir le sous-chapitre 3.3.3.1) peut bloquer la sécrétion de la mélatonine si les intensités sont suffisamment fortes, et induire un retard de phase de l'horloge circadienne qui pourrait, à la longue, entraîner une perturbation de la structure du temps circadien. Les auteurs de cette revue avancent que ces perturbations initiées chez les jeunes peuvent se prolonger à l'âge adulte et sous-tendent le développement de problèmes de santé.

Cependant, d'autres études ont rapporté l'absence de corrélation entre l'exposition lumineuse en soirée et le sommeil. Hersch *et al.* (2015) ont évalué le rapport entre, d'une part la durée du sommeil et le taux de mélatonine matinale, et d'autre part les habitudes de loisir et l'environnement lumineux de 100 adolescents (moyenne d'âge 15,7 ans, 45 hommes, 55 femmes). Il n'y avait pas de corrélation entre la durée de sommeil, l'éclairage nocturne, ou l'utilisation d'écrans connectés, et le taux de mélatonine. [*Limitations : certains paramètres subjectifs, la durée de sommeil est déterminée par les adolescents eux-mêmes*].

3.4.4.1.3 Comparaison des effets sur le sommeil par rapport à la composition spectrale, l'intensité et la durée d'exposition d'écrans à LED

Green *et al.* (2017a) ont exploré les effets indépendants et combinés de deux aspects de l'éclairage d'écran, à savoir la longueur d'onde d'émission et l'intensité lumineuse, sur le

sommeil et les effets fonctionnels associés. Le *design* (« 2 × 2 » mesures répétées) comprenait deux variables indépendantes : intensité lumineuse de l'écran [faible (fl) *versus* forte (FI) : 80 lx (35 mW/cm^2) et 350 lx (160 mw/cm^2) respectivement] et longueur d'onde [courte (SW) *versus* longue (LW) ; 460 et 620 nm respectivement]. Dix-neuf participants (11 femmes, 8 hommes, moyenne d'âge 24,3 ± 2,8 années) ont subi quatre conditions de lumière, fl / SW, FI / SW, FI / LW et FI / LW, en ordre aléatoire. Chaque exposition à la lumière a duré deux heures (21h00-23h00), ensuite des enregistrements par polysomnographie ont été effectués durant la nuit. Chaque nuit la température orale et des échantillons d'urine (pour l'analyse de la mélatonine) ont été recueillis à plusieurs points horaires. Chaque matin, les participants ont rempli des questionnaires et ont réalisé une tâche d'attention informatisée. Indépendamment de l'intensité lumineuse, l'éclairage SW (émissions enrichies en longueurs d'ondes courtes) a considérablement perturbé la continuité et l'architecture du sommeil, et a conduit à une plus grande somnolence diurne. La lumière SW a également modifié les rythmes biologiques, perturbant le déclin nocturne normal de la température corporelle et amortissant la sécrétion nocturne de la mélatonine. L'intensité de la lumière semblait affecter de façon indépendante le sommeil, mais dans une moindre mesure. L'intensité lumineuse et la longueur d'onde ont tous les deux affecté négativement la vigilance mesurée le lendemain matin.

La même équipe a réalisé une étude similaire, mais en analysant cette fois les effets de la durée d'exposition (soit une seule exposition, soit une exposition répétée durant 5 nuits) aux écrans émettant de la lumière de longueur d'onde courte (Green *et al.*, 2017b). Comme précédemment, 19 participants (11 F, 8 H, âge moyen 28,1 ± 7,2 ans) ont été suivis pendant 6 nuits en trois conditions différentes par mesures répétées : par rapport à une nuit de référence (première nuit, aucune exposition à la lumière), les participants ont eu soit une exposition aiguë (deuxième nuit seule) soit une exposition « chronique » (troisième à sixième nuits). Les participants devaient regarder un écran d'ordinateur à LED de taille 22 pouces, positionné au niveau des yeux à une distance d'environ 60 cm. L'intensité lumineuse émise par l'écran était ajustée à 350 lx, et la longueur d'onde dominante était à 460 nm. Chaque exposition à la lumière a duré 2 heures (21h00-23h00). Un test poly-somnographique était effectué à la fin de chaque condition (nuits 1, 2 et 6), et des échantillons d'urine (pour l'analyse du métabolite de la mélatonine) étaient recueillis. Les températures corporelles (orales) ont été mesurées avant et après l'exposition. Chaque matin, les participants ont rempli des questionnaires et effectué un test d'attention informatisé. Les résultats montrent que les deux scénarios, illumination aiguë et chronique, perturbent la qualité et l'architecture du sommeil et conduit à une plus grande somnolence de jour, à des émotions négatives et à des difficultés d'attention. Les deux types d'exposition ont également modifié les rythmes circadiens, atténuant le déclin nocturne normal de la température corporelle et amortissant la sécrétion nocturne de mélatonine.

Compte tenu de l'utilisation généralisée des dispositifs électroniques, ces résultats suggèrent que l'exposition à la lumière de l'écran pendant la soirée exerce des effets négatifs sur le bien-être, le sommeil et la performance chez l'humain, même après une seule soirée d'exposition. La longueur d'onde semble avoir une influence plus importante que l'intensité de la lumière sur le sommeil et une large gamme de fonctions biologiques et comportementales.

3.4.4.1.4 Distance de visionnement d'un smartphone à LED et effet sur le sommeil

Yoshimura *et al*. (2017) ont examiné le lien entre la distance de visionnement d'un *smartphone* et la magnitude des effets sur le sommeil. Vingt-trois étudiants infirmiers (4 H, 19 F, âge moyen 19,7 ± 3,1 ans) ont fait l'objet de l'étude, le statut subjectif du sommeil a été évalué à l'aide du « Pittsburgh Index », un questionnaire concernant le chronotype et utilisant l'échelle de somnolence Epworth a été rempli. Les auteurs ont mesuré la distance entre la tête et la main tenant un smartphone dans des positions assises et couchées ; la distance en position assise variait de 13,3 à 32,9 cm, et en position couchée de 9,9 à 21,3 cm ; les intensités de luminance correspondantes furent de 25,3 à 42,6 lx en position assise et de

50,5 à 80,4 lx en position allongée. Il y avait une corrélation positive entre la courte distance de vision dans la position couchée et un état de sommeil plus faible ($R^2 = 0,27$, $p < 0,05$), une efficacité de sommeil plus faible ($R^2 = 0,35$, $p < 0,05$) et une latence de sommeil plus longue ($R^2 = 0,38$, $p < 0,05$). Par conséquent, selon les auteurs, toute recommandation d'utilisation du *smartphone* en position de repos devait prendre en compte les distances de visionnement.

3.4.4.2 LED et cognition

Park et ses collaborateurs ont analysé l'effet spécifique de l'exposition lumineuse sur l'électroencéphalogramme (EEG) en prenant en compte deux paramètres : le niveau d'éclairement et la température de couleur. Trente-deux sujets sains ont réalisé des tests cognitifs sous différentes ambiances lumineuses de température de couleur 2 766 K *versus* 5 918 K et d'intensité lumineuse 300 Lx *versus* 600 lx. Ces auteurs trouvent une augmentation significative de la puissance alpha de l'EEG avec des températures de couleur chaudes. La mesure de la puissance alpha à l'EEG serait un marqueur de la perception du confort lumineux et peut-être de l'impact cognitif de la lumière polychromatique. Il nous faut néanmoins rappeler que les résultats principaux de cette étude portent sur l'EEG et la perception subjective plutôt que sur une évaluation précise des effets cognitifs (Park *et al.*, 2013).

Borragan *et al.* ont comparé l'impact d'un traitement par une lumière « bright light » (lumière bleue, $\lambda = 460$ nm) *versus* « dim light » (lumière rouge-orange, $\lambda = 600$ nm) sur une population de 20 adultes sains non privés de sommeil. Leur étude consistait en un essai randomisé en *cross over*. Les auteurs ne montrent pas d'effet de la lumière sur les performances cognitives (mesure objective par le PVT), ni sur la vigilance (mesure subjective par l'échelle de Karolinska). En revanche, plusieurs travaux ont montré l'impact de la lumière bleue sur les performances cognitives (Lockley *et al.*, 2006, Chellapa *et al.*, 2011 ; Vandewalle *et al.*, 2007).

3.4.5 Conclusion et évaluation du niveau de preuve

La plupart des travaux scientifiques disponibles montrent que la lumière bleue altère la régulation du sommeil par le biais des perturbations circadiennes (voir chapitre sur les ryhtmes circadiens). Les éléments de preuve chez l'Homme sont suffisants pour conclure à un effet avéré de l'exposition à une lumière riche en lumière bleue en soirée sur la latence d'endormissement, la durée et la qualité de sommeil.

3.5 Effets des LED sur l'œil

3.5.1 Rappels sur l'anatomie et la physiologie de l'œil humain

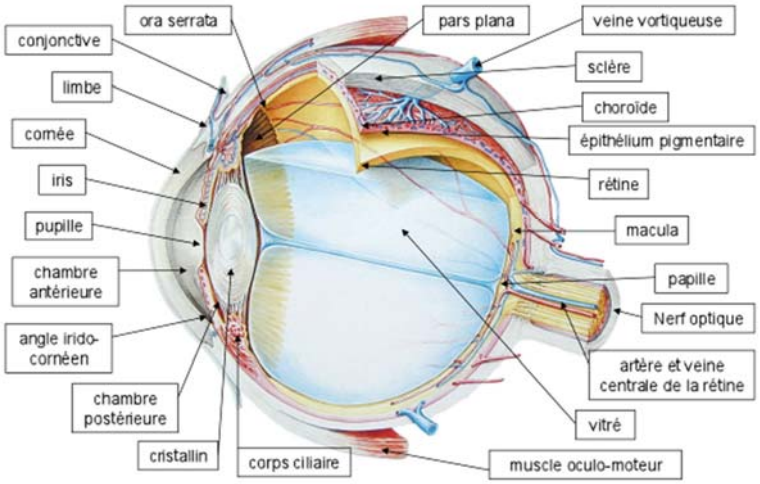


Figure 24 : anatomie de l'œil humain - coupe transversale

La paroi du globe oculaire est formée de trois tuniques (*cf.* Figure 24) avec, de l'extérieur vers l'intérieur : 1) la tunique fibreuse externe qui se compose de la sclère, ou sclérotique, en périphérie et de la cornée en avant, 2) la tunique uvéale ou uvée qui se compose de l'iris en avant et du corps ciliaire et de la choroïde en arrière et 3) la tunique nerveuse interne formée par la rétine qui reçoit les rayons lumineux. Ces tuniques enferment trois milieux transparents différents localisés au centre de l'œil, qui garantissent l'acheminement des rayons lumineux jusqu'à la rétine : 1) l'humeur aqueuse, un liquide transparent qui remplit l'espace entre la cornée et le cristallin, 2) le cristallin qui joue le rôle de lentille centrale et 3) le vitré, corps vitré ou humeur vitrée (60 % du volume oculaire) qui est une masse gélatineuse et transparente maintenant la rétine sur les parois de l'œil et contenant 99 % d'eau.

3.5.1.1 La surface oculaire

La surface oculaire comprend les paupières, le film lacrymal et la surface cornéo-conjonctivale.

3.5.1.1.1 Le film lacrymal

Le film lacrymal (*cf.* Figure 25) est une couche de 7 à 40 µm, formée d'une solution d'eau, de graisses et de mucus. On distingue 3 couches : la couche muqueuse qui adhère à la cornée, la couche aqueuse intermédiaire et la couche lipidique en contact avec l'air. Chaque couche du film lacrymal joue un rôle important dans la physiologie de la surface oculaire. La couche aqueuse apporte de l'eau et des protéines solubles à la cornée et maintient sa transparence, la couche muqueuse favorise l'étalement du film lacrymal et participe à la défense anti-infectieuse en particulier grâce à certains types de mucines. La couche lipidique superficielle est produite par les glandes palpébrales de Meibomius, elle limite l'évaporation de la couche aqueuse et contribue donc au maintien de l'osmolarité des larmes. Hormis des fonctions de défense contre les micro-organismes et de maintien de l'homéostasie nutritive de la cornée, le film lacrymal est un composant du pouvoir réfractif de la cornée en lissant la surface épithéliale. Le film lacrymal contient également des enzymes anti-oxydantes qui pourraient protéger les cellules de la surface oculaire contre le stress oxydatif.

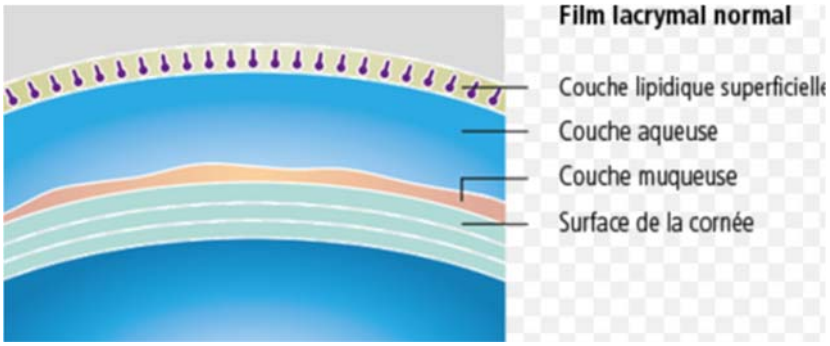


Figure 25 : film lacrymal normal

3.5.1.1.2 La conjonctive

La conjonctive est divisée en trois régions : conjonctive palpébrale, fornix (culs-de-sac conjonctivaux) et conjonctive bulbaire (qui recouvre la sclère).

L'épithélium conjonctival comprend des cellules mucipares, responsables de la sécrétion du mucus dans le film lacrymal. Le chorion conjonctival comprend des glandes annexes séreuses et muqueuses qui participent à la sécrétion du film lacrymal. Des lymphocytes dispersés dans la conjonctive assurent la reconnaissance antigénique.

3.5.1.1.3 Le limbe

Le limbe qui forme la jonction cornéo-conjonctivale est une région riche en cellules souches, essentielles à la régénération de l'épithélium cornéen (Dziasko *et al.*, 2015). Mais le limbe joue également un rôle important dans la défense immunitaire (Garfias *et al.*, 2012) et contient des mélanocytes (Higa *et al.*, 2005). Tout déficit en cellules souches limbiques conduit à une altération majeure de la structure et de la transparence cornéenne.

3.5.1.1.4 La cornée

La cornée humaine comprend cinq couches qui sont, de l'extérieur vers l'intérieur : l'épithélium, la couche de Bowman, le stroma cornéen, la membrane de Descemet et les cellules endothéliales. La membrane de Descemet correspond à la membrane basale des cellules endothéliales. La cornée est le tissu le plus riche en nerfs sensitifs, à partir des nerfs ciliaires antérieurs de la branche ophtalmique du nerf trijumeau. La cornée est un tissu résistant transparent avasculaire. Son indice de réfraction est de 1,377 et son spectre d'absorption situé dans les infrarouges lointains (> 800 nm - > 2 400 nm) et les ultraviolets (< 300 nm – 400 nm). Elle transmet les rayonnements visibles.

3.5.1.2 L'iris

L'iris pigmenté donne sa couleur à l'œil, son centre forme la pupille. Il se situe dans l'humeur aqueuse qui remplit l'espace entre la cornée et le cristallin. L'iris est innervé par des fibres du système nerveux qui activent les muscles dilatateurs et sphincters responsables de la dilatation et de la constriction pupillaire. Ces mécanismes réflexes règlent la quantité de lumière pénétrant dans l'œil. L'ouverture de l'iris dépend aussi de la longueur d'onde du rayonnement. Ainsi, pour un rayonnement UV, le diamètre de la pupille est de l'ordre de 1 mm, pour un rayonnement visible et proche infrarouge, le diamètre de celle-ci est d'environ 7 mm. Pour des longueurs d'onde plus grandes, l'ouverture de la pupille peut atteindre 11 mm.

3.5.1.3 Le cristallin

Le cristallin joue le rôle d'une lentille ronde transparente biconvexe. Il permet par son pouvoir d'accommodation de focaliser les rayons lumineux provenant de l'objet observé sur la rétine. De forme biconvexe, flexible et transparent, il est situé à l'intérieur du globe oculaire juste en arrière de l'iris. Le spectre d'absorption du cristallin se situe dans les ultraviolets proches et infrarouges lointains. Comme nous le verrons plus loin, le spectre d'absorption du cristallin

change avec l'âge, expliquant que le risque de sur-exposition de la rétine à la lumière bleue est accrue chez le jeune enfant.

3.5.1.4 La rétine

La rétine mature de mammifère est composée de deux tissus : la rétine neurale (RN) et l'épithélium pigmentaire rétinien (EPR). Au niveau macroscopique, deux régions se distinguent plus particulièrement sur la rétine visualisée au fond d'œil : la papille optique et la région maculaire. La papille optique correspond à la tête du nerf optique visible sous forme d'un disque d'où émergent les artères et veines rétiniennes.

La région maculaire qui nous procure l'acuité visuelle du fait de la haute densité de photorécepteurs de type cône, présente une zone avasculaire en son centre. La zone la plus centrale, la fovéa, ne contient que des cônes et des cellules gliales. La macula contient dans ses couches superficielles des pigments xanthophylles jaunes qui absorbent les rayonnements optiques bleus.

3.5.1.4.1 Les bâtonnets

Les photorécepteurs sont responsables de la vision nocturne. Ils sont exclus de la zone très centrale de la rétine (fovéa) et demeurent par contre à très haute densité dans la partie périphérique, mais il serait impropre de leur attribuer la vision périphérique. Ces bâtonnets ont une très grande sensibilité, à tel point que des études suggèrent qu'ils pourraient faire la détection d'un unique photon. Dans la vie quotidienne, leur gamme de sensibilité est comprise entre 10^{-6} et 1 cd/m^2, ce qui correspond à la lumière de la pénombre et/ou du clair de lune.

3.5.1.4.2 Les cônes

Les cônes sont très nombreux dans la partie très centrale de la rétine, la macula et sont les seuls photorécepteurs de la fovea. Cependant, bien que leur densité décroisse en périphérie, ils restent présents jusque dans la très grande périphérie, et peuvent notamment détecter le mouvement d'objets arrivant dans le champ visuel. Les cônes assurent la vision diurne. Leur sensibilité s'étend dans une gamme de luminance de 10^{-3} à 108 cd/m^2.

3.5.1.4.3 La photo transduction

Les photorécepteurs, cônes et bâtonnets, transforment les photons en une activité électrique au niveau de leurs segments externes. Le pigment visuel est constitué d'une protéine, la rhodopsine pour les bâtonnets, les iodopsines pour les cônes et d'un chromophore, le 11-cis-rétinal. L'absorption d'un photon par le pigment visuel induit la transformation du 11-cis-rétinal en trans-retinal, produisant un changement conformationnel de la protéine dont la structure confère au pigment visuel sa sensibilité spectrale spécifique. Le changement de conformation du pigment visuel induit une cascade de réactions enzymatiques très consommatrices en énergie, qui assurent la transformation de l'énergie du photon en un signal électrique.

3.5.1.4.4 Les cellules de l'épithélium pigmentaire (EPR)

Elles assurent de multiples fonctions : renouvellement du pigment visuel et cycle des rétinoïdes, digestion des segments externes des photorécepteurs, barrière hémato-retinienne externe, assurant les transports de nutriments et d'oxygène de la choroïde aux photorécepteurs, maintien de l'attachement de la neuro-rétine, absorption des photons par la mélanine contenue dans les mélanosomes permettant de limiter leur réflexion postérieure. Les cellules de l'EPR contiennent aussi des granules de lipofuscine qui s'accumulent avec l'âge, se combinent avec la mélanine (mélanolipofuscine) et peuvent induire des lésions phototoxiques par la génération de radicaux libres.

3.5.1.5 Contrôle rétinien du rythme circadien et de l'ouverture pupillaire

Un troisième système de photoréception est constitué d'une fraction de cellules ganglionnaires (*cf.* section 3.3) qui expriment la mélanopsine avec un pic de sensibilité à la lumière vers 482 nm chez le primate (Provencio *et al*., 2000 ; Provencio *et al*., 2002 ; Hattar *et al.*, 2002 ; Dacey *et al.*, 2005 ; Hannibal *et* Fahrenkrug ; 2004 ; Gamlin *et al.*; 2007). La mélanopsine intervient non seulement dans la régulation des rythmes circadiens, mais aussi dans le contrôle du réflexe pupillaire stabilisé. Chez l'Homme, le calcul de l'éclairement énergétique rétinien requis pour une contraction pupillaire est en accord avec un pic de sensibilité entre 480 et 485 nm, vers 482 nm (Gamlin *et al*., 2007). Ces résultats confirment des mesures plus anciennes qui avaient évalué le maximum de contraction pupillaire proche de 490 nm (Bouma, 1962). En 2009, Mure *et al.* (Mure *et al.,* 2009) ont montré que la mélanopsine possédait un système de photo-régénération indépendant de l'épithélium rétinien pigmentaire subissant une tranformation en méta-mélanopsine sensible à une longueur d'onde différente. Bien que la présence de mélanopsine ne soit pas indispensable pour la genèse de rythmes circadiens, son absence diminue les réponses de 40 % (Panda *et al*.,2002 ; Ruby *et al*.,2002). Les effets de la lumière sur les rythmes circadiens montrent un pic vers 480 nm (Hattar *et al.,* 2002) identique à celui de la réponse à la lumière des cellules ganglionnaires rétiniennes isolées exprimant la mélanopsine (Berson *et al*., 2002).

3.5.2 Rayonnements optiques et tissus oculaires

3.5.2.1 Exposition des tissus oculaires aux rayonnements optiques

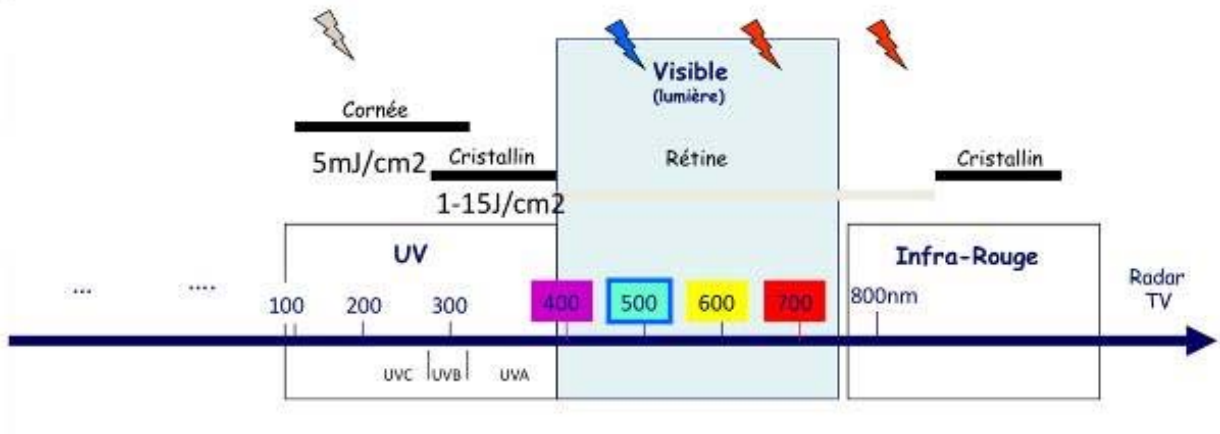


Figure 26 : spectre des rayonnements optiques et sensibilité des milieux oculaires

L'œil humain est capable de percevoir les rayonnements électromagnétiques (*cf.* Figure 26) compris entre 400 et 700 nm. On appelle cette région le « spectre visible ». La cornée absorbe la majorité des rayonnements en dessous de 295 nm, ce qui inclut les UVC, plus de 90 % des UVB et 35 à 40 % des UVA. Le cristallin absorbe les UVA et UVB qui ont traversé la cornée ainsi que les longueurs d'onde courtes et les infrarouges. De façon physiologique, le cristallin exerce en effet un rôle de filtre naturel par absorption des rayonnements de longueur d'onde inférieure à 400 nm.

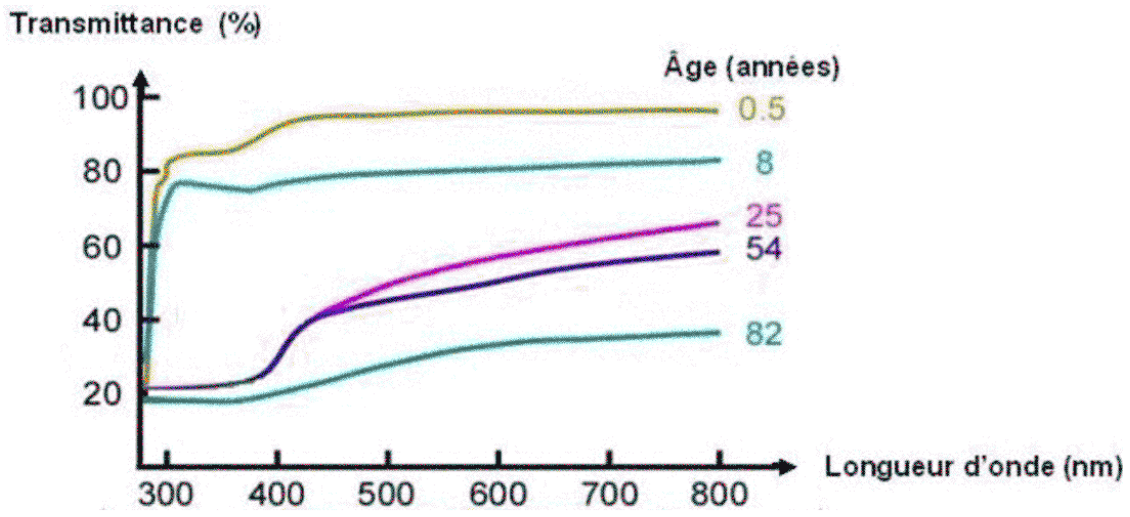


Figure 27 : transmission de la lumière par le cristallin en fonction de l'âge

Cependant, la transmittance du cristallin est dépendante de l'âge (*cf*. Figure 27) et avant l'âge de 8 ans, le cristallin laisse passer plus de 80 % des longueurs d'ondes comprises entre 380 et 500 nm. À partir de 25 ans, le filtre cristallinien absorbe environ 80 % des ondes de longueur d'onde inférieure à 400 nm, mais laisse passer plus de 50 % des ondes comprises entre 400 et 500 nm. Ce n'est que lorsque le cristallin est cataracté (après 80 ans) que seul 20 % de ces ondes est transmises, expliquant que la vision des couleurs se modifie avec l'âge (Artigas *et a*l., 2012). Ainsi, de façon physiologique, au fur et à mesure que la lipofuscine s'accumule dans les cellules de l'épithélium pigmentaire de la rétine et accroit la toxicité potentielle de la lumière bleue (Ach *et al*., 2015 ; Olchawa *et al.*, 2017 ; van der Burght *et al.*, 2013), la modification du cristallin absorbe d'avantage les rayonnements bleus (Behar-Cohen *et al*., 2011).

3.5.2.2 Mécanismes des lésions résultant de l'interaction des rayonnements optiques avec les tissus oculaires

Le rapport d'expertise publié par l'Anses en 2010 (Anses, 2010) a résumé de façon détaillée les mécanismes d'interaction des rayonnements lumineux visibles et non visibles avec les tissus oculaires. Nous rappellerons donc ici uniquement les grands principes et invitons à se rapporter à ce rapport pour plus de précisions.

Toute onde électromagnétique se caractérise par sa longueur d'onde et son énergie.

$E = h\,c / \lambda$

$\lambda\,\nu = c$

Un photon transporte une énergie proportionnelle à sa fréquence (1) h = 6,626 x 10^{-34}J.s (constante de Planck), E énergie en Joules (J) ou electron-volts (eV), c vitesse de la lumière. La longueur d'onde λ et la fréquence ν sont reliées par l'équation (2)

Les rayonnements optiques absorbés par les systèmes biologiques sont susceptibles d'induire des dommages photo-thermiques (libération de chaleur) ou photochimiques (excitation d'un chromophore qui conduit à la production d'espèces réactives de l'oxygène). Les espèces réactives de l'oxygène induisent des lésions cellulaires en altérant :

- les lipides membranaires par péroxdydation lipidique et formation d'acide malondialdéhyde, composé à haut pouvoir mutagène et conduisant à la perte de l'intégrité membranaire ;
- les protéines cellulaires de structures et de fonctions en particulier enzymatiques ;

- les acides nucléiques, favorisant l'oncogenèse et réduisant les capacités mitotiques des cellules.

Les espèces réactives de l'oxygène sont aussi impliquées dans les mécanismes de sénescence (Shaw *et al.*, 2016). Les rayonnements UV (UVA 315-400 nm, UVB 280-315 nm et UVC 100-280 nm) sont les plus énergétiques et photochimiquement les plus actifs, absorbés par les cycles aromatiques des acides nucléiques de l'ADN, ils induisent mutagénèse et mort cellulaire.

Les tissus oculaires, et en particulier la rétine, contiennent de nombreux photo-sensibilisants excitables (*cf.* Tableau 3) par les rayonnements optiques visibles et infra-rouges (Algvere *et al.*, 2006 ; Boulton *et al.*, 2001 ; Glickman, 2002). Des pigments spécifiques sont présents dans les photorécepteurs de la rétine, dans la couche des fibres nerveuses sous la forme du pigment maculaire (xanthine et zeaxanthine) qui joue un rôle de filtre à la lumière bleue (400-500 nm) et dans les cellules de l'épithélium pigmentaire de la rétine qui contient de la mélanine, mais aussi des chromophores différents selon l'âge (en particulier la lipofuscine qui augmente avec l'âge et intervient dans les réactions photodynamiques et la toxicité de la lumière bleue (338-542 nm)).

Malgré la présence de pigments capables d'absorber les rayonnements optiques, des réactions photochimiques et photodynamiques toxiques peuvent survenir par exposition à la lumière, variables selon la longueur d'onde, l'énergie des rayonnements et les molécules avec lesquelles les rayonnements optiques interagissent.

Tableau 3 : mécanismes d'interaction des rayonnements avec les tissus oculaires

Tissu / molécule	Longueur d'onde (nm)	Mécanisme d'interaction
Cornée	< 300 et > 800	Absoption / dissipation chaleur
Iris	Mélanine : 300-700	Absoption / dissipation chaleur
Cristallin	Pic à 365 à 8 ans Pic à 450 à 65 ans	Absoption / dissipation chaleur
Rétine	400-700 Rhodopsine : pic à 507 Cônes courtes longueurs d'onde : pic à 450 Cônes longueurs d'onde moyenne : pic à 530 Cônes grandes longueurs d'onde : pic à 580	Dommage photochimique type I : max à 507 nm Type II : max 430-460 nm
EPR	Mélanine : 400-700	Absoption / dissipation chaleur Dommage photochimique
Lipofuscine	355-450 A2E : pic à 430-440	Effets photodynamiques
Pigments maculaires	Luteine : pic à 446 Xanthine : pic à 455 Zeaxanthine : pic à 480	Absoption / dissipation chaleur

source : *Behar-Cohen et al., 2011.*

3.5.3 Pathologies oculaires et rayonnements optiques

Les tissus oculaires peuvent subir des lésions consécutives à une exposition excessive à des rayonnements optiques. Les lésions dépendent de la longueur d'onde et de l'intensité énergétique du rayonnement. La surface oculaire est exposée à la totalité du spectre solaire et les tissus, à des rayonnements qui dépendent de l'absorption par les structures de la surface oculaire traversées successivement jusqu'aux couches profondes de la rétine. Chaque tissu présente un seuil de résistance qui dépend de ses capacités intrinsèques de résistance au stress photique et en particulier de ses défenses anti-oxydantes.

3.5.3.1 Surface oculaire

Des lésions aiguës peuvent toucher l'épithélium cornéen exposé au rayonnement ultraviolet induisant des kératites douloureuses, mais sans conséquences à long terme du fait des capacités de prolifération de l'épithélium qui retrouve son intégrité en quelques jours. De véritables brûlures thermiques de la cornée peuvent cependant apparaître avec des longueurs d'onde de 1,4 µm à 1 mm. L'exposition aiguë de la conjonctive aux UV induit également des conjonctivites et des lésions de la surface conjonctivale réversibles. Si l'exposition solaire est chronique, des lésions permanentes telles que des ptérygions et des mélanoses conjonctivales peuvent survenir (Roh *and* Weiter, 1994).

3.5.3.2 Cataracte

Le cristallin absorbe les UVA et UVB ainsi que les courtes longueurs d'onde dans le spectre visible. Les études épidémiologiques ont montré que le risque de cataracte est directement lié au degré d'exposition aux ultraviolets en milieux naturel ou professionnel. Des taux d'ultraviolets faibles cumulés sont cataractogènes, qu'ils soient ou non cumulés à d'autres risques environnementaux ou endogènes (Balasubramanian, 2000 ; Löfgren, 2017 ; Yam *and* Kwok, 2014).

Les UVB sont particulièrement cataractogènes. Des expériences sur le rat ont montré un effet cataractogène linéaire avec la dose d'exposition à 300 nm (*cf*. Figure 28). Chez le lapin, le pic de cataracte est également observé à 300 nm. Des travaux récents ont montré un effet cataractogène cumulatif de la dose d'exposition quotidienne à des UV à 300 nm (Söderberg *et al.*, 2016).

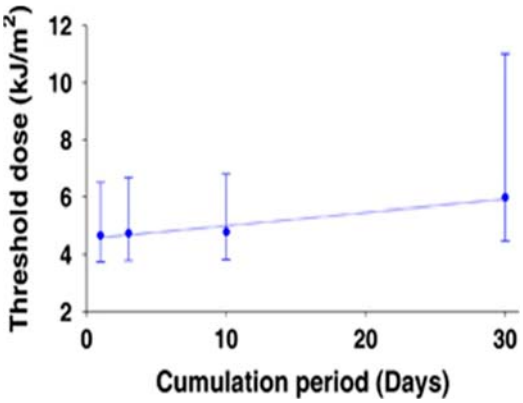


Figure 28 : doses seuil en fonction du nombre de jour d'exposition à des UV de 300 nm

Source : Galichanin *et al.*, 2014

La lumière bleue peut induire des lésions cristalliniennes par effet photodynamique du fait de l'activation de produits accumulés dans le cristallin et dont l'illumination produit des radicaux libres oxygénés. Une étude récente sur des cellules cristalliniennes humaines en culture montre que l'exposition à des LED blanches (750, 1 500 et 2 500 lx), de différentes températures de couleur (2 954, 5 624 et 7 378 K), induit la production de radicaux libres, un arrêt de prolifération et une apoptose d'autant plus importante que la température de couleur est élevée (Xie *et al.*, 2014).

Les rayonnements dans l'infrarouge (de 800 à 3 000 nm) sont également susceptibles d'induire des cataractes immédiates ou retardées (Yu *et al.*, 2015b ; Yu *et al.*, 2015a; Söderberg *et al.*, 2016). Les dommages immédiats seraient essentiellement de nature thermique alors que les effets retardés pourraient être secondaires à des lésions photochimiques cumulées. Ce dernier mécanisme est incertain et n'a pas été validé par des études expérimentales. Il semblerait en effet que les effets cataractogènes des rayonnements infrarouges soient plutôt liés à une élévation de la température, mesurée au limbe, autour de 8-10°C (Yu *et al.*, 2014).

3.5.3.3 Mélanomes de l'uvée

Contrairement aux mélanomes cutanés, les rayonnements UV n'ont pas été associés à la carcinogénèse des mélanomes de l'uvée. Des études récentes suggèrent par contre que les rayonnements bleus pourraient induire des mutations carcinogènes dans les mélanocytes uvéaux (de Lange *et al.*, 2015; Logan *et al.*, 2015).

3.5.3.4 Lésions rétiniennes photo-induites et valeurs limites d'exposition

La lumière peut induire des dommages rétiniens conduisant à la mort des photorécepteurs et des cellules de l'épithélium pigmentaire par différents mécanismes (Hunter *et al.*, 2012; Wenzel *et al.*, 2005). Les modèles de dégénérescence induite par la lumière sont très étudiés et utilisés pour évaluer des agents protecteurs. Nous discuterons ultérieurement de leur relevance pour évaluer la toxicité potentielle de la lumière chez l'Homme.

On reconnaît :

- des dommages par mécanisme photomécanique résultant d'une énergie délivrée forte (de l'ordre du mégawatt / cm^2) sur une période courte (nano ou picosecondes) et non de la longueur d'onde. Une rupture mécanique est due essentiellement à l'accumulation rapide d'énergie dans les mélanosomes des cellules de l'épithélium pigmentaire de la rétine (EPR) ce qui génère des ondes de choc et entraine des lésions irréversibles des cellules EPR et des photorécepteurs. Les tensions mécaniques sont à l'origine de la formation de micro bulles léthales pour les cellules de la rétine. Ce type de lésions est observé par exemple après pénétration d'un rayon laser Yag dans l'iris pour la réalisation d'une iridectomie thérapeutique.
- des dommages photothermiques survenant après exposition à des longueurs d'onde entre 600 et 1 400 nm et des temps d'exposition de la microseconde à quelques secondes. L'irradiance et la durée d'exposition requises pour causer un dommage thermique ne sont cependant pas inversement proportionnelles. La quantité d'énergie nécessaire à causer un effet thermique augmente avec la durée d'exposition du fait de la dissipation de la chaleur pendant l'exposition. En général, une augmentation de la température de plus de 10°C est susceptible de générer des lésions photothermiques.
- les dommages photochimiques résultent quant à eux de l'interaction d'un photon avec des molécules photosensibilisantes conduisant à la formation de radicaux libres toxiques pour la rétine. Les lésions dépendent de la dose totale d'énergie reçue et il existe une relation réciproque théorique entre l'irradiance et la durée d'exposition, jusqu'à un certain délai d'exposition au delà duquel des mécanismes réparateurs se mettent en place. Il n'y a aucune lésion en dessous d'un certain seuil d'irradiance.

Le Tableau 4 ci-dessous, extrait de Hunter *et al.* (Hunter *et al.*, 2012) liste les différences entre les lésions rétiniennes photo-thermiques et photochimiques.

Tableau 4 : caractérisation des lésions rétiniennes thermiques et photochimiques

Property	Thermal Damage	Photochemical Damage
Exposure duration	µs – 10 s	> 1 s
Wavelength	all λ	short visible (λ < 600 nm)
Time course	appear in < 24 hrs	appear in 24 – 48 hrs
Temperature change	> 20 °C temperature ↑	< 10 °C temperature ↑
Minimal lesion size	< beam diameter	= beam diameter
Reciprocity of time & power	no	yes
Scotoma	permanent	reparable
Damage threshold	∝ (irradiated area diameter)$^{-1}$ ∝ time$^{-1/4}$ independent of λ (for 440 nm < λ < 700 nm)	independent of irradiated area ∝ time^{-1} ∝ λ

On distingue typiquement deux types de dommages photochimiques selon le type de molécules avec lesquelles les photons interagissent dans la rétine. Le mécanisme photochimique de classe I, décrit par Noell *et al.* en 1966 (Noell *et al.*, 1966) suggère des lésions liées à l'interaction des photons avec les photopigments contenus dans les photorécepteurs. Le mécanisme de classe II, décrit par Ham en 1978 (Ham *et al.*, 1978) suggère des lésions qui résultent de l'interaction des photons avec la lipofuscine contenue dans les cellules de l'épithélium pigmentaire de la rétine. Il est peu probable que ce type de lésions photochimiques soit dû aux pigments visuels, ceux-ci étant dans ce cas immédiatement photoblanchis. Le mécanisme photochimique de classe II est aussi connu sous le nom de « dommage induit par le lumière bleue » puisque le seuil de toxicité augmente avec l'accroissement de la longueur d'onde et est maximal dans le spectre bleu. Il est important de noter que les réglementations actuelles qui régissent la sécurité de l'exposition à la lumière ne prennent en compte que les lésions photochimiques de classe II dans la détermination des seuils d'exposition. Ce qui différencie plus spécifiquement ces deux types de mécanismes phototoxiques est la longueur d'onde. En réalité, très souvent, les mécanismes sont intriqués (van Norren and Gorgels, 2011).

Les doses limites d'énergie à partir desquelles des lésions rétiniennes sont observées varient en fonction de la longueur d'onde, de l'espèce étudiée, des conditions expérimentales mais aussi du paramètre considéré pour définir la toxicité. La plupart des études réalisées afin de définir les valeurs limites d'exposition ont utilisé comme paramètre des modifications rétiniennes visibles par l'examen ophtalmoscopique direct, et plus rarement par la réalisation d'un électrorétinogramme. La publication de van Norren D *et al.* en 2011 (van Norren and Gorgels, 2011) résume les principales études réalisées sur différentes espèces animales dans lesquelles le protocole d'illumination était assez précis pour calculer la dose d'énergie reçue par la rétine et connaître la longueur d'onde de l'exposition. Il apparaît clairement que les paramètres sont en général ophtalmoscopiques et/ou électrophysiologiques. De très rares études ont réalisé des études histologiques.

Cependant, la présence de lésions visibles à l'examen du fond d'œil témoigne de dégâts rétiniens importants puisqu'il s'agit soit de modifications du pigments ou bien d'une réaction oedémateuse secondaire à des dommages du tissu. L'électrorétinogramme global n'est également altéré que tardivement quand la majorité des photorécepteurs sont morts.

Les valeurs d'exposition responsables des lésions que nous venons de décrire sont résumées dans la Figure 29 ci-dessous, extraite de la publication de van Norren D *et al.* (2011).

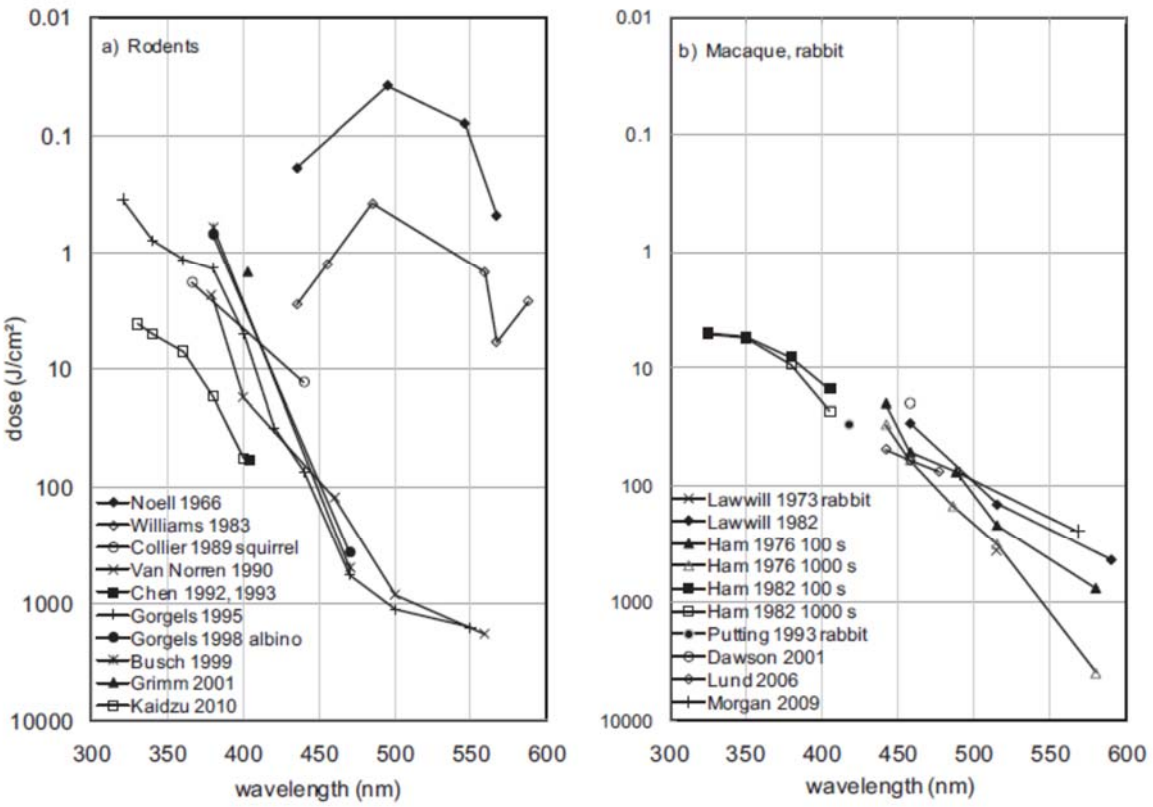


Figure 29 : dose pour des dommages rétiniens en fonction de la longueur d'onde.

Ce graphe montre que la rétine de primate (à droite) est moins sensible que la rétine de rongeurs (à gauche). Il montre également que plus la longueur d'onde est courte plus la dose toxique est faible.

La différence de sensibilité de la rétine entre les primates et les rongeurs a été expliquée, au moins en partie, par la différence de structure de la chromatine dans les noyaux des bâtonnets des différentes espèces. En effet, chez le rongeur, animal en général nocturne, la chromatine est fortement condensée au centre du noyau, ce qui limite la diffraction des photons et optimise ainsi la vision en faible luminance (Solovei *et al.*, 2009). Chez l'Homme et le primate, la chromatine des bâtonnets est au contraire dispersée, ce qui limite la pénétration des photons comme le schématise la Figure 30 ci-dessous extraite de la publication de Solovei *et al.*, 2009. La diffraction de la lumière par la chromatine dispersée réduirait l'énergie parvenant dans les segments des bâtonnets et dans l'épithélium pigmentaire, où se trouvent les pigments capables d'induire des réactions photochimiques et photodynamiques.

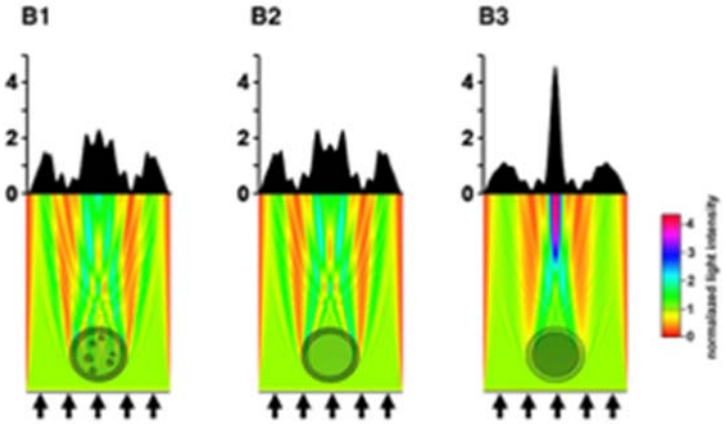


Figure 30 : représentation schématique de l'interaction des photons avec des noyaux dont la structure chromatinienne varie

B1 Chromatine dispersée : diffraction importante

B2 Chromatine périphérique : Diffraction importante

B3 : chromatine condensée au centre : diffraction réduite et concentration des photons.

Ces observations n'ont cependant pas été faites avec les noyaux des cônes, qui sont les photorécepteurs exclusivement présents dans la fovea et donc ceux qui sont susceptibles d'être atteints chez l'Homme lors de l'exposition à la lumière.

L'amélioration des techniques d'imagerie rétinienne permet aujourd'hui de détecter des modifications de la fonction des cellules de la rétine. L'imagerie rétinienne qui utilise l'optique adaptative permet d'obtenir une image des cônes et de juger de leur organisation et intégrité. Une autre technique d'imagerie de l'autofluorescence rétinienne utilisant l'optique adaptative couplée à l'ophtalmoscopie laser à balayage a été utilisée pour imager les cellules de l'EPR du macaque après excitation à 568 ou 830 nm *in vivo* et *ex vivo* (Morgan *et al.*, 2008). Cette technique n'est cependant pas utilisée en pratique clinique à ce jour. Une exposition à faible énergie (> 2 J/cm^2) induit un photo-blanchiment réversible, mais témoin d'une photo-oxydation de la lipofuscine qui peut induire des lésions cellulaires d'autant plus que ces produits oxydés s'accumulent. Une exposition à des énergies plus élevées (≥ 247 J/cm^2) conduit à une altération de la fluorescence qui témoigne d'une rupture de la continuité de l'épithélium. Il est important de noter que les deux types de lésions observées sont survenues à des énergies inférieures aux valeurs limites prévues dans les normes laser ANSI (562 J/cm^2) (Hunter *et al*., 2012).

Ces résultats soulignent également que les paramètres choisis pour fixer les valeurs limites d'exposition sont basés sur des méthodes peu sensibles qui ne permettent pas de mettre en évidence des lésions dont les conséquences fonctionnelles peuvent être réelles.

3.5.3.4.1 Pathologies rétiniennes et exposition aux rayonnements optiques

La rétine absorbe les longueurs d'onde dans le spectre visible avec une sensibilité accrue pour les longueurs d'ondes courtes, les plus énergétiques dans le violet et le bleu (380 à 500 nm) comme décrit plus haut. La relation de cause à effet entre l'exposition et une pathologie est établie facilement quand les lésions sont une conséquence immédiate de l'exposition, mais est plus difficile à mettre en évidence quand il s'agit d'expositions cumulées ou de lésions retardées.

Lésions accidentelles induites par une exposition aiguë

- *Par exposition à la vision directe du soleil*

La fixation directe du soleil induit une photorétinite solaire qui s'accompagne d'un scotome plus ou moins réversible en fonction de la durée et de l'intensité de l'exposition. En conditions normales, des mécanismes d'évitement, le myosis et le clignement protègent d'une exposition directe de la macula à une source de lumière trop intense et potentiellement dangereuse. Regarder fixement le soleil, même quelques secondes, par exemple en-dehors des phases d'éclipse totale, induit une brûlure rétinienne plus ou moins importante en fonction de la durée de fixation par un mécanisme photochimique (Begaj and Schaal, 2017). Parce que la formation d'images sur la rétine nécessite une focalisation des rayons lumineux, l'énergie augmente au point de focalisation, de sorte que des énergies insuffisantes à produire des lésions cutanées peuvent induire des lésions de la rétine. Environ 50 % des patients ayant été exposés à la lumière solaire sans protection oculaire lors d'une éclipse présentent une baisse importante de l'acuité visuelle, directement corrélée, en examen par tomographie à cohérence optique, à un amincissement ou une raréfaction de la couche des photorécepteurs fovéolaires (Bachmeier *et al.*, 2017; Macarez *et al.*, 2007). L'examen des patients exposés montre des altérations du pigment maculaire.

- Par exposition à des instruments ophtalmologiques

L'exposition maculaire à un microscope opératoire pendant une durée prolongée, alors que les patients sont anesthésiés et présentent une dilatation pharmacologique de la pupille, induit des lésions photochimiques paramaculaires. Habituellement, ces lésions n'entraînent pas de baisse de l'acuité visuelle. Les sources responsables sont des sources tungstène ou halogène (van Norren and Vos, 2016). Des lésions ont également été observées après chirurgie avec une illumination endoculaire. Des examens prolongés en ophtalmoscopie indirecte peuvent également induire, mais rarement, des lésions rétiniennes. Il s'agit cependant d'évènements rares et les nombreux examens pratiqués sur les patients à pupilles dilatées n'ont pas été associés, à ce jour, à un risque accru de lésions rétiniennes ou de dégénérescence maculaire.

Maculopathie liée à l'âge (MLA) et lumière

L'exposition solaire et/ou à la lumière bleue n'était, en 2010, pas reconnue de façon unanime comme un facteur de risque de dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA). L'exposition aux rayonnements optiques est en effet difficile à évaluer, elle est essentiellement fondée sur des questionnaires qui, s'ils n'intègrent pas ce paramètre, ne peuvent pas l'identifier comme un facteur de risque. L'exposition est également difficile à quantifier et la relation entre l'exposition et la pathologie est d'autant plus difficile à établir de façon claire quand la pathologie survient avec l'âge. Depuis, plusieurs études ciblées (*cf.* Figure 31) et des méta analyses (Sui *et al.*, 2013) mettent en évidence un risque accru de DMLA associé à l'exposition solaire (Delcourt *et al.*, 2014; Schick *et al.*, 2016) (Nano *et al.*, 2013) en particulier si l'exposition survient sur certaines populations sensibles (enfants, peau très claire, faible teneur en anti oxydants) (Fletcher *et al.*, 2008; Vojniković *et al.*, 2010). À l'inverse, la protection contre l'exposition solaire pourrait protéger du risque de vieillissement oculaire (Vojniković and Vojniković, 2010).

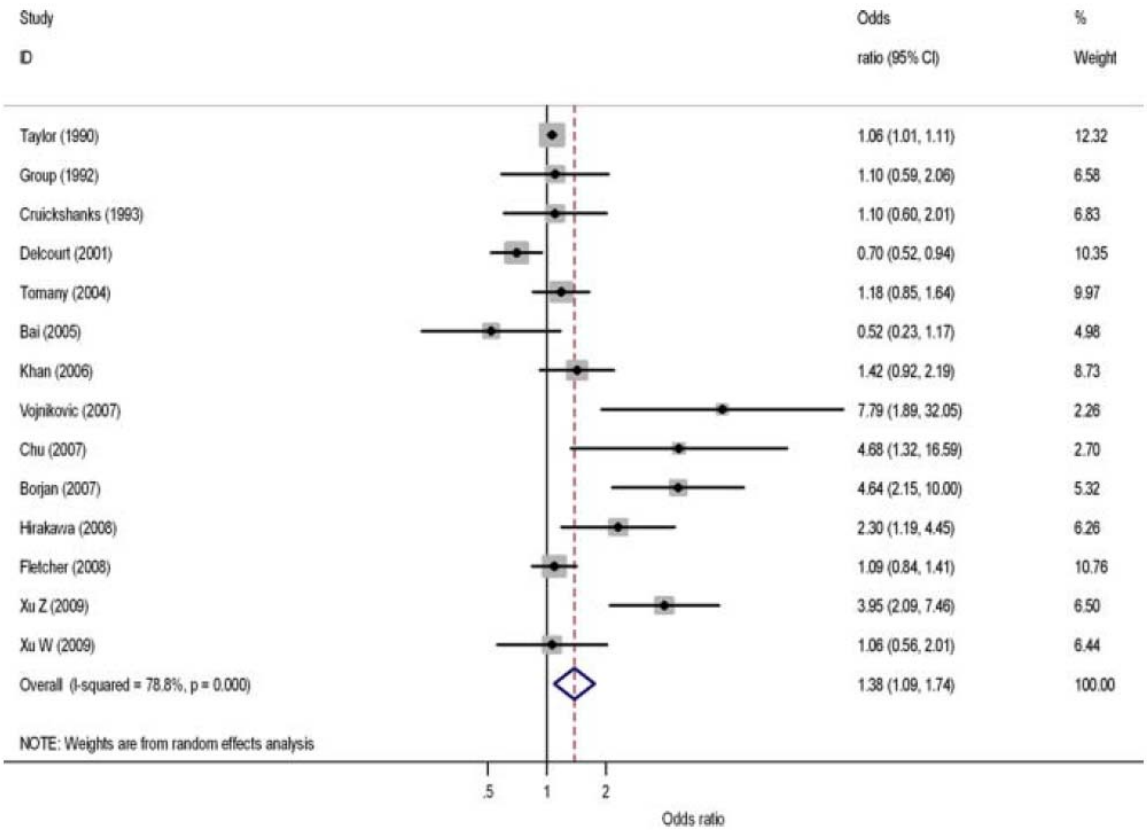


Figure 31 : odds Ratio pour les 14 études épidémiologiques utilisées dans Sui *et al*., 2013

La méta-analyse montre que l'exposition solaire est un facteur de risque significatif dans la survenue de la dégénérescence maculaire

La relation causale de l'exposition solaire et de la rétinite aigue observée immédiatement après fixation d'une eclipse a été facilement établie. Les études épidémiologiques, même si elles sont difficiles à réaliser car essentiellement fondées sur des questionnaires d'exposition solaire, montrent aujourd'hui un lien entre l'exposition solaire et la survenue, des années plus tard de lésions de dégénérescence maculaire liée à l'âge.

L'exposition solaire et particulièrement les longueurs d'onde courtes induisent dans les modèles expérimentaux, un stress oxydatif responsable de lésions rétiniennes. Le cumul de produits d'oxydation, sur un terrain sensibilisé par des facteurs génétiques, nutritionnels, d'âge et environnementaux, pourraient favoriser la dégénérescence maculaire liée à l'âge. Aucune étude n'a analysé les capacités d'adaptation du métabolisme rétinien face à des expositions cumulées sur plusieurs mois à des longueurs d'onde précises ni sur l'apparition de signes pathologiques, ni sur l'aggravation de pathologies pré existantes.

3.5.3.4.2 Aphakie et pseudophakie (absence de cristallin ou implantation d'un cristallin artificiel)

Les études sur les risques de dommages rétiniens induits par l'exposition à la lumière des yeux aphakes ou pseudo phakes remontent à plus de 25 ans. Le cristallin des sujets jeunes transmet les rayonnements optiques de longueurs d'ondes courtes et particulièrement celles qui induisent le plus haut risque de lésions rétiniennes, comprises entre 430 et 440 nm.

3.5.3.4.3 Limites des modèles expérimentaux de dégénérescence rétinienne induite par la lumière (DRIL)

Les modèles de dégénérescence rétinienne induite par la lumière (DRIL) présentent l'avantage d'un bon contrôle des facteurs de risques associés et de l'exposition lumineuse mais doivent être interprétés avec prudence pour les raisons suivantes :

- les espèces animales utilisées sont, dans la grande majorité des études, des petits rongeurs de laboratoire (souris et rat) dont la rétine diffère de celle de l'Homme car elle n'a pas de macula. De plus, des travaux récents ont montré que les noyaux des photorécepteurs de type bâtonnets chez les rongeurs présentent une chromatine condensée alors que chez l'Homme les bâtonnets ont une chromatine dispersée en périphérie du noyau solo (Solovei *et al.*, 2009). Quelques rares expériences sont réalisées sur des chiens (qui ne possèdent aussi pas de macula) ou des primates non humains (qui possèdent une macula proche de celle des Hommes) ;
- la majorité des expériences sont réalisées sur des rats albinos plus sensibles à la lumière. Mais des expériences récentes ont aussi utilisé des rats pigmentés ;
- les protocoles d'exposition à la lumière sont difficilement comparables, pas toujours bien détaillés ni même connus (spectre). La majorité des études est réalisée avec une lumière fluorescente blanche. Certains travaux comportent des lumières de longueurs d'onde connues (vert / bleu), souvent sur une courte durée d'exposition (de quelques minutes à quelques heures). Ce type de protocole permet de cibler certains photopigments et de mieux cerner les mécanismes liés à l'absorption d'une longueur d'onde. La lumière verte émise dans une large bande (490-580 nm) est utilisée pour sa correspondance au spectre d'absorption de la rhodopsine. Les lumières verte ou bleu émises dans une bande étroite (403 ± 10 nm pour le bleu et 550 ± 10 nm pour le vert) sont utilisées pour distinguer les effets d'une lumière de haute énergie (lumière bleue) de ceux induits par une lumière de plus grande longueur d'onde (vert) considérée comme moins dangereuse ;
- la durée et le cycle de l'exposition à la lumière varient : certains protocoles sont basés sur des expositions continues, d'autres sur des expositions intermittentes. L'adaptation à l'obscurité augmente les lésions photochimiques par accumulation de la rhodopsine dans les photorécepteurs. Il existe un effet cumulatif de l'exposition avec une toxicité plus grande pour des doses fractionnées de l'énergie lumineuse avec des intervalles de récupération à l'obscurité, par rapport à la même énergie délivrée sur une durée continue.

En résumé, la lumière solaire peut favoriser l'apparition de lésions de la surface oculaire, de cataracte mais aussi de lésions rétiniennes favorisant la DMLA. Les mécanismes de ces lésions rétiniennes ne sont pas connus avec certitude chez l'Homme et résultent de facteurs combinés associés, génétiques, environnementaux et nutritionnels. Aucune étude épidémiologique n'a à ce jour évalué le risque de DMLA ou d'autres pathologies rétiniennes ou oculaires en général associées à l'exposition à des sources de lumière artificielle. Les modèles expérimentaux de dégénérescence rétinienne par exposition à la lumière (DRIL) ont permis d'identifier des mécanismes cellulaires toxiques directement induits par différentes longueurs d'onde, permettant de mieux anticiper les risques potentiels liés à l'exposition à des lumières artificielles.

3.5.4 Effets de la lumière riche en bleu sur l'œil

Les résultats des expériences réalisées sur les modèles de DRIL ont été décrits dans le rapport publié par l'Anses en 2010 sur les effets sanitaires des LED et nous nous limiterons ici à faire une mise à jour des études publiées depuis 2010.

3.5.4.1 Effets sur la surface oculaire

3.5.4.1.1 Synthèse des études

La surface oculaire est directement exposée à la lumière, non seulement par l'éclairage solaire et domestique mais également par toutes les lumières émises par des écrans

d'ordinateur, de *smartphones*, de tablettes… La gêne ressentie du fait des problèmes de surface oculaire représente un des principaux motifs de consultation ophtalmologique. La prévalence du « syndrome sec » varie entre 7 % aux USA et 33 % à Taiwan et au Japon. Le vieillissement, le sexe féminin, le fait de fumer, les conditions climatiques extrêmes, l'air sec et l'observatioin prolongée d'écrans sont des facteurs favorisants reconnus, sans que le rôle exact des écrans n'ait été élucidé (Wolkoff *et al*., 2006).

Il existe peu d'études qui se soient intéressées spécifiquement aux effets des LED sur les pathologies de la surface oculaire. Une étude menée sur un petit effectif (30 individus) a évalué les effets de l'éclairage LED sur le clignement chez des individus présentant ou non un syndrome d'œil sec. Les résultats montrent que l'éclairage LED augmente la fréquence du clignement dans tous les cas, indépendamment de l'état initial de l'œil et de la présence ou de l'absence de climatisation. L'étude ne décrit pas le type de lampe utilisé (Miura *et al.*, 2013).

In vivo, des souris ont été exposées à des LED rouges (630 ± 8 nm à 48,8 mW/cm^2), vertes (525 ± 2 nm à 59,5 mW/cm^2), et bleues (410 ± 10 nm à 29,2 mW/cm^2) à la dose de 50 J/cm^2, 2 fois par jour (entre 9 heures du soir et 4 heures du matin) pendant 10 jours consécutifs (de J0 à J10). À la fin de cette période, les souris exposées à la lumière bleue ont présenté une réduction significative du temps de rupture du film lacrymal à la surface de la cornée à J7 et J10, une augmentation des lésions épithéliales cornéennes à J5, 7 et 10, une augmentation des cytokines inflammatoires à la surface oculaire (IL-1 et IL-6) et une augmentation des marqueurs de stress oxydatif associés à une augmentation de la mort cellulaire épithéliale (Lee *et al.*, 2016).

L'effet de l'éclairage LED de différentes longueurs d'onde (410, 480, 525, 580, 595, 630, et 850 nm) et doses (1, 2,5, 5, 10, 25, 50, et 100 J/cm^2) a été évalué sur des cellules épithéliales de cornée humaine. La viabilité était réduite uniquement par l'exposition à 480 ± 7 et 410 ± 10 nm avec des doses ≥ 50 J/cm^2 à 480 ± 7 nm et ≥ 10 J/cm^2 à 410 ± 10 nm de façon dose dépendante et corrélée aux marqueurs de stress oxydatif (Lee *et al.*, 2014).

Il est reconnu que le stress oxydatif et l'inflammation sont étroitement liés à la sécheresse oculaire. Le stress oxydatif induit par la lumière bleue sur les cellules de la surface oculaire constituerait donc un facteur aggravant le syndrome sec.

D'autres études sont requises pour préciser le rôle du type de lampe, de la longueur d'onde, de l'énergie et du type de source (lampe ou écran) sur le syndrome sec oculaire.

En conclusion, il existe une étude *ex vivo* chez l'Homme et une étude *in vivo* sur des rongeurs montrant des altérations des cellules épithélilales de la cornée et des altérations du film lacrymal induites par des LED bleues (50 J/cm^2). Mais à ce stade, les données chez l'Homme ne sont pas suffisantes pour relier des pathologies de la surface oculaire à l'exposition à des LED. Il est cependant recommander de mener des travaux pour rechercher l'influence du spectre d'émission des lampes sur des syndromes secs et le dysfonctionnement des glandes de meibomius.

3.5.4.1.2 Conclusions et classement de l'effet de la lumière riche en bleu sur la survenue du syndrome sec

Le groupe de travail conclut que, concernant l'effet de la lumière riche en bleu sur la survenue du syndrome sec :

- les éléments de preuve chez l'Homme sont limités (Miura *et al.*, 2013 avec des éclairages à LED, Lee *et al.,* 2014, étude *in vitro* sur la cornée humaine) ;
- les éléments de preuve chez l'animal sont limités (Lee *et al.*, 2016, souris éclairées avec LED bleues, vertes et rouges).

L'effet de la lumière riche en bleu sur la survenue du syndrome sec est possible.

3.5.4.2 Effets sur la rétine des lumières froides, riches en bleu

3.5.4.2.1 Études sur l'animal in vivo

Une équipe (Shang *et al*., 2014) a comparé les effets chez le rat de l'exposition à des lampes LED blanches froides (6 500 K), des LED bleues (460 nm) et des lampes fluocompactes (température de couleur 6 500 ou 3 000 K) (*cf.* Figure 32), selon un protocole d'exposition consistant en 14 jours d'adaptation à l'obscurité, puis une exposition alternée la nuit pendant 3, 9 ou 28 jours consécutifs, suivis ou non d'une période de récupération de 14 jours à l'obscurité. Pour toutes les lampes, la luminance a été mesurée à 750 lx à 20 cm, ce qui correspond à la distance à laquelle les rats ont été placés. La toxicité éventuelle a été analysée par un électroretinogramme, une histologie en microscopie optique et électronique, une immunohistochimie et la mesure de marqueurs de stress oxydatif. Les spectres des différentes lampes sont indiqués dans les graphes ci-dessous :

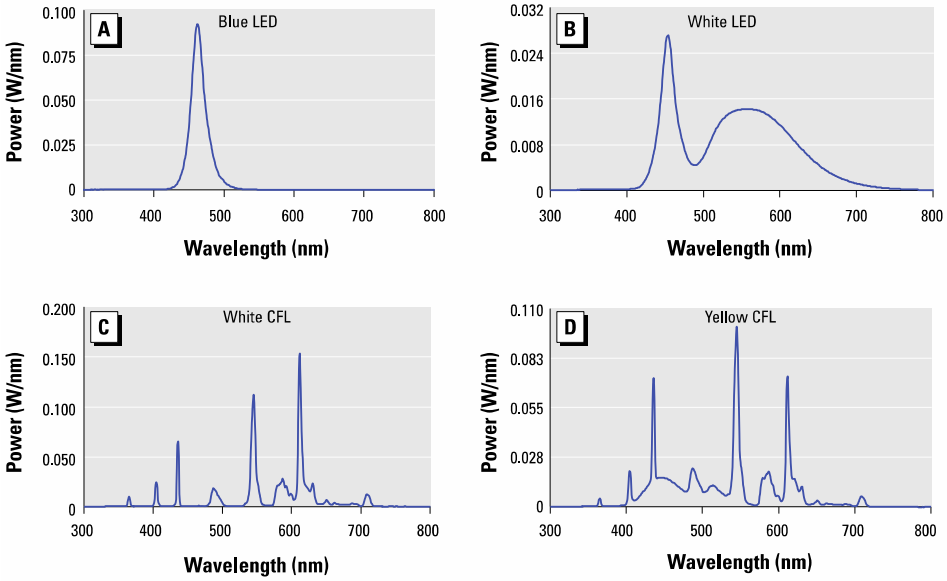


Figure 32 : spectre de LED à des niveaux d'éclairage domestiques utilisés dans la publication de Shang *et al., 2014*

Les résultats ont mis en évidence une altération fonctionnelle à l'ERG (électrorétinogramme), un stress oxydatif et une mort par apoptose des photorécepteurs entrainant une diminution de l'épaisseur rétinienne en cas d'exposition aux LED bleues et blanches froides, mais une altération très modérée de l'ERG sans perte évidente des photorécepteurs uniquement avec les lampes fluocompactes à 6 500 K et aucune lésion significative avec ces lampes à 3 000 K. L'irradiance rétinienne chez l'Homme devrait être au moins 60 % inférieure à celle du rat et l'Homme possède une rétine pigmentée et moins sensible à la lumière que les rats qui sont des animaux nocturnes. Il est donc difficile d'extrapoler ces résultats directement à l'Homme. Cependant, ces travaux montrent qu'à luminance identique et température de couleur identique, dans des conditions d'exposition contrôlées, les lésions rétiniennes sont différentes selon le spectre de la lampe considérée (Shang *et al*., 2014)].

Le même groupe a ensuite publié une étude comparant les effets de LED de couleurs différentes, selon un protocole similaire d'exposition de rats albinos. La Figure 33 ci-dessous représente le spectre des différentes lampes testées (Shang *et al.,* 2017).

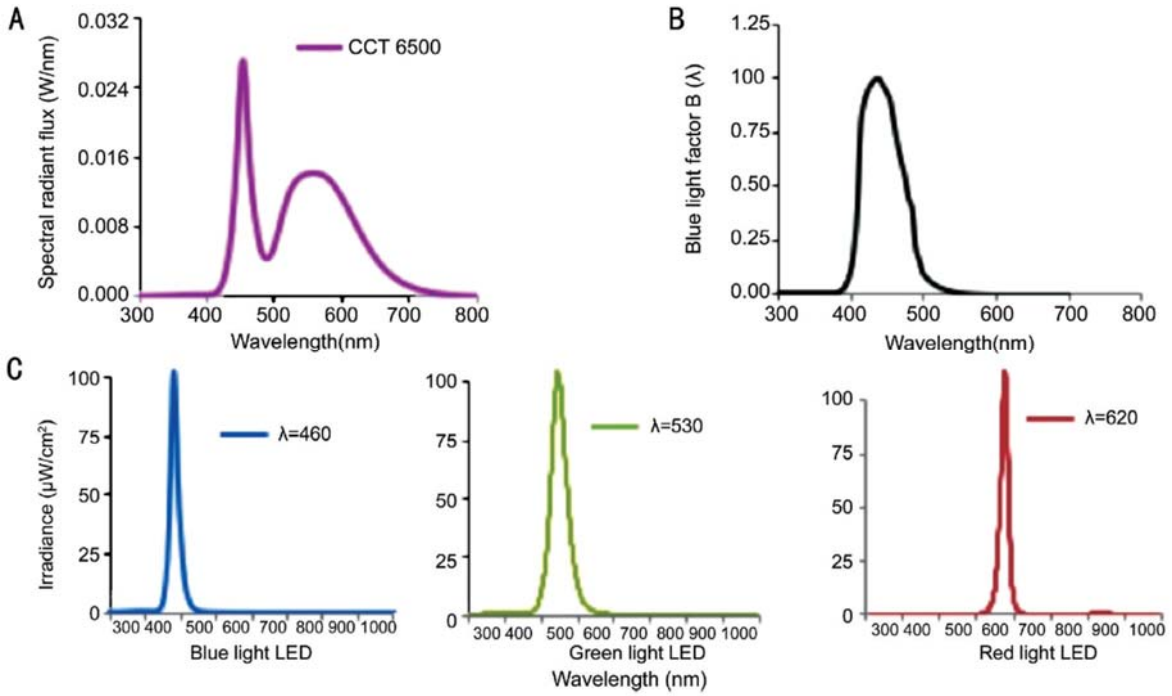


Figure 33 : spectre des différentes LED utilisées dans Shang *et al,* 2017

Les rats ont été exposés de façon aléatoire à des LED bleues (460 nm, 102,3 μW/cm^2), vertes (530 nm, 102,8 μW/cm^2), rouges (620 nm, 102,7 W/cm^2). L'irradiance a été mesurée à 20 cm de la source, ce qui correspond au niveau d'énergie sur la cornée du rat. Après 10 jours d'adaptation, les rats ont été exposés à partir de 18 heures le 11ème jour et exposés 3, 9 ou 28 jours selon un cycle alterné avec l'obscurité de 12 heures. À la fin de la période d'illumination, les animaux ont subi des électrorétinogrammes (ERG) puis leurs yeux ont été analysés en histologie, immunohistochimie et microscopie électronique, des protéines ont été collectées pour des analyses en *western blot* et des mesures de stress oxydatif ont été réalisées dans les tissus. Les résultats mettent en évidence une réduction de la réponse ERG dès 3 jours d'exposition aux LED bleues et une réduction modérée du signal à l'ERG (électrorétinogramme) après 28 jours d'exposition au LED vertes et rouges. Seulement après exposition au LED bleues, une dégénérescence massive des bâtonnets a été observée et objectivée par des marqueurs d'apoptose et de nécrose (RIP kinases) et de nitrosylation des protéines, témoin de stress oxydatif et d'une désorganisation des segments externes des photorécepteurs. Ces travaux montrent qu'à irradiance égale, la longueur d'onde est l'élément déterminant dans la toxicité, activant des mécanismes phototoxiques différents comme cela avait été démontré par Ham et Noel.

Une étude a été réalisée par Krigel *et al.* (Krigel *et al*., 2016) en exposant cette fois des rats albinos et pigmentés à des lampes LED blanches (6 300 K), bleues et à des lampes fluocompactes (CFL). Dans ce protocole expérimental, un premier test a montré qu'une exposition continue pendant 24 heures à 500 lx avec une pupille dilatée entraîne des lésions rétiniennes chez les rats pigmentés et albinos quand des lampes LED blanches froides sont utilisées mais pas quand les animaux sont exposés à des CFL à la même intensité. Ceci est en accord avec des travaux plus anciens qui confirment que, lorsque la pupille est dilatée, des lésions sont aussi observées chez des rats pigmentés (Williams *et al*., 1985). En éclairage cyclique, sans dilatation de la pupille, les rats pigmentés n'ont pas présenté de lésions rétiniennes dégénératives ni avec les CFL ni avec les LED. Par contre, des lésions modérées ont été observées après un mois d'exposition à des LED blanc froid ou des LED bleues chez les rats albinos (Krigel *et al*., 2016). Ces travaux sont moins précis car les irradiances rétiniennes ne peuvent pas être calculées avec les éléments disponibles dans

l'article. Il montre cependant qu'en situation d'exposition à des luminances domestiques, avec une pupille réactive, la pigmentation diminue la sensibilité rétinienne des rats.

Une étude sur les mécanismes de la mort induite dans la neurorétine de rats albinos par des lampes LED blanches, de différents spectres, rapporte qu'une mort des photorécepteurs par nécrose peut être induite par des lampes LED bleues (447 et 467 nm, 234 et 102 cd/m^2) alors que l'apoptose est le mécanisme prédominant avec d'autres sources lumineuses *(Jaadane et al.*, 2015). Cette étude démontre de façon approfondie que le spectre est l'élément déterminant mais également que les mécanismes phototoxiques et donc les paramètres requis à leur identification varient avec la longueur d'onde.

En utilisant des conditions expérimentales plus contrôlées, permettant de calculer avec précision la dose rétinienne d'énergie reçue suite à une exposition à des LED, la même équipe a montré que des lésions des cellules de l'épithélium pigmentaire apparaissent dès 4,14 J/cm^2 chez des rats albinos non sensibilisés par dilatation de la pupille ou adaptation à l'obscurité. Des marqueurs de stress oxydatif, de stress du cytosquelette et de nécrose cellulaire ainsi qu'une augmentation de la perméabilité de la barrière externe ont été observés à une dose inférieure à la dose toxique limite de 11 J/cm^2 reconnue comme valeur limite d'exposition toxique par l'ANSI (American national standard for safe use of lasers - ANSI 136.1–2014). La dose rétinienne dans le spectre bleu était de 0,58 J/cm^2 et donc bien inférieure à la dose de 2,2 J/cm^2 délivrée en 10 000 s, fixée par les valeurs limites d'exposition (Jaadane *et al*., 2017). Ces travaux soulignent de façon plus spécifique que les valeurs limites d'exposition peuvent varier selon le paramètre choisi pour déterminer le seuil de sécurité et que les normes qui ne tiennent compte que du mécanisme phototoxique de classe II qui touche les cellules de l'EPR n'ont pas pris en compte des lésions infra cliniques survenant dans ces cellules et qui pourtant témoignent d'altérations significatives.

Dans une étude réalisée chez le primate, une illumination par des lentilles de contact équipées de LED blanches a été testée. Des anomalies *in vivo* lors de l'examen de la rétine en tomographie à cohérence optique sont observées à partir de 8 heures d'exposition à 8 912 cd/m^2, correspondant à 7 000 lx sur la cornée, évocatrices d'altérations des couches rétiniennes les plus externes (segments de photorécepteurs et épithélium pigmentaire de la rétine). Une réduction de la réponse électro-rétinographique a été transitoirement mesurée, témoignant d'une saturation des photorécepteurs. Les analyses histologiques 12 heures après exposition mettent en évidence des lésions vacuolaires dans les cellules ganglionnaires et la couche des axones des photorécepteurs. À 14 jours, les lésions étaient réversibles (Mukai *et al.*, 2012).

Il s'agit ici d'un système d'illumination assez éloigné d'un éclairage domestique classique et l'irradiance rétinienne ne peut pas être calculée de façon précise à partir des données expérimentales décrites. Mais cette étude montre que la rétine du primate étudié est moins sensible à une illumination que la rétine des rongeurs, qu'ils soient albinos ou même pigmentés, puisque les seuils de toxicité semblent plus haut et que les lésions seraient réversibles.

En conclusion, il existe plusieurs études *in vivo* bien conduites qui montrent chez le rongeur des lésions rétiniennes résultant d'expositions à des LED blanches froides ou bleues à des irradiances rétiniennes inférieures aux limites fixées par l'Icnirp ou à une luminance de 750 lx. Par ailleurs, selon la longueur d'onde le type de lésion toxique diffère, échappant à des méthodes classiques de détection.

3.5.4.2.2 Synthèse des études in vivo

Au moins une étude bien conduite a démontré que l'exposition répétée de rats à des LED blanc froid ou bleues, à des luminances accessibles en environnement domestique (≤ 750 lx) avec un cycle d'illumination alterné (12h/12h) sur pupille non dilatée, génère des lésions rétiniennes des photorécepteurs par apoptose et nécrose. Au moins une étude bien conduite à démontré que sur des rats albinos exposés à des LED blanches ou bleues, des lésions de

l'EPR sont observées à des irradiances rétiniennes inférieures aux valeurs limites d'exposition (Jaadane *et al.*, 2015, 2017).

Une étude bien conduite chez le singe montre des lésions de l'EPR avec des LED à 560 nm, à des irradiances rétiniennes inférieures aux valeurs limites d'exposition selon la règlementation d'utilisation des lasers.

Les différentes études décrites ci-dessus ne permettent cependant pas d'extrapolation directe à l'Homme. Mais elle montrent clairement que des réactions photoxiques différentes *in vivo* résultent d'exposition à des lampes dont les spectres d'émission sont différents. La nature des lésions observées peut ainsi différer selon la longueur d'onde, suggérant que les méthodes d'analyse de la toxicité devraient être adaptées aux mécanismes attendus. Les études confirment la phototoxicité de la lumière bleue. Des morts cellulaires par nécrose, observées dans les cellules rétiniennes soumises à un rayonnement bleu, par opposition à la mort par apoptose, causent une réaction inflammatoire amplificatrice. Les études montrent également un rôle potentiellement protecteur de la composante rouge du spectre, suggérant que le déséquilibre spectral de la lumière vers une augmentation de l'émission bleue et une réduction de l'émission rouge pourrait conduire à une plus grande toxicité. Chez le primate, une exposition aiguë à la lumière LED blanc froid peut induire des lésions au niveau cellulaire, détectables par des méthodes d'imagerie utilisées en clinique humaine, réversibles mais témoin d'un stress oxydatif significatif par dépassement des capacités d'absorption des photons.

Les conséquences sur le long terme du stress cellulaire photo-induits répété pendant des années et cumulé à d'autres types de stress cellulaire ne peuvent pas être déduites de ces expériences mais des études doivent être menées sur le long terme pour contribuer à définir les seuils de toxicité rétinienne de l'exposition chronique à différents types de lumière.

3.5.4.2.3 Études in vitro

Plusieurs études ont été menées *in vitro* pour d'une part comparer les effets de différentes sources lumineuses dans des conditions expérimentales contrôlées et d'autre part pour analyser les mécanismes cellulaires réactionnels. Ces études ne permettent pas d'extrapolation directe sur les effets des LED sur la santé oculaire humaine mais apportent des éléments contribuant à l'analyse des risques.

Des résultats variables sont rapportés selon le type cellulaire et l'élément analysés, montrant soit une plus grande toxicité (stress mitochondrial et oxydatif) pour des longueurs d'onde bleues soit une plus grande toxicité (viabilité) des lampes UV et fluorescentes (Sato *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2012). Sur des lignées de cellules du cristallin humain, des LED blanc froid ont induit des lésions cellulaires à des intensités d'éclairage modéré (750 lx) suggérant un risque cataractogène qui reste à démontrer *in vivo* (Xie *et al.*, 2014) .

Des lignées de photorécepteurs soumises à la lumière de LED bleues, oranges et blanches à 0,38 mW/cm² (50 lx pour les 464 nm, 1 600 lx pour les blanches (456 + 553 nm), 2 500 lx pour la verte (522 nm)) présentent des signes de stress oxydatif et une agrégation de la s-opsine conduisant à la mort cellulaire uniquement après exposition à des LED bleues (Kuse *et al.*, 2014).

Une exposition de lignées de cellules ganglionnaires de la rétine (RGC-5) à des LED bleues (pic 464 nm, 5 W/m^2, 1 370 lx) conduit également à la mort cellulaire par des mécanismes de nécrose et d'apoptose dépendante des caspases à partir de la 4ème heure d'exposition et jusqu'à 24 heures (Chamorro *et al.*, 2013; Huang *et al.*, 2014).

L'exposition de cellules de l'épithélium pigmentaire issu de cellules pluripotentes est un modèle intéressant, car plus proche de cellules humaines natives. Ces cellules ont été exposées à des LED (12h exposées /12h non exposées à la lumière) pendant 3 cycles à 468 nm, 525 nm, et 616 nm ou à une lumière blanche (lampe incandescente 5 mw/cm^2,

34 150 lx) et LED illuminant D65[47] (33 446 lx). Des marqueurs de mort cellulaire ont été observés avec toutes les longueurs d'ondes, mais moins marqués avec la lumière rouge. Une production de radicaux libre a également été observée avec les 3 longueurs d'onde mais pas avec les LED blanches. L'exposition n'a pas eu d'effet sur les potentiels de membrane mitochondrial. Des effets sur l'ADN ont été observés avec toutes les longueurs d'onde, mais plus spécifiquement avec la lumière bleue. La mort cellulaire passe dans ce modèle par un mécanisme apoptotique (Mori *et al*., 2017).

3.5.4.2.4 Synthèse des études in vitro

Toutes les études mettent en évidence une phototoxicité dont les mécanismes dépendent du type cellulaire et de la longueur d'onde. Qu'il s'agissent de LED ou d'autres sources, le spectre est l'élément déterminant. Les courtes longueurs d'onde sont les plus toxiques, aussi bien sur les photorécepteurs que sur les cellules EPR. Il apparaît que les cellules de la surface oculaire et les cellules ganglionnaires peuvent également subir des dommages photo-induits par des photons de courtes longueurs d'onde, l'effet est ici certain.

3.5.4.2.5 Conclusions et classement de l'effet de la lumière froide sur la rétine

Le groupe de travail a considéré nécessaire de distinguer les effets à long terme des effets à court terme de la lumière riche en bleu sur l'œil. Les effets attendus sont liés au spectre d'émission de la lumière et à sa densité énergétique spectrale. Dans ce sens, les technologies des lampes d'éclairage n'ont pas été distinguées pour établir le classement des effets de la lumière froide sur la rétine.

En ce qui concerne, les effets d'une lumière riche en bleu sur la toxicité rétinienne à court terme, le groupe de travail conclut que :

- les éléments de preuve chez l'animal sont suffisants (voir toutes les études exploitées pour déterminer les valeurs limites d'exposition) ;
- les éléments de preuve chez l'Homme sont suffisants (voir le rapport Anses de 2010 (Anses, 2010)).

L'effet de la lumière riche en bleu sur la toxicitié rétinienne à court terme est avéré.

En ce qui concerne les effets d'une lumière riche en bleu sur la toxicité rétinienne à long terme (risque de survenue de DMLA), le groupe de travail conclut que :

- les éléments de preuve chez l'animal sont limités (Krigel *et al*., 2017 ; Shang *et al.* 2017 et Shang *et al*., 2014) ;
- pour ce qui concerne la lumière solaire, qui est une lumière froide, donc riche en bleue en plein jour, les éléments de preuve chez l'Homme sont suffisants (*cf*. les différentes méta-analyses présentées dans ce rapport (voir la section 3.5.3)). En effet, les ultraviolets étant stoppés par la cornée, l'augmentation de risque de DMLA liée à la lumière solaire est imputable en partie à la lumière bleue du soleil.

L'effet d'une lumière riche en bleu sur le long terme sur la contribution à la survenue de DMLA est avéré.

Les valeurs limites d'exposition rétinienne sont résumées dans la Figure 34. Dans le spectre bleu, la dose maximale dépend grandement de la longueur d'onde : inférieure à 8J/cm^2 à 350nm et inférieure 50J/cm^2 à 450nm.

[47] Le D65 est un étalon colorimétrique correspondant à une lumière naturelle en plein jour en zone tempérée.

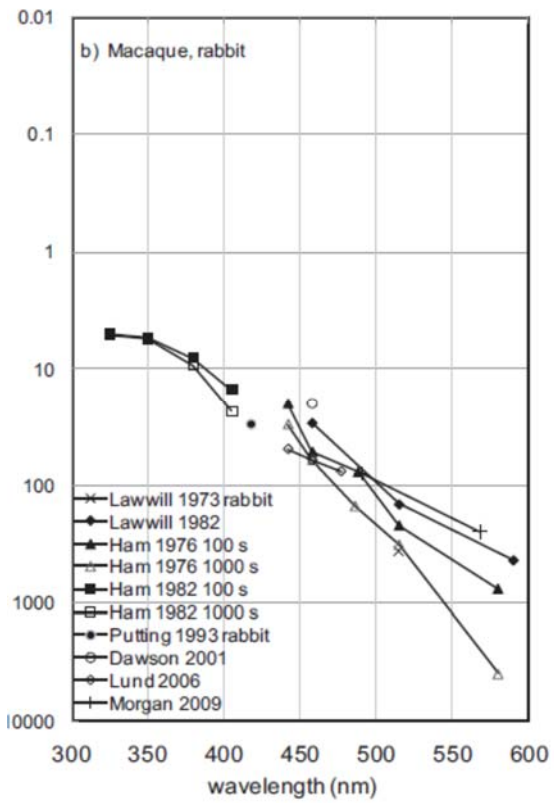


Figure 34 : valeurs limites d'exposition rétinienne en fonction de la longueur d'onde chez la macaque et le lapin

L'analyse des études menées sur l'animal montrent que les paramètres choisis pour fixer les valeurs limites d'exposition sont basés sur des méthodes peu sensibles qui ne permettent pas de mettre en évidence des lésions dont les conséquences fonctionnelles peuvent être réelles. De plus, les normes et les valeurs limites sont calculées pour des expositions aiguës mais les lésions résultant d'une exposition très longue sur des mois ou des années à des niveaux d'énergie lumineuse élevés peuvent être régies par d'autres mécanismes. En particulier, les effets de l'accumulation de produits oxydés dans les cellules de l'EPR peuvent apparaître de façon retardée des mois ou des années plus tard (Brandstetter *et al*., 2015; Ueda *et al*., 2016). Les effets d'expositions prolongées ont été peu étudiés du fait de difficultés expérimentales évidentes et de la difficulté de réaliser des études épidémiologiques sans mesures objectives d'exposition cumulée.

Il est recommandé d'effectuer des études visant à fixer les valeurs limites d'exposition en utilisant les méthodes les plus récentes et les plus sensibles d'analyse de la toxicité au niveau cellulaire et moléculaire et au niveau fonctionnel et morphologique *in vivo*.

3.5.4.3 Effet protecteur de la lumière rouge et du proche infrarouge

Plusieurs études ont mis en évidence un rôle protecteur de la lumière rouge et du proche infrarouge sur la rétine (Eells *et al.*, 2016). Le concept de « photobiomodulation » repose sur l'observation que l'exposition d'un tissu à une faible énergie de photons dans le rouge et proche infrarouge pourrait restaurer les altérations mitochondriales et augmenter des facteurs cytoprotecteurs (Calaza *et al.*, 2015). Les rayonnements sont absorbés par l'enzyme cytochrome C oxydase mitochondriale, conduisant à une amélioration du métabolisme énergétique cellulaire. Des effets bénéfiques ont été démontrés sur des modèles animaux de DRIL, dystrophies rétiniennes et de dégénérescences liées à l'âge. Une étude démontre que la phototoxicité rétinienne résultant d'une exposition de rats albinos à des lampes fluocompactes à 1 800 lx (4 tubes, 18 W, 6 500 K, 12h/12h) peut être modulée par une exposition à des LED rouges (670 nm, 9 J/cm^2, 6 min par jour pendant 30 jours). Ce pré conditionnement à 670 nm entraînerait une protection contre la perte des

photorécepteurs induite par l'exposition à la lampe fluocompacte. Le mécanisme protecteur pourrait également impliquer les stéroïdes endogènes, puisque l'exposition à la lampe fluorescente induit une réduction de la corticostérone plasmatique alors que l'exposition à des LED rouges produit une augmentation de ce glucocorticoïde endogène. Le cytochrome C pourrait être la cible moléculaire de régulation.

Dans une autre étude, une exposition à 670 nm (31,7 J/cm^2) a également permis de réduire la dégénérescence axonale secondaire à une axotomie du nerf optique (Beirne *et al.*, 2016). D'autres travaux ont montré des effets neuroprotecteurs sur la rétine, de la lumière rouge et infrarouge possiblement par stimulation de l'activité mitochondriale (Beirne *et al.*, 2016 ; Eells *et al.*, 2016). Plus largement, il semblerait que la lumière rouge comprise dans le spectre visible (16,5 W/m^2, 3 000 lx, 625-635 nm), soit également neuroprotectrice sur les cellules ganglionnaires soumises à un stress hypertonique *in vivo* et *in vitro* (Del Olmo-Aguado *et al.*, 2016).

3.5.4.4 Effet sur le développement de la myopie

3.5.4.4.1 Études épidémiologiques

La prévalence de la myopie a considérablement augmenté au cours des dernières années et expose, dans les cas où l'erreur de réfraction est supérieure à -6,00 dioptries (D), à de graves complications pouvant conduire à la cécité (Buch *et al.*, 2001; Morgan *et al.*, 2012; Saw *et al.*, 2005). Des études récentes indiquent qu'une augmentation du temps passé à l'extérieur en lumière du jour a un effet protecteur sur le risque de développer une myopie chez les enfants (Dirani *et al.*, 2009; He *et al.*, 2015; Jones *et al.*, 2007; Jones-Jordan *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2013). L'accroissement de la durée d'exposition en milieu extérieur a non seulement retardé la survenue de la myopisation mais a également réduit sa progression chez les enfants en école élémentaire (Wu *et al.*, 2013). Ces différentes études, menées sur des populations différentes, s'accordent sur le fait que l'exposition à la lumière est le facteur dominant dans l'impact du temps passé à l'extérieur sur la myopie.

En conséquence, certains auteurs ont proposé récemment de prévenir la myopisation par l'utilisation de systèmes d'éclairage domestique comportant des rayonnements de longueurs d'onde inférieures à 300 nm, voire à des lampes émettant des UV pour mimer au mieux la lumière du jour (Torii *et al.*, 2017). Une étude a confirmé récemment que l'exposition à la lumière du jour est associée à un moindre risque de myopisation et ce, indépendamment des taux de vitamine D (Williams *et al.*, 2017). Ces études sont à mettre en balance avec les risques sanitaires liés aux expositions UV (Anses, 2005).

3.5.4.4.2 Études chez l'animal

Quand la rétine reçoit de la lumière, les cellules amacrines dopaninergiques limitent la quantité de dopamine qu'elles produisent. Hors la DA intervient dans la croissance du globe, apparaissant comme un médiateur moléculaire possible entre la lumière et la myopisation. Des études ont montré que l'injection intraloculaire d'agonistes dopaminergiques permet de réduire les myopies expérimentales induites chez l'animal par déprivation sensorielle (Connaughton *et al.*, 2015).

Une étude récente a testé l'effet de l'éclairage en lumière blanche à forte luminance pendant 6 heures sur la stimulation dopaminergique dans la rétine de souris. En conditions de base, les animaux étaient soumis à une illumination de 100-200 lx pendant 2 h sur 24. Dans les conditions de stimulation, les animaux étaient soumis à l'éclairage de base pendant 3 heures, puis à une forte luminance (2 500 – 5 000 lx) sous un tube fluorescent pendant 6 heures, puis à un retour en conditions de base pendant 3 heures. Ce rythme d'illumination pendant 4 semaines a permis d'inverser le *shift* myopique en *shift* hypermetropique par stimulation de cellules bipolaires exprimant le récepteur dopaminergique D1. Cette activation a stimulé la voie de signalisation c-fos (Chen *et al.*, 2017).

Des études ont été également menées sur le cochon d'Inde au cours du développement visuel de ces rongeurs dont la rétine est essentiellement constituée de bâtonnets. Soumis

dès le 14ème jour, pendant 12 semaines, à différents types d'illumination (430 nm à 460 mW/m² ; 530 nm à 750 mW/m² et lumière blanche à 400 mW/m²), les animaux exposés à 530 nm ont présenté une myopisation plus rapide que les animaux exposés à 460 nm, confirmant d'autres études chez les poissons et le poulet qui démontrent que les courtes longueurs d'onde dans ces modèles pourraient réduire l'élongation du globe après la naissance (Qian *et al.*, 2013).

L'analyse du rôle de différentes longueurs d'onde sur les phénomènes d'emmetropisation post natale a plus de pertinence quand elle est réalisée sur des modèles dont la rétine est enrichie en cônes, car les signaux d'aberrations chromatiques longitudinales pourraient être différents entre les cônes à longues longueurs d'onde (rouges) et les cônes à courtes longueurs d'onde (bleu). Si l'œil est trop long, la focalisation est meilleure dans le rouge (et signale de freiner la croissance) et si l'œil est trop court il focalise mieux dans le bleu (signale d'augmenter la croissance). Les cônes bleus, moins nombreux, pourraient être plus sensibles à une modulation temporelle de la lumière bleue. Pour tester cette hypothèse, des animaux ont ainsi été exposés du 11ème au 24ème jour post natal à une lumière ambiante variable : soit continue soit en subissant une modulation temporelle à une fréquence aléatoire de LED de différentes couleurs (rouges 626 ± 10 nm, 527 lx en continu et 329 lx avec une modulation temporelle ; bleues 464 ± 10 nm 601 lx en continu et 252 lx avec une modulation temporelle). Les animaux contrôles ont été soumis à une lumière blanche produite par un tube fluorescent (100 - 300 lx). Les animaux soumis à la lumière rouge (continu et *flicker*) sont restés hypermétropes. Les animaux soumis à la lumière bleue continue se sont emmétropisés comme les contrôles alors que les animaux soumis à la lumière bleue *flicker* se sont myopisés. Ces modifications réfractives dues à des modifications de la longueur axiale pendant la période d'emmétropisation physiologique se sont normalisées après retour en illumination normale. Cette étude montre que la lumière bleue présentant une modulation temporelle peut être un signal important de défocalisation au cours du développement oculaire réfractif post natal (Gawne *et al.*, 2017).

Cette étude est importante car, à l'inverse des modèles de myopisation par déprivation sensorielle, elle analyse les effets de différentes LED sur l'emmétropisation physiologique. En effet, les modèles expérimentaux de myopisation par déprivation restent controversés quant à leur transposition à la myopie humaine (Fledelius *et al.*, 2014). Dans cette étude, il apparait que le manque de lumière rouge, associé à une lumière bleue qui présenterait une importante modulation temporelle seraient particulièrement inducteur d'un signal d'allongement du globe oculaire dans la période d'émmetropisation.

En conclusion, la myopie est un problème mondial, touchant plus spécifiquement mais pas uniquement l'Asie (Holden *et al.*, 2016; Morgan *et al.*, 2012, 2017). Ce phénomène est multifactoriel, génétique et environnemental. L'exposition à la lumière du jour est un facteur protecteur sans qu'il n'ait encore été possible de discriminer quel élément dans la lumière artificielle fait défaut : manque de bleu, manque de rouge, manque d'UV, absence de rythmicité… Sur ce dernier point, il faut citer des travaux récents qui montrent que des poulets (dont la rétine est riche en cônes) exposés à la lumière (700 lx) pendant deux heures la nuit entre minuit et 2 heures, pendant 7 jours à partir du 12ème jour de vie, se myopisent, secondairement à une modification du rythme circadien normal de variation de l'épaisseur choroidienne (Nickla *and* Totonelly, 2016). La rythmicité spectrale de la lumière du jour est un élément majeur dans le développement de l'œil de l'enfant au cours de sa croissance. Les impacts des éclairages le jour et la nuit sur la myopisation restent un sujet crucial. Par ailleurs, il faut aussi souligner le rôle possible de la lumière bleue en flicker sur l'induction de la myopie. Les LEDs pauvres en rouge et riches en bleues avec une modulation temporelle seraient d'après ces études de potentiels pourvoyeurs de myopisation.

Des études prospectives permettant d'analyser et de quantifier les types d'éclairage et les risques de myopisation doivent être menées afin d'adapter les éclairages domestiques et scolaires.

3.5.4.4.3 Conclusions et classement de l'effet d'une lumière riche en bleu sur le développement de la myopie

Il y a un effet certain de l'exposition à la lumière naturelle sur la prévention de l'allongement du globe oculaire (myopisation).

Chez l'animal, de nombreuses études mettent en évidence un effet (positif ou négatif) sur l'allongement du globe oculaire soit du spectre soit de la fréquence de modulation temporelle d'une lumière artificielle. Néanmoins, il n'existe pas de données scientifiques chez l'Homme permettant d'incriminer directement la lumière artificielle ni dans sa composition spectrale, ni dans sa variation journalière, ni dans sa fréquence de modulation temporelle pour ce qui concerne l'allongement du globe oculaire.

Le groupe de travail conclut que s'agissant d'une lumière riche en bleu sur le développement de la myopie :

- les éléments de preuve chez l'animal ne permettent pas de conclure ;
- les élements de preuve chez l'Homme sont limités.

L'effet d'une lumière riche en bleu sur le développement de la myopie est donc possible.

3.6 Effets de la modulation temporelle de la lumière émise par les lampes et luminaires à LED

3.6.1 La modulation temporelle de la lumière émise par les LED et son origine

3.6.1.1 Introduction

La modulation temporelle de la lumière traduit des fluctuations rapides, périodiques ou non, de l'intensité de la lumière en fonction du temps. Il s'agit d'un phénomène qui n'est pas en général recherché dans les systèmes d'éclairage, à l'exception d'applications qui seront décrites plus loin (communications optiques sans fil, variation du niveau lumineux par modulation du rapport cyclique, etc.). La terminologie et les définitions relatives à ce phénomène sont exposées dans le chapitre de ce rapport concernant les normes et les réglementations. Dans la plupart des cas, la modulation temporelle d'un système d'éclairage est principalement caractérisée par sa fréquence de modulation et le taux de modulation associé, exprimé en %. Selon la fréquence de modulation, cette modulation peut être perceptible ou non par le système visuel humain. La perception visuelle de cette modulation est appelée papillotement ou flicker en anglais (IEC[48], 2017).

Dans le cas des LED, la modulation temporelle de la lumière n'est pas liée au processus d'émission lumineuse mais au courant d'alimentation du composant. En effet, la production de lumière par une LED suit exactement la forme temporelle de son courant d'alimentation, et ce jusqu'à des échelles de temps très courtes, de l'ordre de la microseconde ou moins. Si une LED est alimentée avec un courant qui n'est pas parfaitement continu mais présente une modulation résiduelle (périodique ou transitoire), alors on retrouve cette modulation résiduelle dans la lumière émise. Il s'agit d'un phénomène particulièrement critique pour l'éclairage à LED. Des fluctuations anormales de la lumière émise par des LED proviennent quelquefois de l'association d'un produit d'éclairage LED avec un variateur conçu pour des

[48] IEC : International Electrotechnical Commission

lampes à incandescence. L'incompatibilité des équipements est à l'origine de fluctuations du courant d'alimentation des LED et d'une modulation temporelle anormale des LED.

En 2016, la CIE dans sa note technique CIE TN 006 (CIE, 2016) a dissocié la notion de modulation temporelle de la lumière, une caractéristique purement physique, des effets que cette modulation produit chez l'Homme. Ces effets biologiques de la modulation temporelle de la lumière peuvent être visuels ou non visuels ; ils peuvent à leur tour induire des effets sur la santé.

3.6.1.2 Les différents types de modulation et les formes d'onde associées

Les formes d'ondes lumineuses sont les courbes de variations temporelles de la lumière (mesurée par une quantité photométrique comme la luminance ou le flux lumineux variant en fonction du temps).

Les formes d'ondes les plus courantes pour les sources d'éclairage sont périodiques et ont une fréquence de modulation égale à deux fois la fréquence de la tension alternative du secteur. Pour les lampes et luminaires à LED, il existe une plus grande diversité de formes d'onde, en ce qui concerne les fréquences de modulation et les profils temporels. Lorsque les sources d'éclairage sont associées à des variateurs, les formes d'ondes sont plus complexes.

La suite de ce paragraphe fournit des exemples typiques de formes d'onde rencontrées en éclairage.

3.6.1.2.1 Formes d'onde typiques des sources d'éclairage traditionnelles

La Figure 35 illustre la forme d'onde d'une lampe halogène de puissance nominale 28 W. La modulation est parfaitement sinusoïdale à 100 Hz avec un pourcentage de modulation de 3,4 % (le pourcentage de modulation est la profondeur de modulation de la forme d'onde)[49].

Pour les lampes à incandescence, la modulation lumineuse est liée à l'oscillation périodique de la température du filament. Celle-ci étant proportionnelle au carré du courant d'alimentation alternatif (effet Joule), on retrouve une composante modulée à deux fois la fréquence du secteur.

La Figure 35 illustre la forme d'onde d'une lampe fluorescente compacte de puissance nominale 15 W. La fréquence de modulation est également de 100 Hz, mais la forme d'onde n'est pas sinusoïdale. Elle est typique de l'utilisation dans le ballast de la lampe d'un convertisseur électrique à redressement double alternance (pont de diode par exemple) et d'un filtrage passe-bas (condensateur par exemple). Cette forme d'onde contient essentiellement des composantes fréquentielles à des fréquences multiples d'ordre impair de la fréquence fondamentale de la modulation temporelle (100 Hz, 300 Hz, 500 Hz, etc.).

[49] Le pourcentage de modulation est égal à *100 x (Max-Min)/(Max+Min)*, où *Max* et *Min* représentent respectivement les valeurs maximales et minimales de la modulation.

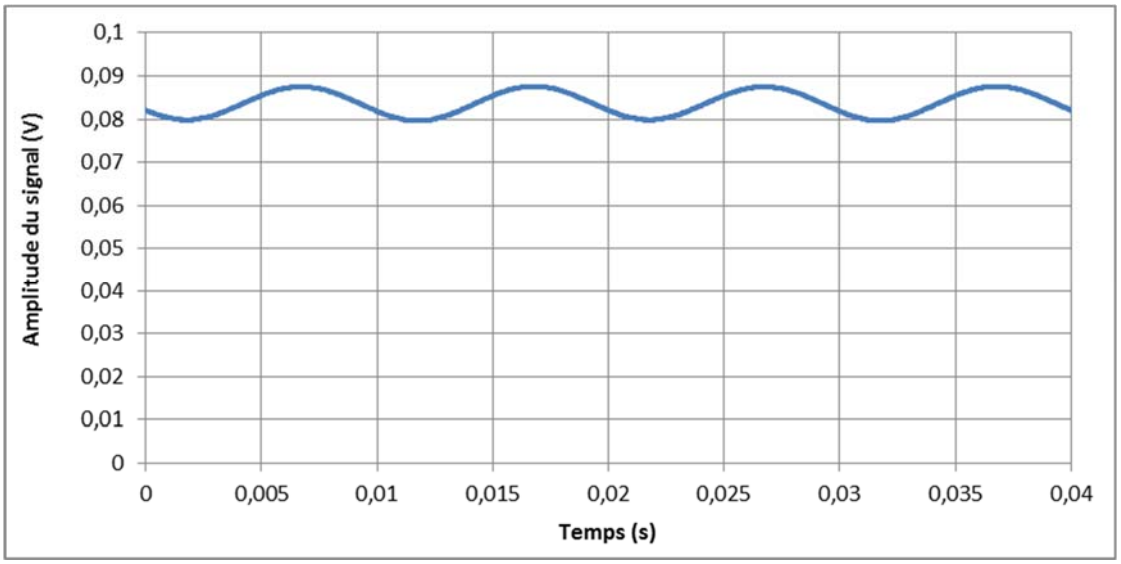


Figure 35 : forme d'onde d'une lampe halogène de puissance 28 W

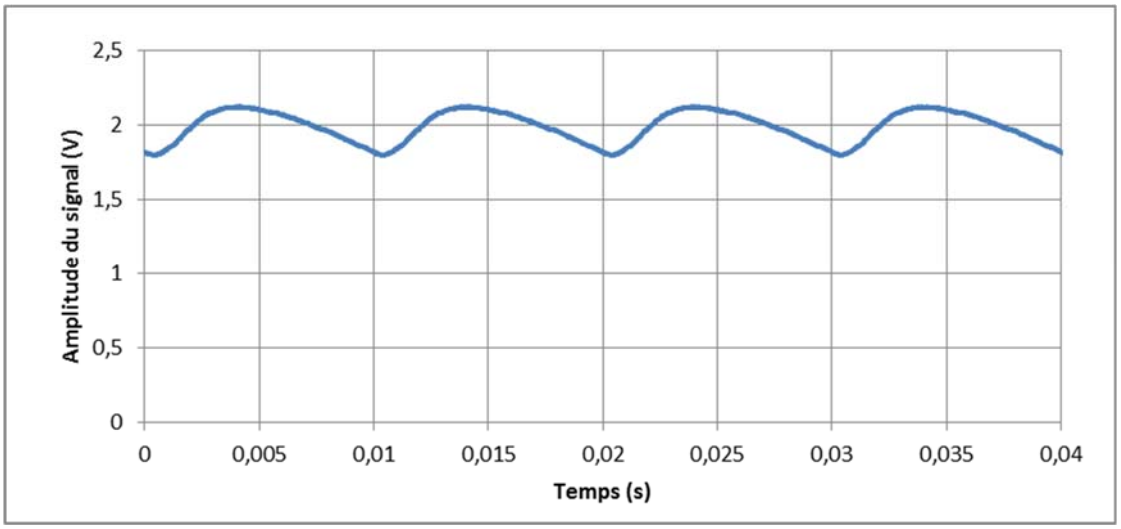


Figure 36 : forme d'onde d'une lampe fluocompacte de puissance 15 W

3.6.1.2.2 Formes d'onde typiques de lampes et luminaires à LED

Contrairement aux lampes à incandescence et aux lampes à décharge, les lampes et luminaires à LED ont des formes d'onde très variées. La Figure 37 illustre la forme d'onde d'une lampe LED pour laquelle la modulation temporelle de la lumière n'a pas été détectée (forme d'onde constante, au bruit près). Le module LED de cette lampe est donc alimenté en courant constant. La Figure 38 présente en revanche la forme d'onde d'une lampe LED très semblable à celle d'une lampe fluorescente compacte.

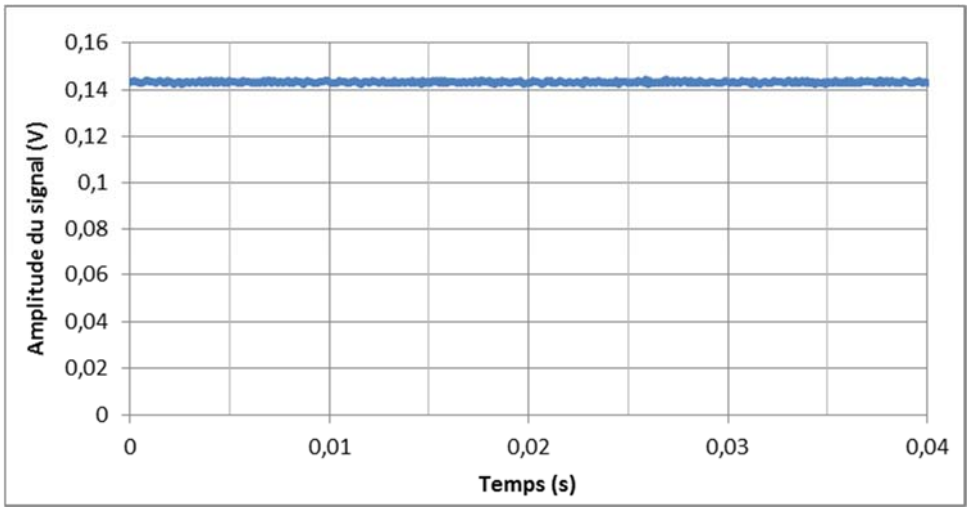


Figure 37 : forme d'onde à peu près constante d'une lampe LED. Il n'y a pas de modulation temporelle détectable

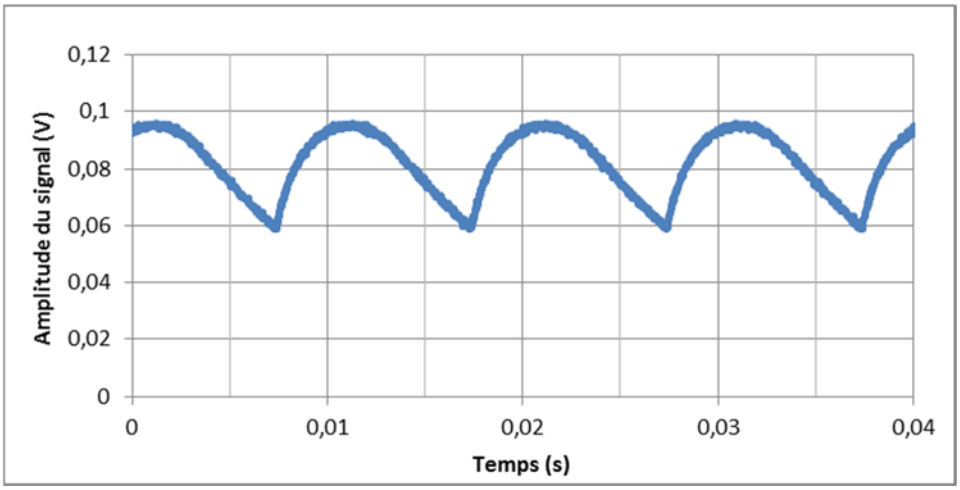


Figure 38 : forme d'onde d'une lampe LED présentant une modulation temporelle importante

La Figure 39 montre, pour une autre lampe LED, une forme d'onde carrée et un pourcentage de modulation de 100 %. Dans cet exemple, il y a une extinction totale de la lumière émise toute les 6,7 millisecondes. Les formes d'ondes carrées contiennent également des composantes fréquentielles harmoniques d'ordre impair.

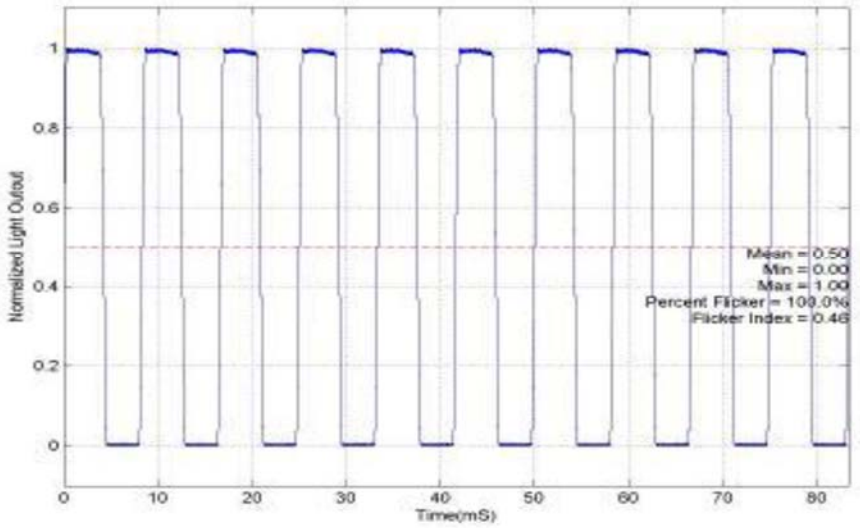


Figure 39 : forme d'onde d'une lampe LED avec une modulation temporelle de forme carrée et un pourcentage de modulation de 100 % (IEEE 1789)

3.6.1.2.3 La notion de rapport cyclique

Le rapport cyclique (*duty cycle* en anglais) d'une forme d'onde est le rapport entre le temps durant lequel le signal est supérieur à la valeur moyenne et la durée totale d'une période de modulation. Les rapports cycliques des formes d'ondes présentées dans les figures précédentes (à l'exception de la forme d'onde constante) ont une valeur de 0,5, ce qui traduit que la lumière dépasse la valeur moyenne pendant exactement 50 % de la durée de la modulation.

Les travaux sur les effets visuels de la modulation de la lumière (papillotement, effet stroboscopique, effet de réseau fantôme) montrent que le changement du rapport cyclique d'une forme d'onde sans modification de la fréquence de modulation ou du pourcentage de modulation, a une influence sur ces effets visuels. Ces observations s'expliquent par le fait que la variation du rapport cyclique modifie le spectre fréquentiel de la forme d'onde (modification de l'amplitude des composantes fréquentielles d'ordre supérieur par rapport à la fréquence de modulation fondamentale).

3.6.1.2.4 Formes d'onde typiques des LED associées à un variateur à découpage de phase

Lorsque des lampes sont associées à un variateur à découpage de phase, le rapport cyclique de la forme d'onde est différent de 0,5 car le variateur « découpe » une partie du courant d'alimentation pour diminuer la durée moyenne d'allumage pendant chaque période de modulation. Le rapport cyclique est donc inférieur à 0,5. La Figure 40 montre la forme d'onde d'une LED associée à un variateur à découpage de phase sur front montant.

Dans cet exemple, la fréquence de modulation dominante est la même qu'avant découpage (double de la fréquence du secteur). Lorsque ce type de découpage est associé à des pourcentages de modulation importants, comme cela peut être le cas pour des lampes ou des luminaires à LED, des effets visuels indésirables sont perçus par la plupart des observateurs (IEEE, 2015).

Dans le cas général, les lampes LED ou luminaires à LED, utilisés avec un variateur à découpage de phase avec lequel ils ne sont pas compatibles, vont produire des formes d'ondes anormales, différentes de la forme d'onde du produit utilisé sans variateur. Ces formes d'ondes anormales produisent à leur tour des effets visuels, le plus souvent le papillotement.

Il existe une telle diversité d'associations possibles entre les nombreux produits d'éclairage à LED et les nombreux modèles de variateur qu'il n'est pas possible *a priori* de donner des règles sur les formes d'ondes et les effets produits pour de telles associations.

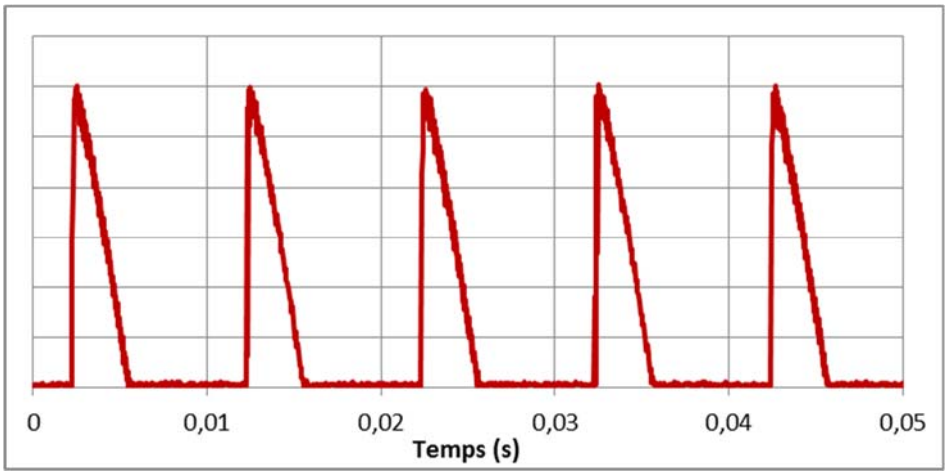


Figure 40 : forme d'onde d'une lampe LED utilisée avec un variateur à découpage de phase

Le rapport cyclique est ici d'environ 30 %

Les LED sont souvent utilisées en association avec des variateurs fonctionnant en modulation de rapport cyclique de type PWM (*Pulse Width Modulation*). Dans ce cas, les formes d'ondes peuvent avoir, de manière intentionnelle, des rapports cycliques inférieurs ou supérieurs à 0,5, selon le niveau de lumière souhaité.

Les formes d'onde typiques des LED associées à un variateur à modulation de rapport cyclique (PWM) sont des formes d'onde rectangulaires dont le pourcentage de modulation est de 100 %. La Figure 41 illustre une forme d'onde typique de la modulation PWM.

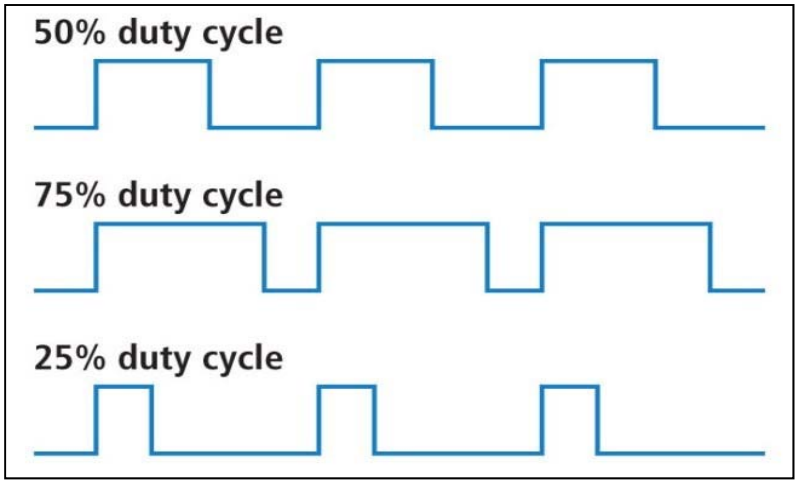


Figure 41 : formes d'onde carrées de même fréquence mais ayant des rapports cycliques différents

La plupart des variateurs PWM sont utilisés à des fréquences élevées, de manière à éviter les effets visuels comme le papillotement et l'effet stroboscopique. Cependant, il n'existe pas de norme pour la fréquence de modulation utilisée en PWM. Ainsi, les feux rouges LED à l'arrière de certaines automobiles passent du mode « normal » au mode « feu stop » en utilisant la modulation PWM à une fréquence de modulation de 200 ou 300 Hz, ce qui peut produire un effet visuel de « réseau fantôme », expliqué dans la suite de cette partie. C'est le

cas aussi de quelques modèles de projecteurs automobiles avant à LED (feux de croisement et de route) qui utilisent également la modulation temporelle PWM pour réduire l'intensité.

3.6.1.2.5 Formes d'onde anormales de lampes ou luminaires à LED

Des formes d'onde anormales apparaissent en lien avec certains types de défaillance. Par exemple, dans le cas de modules LED comportant plusieurs branches associées électriquement en parallèle, une désadaptation d'impédance entre branches peut conduire à l'apparition d'une modulation à la fréquence du secteur (50 Hz en Europe) alors que la fréquence de modulation fondamentale est de 100 Hz. La composante à 50 Hz représente alors une composante « sous harmonique » de la modulation temporelle. Elle est souvent critique car elle se situe dans une gamme de fréquences où le papillotement est perceptible.

Dans le cas général, des produits défaillants ou en fin de vie sont susceptibles de produire des modulations anormales de la lumière. Le plus souvent, les défaillances de composants électroniques d'alimentation sont incriminées.

Il existe également des formes d'onde anormales pouvant être produites de manière transitoire par des produits d'éclairage à LED non défectueux lorsqu'ils sont soumis à des fluctuations anormales de la tension d'alimentation électrique. Une étude publiée en 2017 (Gil de castroa *et al.*, 2017) a montré que le papillotement de 24 lampes LED soumises à des fluctuations de tensions était en moyenne inférieur à celui d'une lampe à incandescence de 60 W. Cependant, cette étude a montré de larges écarts entre différents modèles de lampes LED. Le papillotement de ces lampes produit par les fluctuations de tension variait beaucoup d'un modèle à l'autre.

Un exemple de modulation temporelle anormale est illustré dans la Figure 42.

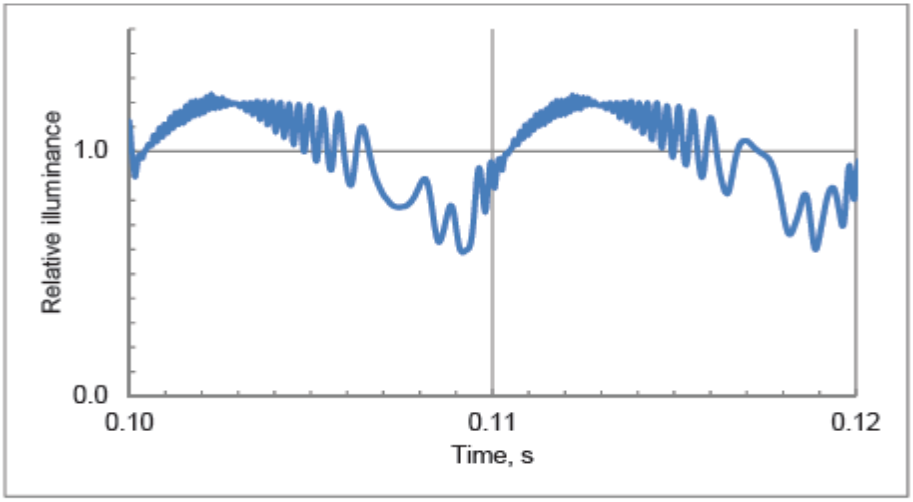


Figure 42 : exemple de forme d'onde caractérisant une modulation temporelle anormale et dont la forme est très complexe

Source : *Chartered Institution of Building Services Engineers*, CIBSE, 2016

3.6.1.3 Comparaison des recommandations existantes concernant la modulation temporelle avec les résultats des mesures

La Figure 43 propose une synthèse graphique des recommandations existantes. Les recommandations de la norme IEEE 1789 sont les plus strictes, quelles que soient les fréquences de modulation considérées.

On peut extraire de cette synthèse les niveaux concernant la fréquence de modulation de 100 Hz, qui apparait le plus fréquemment dans la lumière émise par les lampes et luminaires à LED en France et en Europe.

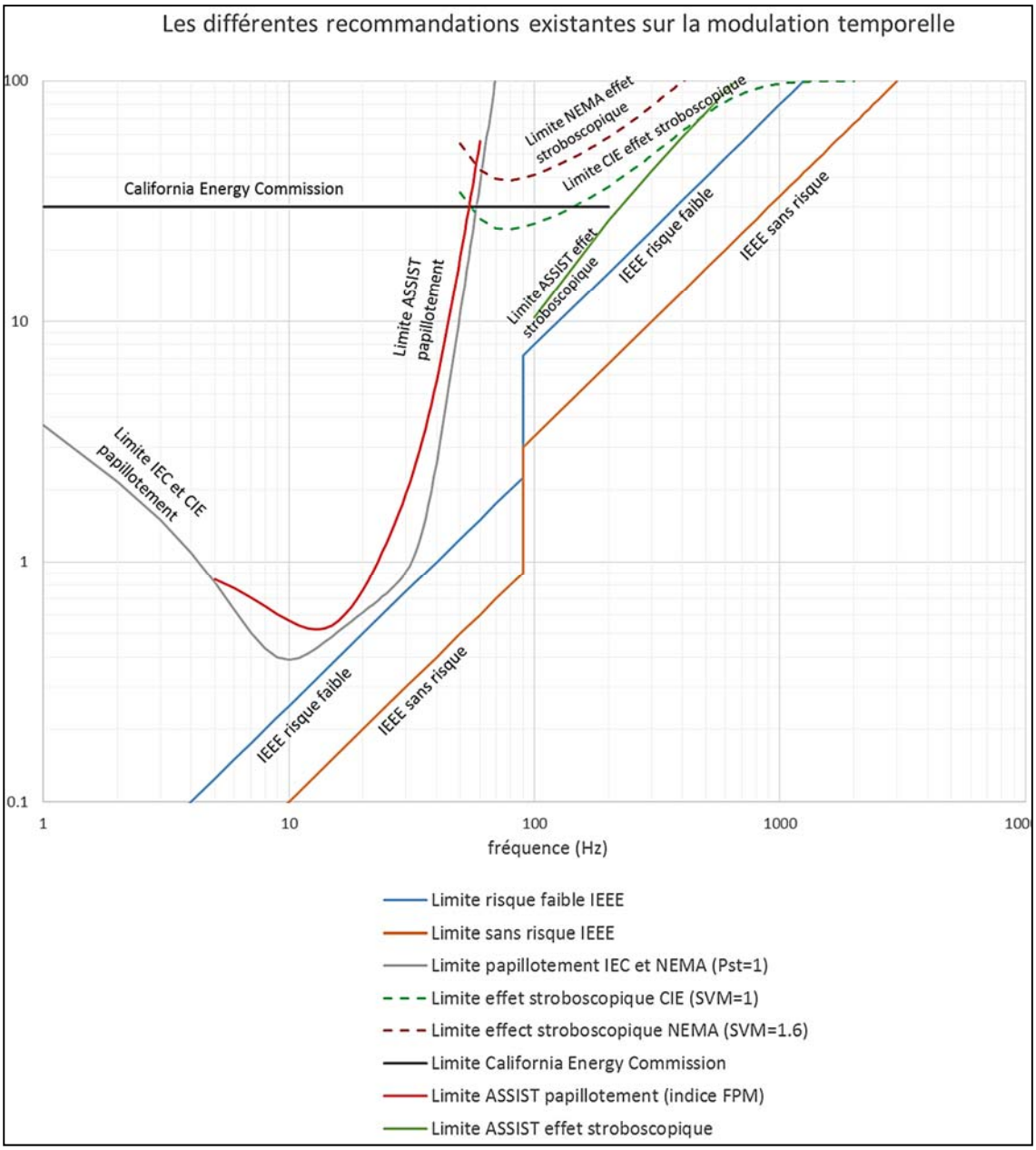


Figure 43 : limites de modulation temporelle proposées par différents organismes

La Figure 44 représente ces limites à 100 Hz, ainsi que les résultats de mesure de la modulation temporelle des lampes grand public décrites précédemment. Il n'existe pas actuellement de consensus international sur les limites de modulation temporelle. En effet, les organismes ayant élaboré ces limites n'ont pas pris en considération les mêmes effets de la modulation temporelle. Seules les recommandations de la norme IEEE 1789 a inclus l'ensemble des effets biologiques et sanitaires connus.

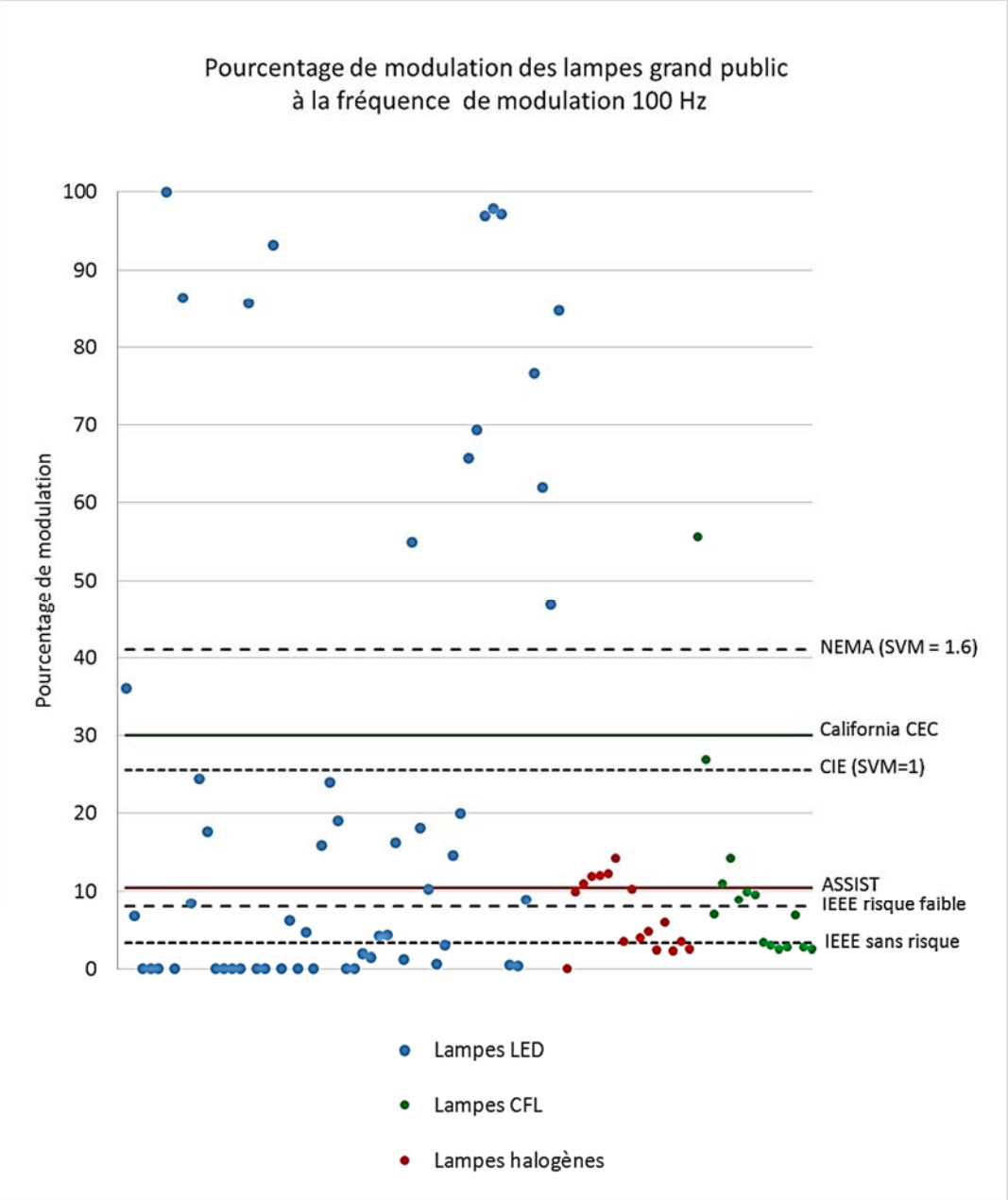


Figure 44 : mesures de modulation temporelle à 100 Hz obtenues sur des lampes grand public et valeurs limites recommandées par différents organismes

3.6.2 Effets biologiques de la modulation temporelle de la lumière

La note technique CIE TN 006 (CIE, 2016) définit les effets visuels liés à la modulation temporelle de la lumière comme étant des changements de la perception visuelle, induits par un stimulus lumineux dont la luminance ou le contenu spectral fluctue dans le temps, pour un observateur humain dans un environnement spécifique.

La CIE présente trois effets visuels distincts : le papillotement (*flicker*), l'effet stroboscopique et l'effet de réseau fantôme. La visibilité de ces trois effets est liée à la sensibilité du système visuel humain aux contrastes spatio-temporels.

3.6.2.1 La sensibilité visuelle aux contrastes spatio-temporels

Lorsque des variations lumineuses se produisent dans l'espace et dans le temps, le système visuel réagit de manière différente selon les caractéristiques des contrastes spatiaux (variations plus ou moins fines du niveau lumineux dans le champ de vision, présence d'un objet plus ou moins grand en mouvement plus ou moins rapide, etc.) et des contrastes temporels (variations plus ou moins rapides du niveau lumineux en fonction du temps).

Les contrastes spatiaux et temporels sont indissociables l'un de l'autre. Par exemple, dans le cas de la vision d'un objet en mouvement dans le champ visuel, le niveau de visibilité dépend à la fois de la vitesse (dimension temporelle) et de la taille de l'objet (dimension spatiale). De manière générale, les contrastes spatio-temporels peuvent être décrits en matière d'excitations visuelles « élémentaires » qui sont caractérisées par les paramètres suivants :

- la fréquence temporelle (exprimée en nombre de cycles par seconde ou Hz) ;
- la fréquence spatiale (exprimée en nombre de cycles par degré ou deg^{-1}) ;
- la position dans le champ de vision (excentricité par rapport à la direction du regard) ;
- l'intensité du contraste en chaque zone du champ de vision considéré ;
- le niveau lumineux de base sur lequel se superposent les excitations visuelles élémentaires.

Contrairement à la sensibilité spectrale du système visuel (sensibilité aux différentes longueurs d'onde du rayonnement optique), la sensibilité aux contrastes spatio-temporelle n'a jamais été normalisée par la CIE. Il existe pourtant de nombreux travaux dans ce domaine dont les plus anciennes publications remontent au début du XXème siècle et les plus récentes sont de 2017.

Les premiers travaux décrivant de manière quantitative la sensibilité aux contrastes spatio-temporels datent d'il y a plus de cinquante ans et ont été effectués par quelques auteurs dont les publications font encore référence à l'heure actuelle. Il s'agit des travaux sur le contraste temporel effectués par de Lange (De Lange, 1958), des travaux sur le contraste spatial effectués par Van Nes et Bouman (Van Nes et Bouman, 1957) et des travaux de Robson (Robson, 1966) évaluant la sensibilité aux contrastes spatiaux et temporels. Un modèle élégant a également été proposé par Kelly pour décrire la visibilité des contrastes spatio-temporels aux niveaux d'illumination photopiques (Kelly, 1979).

L'analyse de ces travaux fondateurs indique que le système visuel a une capacité limitée pour percevoir les contrastes spatio-temporels. Les limites de visibilité ont les caractéristiques suivantes :

- **limite aux basses fréquences temporelles (contrastes lents)** : si l'excitation lumineuse est très lente, typiquement de l'ordre de la dizaine de secondes ou de la minute, le système visuel s'adapte naturellement et limite la perception du contraste. La décroissance de la sensibilité aux basses fréquences temporelles est relativement lente ;
- **limite aux hautes fréquences temporelles (contrastes rapides)** : si l'excitation lumineuse est très rapide, le système visuel n'a pas le temps de réagir. La limite haute de la fréquence temporelle, à partir de laquelle le contraste n'est plus perçu (même à contraste maximum), est appelé « fréquence critique de fusion » ou CFF (critical fusion frequency en anglais). Au-delà de la CFF, on retrouve la loi empirique plus ancienne de Talbot-Plateau (1834) qui établit qu'une lumière intermittente, dès lors qu'il y a fusion des contrastes, paraît aussi lumineuse qu'une lumière stable d'intensité égale à la moyenne temporelle de la lumière intermittente. La décroissance de la sensibilité aux contrastes avec les hautes fréquences temporelles est très rapide ;

- **limite aux basses fréquences spatiales (contrastes occupant une grande portion du champ de vision)** : si l'excitation est très large, la perception du contraste est plus réduite que pour une excitation moins étendue. La décroissance de la sensibilité aux basses fréquences spatiales est relativement lente ;
- **limite aux hautes fréquences spatiales (contrastes de petite taille dans le champ de vision)** : si l'excitation est de très petite dimension, la perception du contraste qu'elle génère est limitée par la résolution spatiale de l'observateur, elle-même liée à la densité des cellules ganglionnaires de la rétine. La décroissance de la sensibilité aux contrastes avec les hautes fréquences spatiales est très rapide.
- **adaptation aux faibles niveaux lumineux (vision mésopique)** (Kelly, 1972) : la sensibilité aux contrastes reste constante en fonction de l'éclairement (loi empirique de Weber) aux fréquences spatiales et temporelles faibles. Par contre, pour les fréquences temporelles élevées et les fréquences spatiales faibles, la sensibilité aux contrastes spatio-temporels diminue linéairement avec la baisse de l'éclairement. Pour les fréquences spatiales élevées et les fréquences temporelles faibles, la sensibilité diminue selon la racine carrée de l'éclairement (loi empirique de De Vries-Rose). De manière générale, la sensibilité aux contrastes spatio-temporels diminue fortement pour les fréquences spatiales et temporelles les plus élevées lorsque l'éclairement baisse pour atteindre le régime de vision mésopique. La fréquence critique de fusion est également plus faible en condition de faible éclairement. C'est pourquoi le papillotement des anciennes lampes à décharge en éclairage public était peu visible alors que la modulation temporelle de la lumière émise était largement supérieure à celle des lampes utilisées en éclairage intérieur ;
- **adaptation aux forts éclairements lumineux** : la sensibilité aux contrastes spatio-temporels de fréquences spatiale et temporelle faibles est constante en fonction de l'éclairement (loi empirique de Weber). Pour les fréquences spatiales et temporelles les plus élevées, le pic de sensibilité au contraste augmente et se décale vers les hautes fréquences temporelles, s'accompagnant d'une augmentation de la fréquence critique de fusion. C'est pourquoi le papillotement des lampes et luminaires d'éclairage intérieur est parfois visible jusqu'à des fréquences de modulation élevées car la fréquence critique de fusion peut atteindre 70 Hz, voire 100 Hz chez une petite minorité de sujets.

Pour un observateur donné, chacune des limites énoncées ci-dessus dépend de plusieurs paramètres. Ainsi, la fréquence critique de fusion dépend de la taille de l'objet considéré, du niveau d'éclairement moyen et de sa position dans le champ visuel.

Les résultats de De Lange, Van Nes et Bouman, Robson et Kelly ont fait l'objet de travaux plus récents visant à élaborer des modèles mathématiques « unifiés » de manière à faciliter la prédiction de la visibilité de différents phénomènes spatiaux temporels. Par exemple, Vienot *et al.* (Vienot *et al.*, 2002) ont bâti en 2002 un modèle mathématique adapté à l'évaluation de la visibilité du papillotement perçu par un automobiliste circulant dans un tunnel éclairé par des luminaires régulièrement espacés. Watson a construit en 2016 (Watson et Ahumada., 2016) un modèle unifié de visibilité des phénomènes spatiaux temporels dans le but de concevoir des systèmes électroniques d'affichage optimisés en nombre de pixels et en fréquence de rafraichissement des images.

Il faut noter que les modèles mathématiques de la perception visuelle des contrastes spatio-temporels supposent un observateur standard qui est souvent assez mal défini. Dans la réalité, la visibilité des contrastes spatio-temporels est variable d'un sujet à l'autre et dépend également de facteurs mal maitrisés comme l'âge, la fatigue, l'alimentation, d'éventuelles maladies et des facteurs psychologiques (Watson, 1986).

3.6.2.2 Papillotement

3.6.2.2.1 Papillotement et fréquence critique de fusion

Le papillotement est la perception du contraste temporel produit par une source lumineuse immobile émettant de la lumière modulée et placée dans le champ de vision d'un observateur statique. Cette source lumineuse peut être une lampe, un luminaire, un écran ou un afficheur mais aussi une surface éclairée par une source de lumière modulée. La dimension de la source lumineuse est importante pour prédire la visibilité du papillotement.

L'industrie de l'éclairage a toujours jugé qu'il était important de limiter le papillotement des lampes et des luminaires car celui-ci est considéré comme gênant. Les travaux fondateurs de De Lange ont beaucoup servi aux industriels car ils ont abouti à des courbes de variation de la visibilité du contraste temporel en fonction de la fréquence de modulation. Ces courbes ont été obtenues avec des conditions expérimentales compatibles avec le domaine de l'éclairage : source modulée sinusoïdalement, source de petite dimension angulaire (2°) en vision centrale (fovéa), luminance moyenne constante. La courbe de la Figure 45 est issue de l'étude de De Lange (De Lange, 1957). Elle décrit la sensibilité au contraste temporel mesurée sur un sujet (observateur « V ») en 1954 pour plusieurs niveaux d'illumination rétinienne, exprimée en *troland* (Td). Une illumination rétinienne de 1 Td est produite par une source de luminance de 1 cd/m² avec une pupille de 1 mm². Lorsque la pupille est ouverte à un diamètre de 3 mm, la valeur de 1 Td correspond à une source d'environ 0,1 cd/m². Bien que mesurée sur un seul sujet, cette courbe est à la base de plusieurs modèles de perception et d'indices de papillotement très utilisés en éclairage.

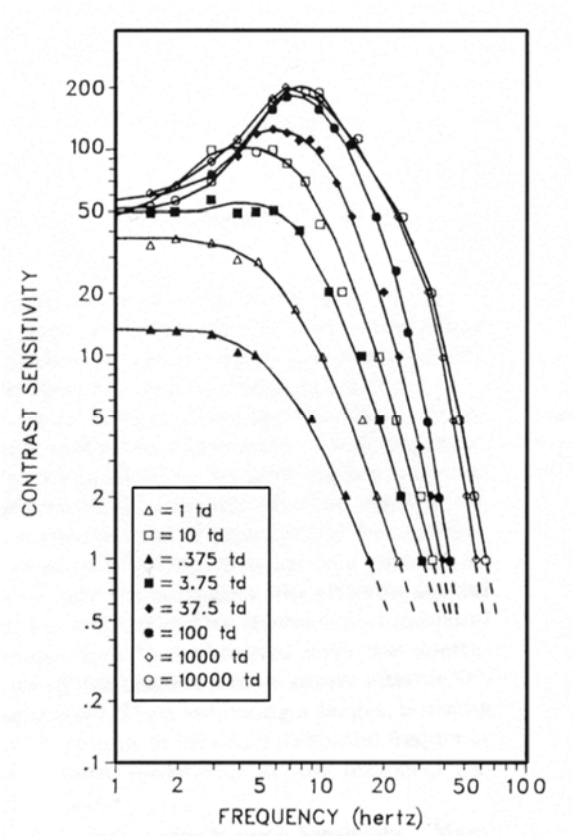


Figure 45 : courbes de sensibilité au contraste temporel

La sensibilité au contraste est exprimée selon l'inverse du pourcentage de modulation : la valeur de 200 correspond à un pourcentage de modulation de 0,5 %. La valeur de 1 correspond à une modulation de 100 %. Cette courbe concerne un observateur unique ayant une petite source de lumière modulée dans son champ de vision central (Source : De Lange, 1957)

Les résultats de De Lange montrent que la fréquence critique de fusion est d'environ 70 Hz pour les niveaux de luminance les plus élevés dans ses expériences, de l'ordre de

1 000 cd/m². Pour des niveaux moins élevés, la fréquence critique de fusion diminue, jusqu'à 20 Hz lorsque la source est très peu lumineuse (0,03 cd/m²).

Pour les niveaux de luminance dépassant 10 cd/m², on constate qu'il existe un maximum de sensibilité lorsque la fréquence de modulation est autour de 10 Hz, et que ce maximum se déplace vers 5 Hz lorsque la luminance diminue. Au maximum de sensibilité, le contraste détectable correspond à un pourcentage de modulation très faible d'environ 0,5 %. Ce phénomène d'amplification de la sensibilité a été qualifié par De Lange de « pseudo-résonance ». Cet effet est attribué à des cellules rétiniennes effectuant un traitement différentiel des signaux neuronaux liés à l'intensité lumineuse.

D'autres travaux plus anciens (Hecht *et al.*, 1933) ont démontré la variation de la fréquence critique de fusion avec la position de la source de lumière modulée dans le champ de vision, l'étendue de la source et le niveau d'éclairement rétinien qu'elle produit. Lorsque ces paramètres varient, la sensibilité au contraste ne fait plus uniquement intervenir les cônes, comme c'est le cas dans les travaux de De Lange (excitation purement fovéale), mais également les bâtonnets, au fur et à mesure que la source de lumière stimule la rétine périphérique.

3.6.2.2.2 Le papillotement en vision périphérique

En vision périphérique, les excitations lumineuses doivent être de plus grande taille pour être visibles car la sensibilité aux petits détails (fréquence spatiale élevée) est plus faible qu'en vision centrale. Elle est liée à la distribution des cellules ganglionnaires beaucoup moins dense sur la rétine périphérique. La fréquence critique de fusion est également plus basse qu'en vision centrale. Par contre, dans ce domaine spatio-temporel plus limité qu'en vision centrale, la sensibilité aux contrastes temporels est plus élevée. Ainsi, la visibilité du papillotement des surfaces observées en vision périphérique (écrans, luminaires, plans de travail éclairés par des lumières modulées, etc.) est plus grande qu'en vision centrale.

3.6.2.2.3 Le papillotement des sources étendues

L'influence de la taille de la source de lumière modulée a été décrite par Kelly dans son étude publiée en 2012 (Kelly, 1972b). Kelly a comparé les courbes de sensibilité au contraste temporel obtenus par De Lange (De Lange, 1958) et Kelly (Kelly, 1961) respectivement avec une petite source (2°) et une source étendue (65°). Les résultats obtenus à haute fréquence, au-dessus de 20 Hz, sont très semblables. Par contre, en dessous de 10 Hz, la sensibilité aux contrastes temporels produits par la source étendue est réduite d'un facteur compris entre 3 et 10. Le pic de sensibilité maximale est également différent : il est situé à environ 10 Hz pour la petite source et à 17 Hz pour la source étendue.

3.6.2.2.4 Le papillotement en vision mésopique

La visibilité du papillotement diminue en condition de faible éclairement (vision mésopique et scotopique). La fréquence critique de fusion est également plus basse. C'est pourquoi le papillotement des anciennes lampes à décharge en éclairage public était peu visible alors que la modulation temporelle de la lumière émise était largement supérieure à celle des lampes utilisées en éclairage intérieur.

3.6.2.2.5 Cas de modulations temporelles non-sinusoïdales

Les travaux de De Lange concernent également la visibilité des modulations temporelles non-sinusoïdales. En effet, celles-ci peuvent être décomposées en composantes sinusoïdales pures (décomposition de Fourier) dont chacune peut être analysée grâce à la courbe de sensibilité de De Lange. Cette méthode repose sur l'hypothèse que le système visuel se comporte comme un système linéaire (Watson, 1986) : la visibilité d'une modulation lumineuse complexe est égale à la somme des visibilités des composantes de la modulation. Cette hypothèse forte a été établie et validée par De Lange puis par Kelly (Kelly, 1961)

De Lange a démontré expérimentalement que la visibilité du papillotement est liée à l'amplitude de la composante fondamentale de Fourier de la forme d'onde et en particulier au

rapport entre cette composante fondamentale et la valeur moyenne de la forme d'onde. De Lange qualifie ce paramètre de « rapport d'ondulation » (*ripple ratio* en anglais). Ce résultat est valable pour la plupart des formes d'onde usuelles (modulations carrée et triangle par exemple), tant que l'amplitude de la composante fondamentale de Fourier est supérieure à toutes les composantes de fréquence plus élevée (De Lange, 1952 ; De Lange 1954).

3.6.2.2.6 Évolution de la visibilité du papillotement avec l'âge

Plusieurs travaux, dont ceux de Rasengane (Rasengane *et al.*,1997), ont mis en évidence que la perception des contrastes temporels n'est pas en place chez le nourrisson et se développe progressivement pendant la petite enfance. Dans cette étude, les nourrissons âgés de 2 et 4 mois par exemple ont une fréquence critique de fusion respective de l'ordre de 13 Hz et 22 Hz.

Chez l'adulte, plusieurs travaux, dont ceux de Casson (Casson *et al.,* 1993), mettent en évidence une diminution avec l'âge de la sensibilité aux contrastes temporels chez des sujets normaux âgés de 20 à 75 ans, pour toutes les fréquences de modulation. Cette baisse de sensibilité est plus importante pour les hautes fréquences temporelles.

L'étude épidémiologique de l'institut Smith-Kettlewell (Brabyn *et al.,* 2001) montre que la fréquence critique de fusion diminue linéairement avec l'âge, de manière assez limitée. Elle était d'environ 50 Hz à l'âge de 20 ans et de 40 Hz à l'âge de 90 ans, soit une diminution de 20 % sur une période de 70 ans. Cette étude a quantifié la diminution de la sensibilité au contraste temporel à 4 Hz et 17 Hz sur le même intervalle d'âges. Cette diminution est très faible entre 20 ans et 60 ans. À partir de 60 ans, elle s'accélère de manière exponentielle. La sensibilité baisse d'un facteur 3 entre 60 et 90 ans.

L'analyse de ces travaux et de travaux effectués sur des singes (Stavros *et al.,* 2008) montre que la sensibilité maximale aux contrastes temporels est atteinte chez l'adolescent et le jeune adulte.

3.6.2.2.7 Existe-t-il une population plus sensible aux contrastes temporels ?

Il existe des populations sensibles à la modulation temporelle de la lumière. Les études portant sur la maturation du système de perception visuelle des contrastes chez l'Homme indiquent que la sensibilité maximale aux contrastes temporels est atteinte chez l'adolescent et le jeune adulte. Il s'agit donc d'une population particulièrement sensible aux lumières modulées.

Certains travaux de recherche signalent qu'il existe une certaine fraction de la population générale capable de percevoir le papillotement de la lumière à une fréquence de modulation de 100 Hz, supérieure à la fréquence critique de fusion habituellement observée (autour de 70 Hz). Hopkinson et Collins ont estimé en 1954 (Collins et Hopkinson ; 1954) qu'avec des niveaux de luminance moyenne de 170 cd/m², le papillotement à 100 Hz pourrait être perçu par :

- 1 personne sur 150 lorsque le pourcentage de modulation est d'environ 35 % ;
- 1 personne sur 34 lorsque le pourcentage de modulation est d'environ 65 % ;
- 1 personne sur 14 lorsque le pourcentage de modulation est d'environ 95 %.

Une étude plus récente de Bullough (Bullough *et al.,* 2011), portant sur 10 sujets exposés à des sources de lumière modulée à base de LED, a confirmé que le pourcentage des sujets percevant les modulations à 100 Hz est faible, inférieur à 10 %, mais pas nul.

3.6.2.2.8 Les indices de visibilité du papillotement

Différents indices de papillotement ont été introduits dans des normes électrotechniques (normes IEC, par exemple (IEC, 2017)) et des normes d'éclairage (publications CIE). Ces indices servent à évaluer la visibilité du papillotement d'une source de lumière, lampe ou luminaire. Ces indices sont présentés et détaillés dans l'Annexe 2 de ce rapport.

Tous les indices de visibilité du papillotement supposent de manière intrinsèque que la perception des contrastes temporels est un phénomène linéaire et invariant dans le temps.

L'indice de sévérité à court terme du papillotement, P_{st}^{lum} a été bâti par l'IEC à partir du modèle de De Lange avec des contributions importantes de Rashbass (Rashbass, 1970). Les travaux de Rashbass ont mis en lumière la constante de temps impliquée dans l'intégration par le système visuel d'excitations lumineuses courtes. Cette constante de temps est de l'ordre de 150 ms à 250 ms. Ces travaux ont également mis en évidence que la superposition des excitations lumineuses élémentaires est associée à une visibilité qui est proportionnelle à la somme quadratique (somme des carrés) des visibilités de chaque excitation. L'indice P_{st}^{LM} est donc très fidèle aux travaux bien établis de visibilité des contrastes temporels, dans les conditions de De Lange : observation directe d'une petite source placée au centre du champ de vision (excitation purement fovéale) dans des conditions photopiques.

La valeur seuil de l'indice P_{st}^{LM} a été définie à 1. Ainsi, lorsque $P_{st}^{LM} = 1$, le papillotement d'une source de lumière correspond à celui d'une lampe à incandescence de 60 W vue par un observateur normal moyen : 50 % des observateurs ne perçoivent pas de papillotement, 50 % des observateurs perçoivent le papillotement. Lorsque $P_{st}^{LM} < 1$, la source de lumière provoque un papillotement plus faible qu'une lampe à incandescence de 60 W pour l'observateur moyen. Lorsque $P_{st}^{LM} > 1$, la source de lumière provoque un papillotement plus élevé qu'une lampe à incandescence de 60 W pour l'observateur moyen.

L'indice P_{st}^{LM} normalisé par l'IEC et accepté par la CIE dans sa note technique récente (CIE, 2016) est bien établi. Cependant, il est valable uniquement en vision centrale, pour une petite source (fréquence spatiale élevée) et en condition de jour (vision photopique). Il n'est pas fidèle au papillotement perçu en vision périphérique ou pour les grandes surfaces (plans de travail éclairés par de la lumière modulée) ou bien encore à faible éclairement (éclairage public).

En se basant sur la limite de visibilité du papillotement $P_{st}^{LM} = 1$, il est possible de déterminer le pourcentage de modulation limite en fonction de la fréquence de modulation. Ainsi, pour une modulation sinusoïdale, la Figure 46 indique le pourcentage de modulation minimal pour que le papillotement soit en limite de visibilité selon le critère IEC. Pour une modulation sinusoïdale, le pourcentage de modulation est de 3,6 % à 1 Hz, atteint un minimum de 0,4 % vers 10 Hz (domaine de visibilité maximale), 2,6 % à 40 Hz et augmente ensuite rapidement à 100 % à 70 Hz. À partir de 70 Hz, l'indice P_{st}^{LM} est toujours nul, ce qui traduit que le papillotement n'est plus visible, même avec une modulation maximale de 100 %.

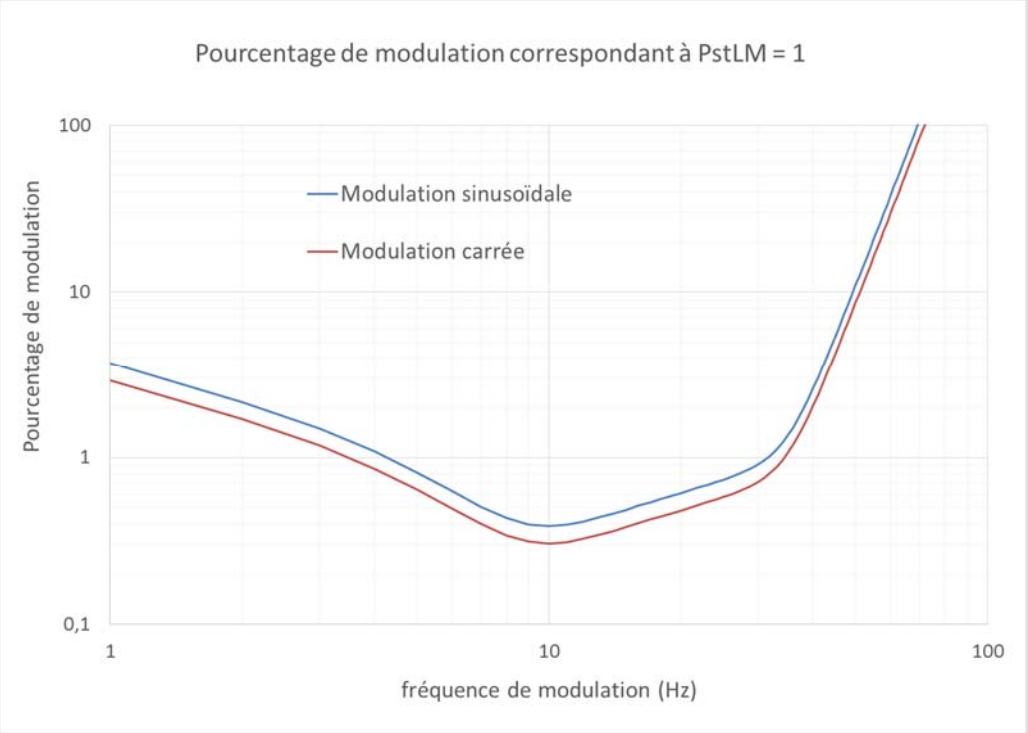


Figure 46 : pourcentage de modulation en fonction de la fréquence de modulation

Conditions : en limite de visibilité de papillotement selon le critère de l'IEC (P_{st}^{LM}=1) pour une modulation sinusoïdale (courbe bleue) et pour une modulation carrée (courbe rouge)

Des travaux sur la visibilité du papillotement continuent donc à être effectués, le plus souvent sous l'impulsion d'industriels de l'éclairage et des systèmes d'affichage électronique (Lin *et al.,* 2014). Ainsi, Bodington *et al.* ont introduit en 2015 (Bodington *et al.*, 2015) une modification de l'indice Pst de l'IEC. Ce nouvel indice, non normalisé, a été proposé à l'agence de protection de l'environnement américaine (EPA) pour décrire la limite acceptable de papillotement des lampes (EPA, 2017). Un nouvel indice de visibilité du papillotement appelé FVM, « *flicker visibility metrics* », a également été proposé en 2017 par Perz *et al.* (Perz *et al.,* 2017) à partir d'expériences menées sur deux groupes de 17 et 20 sujets placés dans des conditions d'éclairage de bureau et observant un mur blanc éclairé par des luminaires modulés temporellement. L'étude a permis dans un premier temps de construire empiriquement une courbe de sensibilité au contraste temporel qui s'avère proche du modèle de De Lange. Dans un second temps, l'indice de visibilité a été défini grâce à une sommation quadratique pondérée de chaque composante fréquentielle du spectre de la modulation temporelle. L'indice obtenu permet ainsi de tenir compte de la forme d'onde de la modulation temporelle (carrée, sinusoïdale, etc.) et de son rapport cyclique. Cet indice n'est pas encore normalisé.

3.6.2.2.9 Le papillotement chromatique

Le papillotement chromatique (*chromatic flicker* en anglais) est le phénomène de perception visuelle d'une modulation temporelle de la couleur ou du spectre d'un stimulus lumineux.

La sensibilité à la modulation temporelle chromatique de la lumière a été étudiée depuis le début du XXème siècle. On en trouve une description dans l'étude de Van Der Horst (Van Der Horst, 1696). Le papillotement chromatique peut être expérimentalement mis en évidence en faisant alterner deux stimuli de couleur différente. Les courbes de sensibilité aux contrastes chromatiques en fonction de la fréquence de modulation ne possèdent pas de pic, à l'inverse des courbes de sensibilité aux contrastes de luminance (*cf.* Figure 45, courbe de De Lange). Ainsi, la sensibilité aux contrastes temporels chromatiques décroit de manière monotone entre les basses fréquences et les hautes fréquences.

La fréquence temporelle à laquelle l'observateur ne perçoit plus de variation temporelle de couleur, mais seulement une couleur intermédiaire, est appelée la fréquence critique de fusion chromatique (CCFF pour *Chromatic Fusion Flicker Frequency* en anglais). Le phénomène est sensible à l'écart de chromaticité entre les deux stimuli et à leur déphasage temporel. Ainsi, pour une modulation de lumière rouge alternant avec du vert (615 nm / 549 nm), la CCFF vaut environ 25 Hz.

Les travaux de Kelly publiés en 1962 (Kelly, 1962) indiquent qu'aux niveaux photopiques, la sensibilité visuelle aux contrastes temporels est différente selon les couleurs des *stimuli*. Ce phénomène est expliqué par des temps de réponse du système visuel différents selon les longueurs d'onde. Ainsi, lorsque l'œil est adapté à la lumière blanche :

- la sensibilité aux basses fréquences (4 Hz – 7 Hz) augmente lorsque la modulation de couleur se situe vers le bleu ;
- la sensibilité aux fréquences intermédiaires (10 Hz – 15 Hz) augmente lorsque la modulation de couleur se situe vers le vert ;
- la sensibilité aux fréquences élevées (20 Hz – 30 Hz) augmente lorsque la modulation de couleur se situe vers le rouge.

Lors de l'analyse bibliographique effectuée pour la rédaction de ce rapport, aucune étude concernant le papillotement chromatique des LED n'a été trouvée. Cependant, plusieurs articles portent sur les modifications du spectre de la lumière émise lorsque le mode d'alimentation des LED passe du courant continu (pas de modulation temporelle) à une modulation temporelle de type PWM (forme d'onde carrée de rapport cyclique variable). Ainsi, l'étude de Dyble *et al.* (Dyble, 2005) et l'étude de Almeida *et al*. (Almeida, 2011) font état de modifications de la couleur de la lumière émise, corrélées à des modifications de la modulation temporelle, en lien avec des modes d'alimentation électrique différents. Cependant, les fréquences de modulation utilisées étaient bien supérieures à la fréquence de fusion chromatique et aucun phénomène de papillotement chromatique n'a été rapporté par les auteurs.

Le phénomène de papillotement chromatique a été mis à profit dans la technique dite du minimum de papillotement hétérochrome (HFP pour *Heterochromatic Flicker Photometry* en anglais) inventée au début du XXème siècle par Frederick Ives (Ives, 1912). C'est la technique qui a été utilisée pour mesurer la sensibilité spectrale de l'œil humain, en condition photopique (détermination expérimentale de la courbe V(λ) normalisée par la CIE en 1913), en condition scotopique et plus récemment en condition mésopique (Viénot, 1992). La technique consiste à produire une alternance de deux couleurs à des fréquences de l'ordre de10 Hz ou 20 Hz et de faire ajuster par l'observateur la luminance respective de chaque stimulus, ainsi que leur déphasage temporel, dans le but d'éliminer le phénomène de papillotement.

3.6.2.3 L'effet stroboscopique

L'effet stroboscopique est une modification de la perception visuelle ressentie par un observateur statique lors du mouvement d'un objet éclairé par une lumière modulée.

Lorsque l'objet en mouvement est une machine tournante ou oscillante, la lumière modulée peut « interférer » avec le mouvement de l'objet et produire un mouvement apparent plus lent ou inversé. Dans certaines conditions, l'objet en mouvement peut paraître stationnaire. Il s'agit d'un effet faisant intervenir la sensibilité du système visuel aux contrastes spatiaux produits par un éclairage modulé. Les contrastes spatiaux sont liés aux motifs périodiques qui apparaissent lors du mouvement d'un objet sous ce type d'éclairage.

Lorsque l'objet en mouvement est une partie du corps humain (bras, main, doigt) passant devant l'œil, cet effet est typiquement observable pour des fréquences de modulation comprises entre 80 Hz et 2 000 Hz (NEMA, 2017). L'observateur perçoit alors une décomposition du mouvement.

L'effet stroboscopique a été étudié précisément par Bullough *et al.* dans une série de publications (Bullough *et al.,* 2011 ; Bullough *et al.,* 2012, Bullough *et al.,* 2016). Ces travaux ont permis d'établir des domaines de fréquence et de pourcentage de modulation correspondant à la visibilité de cet effet ainsi qu'à son acceptation par un panel d'observateur. Les auteurs ont confirmé que la visibilité de l'effet stroboscopique, révélé par le mouvement d'une règle ou d'un métronome dans le champ de vision (*cf.* Figure 47) est susceptible de varier en fonction de la fréquence de modulation, du pourcentage de modulation, de la forme d'onde de la modulation et de son rapport cyclique :

- **influence de la fréquence de modulation** : une forte dépendance de l'effet stroboscopique à la fréquence de modulation a été mise en évidence dans les travaux de Bullough *et al.*, entre 100 Hz et 1 000 Hz. La détection est possible au-delà de 1 000 Hz pour des pourcentages de modulation très élevés et/ou des objets en mouvement plus rapides que ceux utilisés dans ces études ;
- **influence du pourcentage de modulation** : l'effet stroboscopique est également fortement dépendant du pourcentage de modulation. Plus il est élevé, plus l'effet sera visible ;
- **influence de la forme d'onde** : l'étude décrite dans (Bullough *et al.,* 2011) ne montre pas de différence significative de perception de l'effet stroboscopique entre des formes d'onde rectangulaire et sinusoïdale rectifiée de même pourcentage de modulation ;
- **influence du rapport cyclique :** les études de Bullough *et al.* montrent qu'un rapport cyclique différent de 50 %, valeur normalement observée avec des lampes et luminaires utilisés sans gradateur, modifie la perception de l'effet stroboscopique. Des différences de perception modestes ont été trouvées par les auteurs entre un rapport cyclique faible de 10 % et un rapport cyclique standard de 50 %, tous les autres paramètres ci-dessus étant égaux par ailleurs.

Figure 47 : configuration expérimentale utilisée par Bullough *et al.*

Source : Bullough *et al.*, 2011

Les résultats de Bullough *et al*. (Bullough *et al*., 2012) sont résumés dans la Figure 48 et la Figure 49. Ces figures montrent respectivement les domaines de visibilité et d'acceptabilité de l'effet stroboscopique en fonction de la fréquence et du pourcentage de modulation. Ils ont été obtenus à partir d'un panel de 10 observateurs.

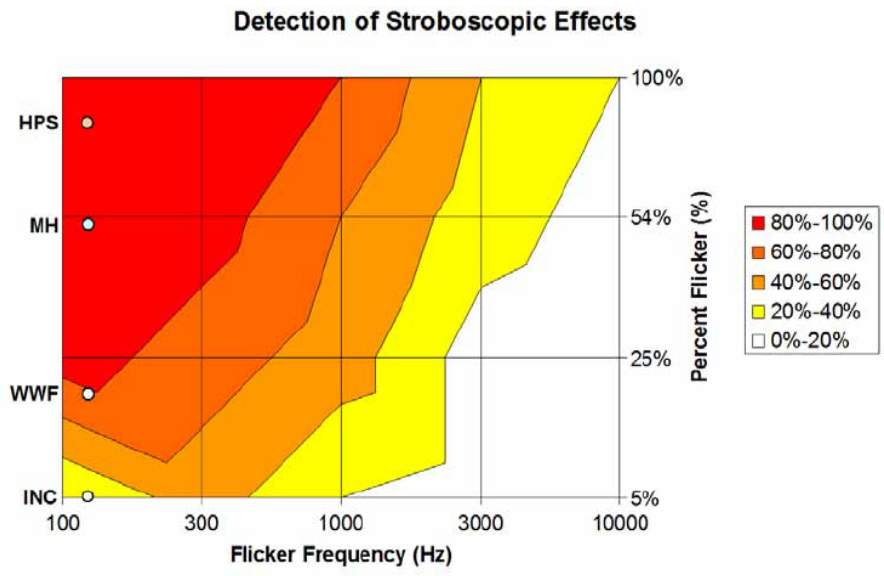


Figure 48 : pourcentages moyens de détection de l'effet stroboscopique en fonction de la fréquence et du pourcentage de modulation variable

Source : Bullough, 2012

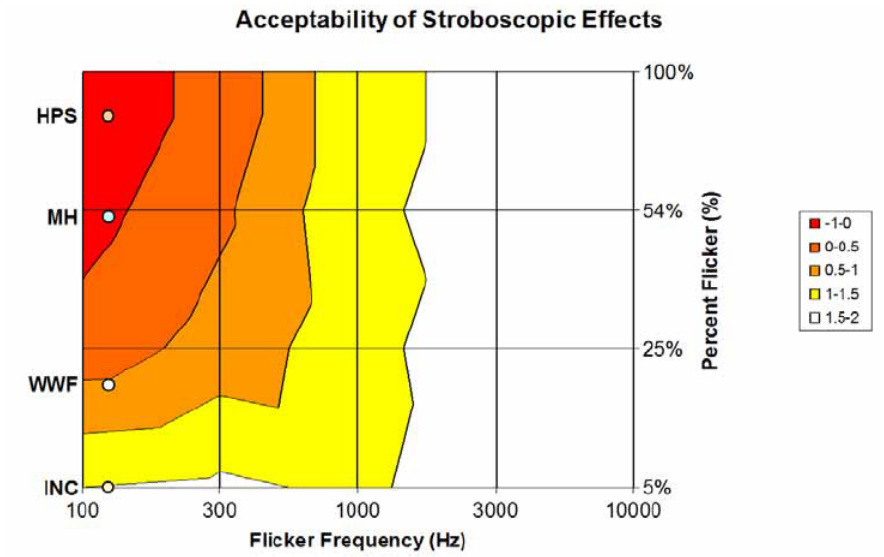


Figure 49 : scores d'acceptabilité moyens de l'effet stroboscopique en fonction de la fréquence et du pourcentage de modulation variable

+2 : très acceptable ; +1 : plutôt acceptable

0 : ni acceptable, ni inacceptable

-1 : plutôt inacceptable ; -2 : très inacceptable

Source : (Bullough et al., 2012)

L'analyse du premier graphe (*cf.* Figure 48) publié par Bullough indique que l'observateur moyen était capable de détecter l'effet stroboscopique avec un pourcentage de modulation d'au moins 10 % à 100 Hz. La fréquence limite de visibilité définie pour 50 % des observateurs était d'environ 2 500 Hz.

Le second graphe publié par Bullough (*cf.* Figure 49) montre que les observateurs jugent en moyenne qu'il est acceptable de percevoir un léger effet stroboscopique. À la fréquence de

100 Hz, le pourcentage de modulation en limite d'acceptabilité (valeur 0 sur le graphe de la Figure 49) était de l'ordre de 39 %. La fréquence limite d'acceptabilité était d'environ 300 Hz.

Les résultats de Bullough *et al.* ont été repris par le consortium américain *Assist* dans ses recommandations concernant l'effet stroboscopique.

Les travaux de Perz *et al.* de 2015 (Perz *et al.,* 2015) ont permis d'établir empiriquement un indice de visibilité de l'effet stroboscopique : l'indice SVM (*stroboscopic visibility measure* en anglais). Cet indice a été bâti avec l'objectif de prendre en compte les caractéristiques complexes de la modulation temporelle, comme par exemple un rapport cyclique différent de 0,5. Il a été établi à partir de plusieurs séries d'expériences menées sur des sujets à partir d'un dispositif rotatif comportant une cible tournant à une vitesse constante correspondant à la vitesse maximale de déplacement de la main au cours d'un travail de bureau (vitesse maximale évaluée à 4 m/s). La Figure 50 montre une photographie du système rotatif utilisé.

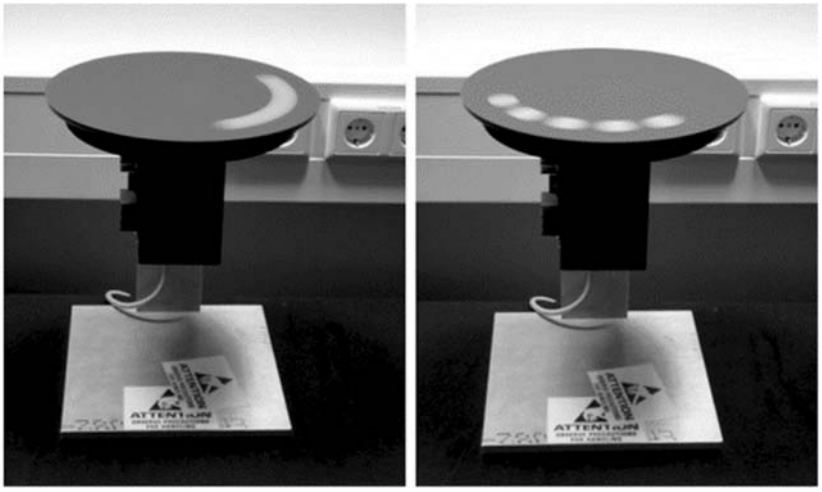


Figure 50 : expérience utilisée pour évaluer la visibilité de l'effet stroboscopique

Disque rotatif noir avec motif circulaire blanc. Sur l'image de gauche, l'éclairage ne présente aucune modulation temporelle. Sur l'image de droite, l'éclairage est modulé temporellement.

Source : Perz et al., 2015

Les expériences ont été menées dans des conditions d'éclairage intérieur avec un éclairement d'environ 500 lx. Plusieurs séries d'expériences différentes ont permis d'établir, d'une part la sensibilité visuelle de l'effet stroboscopique pour des modulations purement sinusoïdales en fonction de la fréquence, et d'autre part la formule de sommation des composantes fréquentielles pondérées dans le cas de modulations lumineuses non sinusoïdales (formes d'onde carrée, triangle, etc. ; rapport cyclique éventuellement différent de 0,5). La formule de sommation fait apparaître une sommation de type Minkowski avec un exposant 3,7.

En se basant sur la limite de visibilité de l'effet stroboscopique SVM = 1, il est possible de déterminer le pourcentage de modulation limite en fonction de la fréquence de modulation. Ainsi, pour une modulation sinusoïdale, la Figure 51 indique le pourcentage de modulation minimal pour que l'effet stroboscopique soit en limite de visibilité selon le critère SVM = 1. Pour une modulation sinusoïdale, le pourcentage de modulation limite est minimal (visibilité maximale de l'effet stroboscopique) à 80 Hz. Au-delà de 80 Hz, la limite augmente régulièrement pour atteindre 100 % à partir d'environ 1 000 Hz. À partir de 1 000 Hz, l'indice SVM devient très faible, ce qui traduit que l'effet stroboscopique n'est plus visible, même avec une modulation maximale de 100 %. Cette valeur limite de 1 000 Hz est en accord avec les résultats de Bullough *et al.*

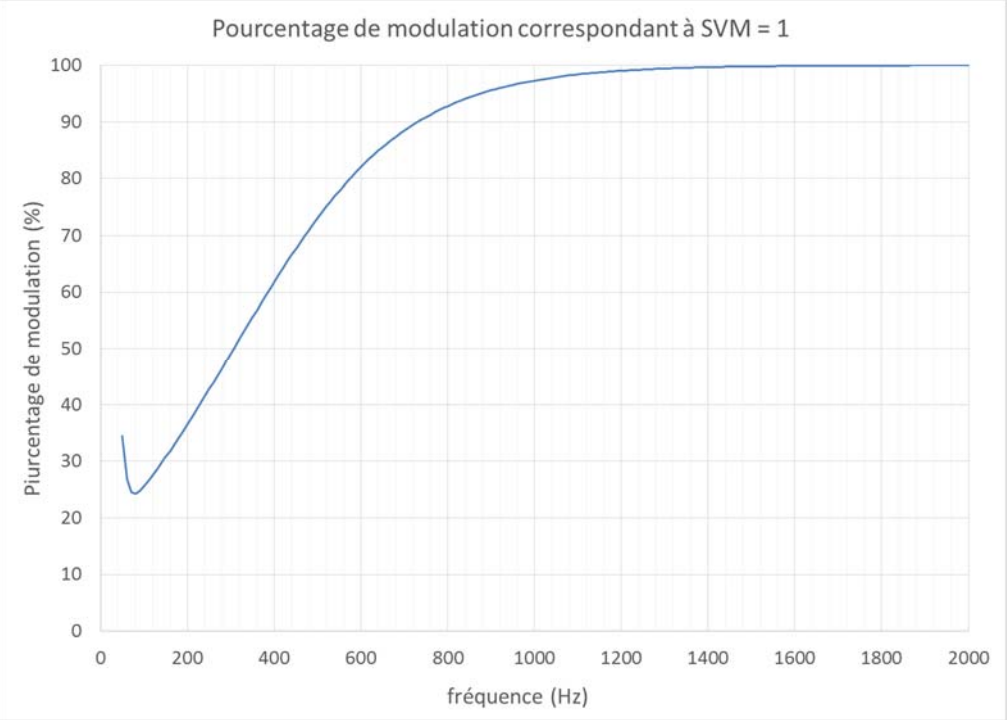


Figure 51 : pourcentage de modulation en fonction de la fréquence de modulation

Conditions : en limite de visibilité de l'effet stroboscopique selon le critère SVM = 1 pour une modulation sinusoïdale.

Source : Perz et al., 2015

On note qu'à la fréquence de modulation de 100 Hz, la plus importante actuellement pour les lampes et luminaires à LED, le seuil de visibilité de l'effet stroboscopique (critère SVM = 1) correspond à un pourcentage de modulation d'environ 25 %.

On constate que les seuils de pourcentage de modulation définis par le critère SVM = 1 sont environ deux fois plus élevés que ceux rapportés par Bullough (Bullough *et al.*, 2012). Selon Perz *et al.*, cette différence pourrait s'expliquer par l'utilisation de cibles de test différentes dans les études de ces deux équipes (Perz *et al.,* 2015).

Comme l'équipe de Bullough, l'équipe de Perz a également testé l'acceptabilité de l'effet stroboscopique en situation de travail de bureau (Perz *et al.*, 2017b) Les auteurs proposent une limite d'acceptabilité SVM = 1,5, différente de la limite de visibilité SVM = 1. Avec une modulation sinusoïdale à la fréquence de 100 Hz, cette limite correspond à un pourcentage de modulation d'environ 38 %. Perz *et al.* soulignent que cette limite est en accord avec la limite d'acceptabilité publiée par Bullough *et al.* (Bullough *et al.*, 2012) et correspondant à environ 39 % à 100 Hz.

La communication de Perz *et al.* (Perz *et al.*, 2017b) propose de définir la limite d'acceptabilité de l'effet stroboscopique, exprimée en valeur d'indice SVM, en fonction du temps d'exposition à cette effet (maximum de 8 h) et en fonction de la vitesse des mouvements de la main (lente, moyenne, rapide). Dans une expérimentation pilote, d'envergure limitée, portant sur l'éclairage hôtelier, les auteurs ont abouti aux résultats suivants :

- mouvements à vitesses moyenne et rapide (marches, préparation des repas, sports) : la limite d'acceptabilité de l'effet stroboscopique est SVM = 1 ;
- mouvements à vitesses moyennes (tâches de bureau, marche lente, lecture) : la limite d'acceptabilité de l'effet stroboscopique varie entre SVM = 1,3 et SVM = 1,5 ;

- mouvements de montée et descente d'un ascenseur : la limite d'acceptabilité de l'effet stroboscopique est SVM = 2,3.

L'indice SVM a été récemment normalisé par plusieurs organismes de normalisation comme IEC et NEMA (voir la partie concernant la normalisation et la réglementation dans l'Annexe 2 de ce rapport pour plus de détails sur les normes concernées).

3.6.2.4 L'effet de réseau fantôme

L'effet de réseau fantôme (*phantom array effect*) est une modification de la forme ou de la position d'un objet induit par la modulation de la lumière pour un observateur non statique dans un environnement statique. L'effet de réseau fantôme apparaît notamment pendant que l'œil effectue une saccade (une saccade oculaire est un bref et rapide mouvement des yeux entre deux positions stables) en présence d'une source de lumière modulée dans le champ de vision.

Il a été décrit par Hershberger en 1987 (Hershberger, 1987 ; Herschberger 1998). Ces travaux indiquent que cet effet a été visualisé par des observateurs jusqu'à des fréquences de modulation de 500 Hz, ce qui a permis à ces observateurs de détecter visuellement la modulation temporelle à cette fréquence.

Dans des travaux récents consacrés à la caractérisation de cet effet (Roberts *et al.*, 2013), les auteurs ont montré que des sujets effectuant des saccades visuelles perçoivent la modulation temporelle d'une source de lumière jusqu'à des fréquences de 2 500 Hz.

On retrouve une identification de ce phénomène par Davis *et al.* (Davis *et al.*, 2015). Les auteurs ont mis en évidence que des sujets peuvent percevoir la modulation temporelle d'un écran ayant une fréquence de rafraichissement d'images de 500 Hz lorsque l'image affichée possède des fréquences spatiales élevées (contours fins bien contrastés). La détection de la modulation temporelle de l'écran est également attribuée par les auteurs aux saccades de l'œil de l'observateur.

La Figure 52 illustre ce phénomène dans le cas de la vision d'un feu automobile arrière à LED émettant de la lumière modulée à 200 Hz.

Figure 52 : illustration de l'effet de réseau fantôme

Source : Miller et al., 2015

Dans leurs travaux (Roberts et Wilkins, 2013), Roberts et Wilkins ont étudié dans une série d'expériences menées sur 11 sujets la perception d'une source de lumière modulée lorsque l'œil effectue des saccades rapides (environ 500 °/s) de grande amplitude (de 20° à 40°) devant la source. Les expériences ont été effectuées dans une salle dont l'éclairement ambiant était d'environ 50 lx. Cette valeur est relativement basse mais a été choisie pour

étudier la détection de l'effet de réseau fantôme dans des conditions typiques de conduite automobile de nuit.

Dans ces conditions, les sujets ont pu détecter que la lumière était modulée, alors que la modulation était imperceptible sans effectuer de saccade. La fréquence maximale de perception de l'effet de réseau fantôme était de 1,98 kHz lorsque le pourcentage de modulation était de 100 %. À la fréquence de 120 Hz, l'effet était perceptible quand le pourcentage de modulation dépassait seulement le seuil de 10 %.

La visibilité de l'effet de réseau fantôme n'a pas été investiguée à la fréquence de modulation de 100 Hz par Roberts et Wilkins mais à la fréquence de 120 Hz, correspondant aux modulations observées le plus souvent pour les lampes et luminaires à LED alimentés en 60 Hz (aux États-unis et au Japon par exemple). Cependant, le pourcentage de modulation limite de visibilité de cet effet est une valeur relativement faible (10 %) qui peut approcher très raisonnablement la valeur qui aurait été observée à 100 Hz. On constate ainsi que cette limite de visibilité est inférieure à la moitié de la limite de visibilité de l'effet stroboscopique défini par SVM = 1, même si les deux limites n'ont pas été obtenues dans les mêmes conditions expérimentales (éclairement > 100 lx pour la limite de l'effet stroboscopique et éclairement de l'ordre de 1 lx pour l'effet de réseau fantôme). On peut donc raisonnablement supposer que l'effet de réseau fantôme est plus visible que l'effet stroboscopique à la fréquence de 100 Hz, même si ce type d'hypothèse comparative nécessiterait une étude expérimentale spécifique menée dans des conditions identiques pour les deux effets.

Pour expliquer la nature physiologique de l'effet de réseau fantôme, les auteurs avancent l'hypothèse d'une action de la lumière modulée sur le mécanisme neuronal de suppression saccadique. Il 'agit d'un mécanisme biologique qui intervient naturellement entre le début et la fin d'une saccade, de manière à éviter de voir flou pendant celle-ci : l'acuité visuelle est temporairement réduite pendant la saccade.

La lumière modulée réduirait donc le réflexe de suppression saccadique, rendant visible une série d'images intermédiaires pendant le mouvement. Wilkins et Roberts ont montré qu'il est possible d'estimer le nombre d'images fantômes perçues lors d'une saccade en calculant la fréquence spatiale correspondant au produit de la vitesse angulaire de la saccade par la fréquence de modulation temporelle.

Une publication parue en 2016 (Lee *et al.* 2016) fait état d'une plus grande sensibilité à l'effet de réseau fantôme pour la lumière rouge, en comparaison avec le bleu. Par ailleurs, ce travail rapporte également une plus grande sensibilité à cet effet visuel lorsque la source de lumière modulée est plus lumineuse et occupe un champ de vision plus petit.

La même équipe de chercheurs a mis en évidence, dans une publication de 2017, un phénomène plus général d'effet de « réseau fantôme stroboscopique » lorsque l'observateur effectue des saccades visuelles en présence d'une source de lumière modulée elle-même en mouvement (Lee *et al.,* 2017). Dans ce travail, les auteurs ont voulu être plus proches des conditions expérimentales de conduite de nuit, lorsque les feux automobiles émettant de la lumière modulée se déplacent lorsque l'observateur effectue une saccade.

Ce travail montre que la perception de l'effet combiné de réseau fantôme stroboscopique peut se produire jusqu'à des fréquences plus élevées, de l'ordre de 4 000 Hz dans les conditions expérimentales utilisées. Pendant la saccade, la vitesse relative entre la source mobile de lumière modulée et les yeux est un paramètre important. Ainsi, la fréquence maximale de détection de la modulation temporelle augmente linéairement avec la vitesse de la source de lumière modulée.

3.6.2.5 Modification des mouvements oculaires et baisse des performances visuelles

Des effets non visuels de la modulation temporelle sont liés à des phénomènes trop rapides pour être perçus visuellement (fréquences de modulation supérieures à la fréquence critique

de fusion) mais néanmoins détectés par l'œil puis transmis au cerveau. Certains auteurs dans le domaine de la psychologie utilisent le terme de « perception subliminale » pour qualifier ce type d'effet (Knez, 2014). On trouve également dans la littérature scientifique anglophone la dénomination « *invisible flicker* » (Shady *et al.,* 2004).

Ce terme n'est plus utilisé depuis que la CIE a défini le terme « *flicker* » (papillotement) comme étant un effet uniquement visuel de la modulation temporelle de la lumière.

Les travaux de Burns (Burns, 1992) et Berman (Berman, 1991) ont montré que la lumière modulée à des fréquences comprises entre 100 Hz et 200 Hz, non perceptibles car supérieures à la fréquence critique de fusion, induit une activité électrique de la rétine détectable par électrorétinogramme (ERG). L'exposition à la lumière modulée est également détectable par électroencéphalogramme (EEG) comme le démontrent plusieurs travaux depuis les travaux de Regan en 1968 (Regan, 1968).

Plus récemment, une activité cérébrale induite par une modulation chromatique visuellement imperceptible a été détectée grâce à l'imagerie fonctionnelle à résonance magnétique nucléaire (fMRI) (Jiang *et al.*, 2007).

Les travaux de Shady (Shady*et al.,* 2014) ont révélé que l'exposition préalable pendant quelques minutes à la lumière modulée au-delà de la fréquence critique de fusion peut modifier la perception visuelle des contrastes de luminance et de couleur. Dans cette étude, une réduction de la visibilité du papillotement à 30 Hz a été observée après une exposition préalable de deux minutes à des fréquences de modulation de l'ordre de 60 Hz qui n'étaient pas perceptibles dans la configuration expérimentale utilisée. Ces résultats indiquent que l'exposition à la lumière modulée de manière non perceptible peut modifier la sensibilité du système visuel aux contrastes temporels.

La norme américaine IEEE 1789 (IEEE, 2015) rappelle qu'il existe plusieurs travaux établissant de manière solide que l'exposition à la lumière modulée entre 100 Hz et 120 Hz (les fréquences de modulation les plus couramment produites par les lampes et luminaires) avec des pourcentages de modulation d'environ 35 % perturbe les saccades oculaires et réduit les performances visuelles en comparaison avec des sources sans modulation ou avec une modulation à haute fréquence (> 40 kHz) avec un pourcentage de modulation inférieur à 4 %. On peut citer par exemple l'étude de Wilkins (Wilkins,1986) et celle de Kennedy et Murray (Kennedy et Murray, 1991). L'étude de Wilkins a été menée en utilisant un dispositif de suivi du regard durant une tâche de lecture. L'étude a montré que l'éclairage en lumière modulée augmente la longueur des saccades d'une distance équivalente à la largeur d'un caractère.

Dans l'étude menée par Veitch *et al.* (Veitch *et al.,* 1995), les performances visuelles d'un échantillon de 48 étudiants ont été évaluées sous deux types d'éclairage : tubes fluorescents exhibant de la modulation temporelle à 120 Hz et tubes fluorescents modulés à très haute fréquence (20 - 60 kHz). Bien que le papillotement des tubes à 120 Hz n'était pas perceptible, les performances visuelles des sujets étaient plus faibles sous ce type d'éclairage. L'étude de Jaen *et al.* (Jaen *et al.,* 2011), menée également sur des sujets jeunes (20 - 22 ans) a confirmé la baisse des performances visuelles liées à des tâches effectuées sous un éclairage produisant de la lumière modulée à 100 Hz avec un pourcentage de modulation de 32 %, par rapport à un éclairage identique mais présentant une modulation lumineuse très faible à 100 Hz.

3.6.3 Effets sanitaires de la modulation temporelle de la lumière

Différents effets sanitaires résultant de l'exposition à de la lumière modulée ont été mis en évidence dans les publications scientifiques. Ces effets peuvent être induits directement par des effets visuels (accidents avec des machines et crises d'épilepsie par exemple).

Dans d'autres cas, il s'agit d'effets sanitaires apparaissant sans perception consciente d'une quelconque modulation (migraines et maux de tête par exemple).

3.6.3.1 Accidents avec des machines et des outils

L'effet stroboscopique est produit par l'interaction entre un objet en mouvement et un éclairage modulé temporellement. Il est à l'origine d'un risque lié à la sécurité des machines ou des outils, dans un contexte industriel ou domestique. En effet, le mouvement apparent de machines tournantes ou oscillantes peut être modifié par rapport à la réalité (inversion, ralentissement ou arrêt des mouvements apparents). Les machines concernées peuvent être des machines de découpe ou de perçage par exemple. Il peut également s'agir d'outils ménagers comme les robots de cuisine ou les mixers (Chartered Institution of Building Services Engineers, CIBSE, 2016).

3.6.3.2 Accidents de conduite de véhicule

En situation de conduite de véhicule, la perception d'effets visuels comme l'effet stroboscopique et l'effet de réseau fantôme est susceptible de distraire le conducteur. Cette distraction a été constatée par de nombreux conducteurs de manière anecdotique lors de l'apparition de feux rouges arrière à LED sur les automobiles. Ces feux sont modulés à des fréquences assez élevées, typiquement 200 Hz, et peuvent produire des effets stroboscopiques et de réseaux fantômes.

Aucune étude scientifique n'a encore été menée sur la distraction du conducteur causée par ces phénomènes.

3.6.3.3 Déclenchement de crises d'épilepsie

Le déclenchement de crises d'épilepsie par la lumière modulée est un phénomène très bien connu et documenté dans la littérature scientifique. On trouve une liste de références bibliographiques détaillée dans la norme IEEE 1789 ainsi que dans le rapport d'expertise préliminaire du Scheer sur les risques sanitaires des LED dont une version provisoire a été publiée en 2017 (Scheer, 2017). Le déclenchement de crises d'épilepsie est le risque qui a été étudié de manière la plus détaillée dans la norme américaine IEEE 1789.

Ce phénomène n'est pas du tout lié à une technologie particulière d'éclairage, d'affichage ou de projection d'images. Il se produit typiquement lors de la vision de flashs intenses de lumière (émis par une lampe stroboscopique par exemple) ou de la succession très rapide d'images fortement contrastées pendant un film, un jeu vidéo ou un dessin animé. Par exemple, en 1995 au Japon, un épisode du dessin animé *Pokemon* a déclenché une crise d'épilepsie chez 560 enfants après l'exposition à une séquence de quatre secondes contenant une alternance d'images bleues et rouges à la fréquence de 12,5 Hz (Fisher *et al.,* 2005).

Une étude récente (BRNA, 2017) décrit le cas d'une personne qui subit de manière reproductible une crise d'épilepsie lors de l'exposition aux flashs lumineux d'un téléphone mobile. Ces flashs servent à réduire le phénomène des yeux rouges avant une prise de photographie.

Le déclenchement de crises d'épilepsie par la lumière modulée est très bien corrélé à la sensibilité du système visuel humain au contraste temporel et donc à la sensation de papillotement. La Figure 53, tirée de l'étude de Wilkins (Wilkins *et al.*, 2010) et construite sur les données extraites de l'étude de Harding (Harding et Jeavons, 1994), montre le pourcentage de sujets, sur un échantillon de 170 personnes, exhibant un EEG épileptiforme pendant une exposition à une lumière modulée à une fréquence donnée. Cette courbe a un maximum situé autour de 15 Hz qui est également le maximum de sensibilité du système visuel au contraste temporel (voir section 3.6.2.2.1). Le domaine des fréquences de modulation susceptible de déclencher des crises d'épilepsie est compris entre 3 et 70 Hz. Cependant, les fréquences comprises autour de 15 Hz sont les plus critiques.

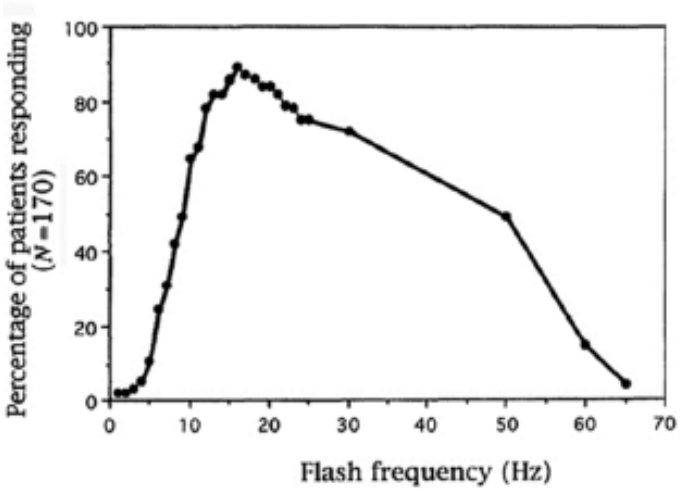


Figure 53 : pourcentage des patients ayant un EEG épileptiforme en réponse à une modulation temporelle d'une lampe à décharge en fonction de la fréquence de modulation des impulsions lumineuses

Outre la fréquence de modulation de la lumière, Fisher *et al.* (Fisher *et al.,* 2005) recensent plusieurs facteurs qui affectent la probabilité de déclenchement de crises d'épilepsie :

- la luminance moyenne de la lumière modulée ; le risque augmente avec le logarithme de la luminance au-delà de 1 cd/m². Il y a des risques avec des niveaux lumineux en dessous de 1 cd/m² ;
- le pourcentage de modulation : plus il est élevé, plus le risque de déclenchement est élevé ;
- le spectre et la couleur de la lumière modulée : les modulations temporelles de couleur sont d'autant plus critiques que les variations de chromaticité sont importantes (variations rapides entre rouge et bleu par exemple) ;
- le contraste avec l'éclairage ambiant. Des contrastes supérieurs à 10 % présentent un risque de déclenchement ;
- la taille de l'excitation lumineuse modulée dans le champ de vision : la proportion de surface rétinienne éclairée est déterminante. Plus celle-ci est grande, plus le risque augmente ;
- la position de l'excitation lumineuse modulée : le risque est plus grand en vision centrale qu'en vision périphérique, bien que le papillotement puisse être plus perceptible dans ce dernier cas ;
- l'excitation d'un seul œil ou des deux yeux ;
- la fermeture des yeux (excitation possible de toute la rétine au travers des paupières si les niveaux lumineux sont très élevés).

La prévalence du phénomène de crises d'épilepsie déclenchées par la lumière a été estimée par Fisher *et al.* (Fisher *et al.,* 2005) à 1 personne pour 10 000 dans la population générale et 1 personne pour 4 000 dans la tranche d'âge 5 - 24 ans. En ce qui concerne les patients épileptiques, la prévalence de la photosensibilité des crises serait de l'ordre de 2 %. D'après Quirk (Quirk, 1995), l'incidence annuelle des crises d'épilepsie déclenchées par la lumière modulée est de 1,5 pour 100 000 par an dans la population générale et de 7 pour 100 000 par an dans la tranche d'âge allant de 7 à 19 ans. Les adolescents et les jeunes adultes sont la population la plus concernée par ce phénomène.

La fondation américaine de l'épilepsie (*Epilepsy Foundation of America*) a établi une limite de modulation temporelle de la lumière correspondant à un niveau de risque faible de déclenchement de crises d'épilepsie. Cette limite est exprimée en valeur absolue de modulation de la luminance : la variation maximale à ne pas dépasser est de +/- 20 cd/m²

entre 3 Hz et 65 Hz. Le groupe d'expert ayant élaboré la norme IEEE 1789 a converti cette limite en pourcentage de modulation correspondant à un niveau moyen de 200 cd/m². La valeur limite retenue dans la norme IEEE 1789 pour limiter les crises d'épilepsie est ainsi de 5 %. L'analyse précise des niveaux de risque établis dans la norme IEEE 1789 est résumée dans la Figure 54. Les niveaux de risque élevé sont associés à une modulation lumineuse dont le diamètre apparent représente plus de 10 % du champ de vision, soit 0,006 sr, des variations de luminances supérieures ou égales à 20 cd/m² et des fréquences de modulation comprises entre 1 et 65 Hz.

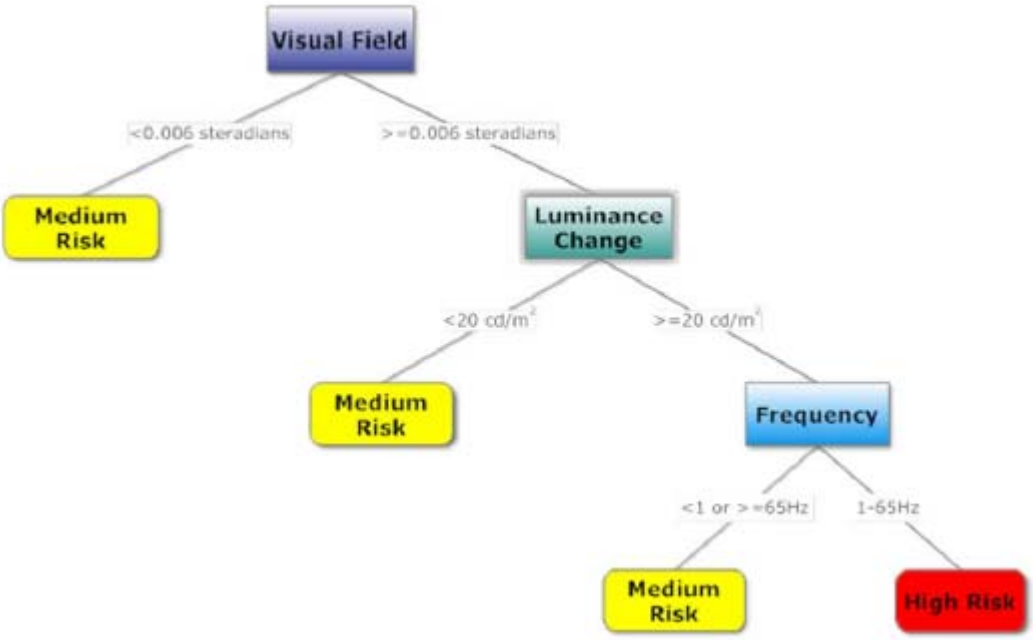


Figure 54 : niveaux de risques de déclenchement de crises d'épilepsie par la lumière modulée établis dans la norme IEEE 1789

3.6.3.4 Effets sur les émotions, l'humeur et la cognition

Des publications font état d'effets non visuels de la modulation temporelle relatifs aux émotions, à l'humeur et à la concentration durant le travail.

L'étude publiée par Knez en 2014 (Knez, 2014) a comparé l'effet de l'exposition en condition de travail de bureau à des tubes fluorescents d'ancienne génération (ballast ferromagnétique, modulation à 100 Hz) et de nouvelle génération (ballast électronique, modulation haute fréquence à 32 kHz).

L'exposition aux tubes d'ancienne génération était associée à une baisse des émotions dites « agréables activées » (excitation, enthousiasme, euphorie, sentiment d'énergie) et dites « agréables non-activées » (sérénité, satisfaction, calme, repos).

Dans le second volet de cette étude, l'exposition à la lumière des tubes de nouvelle génération (modulation à 32 kHz) était corrélée à une augmentation des performances cognitives, évaluées par la résolution de problèmes de reconnaissance de formes abstraites. Dans cette étude, l'exposition à de la lumière modulée à 100 Hz était donc associée à de moins bonnes performances cognitives. L'auteur suggère que l'état émotionnel « agréable non-activé » est responsable de cet effet.

L'étude de Kim *et al.* publiée en 2015 (Kim *et al.*, 2015) visait à étudier l'effet de la modulation temporelle de type PWM, et en particulier du rapport cyclique, sur la concentration de 10 sujets lors de l'accomplissement de tâches de recherches d'erreurs de

chiffres et de lettres dans des listes. Les auteurs concluent qu'il n'y a pas d'influence du rapport cyclique sur la concentration des sujets. Cependant, l'article fournit très peu de détail technique sur le protocole et les caractéristiques techniques de l'exposition lumineuse (la fréquence de modulation n'est notamment pas précisée).

3.6.3.5 Fatigue visuelle (asthénopie) et maux de tête

Les travaux de Wilkins publiés en 1989 (Wilkins, 1989) ont démontré que l'exposition à la lumière émise par des tubes fluorescents d'ancienne génération utilisant des ballasts ferromagnétiques (fréquence de modulation 100 Hz, pourcentage de modulation de l'ordre de 45 %), est associée à une incidence environ deux fois plus élevée de maux de têtes et de fatigue visuelle, par rapport aux valeurs observées dans le cas de tubes fluorescents plus récents, modulés en haute fréquence (32 kHz) ayant un pourcentage de modulation résiduel à 100 Hz inférieur à 7 %. L'étude a été menée en double aveugle dans un contexte d'éclairage de bureau sur un échantillon total de 159 personnes pendant des durées d'exposition comprises entre 9 et 19 semaines.

Les auteurs signalent que l'augmentation de l'incidence observée concerne essentiellement une minorité de personnes exhibant une sensibilité particulièrement élevée à la modulation temporelle de la lumière. Les auteurs observent aussi une bonne corrélation entre l'apparition de la fatigue visuelle et des maux de tête.

3.6.3.6 Migraines et maux de têtes paroxystiques sévères avec nausées et perturbations visuelles

La migraine est un type de mal de tête chronique, intense et parfois invalidante lorsqu'elle s'accompagne de symptômes tels que des perturbations du champ de vision (migraines ophtalmiques), une aversion à la lumière (photophobie), des nausées et des vomissements. Bien que la migraine soit très répandue dans la population générale (prévalence variable selon les pays mais touchant environ 11 % dans la population mondiale, (OMS, 2004)), les facteurs déclenchant les crises de migraine sont encore mal connus et relativement nombreux. Il existe très certainement une prédisposition génétique à la migraine. Les femmes sont plus susceptibles d'avoir des migraines que les hommes.

Le déclenchement de migraine par de la lumière modulée est un phénomène couramment cité de manière anecdotique par les migraineux mais il n'existe pas beaucoup de publications scientifiques étudiant ce phénomène de manière clinique.

Sur la base d'un questionnaire rempli par 180 personnes (132 migraineux et un groupe de contrôle de 48 sujets), l'étude de 2010 de Shepherd (Shepherd, 2010) a permis d'identifier la lumière modulée comme étant la principale cause de déclenchement de migraines et de maux de têtes, suivie par des stimuli visuels présentant des contrastes spatiaux marqués.

La norme IEEE 1789 a conclu en 2015 que les études épidémiologiques portant sur les causes de la migraine ont identifié avec certitude le fait que la lumière modulée est susceptible de déclencher des crises de migraines. Cependant, il n'existe pratiquement aucune donnée sur la nature des paramètres déterminants (fréquence et pourcentage de modulation par exemple). Par ailleurs, le pourcentage de la population des migraineux dont les crises sont déclenchées par la lumière modulée n'est pas connu.

3.6.3.7 Aggravation de comportements autistiques

Un petit nombre d'études assez anciennes rapportent que l'exposition à la lumière modulée de tubes fluorescents d'ancienne génération à ballast ferromagnétique pourrait être corrélée à l'augmentation de comportements répétés chez certains sujets autistes. On peut citer les études de Colman de 1976 (Colman *et al.*, 1976) et l'étude de Fenton de 1985 (Fenton et Penney, 1985). Ces travaux portent sur un très faible nombre de sujets (6 sujets chez Colman *et al.* et 5 chez Fenton *et al.*).

Il n'existe actuellement pas de données épidémiologiques publiées sur la sensibilité des sujets autistes à la lumière modulée. Il est actuellement impossible de quantifier l'incidence

et la prévalence de ce phénomène, ni de donner des valeurs limites pour réduire ce risque potentiel.

3.6.3.8 Applications thérapeutiques de la lumière modulée émise par des LED

Il est bien établi qu'une excitation lumineuse périodique ou transitoire produit une activité cérébrale associée qui peut être détectée par des électro-encéphalogrammes (EEG) et des magnéto-encéphalogrammes (MEG). En présence d'excitations lumineuses modulées, l'activité alpha (activité caractéristique du système visuel au repos et ayant une fréquence comprise en 7 et 12 Hz) des neurones du cortex visuel se synchronise, sa fréquence s'ajustant sur celle du stimulus. Ce phénomène est qualifié d'entrainement photique.

Une étude récente (Halbleib *et al.,* 2012) présente une modélisation des réponses cérébrales à des excitations lumineuses modulées de manière à en exploiter leurs potentiels en clinique neuropsychiatrique. Les auteurs cherchent à vérifier que le substrat neuronal à la base de l'entrainement photique est constitué par un système d'oscillateurs couplés, non-linéaires, dotés, pour chaque individu, d'une fréquence de résonance propre. Les auteurs constatent, chez les 10 sujets testés, que les EEG ou MEG présentent des caractéristiques similaires : la fréquence de la réponse se cale sur celle de la stimulation. Cependant, aux alentours de la fréquence de repos alpha et de la demi-fréquence (alpha / 2), la fréquence de la réponse tend vers la fréquence de stimulation, se stabilisant après une dizaine de périodes et se maintenant encore sur quelques périodes. Cet effet reflète un effet d'entraînement dynamique de la part d'oscillateurs cérébraux aux propriétés non linéaires.

Des applications cliniques de l'entrainement photique sont à l'étude pour stimuler certains patients atteints de pathologies neurodégénératives, notamment chez les sujets âgés (Williams *et al.,* 2006).

Un article récent de 2016 (Kim *et al.,* 2016) relate une étude concernant l'utilisation de la « photothérapie rythmique » comme traitement de la dépression. L'article fournit une excellente description méthodologique d'une expérimentation menée sur un modèle de souris déprimée (administration de corticostérone). Les souris ont été exposées 3 heures par jour pendant 8 à 14 jours à un éclairement de 100 lx produit par les LED modulées à des fréquences de 9 à 11 Hz (fréquence correspondant aux ondes cérébrales alpha). Quatre tests ont été utilisés pour tester l'effet antidépresseur de l'exposition, en comparaison à l'utilisation d'un antidépresseur chimique classique : labyrinthe, évolution libre, interaction sociale avec jeune souris, nage forcée.

Les effets antidépresseurs constatés chez les souris ayant subi une exposition lumineuse modulées ont été significativement meilleurs que chez les souris ayant subi un traitement antidépresseur chimique.

L'étude ne permet cependant pas d'attribuer les effets antidépresseurs à la modulation de la lumière ou à l'exposition à la lumière des LED, qu'elle soit modulée ou pas.

Quelques hypothèses mécanistiques ont été formulées mais n'ont pas été vérifiées : activation du cortex visuel qui influence d'autres régions du cerveau (effets visuels) ou effets non visuels *via* la mélatonine et d'autres neurotransmetteurs ou neuromodulateurs.

Un article publié en 2015 (Vartanian *et al.*, 2015) tente d'apporter des éléments visant à démontrer une meilleure efficacité de la lumière modulée sur l'activation des cellules ganglionnaires à mélanopsine de la rétine. Les auteurs ont étudié le réflexe de constriction pupillaire, lié à l'activation de ces cellules. La constriction pupillaire était maximale avec un éclairement minimal lorsque celui-ci était modulé à 2 Hz avec un rapport cyclique de 12 % et un pourcentage de modulation de 100 %.

Une publication récente de 2017 (Le Floch, 2017) suggère d'utiliser un éclairage LED modulé en PWM pour lutter contre les difficultés de lecture des sujets dyslexiques. En étudiant deux cohortes comprenant respectivement 30 sujets adultes dyslexiques et 30 sujets adultes non dyslexiques, les auteurs ont trouvé qu'un éclairage modulé à 70 Hz avec

un rapport cyclique de 20 % et un taux de modulation de 100 % permettait de supprimer les post-images indésirables des caractères imprimés apparaissant dans le champ visuel des sujets dyslexiques lors de la lecture. Les auteurs rapportent que ces post-images sont symétriques chez les sujets dyslexiques et qu'elles induisent une ambiguïté dans la reconnaissance de certains caractères symétriques (les lettres « b » et « d » par exemple). Les auteurs ont montré que chez les sujets non dyslexiques, les post-images ne sont pas ambiguës. Les auteurs ont mis en évidence une symétrie anormale entre les taches de Maxwell des deux yeux. Les taches de Maxwell sont des images observables dans certaines conditions et correspondent à la zone centrale de la fovéa. L'utilisation de lumière modulée viendrait briser les effets de cette symétrie anormale chez les sujets dyslexiques.

Bien que cette étude montre une corrélation entre la symétrie des taches de Maxwell et la dyslexie, il n'est pas démontré que ce phénomène est une cause de dyslexie. Il reflète peut-être une relation entre la topographie de la rétine et l'organisation des connexions rétino-corticales.

L'utilisation de la modulation temporelle de la lumière avec les paramètres utilisés par les auteurs (fréquence 70 Hz, rapport cyclique 20 %, taux de modulation 100 %) est originale. Elle n'a cependant pas été encore validée au niveau de son efficacité et de ses effets indésirables.

En conclusion de cette partie, les travaux de recherche portant sur des utilisations thérapeutiques de la modulation temporelle de la lumière semblent prometteurs et fondés sur des mécanismes neurobiologiques relativement bien établis. L'exposition à des lumières modulées utilisées à des fins « d'entrainement photique » pourrait représenter une piste pour le traitement de pathologies liées à des maladies neurodégénératives ainsi que pour le traitement de maladies comme la dépression.

La luminothérapie pourrait également bénéficier de l'apport de la modulation temporelle pour tenter de mieux stimuler les cellules ganglionnaires à mélanopsine de la rétine.

La publication récente (Le Floch, 2017) indique aussi une utilisation possible d'un éclairage modulé pour améliorer les performances visuelles de sujets dyslexiques lors de tâches de lecture.

Toutes ces applications potentielles ne doivent pas négliger les effets indésirables de la modulation temporelle de la lumière.

3.6.4 Conclusions et classement des effets de la modulation temporelle

3.6.4.1 Conclusions sur les effets biologiques

3.6.4.1.1 Conclusions sur le papillotement

La perception visuelle de la modulation temporelle de la lumière, pour des fréquences inférieures à 70 Hz, est appelée papillotement. Le papillotement induit chez l'observateur un inconfort visuel.

3.6.4.1.2 Conclusions sur l'effet stroboscopique

L'effet stroboscopique est une modification de la perception visuelle ressentie par un observateur statique lors du mouvement d'un objet éclairé par une lumière modulée dans des fréquences de l'ordre de 70 Hz à 2000 Hz. La perception d'un effet stroboscopique provoque un inconfort visuel pour l'observateur.

3.6.4.1.3 Conclusion sur l'effet de réseau fantôme

L'effet de réseau fantôme se manifeste lors de saccades oculaires en présence d'une source de lumière modulée. Il apparaît jusqu'à des fréquences de modulation élevées, de l'ordre de 1 kHz en présence de sources immobiles. Lorsque les sources de lumière modulée sont en mouvement, la fréquence limite de perception peut augmenter significativement, comme par

exemple dans des situations de conduite automobile lorsque les feux des véhicules émettent de la lumière modulée. C'est le cas de feux rouges arrière à LED, de feux blancs à LED situés à l'avant pour l'éclairage de jour et les feux de position, ainsi que pour certains modèles de projecteurs (feux de croisement, feux de route) à LED.

La perception d'un effet de réseau fantôme provoque un inconfort visuel chez l'observateur.

3.6.4.1.4 Conclusion de l'effet de perturbation de mouvements oculaires et de diminution des performances visuelles

La perturbation des mouvements oculaires durant une tâche de lecture est provoquée par la modulation temporelle de la lumière à des fréquences de 100 Hz ou 120 Hz.

Une diminution des performances visuelles est causée par la modulation temporelle de la lumière à des fréquences de 100 Hz ou 120 Hz , lorsque le pourcentage de modulation est au moins égal à 30 %.

Les études ayant été effectuées avec des tubes fluorescents ne comportant qu'un seul profil de modulation temporelle, il n'existe pas assez de données pour établir un seuil ou une relation de type dose-effet.

3.6.4.2 Classement des effets sanitaires

Pour les effets sanitaires considérés dans cette section, il n'existe pas de données scientifiques s'intéressant aux effets de la modulation temporelle chez l'animal ou sur des modèles cellulaires. Le niveau de preuve des effets sanitaires a donc été déterminé uniquement à partir des données disponibles chez l'Homme.

3.6.4.2.1 Classement des effets de modification des émotions, de l'humeur et des performances cognitives

Les éléments de preuve ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet.

3.6.4.2.2 Classement de l'effet de la modulation temporelle de la lumière sur l'accidentologie

- Accidentologie liée à la perception de l'effet stroboscopique

Dans un contexte industriel ou domestique, il est vraissemblable que la perception de l'effet stroboscopique impacte la sécurité de l'Homme lors de l'usage de machines ou d'outils. Il n'existe cependant pas d'étude traitant spécifiquement des effets de la perception de l'effet stoboscopique sur l'accidentologie.

Les données scientifiques, ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet de la perception de l'effet stroboscopique sur l'accidentologie lors de la manipulation de machines ou d'outils.

- Accidentologie liée à la perception d'un réseau fantôme.

Lors de la conduite d'un véhicule, il est possible sous certaines conditions, de percevoir un effet de réseau fantôme. Néanmoins, il n'existe pas d'étude évaluant l'effet de distraction du conducteur par l'effet de réseau fantôme sur l'accidentologie sur les routes.

Les données scientifiques ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet de la perception d'un réseau fantôme sur l'accidentologie sur les routes.

3.6.4.2.3 Classement de l'effet de la modulation temporelle de la lumière sur le déclenchement de crises d'épilepsie

Les éléments de preuve disponibles chez l'Homme concernant le déclenchement de crises d'épilepsie par l'exposition à la lumière modulée sont suffisants. L'effet de la lumière modulée sur le déclenchement de crises d'épilepsie est donc avéré.

3.6.4.2.4 Classement de l'effet de fatigue visuelle et de maux de tête

Un nombre limité d'études sur sujets ont identifié une association entre l'exposition à la lumière modulée autour de 100 Hz et la fatigue visuelle. Une étude a mis en évidence un lien avec l'effet de modification des saccades oculaires pendant une tâche de lecture.

Les éléments de preuve disponibles chez l'Homme sur la fatigue visuelle et le déclenchement de maux de tête causé par la modulation temporelle de la lumière sont limités. Il n'existe pas de données scientifiques chez l'animal. L'effet est possible.

Les études ayant été effectuées avec des tubes fluorescents ne comportant qu'un seul profil de modulation temporelle, il n'existe pas assez de données pour établir un seuil ou une relation de type dose-effet.

3.6.4.2.5 Classement de l'effet de déclenchement de maux de tête paroxystiques et de migraines

Les éléments de preuve disponibles chez l'Homme sur le déclenchement de maux de tête paroxystiques et de crises de migraine en raison de la modulation temporelle de la lumière sont limités. Ils concernent essentiellement la population des personnes sensibles aux migraines. Il n'existe pas de données scientifiques chez l'animal. L'effet est possible.

Les études ayant été effectuées avec des tubes fluorescents ne comportant qu'un seul profil de modulation temporelle, il n'existe pas assez de données pour établir un seuil ou une relation de type dose-effet.

Des études épidémiologiques portant sur les causes de la migraine ont pu établir une association entre la lumière modulée et le déclenchement de crises de migraines. Cependant, il n'existe pas assez de données sur la nature des facteurs déclenchants et des facteurs de confusion avec d'autres paramètres lumineux existent (éblouissement, non uniformité de l'éclairement par exemple).

Le pourcentage de la population des migraineux dont les crises sont déclenchées par la lumière modulée n'est pas connu.

3.6.4.2.6 Classement de l'effet d'aggravation de comportements autistiques

Les données portant sur l'aggravation de comportements autistiques par l'exposition à la modulation temporelle de la lumière ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de cet effet.

3.6.4.3 Synthèse de la bande fréquentielle impliquée pour chaque effet

Le Tableau 5 présente une synthèse de la bande fréquentielle impliquée pour chaque effet lié à la modulation temporelle de la lumière dont le niveau de preuve chez l'. La fréquence de modulation de 100 Hz, caractéristique de la modulation temporelle de la grande majorité des lampes et des luminaires en France et en Europe, est potentiellement concernée par tous les effets relatés dans les publications scientifiques, à l'exception du papillotement et du déclenchement de crises d'épilepsie.

Tableau 5 : synthèse des différents effets biologiques et du classement des effets de la modulation temporelle

<table>
<tr><th>Fréquence
Effets</th><td>1 Hz</td><td>20 Hz</td><td>70 Hz</td><td>100 Hz</td><td>1 000 Hz</td><td>2 000 Hz</td><td>3 000 Hz</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Effets biologiques</td><td colspan="3" rowspan="2">Papillotement</td><td colspan="3">Effet stroboscopique</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="4">Effet de réseau fantôme</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="3" rowspan="2">Modification des mouvements oculaires</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="3">Baisse des performances visuelles</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Effets sanitaires</td><td colspan="3">Déclenchement de crises d'épilepsie
Effet avéré</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="3" rowspan="2"></td><td colspan="3" rowspan="2">Fatigue visuelle
Migraines
Effet possible</td></tr>
<tr><td colspan="3">Migraines et maux de têtes paroxystiques
Effet possible</td></tr>
</table>

3.6.4.4 Conclusions relatives aux normes et réglementations concernant la modulation temporelle

Jusqu'à 2015, il n'existait que des normes anciennes et incomplètes décrivant les phénomènes liés à la modulation temporelle de la lumière. Des nouvelles normes et documents techniques ont été élaborés ou remis à jour par la plupart des organismes de normalisation depuis 2015. C'est le cas de la CIE, de l'IEEE, de NEMA et de l'IEC.

Dans ces documents récents, le papillotement est l'effet le mieux décrit et les indices relatifs à ce phénomène sont très bien établis. En éclairage intérieur, l'indice de visibilité du papillotement P_{st}^{LM} est très bien adapté à la quantification de cet effet pour des lampes et luminaires. Il repose sur des bases scientifiques solides et sa définition est bien établie. Par contre, le domaine de validité de l'indice P_{st}^{LM} est très limité. Ainsi, cet indice n'est pas bien adapté à décrire la visibilité du papillotement des grandes surfaces éclairées par des sources de lumière modulée : plans de travail, murs, plafonds, etc. Cet indice ne peut pas être utilisé pour juger des questions sanitaires.

La sensibilité humaine aux contrastes temporels en vision périphérique révèle que les excitations lumineuses doivent être de plus grande taille pour être visibles. La fréquence critique de fusion est également plus petite qu'en vision centrale. Par contre, dans un domaine spatio-temporel plus limité qu'en vision centrale, la sensibilité aux contrastes est plus élevée. C'est pourquoi la visibilité du papillotement des grandes surfaces observées en vision périphérique (écrans, luminaires, plans de travail éclairés par des lumières modulées,

etc.) peut paraître plus importante qu'en vision centrale. L'indice P_{st}^{LM} n'est pas adapté pour décrire la visibilité du papillotement en vision périphérique.

La fréquence critique de fusion est plus petite en condition de faible éclairement. Ainsi, le papillotement des anciennes générations de lampes à décharge en éclairage public n'a jamais été un sujet de controverses alors que la modulation temporelle de la lumière émise était largement supérieure à celle des lampes utilisées en éclairage intérieur. Les indices de papillotement actuels comme P_{st}^{LM} ne sont pas adaptés à l'éclairage extérieur en condition de faible éclairement. Il n'existe actuellement pas d'indice dans ce domaine, et *a fortiori* pas de limite bien définie.

La prise en compte de travaux de recherche récents sur l'effet stroboscopique a permis aux organismes de normalisation de proposer un nouvel indice décrivant sa visibilité lors de mouvements de la main. Il s'agit de l'indice SVM de visibilité de l'effet stroboscopique qui a été introduit en 2014 et rapidement adopté dans la normalisation après 2015. Il manque cependant des études de validation de cet indice, notamment dans d'autres conditions expérimentales que le travail de bureau et le mouvement de la main.

Il n'existe actuellement pas de normes sur l'effet de réseau fantôme dont l'existence est avéré et qui a néanmoins été décrit par la CIE et l'IEEE.

Certains indices ont été construits pour tenter d'agréger les effets visibles et les effets sanitaires de la modulation temporelle (indice NM de l'IEEE 1789, indice CFD de DerLichtPeter par exemple). Aucune étude n'a été menée pour valider ou invalider cette approche globale des phénomènes.

Les normes de sécurité et de performance des produits LED n'incluent à l'heure actuelle aucune limitation de la modulation temporelle de la lumière émise. De plus, les normes relatives aux dispositifs de contrôle-commande des lampes et luminaires ne garantissent pas la compatibilité et le bon fonctionnement de ces produits avec les systèmes à LED.

La seule norme qui émet des recommandations précises destinées à protéger la santé humaine est la norme américaine IEEE 1789 publiée en 2015. Les recommandations reposent sur une expertise sanitaire incluant des analyses de risques. Le groupe de travail confirme que la plupart des lampes à incandescence dépassent la limite « sans risque » recommandée par la norme IEEE 1789. De plus, les paramètres sur lesquels sont basées ces recommandations ne sont pas directement applicables aux modulations temporelles complexes : modulations irrégulières, rapports cycliques différents de 0,5, modulations transitoires. Le groupe de travail confirme cette critique mais souligne néanmoins que les paramètres utilisés dans la norme IEEE 1789 (fréquence et pourcentage de modulation) sont tout-à-fait applicables à la grande majorité des lampes et des luminaires à LED.

Il existe actuellement des lacunes dans les documents normatifs en ce qui concerne les mesures physiques de la modulation temporelle de la lumière. Les conditions de mesures ne sont pas toutes précisées, notamment en ce qui concerne la mesure de la forme d'onde. Il s'agit notamment des fréquences d'échantillonnage des signaux, de la bande passante des équipements, de la géométrie de la mesure, des paramètres et des méthodes utilisés pour effectuer l'analyse spectrale de la forme d'onde (décomposition en composantes fréquentielles de Fourier). L'application numérique des formules de calcul des différents indices mériterait également d'être mieux décrite dans les normes.

En ce qui concerne la réglementation en matière de limitation de la modulation temporelle de la lumière, on constate qu'elle est actuellement inexistante. Les règlements européens portant sur les performances des dispositifs d'éclairage ne comportent aucune disposition sur la modulation temporelle de la lumière.

En France, il faut noter que le Code du travail mentionne que l'éclairage des lieux de travail ne doit pas présenter d'effets stroboscopiques.

3.7 Effets des LED sur le confort et les performances visuelles

3.7.1 Généralités sur l'éblouissement, l'inconfort visuel et leurs effets

Parmi les critères utilisés pour évaluer les effets sanitaires produits par une source d'éclairage, l'inconfort ressenti et l'éblouissement perçu sont deux critères subjectifs, accessibles aux utilisateurs, que les métrologues ont tenté d'objectiver par des formules ou des modèles. Or, l'expérimentation est délicate car elle nécessite d'exposer des sujets à des conditions inhabituelles, désagréables, et parce que la transposition des résultats expérimentaux obtenus en laboratoire à la réalité est imparfaite. Dans la première partie de ce chapitre, nous rappellerons des généralités et des définitions, sachant que la synthèse entre l'approche empirique classique et les nouvelles approches cognitives est actuellement imparfaite. Dans la seconde partie, nous décrirons quelques-uns des nombreux travaux déclenchés par le renouvellement technologique de l'éclairage apporté par les LED.

3.7.1.1 Éblouissement et inconfort

3.7.1.1.1 Définition de l'éblouissement

Le terme « éblouissement » peut se comprendre comme l'action d'éblouir provoquée par une source ou comme le phénomène ressenti par l'observateur (Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales). Ainsi, il y a une réelle ambiguïté dans l'emploi du terme éblouissement, due à une différence de point de vue. Dans le premier cas, l'éblouissement se définit comme un stimulus lumineux temporaire ou continu responsable d'un déficit plus ou moins intense et prolongé des performances visuelles (Risse, 1999, p. 258). Dans le second cas, l'éblouissement se définit par son impact sur l'observateur comme la sensation produite par une luminance dans le champ visuel suffisamment forte par rapport à celle à laquelle l'œil est adapté pour qu'elle provoque inconfort, incapacité visuelle ou perte de performance visuelle et de visibilité (IESNA, 1984, cité par Risse, 1999, p. 258).

La Commission internationale de l'éclairage (CIE, IEV ref 845-02-52), quant à elle, définit l'éblouissement (en anglais *glare*) par « conditions de vision dans lesquelles on éprouve une gêne ou une réduction de l'aptitude à distinguer des détails ou des objets, par suite d'une répartition défavorable des luminances ou d'un contraste excessif ». En outre, elle introduit la distinction entre l'éblouissement perturbateur, qui diminue les capacités visuelles et les performances du sujet, et l'éblouissement inconfortable qui apporte une sensation de gêne au sujet, sans provoquer de baisse de performance. En pratique, les deux effets sont rarement dissociés.

Le Tableau 6 ci-dessous rassemble les différentes définitions, en français et en anglais, du terme « éblouissement ».

Tableau 6 : définitions de l'éblouissement, avec la traduction des termes en anglais

Terme à définir	Vocabulaire International de l'Eclairage (CIE, 1970)	*Termlist entry*		*International Lighting Vocabulary (eILV, CIE, 2014)*
845-02-52 Eblouissement	Conditions de vision dans lesquelles on éprouve une gêne ou une réduction de l'aptitude à distinguer des détails ou des objets, par suite d'une répartition défavorable des luminances ou d'un contraste excessif	17-492 *Glare*		*condition of vision in which there is discomfort or a reduction in the ability to see details or objects, caused by an unsuitable distribution or range of luminance, or by extreme contrasts*

Terme à définir	Vocabulaire International de l'Eclairage (CIE, 1970)	*Termlist entry*		*International Lighting Vocabulary (eILV, CIE, 2014)*
845-02-57 Eblouissement perturbateur	éblouissement qui trouble la vision des objets sans provoquer nécessairement une sensation désagréable	17-330 *Disability glare*		*glare that impairs the vision of objects without necessarily causing discomfort*
845-02-56 Eblouissement inconfortable	éblouissement produisant une sensation désagréable sans nécessairement troubler la vision des objets	17-333 *Discomfort glare*		*glare that causes discomfort without necessarily impairing the vision of objects*

3.7.1.1.2 Classification des phénomènes d'éblouissement

3.7.1.1.2.1 Conditions provoquant l'éblouissement

En conditions normales, l'œil est amené à fonctionner en vision photopique (vision diurne où la réponse des cônes dominent), mésopique (vision crépusculaire où bâtonnets et cônes fonctionnent), ou scotopique (vision nocturne où la réponse des bâtonnets domine). Le domaine d'éblouissement se situe au-delà du niveau lumineux actuel ou passé auquel l'œil est adapté. En vision diurne, notamment, le domaine d'éblouissement se situe au-delà du domaine photopique (Risse, 1999). Ainsi, il y a éblouissement chaque fois que le niveau d'adaptation augmente brutalement : la quantité de lumière nécessaire pour le provoquer dépend alors du niveau préalable d'adaptation. Il y a aussi éblouissement si la luminance d'une ou plusieurs sources de lumière dépasse largement la gamme des luminances présentes dans la majeure partie du champ visuel.

- ***Quelques classes d'éblouissement (Boyce, 2014 ; Mainster et Turner, 2012)***
  - L'éblouissement d'inconfort survient quand la lumière est ressentie comme trop intense ou anormalement variable. Il augmente avec la luminance des sources ou des surfaces éblouissantes, leur nombre et leur étendue, leur localisation périphérique.
  - Luminosité aveuglante (« *dazzle* » en anglais). En extérieur, la luminosité peut être trop élevée et rendre pénible la vision. Par réflexe, l'observateur ferme les yeux, s'abrite derrière la main, cherche l'ombre, met ses lunettes de soleil… Le niveau de lumière a atteint la saturation. Exemple de la neige, de la plage ou d'une dalle de béton à midi.
  - Défaut d'adaptation transitoire. Il survient lorsque le niveau lumineux augmente brutalement, par exemple au sortir d'un tunnel. Le système visuel se réadapte en quelques instants au nouveau niveau lumineux.
  - L'éblouissement d'incapacité survient quand la gamme de luminances présentes dans le champ visuel est trop étendue, du fait de la présence d'une ou plusieurs sources de lumière dans le champ visuel. La lumière diffuse sur l'ensemble de la rétine, générant une sorte de voile lumineux se superposant à l'image rétinienne et en diminuant les contrastes. L'explication est plausible. On mesure localement la perte de visibilité des contrastes générée en calculant la « luminance de voile ».

- La post-image (« scotome ») qui suit un éclair éblouissant, transitoire, localisée, plus ou moins persistante, résulte d'un épuisement passager des photopigments rétiniens (« blanchiment »).

3.7.1.1.2.2 Complexité de l'inconfort

La perception de confort est liée à des sensations de bien-être, à des attentes subjectives, voire esthétiques extrêmement difficiles à analyser. La sensation d'inconfort visuel croît avec l'intensité lumineuse et le contraste. Elle peut atteindre divers degrés et se révéler sous différentes formes. Elle est sujette à de grandes variabilités interindividuelles. Elle dépend de l'expérience et du vécu du sujet, du contexte ergonomique et de l'attente de l'usager. On peut tenter de caractériser l'inconfort d'après les signes et les dégradations que l'éclairage induit :

- gêne plus ou moins diffuse ;
- divers maux : fatigue oculaire et musculaire, irritations, yeux rouges et larmoiements ;
- migraines ;
- difficulté à maintenir l'attention et baisse de performance visuelle ;
- éblouissement inconfortable dû aux sources ;
- éblouissement d'incapacité (ou éblouissement perturbateur) ;
- scotome transitoire ;
- destruction des milieux oculaires.

La Figure 55 illustre le fait que la sensation d'éblouissement augmente avec le niveau lumineux. Cette relation est simple en ce qui concerne l'effet de réduction des capacités visuelles. Par contre, la sensation d'inconfort, qui augmente aussi avec le niveau lumineux, est multifactorielle. Les contrastes relatifs à la distribution spatiale des luminances dans la scène, les séquences temporelles des éclairements parvenant à l'œil et les irrégularités dans le spectre de la lumière jouent des rôles essentiels. En outre, la distribution des sources intenses dans le champ visuel, l'état d'adaptation de l'observateur, entre autres, modifient aussi la gêne et le ressenti visuel.

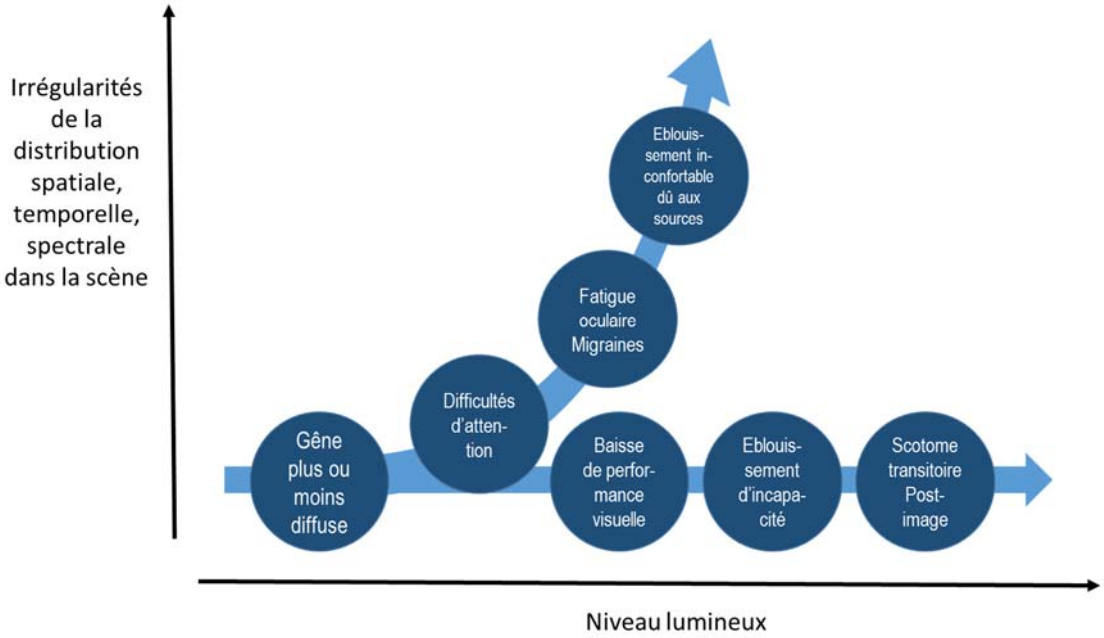


Figure 55 : les dimensions de l'inconfort et de l'éblouissement.

3.7.1.2 Éblouissement perturbateur et baisse des capacités visuelles

L'éblouissement perturbateur (*disability glare* en anglais) recouvre les situations dans lesquelles le sujet subit une diminution de ses capacités et de ses performances visuelles, un trouble de la vision des objets, sans nécessairement ressentir une sensation désagréable.

3.7.1.2.1 Performances visuelles normales et récupération de la sensibilité à l'obscurité

3.7.1.2.1.1 Seuil absolu et,adaptation à l'obscurité

Pour caractériser la sensibilité à la lumière, on mesure le seuil absolu dans l'obscurité. Les valeurs du seuil absolu dépendent de l'étendue, de la durée et de la localisation du test dans le champ visuel. À la suite d'une exposition vive à la lumière, la récupération à l'obscurité de la sensibilité initiale demande du temps. Si le test est extra fovéal, la courbe de récupération de la sensibilité à l'obscurité présente deux branches (*cf.* Figure 56): les cônes récupèrent d'abord leur sensibilité en une petite dizaine de minutes, puis suivent les bâtonnets. Si le test est fovéal, seule la première branche, correspondant à la récupération des cônes, est observée.

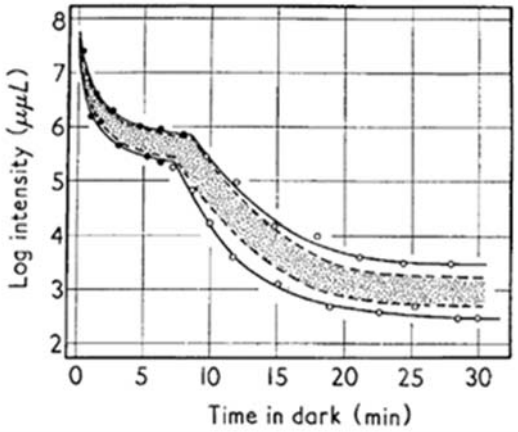


Figure 56 : décours temporel de la récupération de la sensibilité après une préadaptation à 4 775 cd/m²

La zone grisée représente les mesures chez 80 % des 110 sujets examinés. L'échelle des ordonnées est graduée en milliLambert (1 mL = (10/π)=3.183 cd/m²). Test de diamètre 3 deg, flashé en 0.2 s, à 7 deg d'excentricité. Pupille naturelle. Lumière blanche (Hecht et Mendelbaum, 1939)

3.7.1.2.1.2 Seuil de détection et sensibilité différentielle

Le seuil de détection d'une cible lumineuse sur un fond est d'autant plus élevé que la luminance du fond est élevée. C'est la loi de Weber.

$$\Delta L/L = constante$$

La valeur de la constante dépend de la durée, de l'étendue et de la localisation du test.

3.7.1.2.1.3 Acuité visuelle

L'acuité visuelle, mesurée par l'inverse de la valeur angulaire du plus petit détail détectable, dépend de l'état d'adaptation lumineuse du sujet. Les mesures d'acuité se situent sur deux branches (*cf.* Figure 57) : la branche inférieure est obtenue en vision scotopique, la branche supérieure est obtenue en vision photopique.

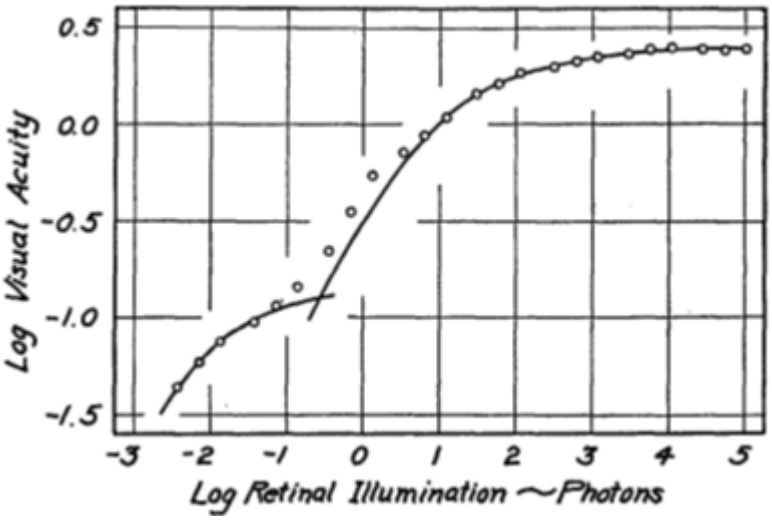


Figure 57 : acuité visuelle normale en fonction de la luminance du fond d'adaptation.

La branche inférieure correspond à la fonction des bâtonnets en vision périphérique , la courbe supérieure à la fonction des cônes en vision fovéale, et les points à une vision libre. Abscisses en Troland (unité anciennement dénommée Photon). (Schlaer, 1937)

3.7.1.2.2 Performances visuelles en situation d'éblouissement perturbateur

3.7.1.2.2.1 Baisse de contraste due à un voile de luminance

Une source ponctuelle intense présente dans un champ obscur provoque un phénomène d'éblouissement, dit « éblouissement d'incapacité », ou « éblouissement perturbateur » (*disability glare*, en anglais) comme si la source répandait un voile lumineux sur l'ensemble du champ de vision. Ce voile, perturbant la vision, est attribuable à un phénomène de diffusion de la lumière par les milieux oculaires imparfaitement transparents, accompagné d'un phénomène d'inhibition latérale d'origine rétinienne (Le Grand, 1937 ; Vos, 1962 ; van den Berg *et al.*, 2013).

La dégradation de la qualité de la vision dans une situation éblouissante peut être quantifiée indirectement par la mesure de la « luminance équivalente » L_{eq} qui, additionnée à la scène en absence d'éblouissement, abaisse le contraste apparent de l'image d'une valeur équivalente. La comparaison directe de contraste (*Direct Compensation Method*) dans les deux situations, avec et sans la source éblouissante, donne des résultats reproductibles (Van den Berg *et al.*, 2013). Un projet européen[50] a révélé que la dégradation de la vision due à l'éblouissement est fréquente. Dans un échantillon de plus de 2 400 conducteurs, 0,8 % des sujets de 45-54 ans et 29,5 % des sujets de plus de 75 ans exigent un contraste 3 fois plus élevé que l'exigent les sujets de 20-30 ans, pour atteindre des performances équivalentes et 1,7 % des sujets de plus de 75 ans exigent un contraste 8 fois plus élevé. Pratiquement, plusieurs facteurs modulent l'incapacité due à l'éblouissement, évidemment la quantité de lumière envoyée dans l'œil par la source elle-même, mais aussi la proximité – proche ou lointaine – de la source éblouissante ainsi que l'âge de l'observateur.

Soit E_p l'éclairement (en lux) produit par la source dans le plan de la pupille du sujet, θ l'angle visuel (en degrés), la formule empirique, obtenue à partir des résultats expérimentaux de Holladay (Holladay ,1926) et Stiles (Stiles ,1929-1935), indique que la valeur de la luminance de voile L_{eq} est proportionnelle à l'éclairement obtenu à la surface de la pupille et inversement proportionnelle au carré de la distance angulaire entre la source et la cible regardée.

[50] Relevance of glare sensitivity and impairment of visual function among European drivers. EU project: SUB-B27020B-E3-GLARE-2002-S07.18091.

$$L_{\mathrm{eq}} = 10E_{\mathrm{p}}\theta^{-2}$$

La composition spectrale de la lumière ne modifie pas le phénomène d'éblouissement. En revanche, comme la diffusion des milieux oculaires augmente avec l'âge, le voile apparent augmente avec l'âge. La formule suivante, exhaustive, s'applique à des sources ponctuelles isolées, éloignées de la cible de 0,1 degré à 100 degrés. Elle inclut l'effet de l'âge *A* et un facteur *p* pour la pigmentation de l'œil (CIE, 2002) :

$$\frac{L_{\mathrm{eq}}}{E_{\mathrm{gl}}} = \frac{10}{\theta^3} + \{1 + [A/62.5]^4\} \cdot \left[\frac{5}{\theta^2} / + \frac{0.1 \cdot p}{\theta}\right] + 2.5 \cdot 10^{-3} \cdot p.$$

3.7.1.2.2.2 Post-images et scotome transitoire

L'observation soutenue d'une source très intense peut créer un petit scotome maculaire, responsable d'une baisse d'acuité et de sensibilité au contraste passagère, avec perception d'une post-image. Les pigments visuels, saturés, doivent se reconstituer, et les cellules bipolaires reprendre leur activité normale. On mesure la résistance à ce type d'éblouissement par la vitesse de récupération des fonctions visuelles dans des conditions normalisées. Les tests sont calibrés pour mesurer un temps nécessaire à la récupération de l'acuité chez un sujet normal de l'ordre de plusieurs secondes ou dizaines de secondes. La variation de la susceptibilité individuelle à l'éblouissement est grande et l'âge est un facteur aggravant. (Risse, 1999)

3.7.1.2.2.3 Cas de la conduite routière et rôle du contraste

Plusieurs paramètres entrent en ligne de compte pour définir les conditions d'éclairage optimisées pour la conduite automobile de nuit.

La variable clé est le contraste. Deux paramètres conditionnent le niveau d'adaptation : une situation statique (celle du piéton) ou une situation dynamique (conduite sur route ou autoroute).

La visibilité en conduite automobile s'appuie sur plusieurs composants :

- l'éclairage du véhicule qui permet essentiellement de percevoir les obstacles verticaux mais qui, en contrepartie, est susceptible d'éblouir les conducteurs en sens inverse ;
- l'éclairage public issu des lampadaires qui fournit la lumière sur la chaussée et modifie l'arrière-plan des signaux et panneaux lumineux qui doivent être déchiffrables à distance (Boyce, p. 425).

L'indice TI (pour « *threshold increment* ») est un indice d'éblouissement d'incapacité, spécifique à la conduite routière. Il découle du rapport entre la luminance de voile L_v et la luminance moyenne *L* de la chaussée (IESNA, 2005, in : Boyce, 2014).

$$\mathrm{TI} = 65\left(\frac{L_{\mathrm{eq}}}{L^{0,8}}\right)$$

Sa forme générale, où les constantes α et β dépendent de la luminance d'adaptation, s'écrit comme suit (IESNA, 2005) :

$$\mathrm{TI} = \beta\left(\frac{L_{\mathrm{eq}}}{L^{\alpha}}\right)$$

3.7.1.2.3 Aggravation de l'éblouissement avec le vieillissement

Toutes les performances visuelles déclinent exponentiellement avec l'âge, toutefois l'âge auquel s'amorce le déclin est propre à chaque fonction visuelle et l'amplitude du déclin varie considérablement selon les individus (étude menée par Haegerstrom-Portnoy & Schneck, 1999, chez une population normale incluant 900 sujets sains ou avec une pathologie courante).

Les résultats suivants ont été obtenus chez 900 adultes de tous âges, sains ou avec une pathologie courante, représentatifs d'une population normale.

L'éblouissement perturbateur, mesuré par la perte d'acuité au voisinage d'une source éblouissante, est, en valeur médiane, 4 fois plus notable chez les sujets de plus de 85 ans que chez ceux de 60 ans. La perte d'acuité se fait par pas de 0,1 logMAR/décade.

Le MAR, pour *Minimum Angle of Resolution*, est l'unité qui définit le pouvoir séparateur de l'œil. L'unité logMAR en est la valeur logarithmique de base 10.

Le Tableau 7 et la Figure 58 présentent respectivement l'expression de l'acuité visuelle en différentes unités ainsi que sa variation en fonction de l'âge.

Tableau 7 : expression de l'acuité visuelle en différentes unités

Acuité visuelle, exprimée en dixièmes	Pouvoir séparateur, exprimé en minute d'arc	Acuité exprimée, En logMAR
10/10	**1**	**0**
5/10	**2**	**0.3**
1/10	**10**	**1**

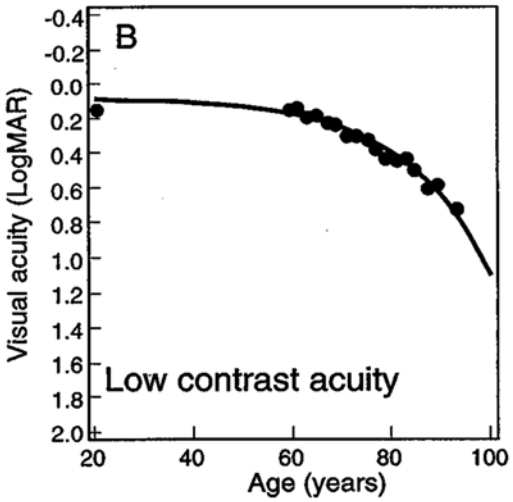


Figure 58 : variation, selon l'âge, de l'acuité en présence d'une source éblouissante circulaire de 3300 cd/m²

Source : Haegerstrom-Portnoy & Schneck, 1999

Le temps de récupération de la sensibilité à l'obscurité après 1 min d'exposition à une source très intense (3 300 cd/m²) augmente considérablement avec l'âge (*cf.* Figure 59). Même en ajustant la taille du test pour tenir compte de la grande variation de l'acuité avec l'âge, la durée de réadaptation (sa valeur médiane) est multipliée par un facteur 8 en moyenne au-delà de 85 ans, par rapport aux sujets de 60 ans.

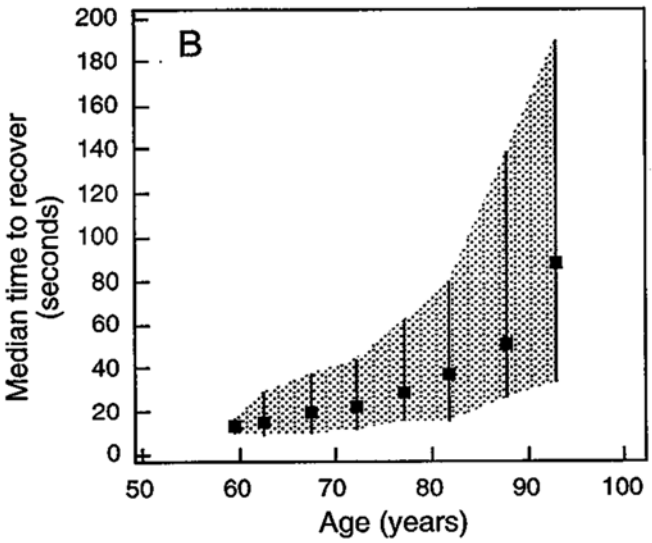


Figure 59 : variation, selon l'âge, du temps de récupération de l'acuité à l'obscurité, après un éblouissement par une source de 3 300 cd/m²

Source : Haegerstrom-Portnoy & Schneck, 1999

3.7.1.3 Éblouissement inconfortable lié à la scène et gêne visuelle

L'éblouissement d'inconfort produit une sensation désagréable, sans nécessairement troubler la vision des objets. Cet éblouissement est provoqué par la vision d'une scène dont le contraste est trop élevé, compte tenu de l'état d'adaptation à la lumière de l'observateur.

Le degré d'éblouissement inconfortable est évalué sur une échelle subjective. La plus courante est l'échelle de Boer.(détaillée dans l'Annexe 3), comprenant 9 échelons :

1 = *Unbearable* ou insupportable ; 3 = *Disturbing* ou perturbant ; 5 = *Just permissible* ou juste acceptable ; 7 = *Satisfactory* ou satisfaisant ; 9 = *Just noticeable* ou négligeable (Assist, 2011). Les sujets réussissent assez bien à se situer, mais il peut être utile de diminuer le nombre d'échelons, d'inclure une notation 0 = absence d'éblouissement, ou de proposer un nombre pair de notes pour éviter un choix moyen (Fotios, 2015). Dans tous les cas, il convient d'assortir une définition verbale à chaque échelon.

D'une manière générale, le sujet ressent comme inconfortable une situation qu'il juge inconsciemment éloignée des conditions naturelles dans lesquelles il a évolué. Si la sensation d'inconfort lié aux sources augmente avec leur intensité et avec la durée d'exposition, elle provient aussi d'un mauvais équilibrage des luminances dans le panorama, tant par leur répartition dans l'espace, que par leurs variations dans le temps ou du fait des irrégularités de leur spectre.

3.7.1.3.1 Effet de l'inhomogénéité spatiale de la scène

Les nombreuses tentatives de modélisation convergent vers le constat que ce sont les contrastes de luminance trop élevés qui provoquent l'éblouissement et que, dans l'ensemble, il convient de limiter à une valeur comprise entre 5 et 10, le rapport de la luminance la plus élevée à la luminance moyenne du champ visuel (Le Grand, 1972).

Dans la pratique, les professionnels ont recours à divers indices pour évaluer l'éblouissement inconfortable généré par des sources dans le champ de vision.

3.7.1.3.1.1 UGR et autres indices

L'indice d'éblouissement d'inconfort UGR (*Unified Glare Rating* – Taux d'éblouissement unifié) décrit l'effet combiné de la luminance, de la position du point de vue du sujet et de la

taille de la source, ainsi que de la luminance de l'arrière-plan. Il est évalué en utilisant la méthode préconisée par la Commission internationale de l'éclairage [CIE 117, 1995] :

$$UGR = 8\log_{10}\left(\frac{0.25}{L_f}\sum_{i=1}^{n}\frac{L_i^2\omega_i}{p_i^2}\right)$$

Avec :

L_f : luminance de l'arrière-plan exprimée en cd/m², calculée comme étant le rapport $\frac{E_{\text{ind}}}{\pi}$, où E_{ind} est l'éclairement vertical indirect au niveau de l'œil de l'observateur ;

L_i : luminance des parties lumineuses de chaque luminaire *i* dans la direction de l'œil de l'observateur en cd/m² ;

ω_i : angle solide (stéradian) des parties lumineuses de chaque luminaire *i* au niveau de l'œil de l'observateur ;

p_i : indice de position de Guth pour chaque luminaire *i* se rapportant à la position du luminaire par rapport à l'axe visuel. Variant entre 1 pour la direction face au sujet et 16 pour l'extérieur du champ visuel, l'indice de position de Guth restreint l'influence de l'éblouissement d'inconfort au champ visuel [0°, 40°], Vérifier [0°, 40°] ou [0°, 53°] ;

Le degré d'inconfort varie entre 7 (non ressenti) et 31 (insupportable). L'Association française de l'éclairage (AFE) rappelle quelques valeurs préconisées par la norme d'éclairage intérieur NF EN 12 464-1 (cf. Tableau 8) :

Tableau 8 : quelques niveaux d'UGR selon les situations

UGR	Exemples de type de tâche à exécuter
<16	Travail de précision, salle de soin
16<...<19	Bureau classique
19<...<22	Salle de repos, cantine
22<...<25	Vestiaire, salle de bain, local technique, magasin
25<...<28	Zone de circulation et couloirs
>28	Dangereux, non utilisable

En Amérique du Nord, on utilise l'indice VCP (*Visual Comfort Probability*) qui prédit le pourcentage de personnes qui jugeraient la sensation d'éblouissement acceptable (IES lighting Handbook, 2000 ; Boyce, 2004). La corrélation entre les deux systèmes est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 9 : équivalence entre l'UGR et le VCP (*Visual Comfort Probability*)

UGR	VCP Equivalent
11,6	90 %
16	80 %
19	70 %
21,6	60 %
24	50 %

Outre la formule classique de l'UGR, la Commission internationale de l'éclairage (CIE, 2002) a ajouté un indice spécifique aux « petites sources » , *UGRsmall*, qui s'applique aux sources inférieures à 0,005 m² comme les lampes fluocompactes. Le produit de la luminance et de l'angle solide sous lequel est vue la source est remplacé par une fonction de l'intensité, de la surface et de la distance de la source.

Comme l'arcade sourcilière protège l'œil de la lumière issue du haut, l'indice UGR de la Commission internationale de l'éclairage ne s'applique pas aux sources situées au-delà de l'angle d'élévation 53 deg, hors du champ de vision. Et pourtant, des sources situées au-dessus de nos têtes peuvent s'avérer gênantes. Elles provoquent sans doute une certaine distraction, variable selon la morphologie du visage. Boyce fixe à 16 500 cd/m² la limite au-delà de laquelle une source au plafond provoque l'éblouissement de type « *overhead glare* » (Boyce, 2014).

Tableau 10 : tableau comparatif des indices d'éblouissement inconfortable les plus usités

Degree of glare sensation	**BGI**	**VCP**	**CGI**	**DGI**	**UGR**
Intolerable	31	12	34	30	34
Just intolerable	28	20	31	28	31
Uncomfortable	25	28	28	26	28
Just uncomfortable	22	36	25	24	25
Unacceptable	19	43	22	22	22
Just acceptable	16	50	19	20	19
Perceptible	13	59	16	18	16
Just perceptible	10	67	13	16	13
Imperceptible	7	75	10	14	10

Source : Carlucci *et al.*, 2015

Citons aussi l'indice GR, spécifique aux terrains de sport, qui prend en compte la luminance de voile d'un luminaire ponctuel et de l'environnement, compris entre 10 et 90 (Tashiro *et al.*, 2015).

3.7.1.3.1.2 Cas de la conduite routière et effet du mouvement du véhicule ou du piéton

L'effet d'un véhicule venant à contresens, ou la situation d'un piéton approchant d'un lampadaire est complexe.

L'éblouissement du point de vue d'un conducteur et l'éblouissement du point de vue d'un piéton diffèrent à plusieurs égards (Miller et Gowan, 2015). Leur activité ne nécessite pas la même performance, le premier doit réagir rapidement, le second dispose généralement de plus de temps. Leur zone d'intérêt n'est pas la même, le premier se focalise sur la route, le second explore plus largement son environnement immédiat. En conséquence, leur domaine d'adaptation et leur dynamique d'adaptation ne sont pas les mêmes. Plusieurs modèles analytiques empiriques ont été proposés depuis une cinquantaine d'années pour évaluer l'éblouissement inconfortable en extérieur. Tous sont fondés sur l'estimation d'inconfort selon une notation subjective (échelle de de Boer, voir l'Annexe 3 sur les échelles d'éblouissement inconfortable) et prennent en compte la luminance de la source, la luminance du fond

d'adaptation, l'éclairement dans le plan de l'œil, l'excentricité de la source par rapport à la direction du regard et l'étendue angulaire de la source.

3.7.1.3.2 Effets du décours temporel sur l'inconfort

La réponse pupillaire, corrélée à la vergence et à l'accommodation, conditionne une bonne vision.

3.7.1.3.2.1 La réponse pupillaire

Les cellules ganglionnaires à mélanopsine (CGM), leur organisation et leur fonction, ont été présentées dans la section 3.3.1.1.2 ce rapport. La Commission internationale de l'éclairage (CIE) a publié une note technique proposant une fonction d'efficacité lumineuse relative spectrale du système photorécepteur mélanopique (CIE TN 003:2015).

Quand l'œil est exposé à un incrément de lumière, la pupille se contracte transitoirement, en moins d'une seconde, sous l'effet des signaux de cônes et/ou de bâtonnets, puis récupère incomplètement jusqu'à se stabiliser, par l'effet des signaux issus des cônes, des bâtonnets et des CGM. À l'extinction de la lumière, la contraction de la pupille se maintient encore pendant plusieurs secondes, jusqu'à atteindre un diamètre légèrement inférieur à sa valeur d'avant la phase lumineuse (*cf.* Figure 60). Ce réflexe pupillaire post stimulus (PIPR, pour *post illumination pupil reflex*) reflète spécifiquement l'action des CGM dont la réponse se met en route lentement et entretient l'ouverture de la pupille (Gamlin *et al.*, 2007 ; Kankipati *et al.*, 2010).

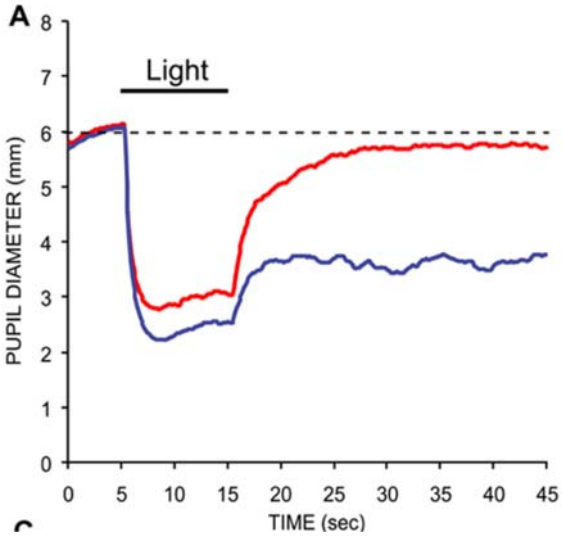


Figure 60 : décours de la réponse pupillaire à un stimulus photopique

Diamètre pupillaire en mm. Éclairement rétinien 14,2 log photons.cm^{-2}.s^{-1} (supérieur au seuil de réponse des cônes et des CGM), 493 nm (tracé bleu) et 613 nm (tracé rouge, durée du stimulus 10 secondes. Le PIPR, pour post illumination pupil reflex, *survient après l'extinction du stimulus. Source : Gamlin et al., 2007*

3.7.1.3.2.2 Papillotement et phénomènes stroboscopiques

Le papillotement, au-dessous de la fréquence critique de fusion (CFF) – de l'ordre de 60 Hz en vision photopique – est très inconfortable et peut même provoquer des crises ou des convulsions chez certains sujets. Au-dessus de la fréquence de fusion, le papillotement n'est plus apparent, ce qui n'exclut pas qu'il puisse avoir des effets perceptibles dans certaines configurations spatio-temporelles. Ainsi, un objet en mouvement peut apparaitre comme une succession d'images en différentes positions ; il s'agit d'un effet stroboscopique. Un objet immobile peut aussi donner des images fantômes quand l'œil effectue une saccade ; habituellement, le déplacement de l'image sur la rétine n'est pas perçu parce que l'œil est insensible aux mouvements trop rapides d'une cible et parce qu'un mécanisme de

suppression du signal visuel se met naturellement en place ; mais si l'image ne se déplace plus continûment sur la rétine, la suppression peut se relâcher, laissant apparaitre de multiples images. De telles interférences sont possibles entre les mouvements oculaires et les fréquences de la lumière nettement supérieures à la fréquence de fusion et être à l'origine de maux de tête.

Ce thème, essentiel pour le confort de l'éclairage par LED, est traité dans la section 3.5 de ce rapport.

3.7.1.3.2.3 Ajouts sur le temporel

En vision photopique, les cellules à mélanopsine et les cônes sont actifs. C'est par ces deux types de photorécepteurs que la pupille est contrôlée. Chez 16 sujets, dans des conditions expérimentales permettant d'isoler la réponse de chaque famille de photorécepteurs, il a été observé que les signaux des cellules à mélanopsine induisent sa contraction, les cônes S (cônes bleus), sa dilatation. Les deux mécanismes sont toniques (lents). Etant antagonistes, ils peuvent paradoxalement entrainer la dilatation de la pupille en lumière bleue, ce qui pourrait avoir une certaine importance sur la sensibilité individuelle à la lumière bleue (Spitschan *et al.*, 2014).

3.7.1.3.3 Effets du spectre et de la couleur sur l'inconfort

Bien que fortement liés l'un à l'autre, le spectre et la couleur n'appartiennent pas au même domaine. Le spectre spécifie un rayonnement dans le domaine physique : la répartition spectrale d'énergie décrit l'ensemble des composantes monochromatiques qui le composent. (IEV ref 845-01-08, e-ILV 17-1238). La couleur spécifie un stimulus dans le domaine visuel, d'après la sensation qu'il génère dans le système visuel humain. Notons alors que la couleur est tridimensionnelle tandis que la répartition spectrale d'énergie possède autant de dimensions que de radiations monochromatiques mesurables. De ce fait, il est toujours possible de convertir un spectre en couleur, mais la conversion de la couleur vers le spectre est indéterminée. Par exemple, la connaissance du spectre d'une source LED permet immédiatement de connaître sa couleur : blanche, bleue, verte … Mais l'inverse n'est pas vrai.

3.7.1.3.3.1 Choix de la température de couleur et rendu des couleurs

Il s'agit de deux notions bien différentes. La température de couleur est une échelle qui spécifie la couleur de la lumière émise par une source, lumière communément qualifiée de « blanche », sans autre précision sur son spectre. Notons que les écarts apparents de couleur ne s'échelonnent pas régulièrement sur toute la gamme des températures de couleur ; une différence de température de couleur donnée est plus visible aux températures de couleur basses qu'aux températures de couleur élevées.

En 1942, Kruithof, ingénieur chez Philips, avait mené des travaux dans des conditions très particulières, pour montrer que la lumière des tubes fluorescents de l'époque pouvaient être jugée « agréable », « non artificielle ». Un graphique illustrait, pour chaque température de couleur, les niveaux d'éclairement ressentis les plus agréables. Il en ressortait un agrément entre les lumières de couleur chaude aux faibles éclairements et la lumière du jour aux éclairements élevés. Pendant des années, la règle a été interprétée de manière pragmatique et « naturelle », pour conseiller l'usage de lumières de température de couleur basse aux faibles éclairements et de lumières de température de couleur élevée aux forts éclairements. Depuis les années 1990, toutes les révisions de la règle empirique déduite des travaux que Kruithof (1942) avait mené dans ces conditions assez singulières, alertent sur l'absence d'accord sérieux entre la préférence pour une température de couleur d'une source et le niveau d'éclairement requis. (Fotios, 2016). Malheureusement, les spectres des sources testées ne sont souvent pas de même profil et les conditions expérimentales ne sont pas toujours ne s'apparentent pas toujours à des situations habituelles.

Le rendu des couleurs exprime la capacité de la lumière à restituer aux objets une couleur attendue. Bien qu'évalué indirectement par la perception que l'on a des objets, le rendu des couleurs est directement dépendant du spectre de la lumière. La révision de l'indice de rendu des couleurs R_a recommandé par la Commission internationale de l'éclairage (CIE, 1995), est en cours de discussion. Celle-ci vient de publier un nouvel indice général de fidélité des couleurs R_f (CIE, 2017), identique à l'indice TM-30 développé par *l'Illuminating Engineering Society* (IES TM-30-2015). Ce nouvel indice traduit l'information sur la fidélité de la reproduction des couleurs de surface par une source de lumière, en comparaison avec la source de référence de température de couleur identique. Dénué des faiblesses de l'ancien indice, il permettra de comparer honnêtement le rendu de fidélité des couleurs des LEDs à celui des sources traditionnelles (David *et al.*, 2015). Pour l'instant, les deux indices R_a et R_f co-existent. Hormis ces indices, de nombreux indices rendent compte de la qualité de la lumière, mettant en valeur différents points de vue (voir la revue de Carlucci *et al.*, 2015) : le *Color Quality Scale* (CQS), le *Flattery Index*, le *Color Preference Index*, le *Feeling of Contrast Index*, le *Color Rendering Capacity*.

Pratiquement, les mélanges de trois LEDs de couleur rouge-vert-bleu ont un rendu des couleurs très médiocre.

Il est prouvé qu'en améliorant le rendu des couleurs, il est possible de diminuer les niveaux lumineux sans entraîner de désagrément. En outre, bien qu'il ne soit pas directement perceptible par le sujet, un mauvais rendu des couleurs pourrait être source d'inconfort visuel. (Papamichaela, *et al.*, 2015)

3.7.1.3.3.2 Effets du spectre sur l'inconfort

Alors que la couleur et la répartition spectrale de luminance n'affectent pas l'éblouissement perturbateur, il apparait que ces deux facteurs affectent l'éblouissement d'inconfort. Il semble que les cônes bleus ont, plus que les autres familles, une forte sensibilité aux rayonnements de courtes longueurs d'onde et que cette sensibilité augmente notablement avec l'excentricité rétinienne (Bullough, 2009) (*cf.* Figure 61). Ainsi, la sensibilité spectrale à l'éblouissement inconfortable $V_{DG}(\lambda)$ peut être modélisée par la combinaison de la fonction d'efficacité lumineuse photopique $V_{10}(\lambda)$ et de la sensibilité spectrale des cônes bleus $S(\lambda)$.

$$V_{DG}(\lambda) = V_{10}(\lambda) + kS(\lambda)$$

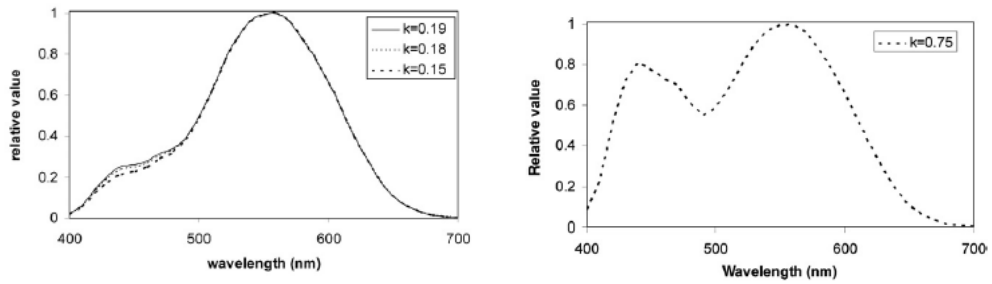


Figure 2. Optimum luminous efficiency functions $V_{DG}(\lambda)$ for the 5° extrafoveal stimuli.

Figure 3. Optimum luminous efficiency function $V_{DG}(\lambda)$ for the 10° extrafoveal stimuli.

Figure 61 : fonctions d'efficacité lumineuse révélant la sensibilité à l'éblouissement inconfortable, déterminées expérimentalement en vision extra-fovéale : à 5° et à 10° d'excentricité

Source : Bullough, 2009

3.7.1.4 Migraines et fatigue visuelle

3.7.1.4.1 Migraines

Une étude américaine évalue le taux de prévalence des migraines à 5,6 % chez les hommes et 17,1 % chez les femmes (Stewart *et al.*, 2013). Il s'agit de migraines selon un critère de

prévalence : 15 crises sévères dans le mois, définies selon le Headache Classification Subcommittee of the International Headache Society

On sait, par les réponses aux questionnaires et par l'enregistrement de signaux corticaux, que l'organisation de la scène visuelle a des répercussions sur le confort. Or, les scènes visuelles naturelles sont caractérisées par une distribution régulière de fréquences spatiales[51] (f_x, f_y), décroissante en 1/*f*, une sélection de couleurs assez peu saturées (avec peu de couleurs vives), une gamme de vitesses assez réduites, un champ visuel de l'ordre de 180°, des variations de luminosité dominées par les alternances circadiennes et climatiques. Le fonctionnement du système visuel serait optimisé pour les scènes naturelles. Les scènes naturelles mobiliseraient, à un moment donné, un minimum de neurones répartis dans l'ensemble du cerveau tandis que la majorité des neurones voisins resteraient silencieux. Dans un environnement artificiel où les scènes sont construites à partir d'une distribution anormale de fréquences spatiales, les sujets manifestent un inconfort d'autant plus gênant que la distribution s'écarte de 1/*f*, que l'énergie aux alentours de 3 cycles par degré – la fréquence moyenne à laquelle le système visuel est le plus sensible – est élevée, et que ces anomalies couvrent une grande étendue du champ visuel. Les images et les scènes inconfortables sont celles qui exigent une réponse hémodynamique accrue du cerveau, signe d'une charge mentale accrue. Cet excès d'activité neuronale a été constaté par imagerie fonctionnelle cérébrale (iRMf) ou par oxymétrie cérébrale (*Near-Infrared Spectroscopy* ou NIRS). Il est particulièrement présent chez les sujets migraineux ou photophobes. L'inconfort et l'activité cérébrale sont aussi accentués par des contrastes chromatiques élevés. Comme ceux-ci sont modifiés par le spectre de l'éclairage, certaines manipulations du spectre sont susceptibles d'exacerber les symptômes migraineux ou, au contraire, de les atténuer (Wilkins, 2016).

Il est reconnu que la photophobie accompagne la plupart des formes de maux de tête, et particulièrement les migraines. La longueur d'onde de la lumière affecte inégalement la photophobie. Main *et al.* (2000) ont trouvé que la lumière de courtes longueurs d'onde, et dans une moindre mesure de grandes longueurs d'onde, est plus inconfortable chez les migraineux (21 sujets) que chez ceux qui souffrent de céphalées de tension (19 sujets) ou chez des sujets témoins (21 sujets), tous testés entre des crises. Chez 20 enfants migraineux, Good *et al.* (1991) ont trouvé que l'activité cérébrale bêta induite était supprimée par le port de lunettes roses, associée à une réduction de la fréquence des maux de tête, ce qu'ils n'observaient pas avec le port de lunettes bleues, montrant que les deux longueurs d'onde ont des effets différents sur l'activité corticale (Digre *et al.* 2012).

Récemment, un nouveau circuit détectant la lumière, indépendant du nerf optique, a été identifié dans le nerf trijumeau et pourrait influencer le comportement à une lumière forte (Matynia *et al.*, 2016). Chez la souris, comme chez l'Homme (4 individus décédés âgés), environ 3 % des neurones des ganglions trijumeaux contenant des nocicepteurs (récepteurs de la douleur) contiennent aussi de la mélanopsine. Ils sont plutôt situés dans la branche ophtalmique du nerf trijumeau. Ces neurones sont intrinsèquement sensibles à la lumière . En effet, lorsqu'ils sont isolés, ils répondent à une lumière intense de 480 nm, avec des retards à l'allumage et à l'extinction analogues aux retards mesurés dans les CGM.

De la mélanopsine est aussi présente dans quelques cellules de la cornée et de la choroïde de la souris, mais est absente du cristallin. La mélanopsine est souvent co-localisée avec le CGRP, un peptide impliqué dans la migraine, tant dans les CGM que dans les neurones des ganglions trijumeaux. Chez la souris, le réflexe d'aversion à la lumière est maintenu après dégénération exclusive des fibres du nerf optique, voire amplifié par l'administration de triglycérine, connue pour susciter des migraines. Seule la lumière intense déclenche la

[51] La fréquence spatiale informe sur le nombre d'éléments comptés dans la scène. Elle est mesurée en cycles par degré (cpd).

réponse des neurones des ganglions trijumeaux, vraisemblablement en atteignant leurs extrémités dendritiques proches de la surface comme dans la cornée. L'identification d'un circuit détectant la lumière dans le nerf trijumeau ouvre la voie à une exploration de la migraine.

3.7.1.4.2 Fatigue visuelle

La fatigue visuelle, manifestée par un certain nombre de symptômes subjectifs, est à distinguer de la baisse de performance visuelle, mesurable objectivement. D'après l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) (Cail, 2012), il s'agit d'un « effet physiologique réversible résultant de sollicitations excessives des muscles oculaires et de la rétine, pour tenter de conserver une image nette par des ajustements inefficaces. Elle s'accompagne d'une réduction de la capacité nécessaire à la réalisation d'une tâche visuelle et d'une modification de la stratégie d'accomplissement de cette tâche ; elle constitue un signal d'alarme ». Les modifications fonctionnelles concernent l'ouverture pupillaire, l'accommodation, sa dynamique et ses fluctuations, les mouvements oculaires, la fréquence anormale des clignements, l'amplitude de vergence, les phories (déviation des axes du regard), la fréquence critique de fusion, l'acuité visuelle et la sensibilité au contraste. La fatigue visuelle est multifactorielle et son évaluation est complexe. Elle a été particulièrement étudiée dans le cadre du travail sur écran, du fait de nombreuses plaintes exprimées par les usagers (Caill, 2014).

3.7.1.5 Conclusion générale sur l'éblouissement et l'inconfort

Cette revue des connaissances sur l'éblouissement et l'inconfort montre qu'il existe des outils et des critères pour évaluer l'effet des sources d'éclairage sur la santé humaine. Dans ce cadre, on se préoccupe de l'éblouissement perturbateur (ou d'incapacité) quand les recherches tendent à développer l'usage des sources, ou de l'éblouissement d'inconfort quand les recherches tendent à améliorer le bien-être des individus.

3.7.2 Analyse de la littérature scientifique disponible

La disponibilité commerciale des produits LED a entraîné de nouveaux travaux sur l'éblouissement et l'inconfort perçus par les usagers : l'éblouissement amenant une baisse de performance tandis que l'inconfort est du domaine du ressenti. Nous commencerons par décrire certains travaux menés en laboratoire, de portée générale. Ensuite, nous citerons d'autres travaux, ayant un champ d'appplication bien identifié : les performances des éclairages à LED évalués en extérieur, de nuit, et l'éblouissement d'inconfort, évalué en intérieur, de jour.

3.7.2.1 Modélisation et études de l'éclairage LED en laboratoire

3.7.2.1.1 Voile de luminance généré par les LED

Une simulation numérique de la « luminance équivalente » produite par 3 types de luminaires d'éclairage public à LED a été effectuée pour identifier le moins éblouissant dans différentes conditions (Sun *et al.*, 2014) . Le calcul de la luminance de voile est basé sur la formule CIE d'éblouissement d'incapacité. L'étude conclut qu'en visée horizontale et intermédiaire, les 3 configurations donnent le même éblouissement (*cf.* Figure 62) ; la taille de la matrice LED ne joue pas ; l'âge a un effet important : à 60 ans, la luminance équivalente est 1,5 fois plus grande qu'à 40 ans. En visée directe du luminaire, la luminance équivalente dépend de la taille de la matrice ; elle atteint son minimum à partir d'une matrice 3x3 et ne change que peu avec l'augmentation de la densité numérique des LED ; la luminance directe est tellement élevée que la contribution de la luminance de voile et donc de l'âge, est négligeable (Sun *et al.*, 2014).

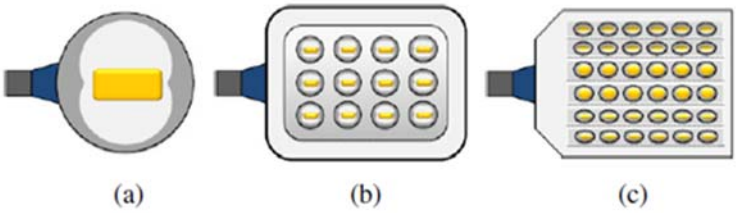


Fig. 1. (Color online) The three major types of optical design for LED street lamps: (a) CSL type, (b) ALA type, and (c) TA type.

Figure 62 : motifs des luminaires à LED étudiés par Sun *et al*, 2014

3.7.2.1.2 Inhomogénéité spatiale, le point sur les sources à matrice de LED

La technologie LED permet de diversifier l'emplacement des sources. Par exemple, les LED apparaissent en éclairage d'accentuation, dans des plafonniers, encastrées dans le plancher ou dans du mobilier.

Un point sur l'impact des sources non-uniformes sur l'éblouissement d'inconfort a été fourni par Geerdinck et ses collaborateurs (Geerdinck *et al.*, 2016).

Après avoir passé en revue 43 articles publiés essentiellement durant les 4 dernières années, les auteurs ont dégagé les paramètres les plus pertinents pour caractériser une source non-uniforme d'après son impact sur la sensation d'éblouissement (*cf.* Figure 63).

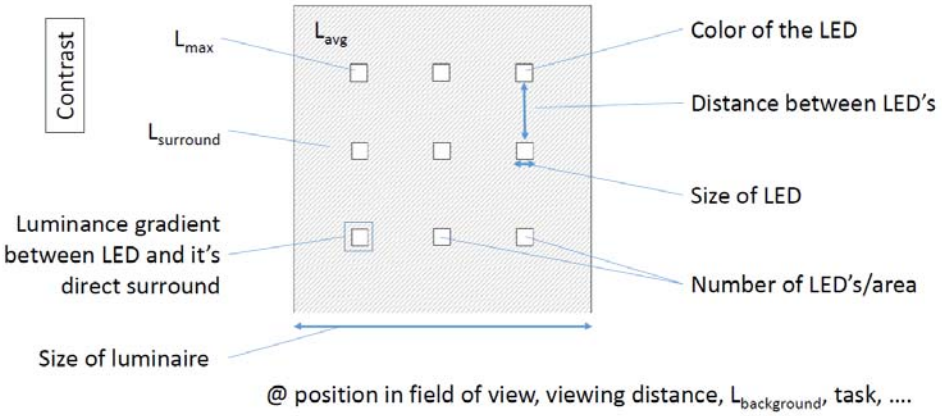


Figure 63 : paramètres d'arrangement des LED, influençant la perception de l'éblouissement

Source : Geerdinck, 2016

Toutes les études (sauf une) s'accordent à montrer que les sources non-uniformes sont plus éblouissantes que les sources uniformes, et que plus le contraste entre la luminance maximum du luminaire et sa luminance moyenne est élevé, plus la sensation d'inconfort est grande. Précisément :

- à luminance moyenne identique, la sensation d'éblouissement augmente quand la dimension des LED diminue ou quand le nombre de LED par unité de surface diminue (Yang *et al.,* 2015) ;
- l'espacement des LED a un effet plus complexe. En vision directe, un espacement angulaire proche de l'acuité visuelle augmente l'inconfort ;
- c'est en vision fovéale que l'impact des sources non-uniformes est le plus différent de l'impact des sources uniformes. À 30 degrés d'excentricité, il n'y a plus qu'une faible différence, sauf si la source gênante attire le regard du sujet ;

- pour les quelques études qui mentionnent l'effet de l'arrière-plan, toutes conviennent que l'éblouissement d'inconfort diminue quand la luminance du fond augmente (Tashiro *et al.*, 2015 ; Yang *et al.*, 2015) ;
- les effets de tous les paramètres ne sont pas indépendants les uns des autres.

Les études ont pu être réalisées en laboratoire ou dans des maquettes de bureau, rarement sur site. La photométrie de la source non-uniforme ne fait pas encore l'objet de recommandations. On met en garde les utilisateurs de video-luminancemètres dont la résolution ne serait pas assez fine. La plupart des études interrogent les sujets sur leur ressenti d'inconfort en utilisant une échelle sémantique subjective ; seules quelques-unes mesurent la fatigue ou la visibilité. Les résultats restent applicables aux conditions propres à chaque étude. On ne dispose pas encore d'une synthèse.

Quatre approches sont proposées pour améliorer la formule de l'UGR :

- corriger l'indice de position ;
- remplacer la luminance de la source par une « luminance effective » prenant essentiellement en compte et pondérant les pixels les plus lumineux (Tashiro *et al.*, 2015) ;
- réviser la dimension angulaire de la source en appliquant un seuil de luminance ;
- revoir catégoriquement la définition de la non-uniformité (Yang *et al.*, 2016).

De nouvelles propositions émergent, fondées sur des modèles physiologiques de la sensibilité au contraste de luminance. La CIE devrait publier de nouvelles recommandations en 2018.

Dans deux séries d'expériences, 20 puis 13 observateurs, âgés de 20 à 39 ans, ont évalué, sur une échelle à 7 points, dans le noir et à deux positions, l'éblouissement exercé par 3 panneaux à LED : à LED bleues (435, 455 ou 477 nm, plus ou moins intenses), à LED blanches au pic bleu plus ou moins promoncé, et en LED trichromes pour différentes températures de couleur (*cf.* Figure 64) (Luo *et al.*, 2017).

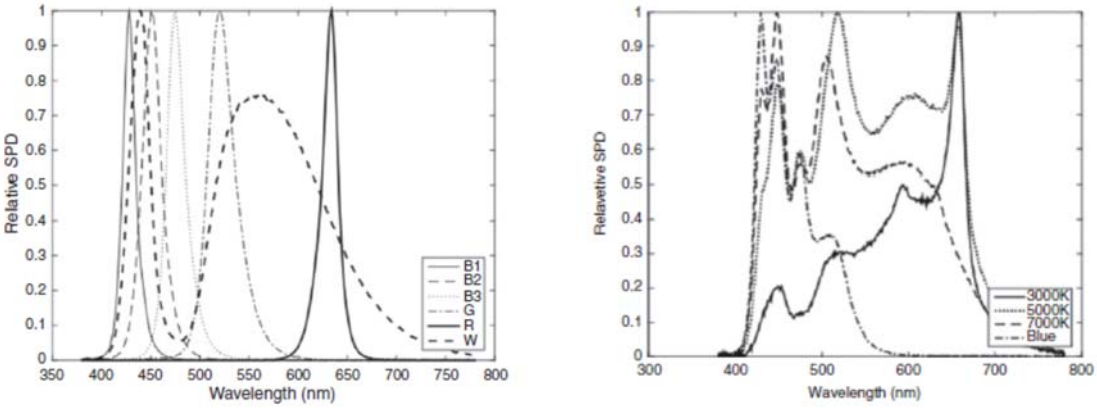


Figure 64 : répartition spectrale relative d'énergie des sources utilisées par Yang *et al.*, 2016 et Yang *et al.* 2017, synthétisées par Luo *et al.*, 2017

L'augmentation de l'éblouissement d'inconfort lié à la présence de rayonnements bleus dans le spectre est confirmée. Comme proposé par Bullough (2011), la fonction d'efficacité lumineuse photopique $V_{DG}(\lambda)$ inclut la sensibilité des cellules à mélanopsine et des cônes sensibles au bleu, avec des contributions variables selon la localisation rétinienne (cf. Figure 65).

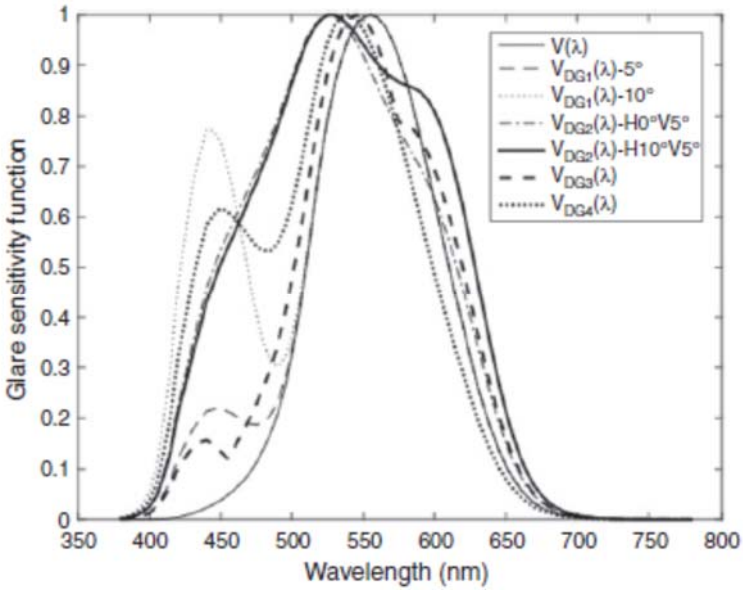


Figure 65 : fonctions d'efficacité lumineuse relative pour l'éblouissement d'inconfort

3.7.2.1.3 Tolérance des panneaux d'affichage publicitaire extérieurs

Des expériences reproduisant les conditions géométriques de la vision des panneaux d'affichage publicitaire, la nuit, ont été menées en laboratoire (panneau de LED à 466,73, 517,97 et 630,38 nm, affichage blanc à 10 052 K, 160 × 128 pixels RGB couvrant 1,60 m × 1,28 m, observé à 5 m, *cf*. Figure 66) (Lin *et al.*, 2014).

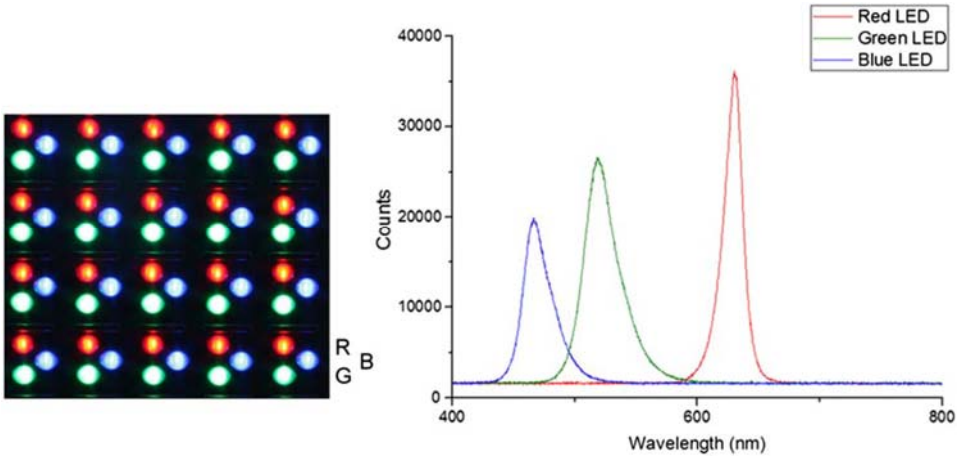


Figure 66 : caractéristiques physiques de l'affichage des pixels d'un panneau publicitaire

Source : Lin et al.*, 2014*

Les auteurs ont joué sur quatre facteurs : le niveau de lumière ambiant (arrière-plan 5 ou 25 lx), la fréquence de papillotement (0 à 32 Hz), la luminance du panneau (505 à 5 063 cd/m²), l'angle d'observation (9,1° à 18,2°). Les participants (dont le nombre n'est pas indiqué) ont jugé le confort vis-à-vis du papillotement et le confort global. Le niveau de lumière ambiant est resté sans effet sur les résultats. Les luminances élevées et les observations sur de grands angles apportent le plus d'inconfort. C'est la fréquence de 15 Hz qui génère le plus d'inconfort. Au vu de ces résultats, les auteurs affirment que seule la combinaison de la luminance la plus faible (500 cd/m²) d'une fréquence inférieure à 6 Hz ou supérieure à 24 Hz peut procurer un niveau de confort admissible de 5 points sur l'échelle de De Boer (Lin *et al.*, 2014).

Le nombre de sujets n'est pas indiqué ; les auteurs ont procédé à des comparaisons intra-individuelles, les écarts entre individus étant très importants.

3.7.2.1.4 Effets du spectre et de la couleur sur l'inconfort

Les sources LED colorées, bleues (459 nm) et rouges (628 nm) entre autres, paraissent plus lumineuses que les sources blanches de luminance identique. Kimura-Minoda et Ayama (Kimura *et al.*, 2010) ont montré une corrélation positive entre la sensibilité du sujet à la luminosité (voir l'Annexe 3 sur la luminance et la luminosité) et la sensibilité à l'éblouissement inconfortable (Kimura-Minoda *et al.*, 2010).

Trois expériences menées sur 6 à 10 sujets ont confirmé que la présence d'un fond lumineux coloré réduit notablement l'inconfort d'une matrice 3×3 de LED blanches éblouissantes. Toutefois, le fond bleu le fait avec moins d'efficacité qu'un fond jaune. (Chromaticité des LED blanches : x = 0,28, y = 0,32, et des fonds (dimensions de la matrice de LED : 2 degrés, et du fond coloré : 4 degrés). Éclairement à l'entrée de l'œil : 4, 6, 8, 10, et 12 lx en provenance des LED blanches, 3 lx en provenance du fond) (Sweater-Hickcox *et al.*, 2013).

Les expériences confirment l'influence de la répartition spectrale de la source sur le niveau d'éblouissement inconfortable (*discomfort glare* DG). La sensibilité $V_{DG}(\lambda)$ de l'observateur pouvant être convenablement modélisée en combinant la fonction d'efficacité lumineuse $V_{10}(\lambda)$ et le spectre d'action des cônes S (improprement nommés cônes bleus) (Sweater-Hickcox *et al.*, 2012) (*cf.* Figure 67).

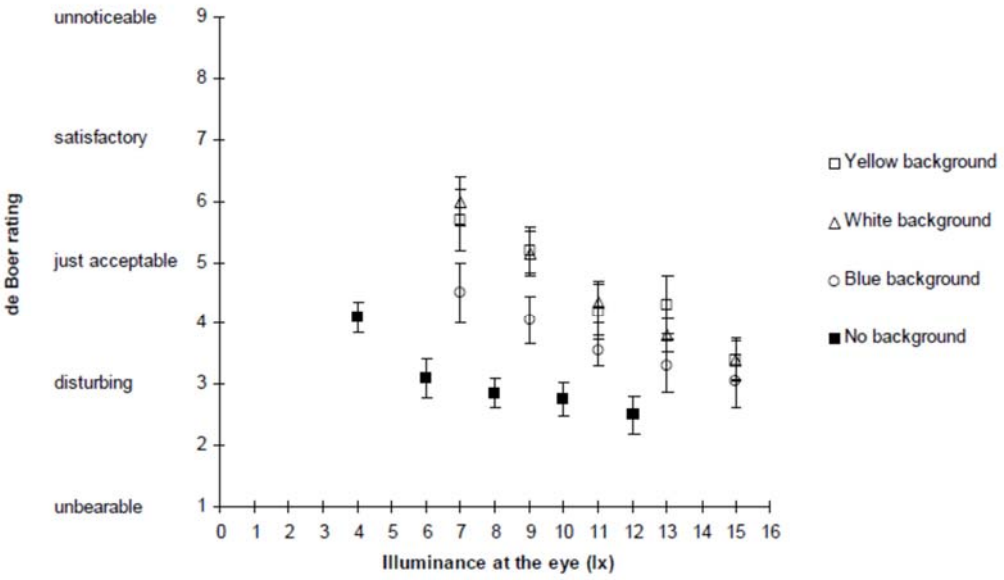


Figure 3. Mean de Boer ratings (± standard error of the mean) for the different experimental conditions.

Figure 67 : réduction de l'inconfort par un fond coloré

Source : Sweater-Hickcox et al., 2012

Fondé sur les données spectroradiométriques de terrain de 5 sources LED, 5 lampes au sodium à haute pression et 27 lampes fluorescentes, et la modélisation de 25 illuminants D de la CIE, dont les températures de couleur se situent entre 2 000 K et 17 500 K, le calcul montre que les sources artificielles excitent nettement moins la mélanopsine que la lumière naturelle (*cf.* Figure 68). Cette conclusion est valable quelle que soit la température de couleur à laquelle on effectue la comparaison (Cao, Barrionuevo, 2015).

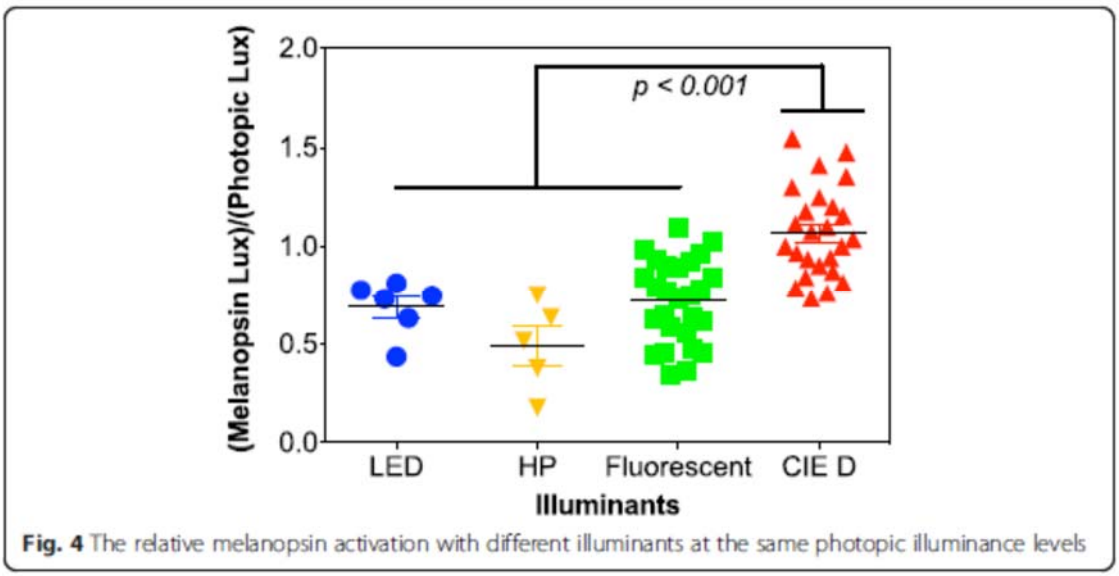


Figure 68 : calcul de l'excitation de la mélanopsine pour différentes technologies d'éclairage

Source : Cao et Barrionuevo, 2015

Le choix des sources a été fait sur la base de la distribution des illuminants étudiés par les mêmes auteurs (Cao et Barrionuevo, 2014). Toute la gamme des températures de couleur usuelles a pu être étudiée (*cf*. Figure 69).

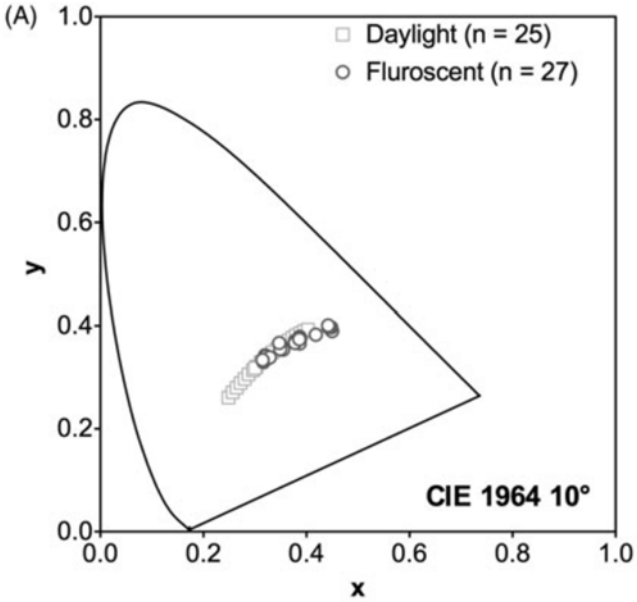


Figure 69 : distribution des illuminants étudiés par Cao et Barrionuevo, 2014.

3.7.2.1.5 Effet de l'éclairage à LED sur l'ouverture pupillaire

Le paradoxe suivant a été relevé dans une étude sur la relation de l'appréciation de l'éclairage en fonction de la température de couleur et du niveau lumineux : lorsque la température de couleur s'élève, les sujets jugent l'éclairage plus lumineux alors que leur pupille se contracte, c'est-à-dire que moins de lumière parvient à leur rétine (Viénot, Durand, Mahler, 2009).

Un dispositif multi-LED (615 nm, 525 nm, 500 nm et 470 nm) permet de générer des lumières stimulant indépendamment et exclusivement les cônes ou la mélanopsine, les autres photorécepteurs restant « silencieux ». En opérant à un niveau photopique pour que les bâtonnets soient saturés, les auteurs ont mesuré des changements conséquents du diamètre pupillaire quand – seule – la mélanopsine est excitée (Tsujimura *et al.*, 2010).

Un système d'éclairage à sept diodes de couleur était exploité pour produire de véritables éclairages métamères (même couleur, même éclairement, mais spectres différents), afin de stimuler plus ou moins, mais dans le même sens, les CGM exprimant la mélanopsine et les bâtonnets (*cf.* Figure 70). Il a été vérifié que le diamètre de la pupille augmente significativement lorsque l'excitation des cellules exprimant la mélanopsine et des bâtonnets est à un minimum. Pour 14 observateurs, l'augmentation moyenne du diamètre pupillaire a été de 12 % (Viénot *et al.*, 2012). Il faut toutefois noter que les éclairages LED de cette étude ont un spectre très éloigné de celui des LED commerciales.

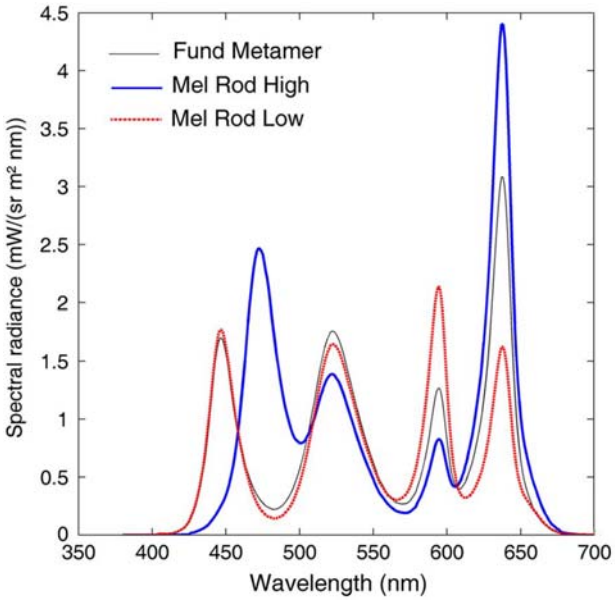


Figure 70 : répartition spectrale de la lumière obtenue par association de 7 LED de couleur pour maximiser (en bleu) ou minimiser (en rose) l'excitation mélanopique

Source : Viénot et al., 2012

L'effet de cinq éclairages (deux sources LED commerciales, « blanc chaud » à 2 970 K et « blanc froid » à 5 720 K, et trois lumières métamères à 2 400 K ± 20 K à 100 lx ou 2 560 K ± 20 K à 210 lx, (précisément deux lumières multi-LED et une lumière incandescente) a été évalué pour une comparaison. La réponse visuelle a été mesurée, d'une part objectivement, sur des séquences filmées de la pupille et, d'autre part subjectivement, à l'aide de questionnaires. L'étude a porté sur 9 sujets agés de 24 à 65 ans. Les résultats confirment la contraction de la pupille avec l'élévation du niveau lumineux (réduction de surface de 29 % entre 100 et 210 lx) et de la température de couleur (réduction de surface de 14 % en moyenne entre l'incandescence et la LED « blanc froid »). Grâce à l'introduction de lumières métamères (même couleur, même éclairement, mais spectres différents), il apparaît que le spectre de la lumière agit aussi sur le diamètre pupillaire. Particulièrement, la lumière de la LED commerciale « blanc chaud » dilate davantage la pupille qu'attendu, compte tenu de sa température de couleur. Ainsi, l'énergie disponible autour de 480 nm est mieux corrélée avec l'ouverture pupillaire que ne l'est la température de couleur. La variation de surface pupillaire est supérieure à 3 %. Interrogés sur leur ressenti, tous les observateurs ont noté l'apparence éblouissante de la lumière de la LED commerciale « blanc froid », attribuable à sa température de couleur élevée, mais ils n'ont pas exprimé de gêne notable avec les différents spectres. À noter que les variations de répartition spectrale des lumières multi-LED ont été exacerbées (maximisées) pour explorer

l'effet du spectre sur l'ouverture pupillaire et ne devraient pas être rencontrées en éclairage domestique (Le Rohellec et Viénot, 2012).

Une comparaison de l'effet d'une source fluorescente à 5 000 K et de deux sources LED à 3 000 K a porté sur la sécrétion de mélatonine, le temps de montée de la mélatonine et le diamètre pupillaire. L'étude a été effectuée de nuit sur 8 sujets masculins. Tandis que les résultats montrent un surplus significatif de la secrétion de mélatonine avec les LED, il n'a pas été observé de différence significative sur le diamètre pupillaire. Les spectres des sources étaient représentatifs des éclairages retrouvés sur le marché ; ceux des LED ressemblaient à un spectre de LED blanches classique additionné d'une composante rouge (*cf*. Figure 71) (Lu *et al.*, 2016).

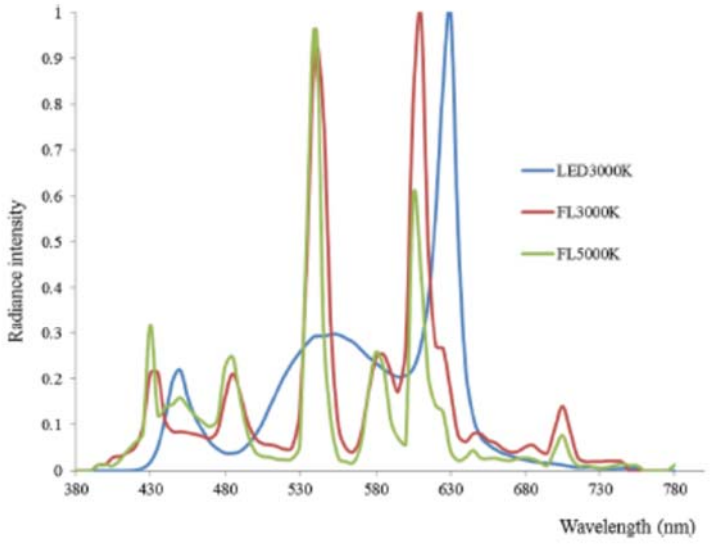


Fig. 5 The experiment 2 trial spectral compositions for three different correlated color temperatures: LED 3021 K, FL 3257 K and FL 4802 K

Figure 71 : répartition spectrale d'énergie des sources LED et de la source fluorescente comparées dans l'étude de nuit de Lu *et al*., 2016

Avec l'âge, le cristallin jaunit et s'opacifie, et la surface pupillaire diminue. Une comparaison des surfaces pupillaires a porté sur 60 sujets jeunes (21-30 ans), 54 sujets normaux (≥50 ans), 107 sujets (≥50 ans) avec cataracte modérée, 18 sujets (≥50 ans) avec cataracte sévère. Alors que la quantité de lumière bleue atteignant la rétine est plus sévèrement réduite par le jaunissement du cristallin que la quantité de lumière rouge, les auteurs ont constaté une réduction de surface pupillaire équivalente en bleu (469 nm) et en rouge (631 nm). Un tel résultat laisse penser à l'existence d'un mécanisme compensatoire à l'appauvrissement de l'éclairement rétinien en lumière bleue (Rukmini *et al.*, 2017).

3.7.2.1.6 Exploitation de réponses physiologiques à l'exposition à des éclairages à LED

La fatigue visuelle et la concentration procurée par 12 luminaires à LED différents (4 000 K, 6 000 K ; longueur d'onde dominante de la lumière bleue : 420 nm, 460 nm, 480 nm ; 400 lx, 700 lx) ont fait l'objet de mesures objectives. Six jeunes hommes et six jeunes femmes ont passé des examens physiologiques, avant et après une heure de travail de lecture sur papier ou sur écran (caractérisation manquante). Les enregistrements de l'électroencéphalogramme, du rythme cardiaque et des clignements des yeux sont des indicateurs de l'activité des systèmes nerveux sympathique (préparant à l'action) et parasympathique (correspondant à la relaxation). Associés à la mesure de la fréquence critique de fusion, les enregistrements sont révélateurs de fatigue visuelle ou de baisse de

concentration. L'intérêt de l'étude tient à la possibilité d'évaluations subjectives qu'elle offre mais les résultats sont imprécis et confus. (Wu *et al.*, 2017).

Contrairement aux métriques empiriques classiques, un modèle physiologique incorporant le mécanisme des champs récepteurs[52] à antagonisme centre pourtour, avec la réponse pupillaire et la position de la source en paramètres, est proposé pour évaluer l'inconfort. Le test par des observateurs (dont le nombre n'est pas mentionné) indique que les matrices de luminaires, sont inconfortables, particulièrement lorsque les sources sont espacées entre 6 et 9,3 cycles par degré (Scheir *et al.*, 2017).

Alors qu'il est reconnu que la migraine est exceptionnellement exacerbée par la lumière, l'exposition à la lumière verte exacerbe la migraine significativement moins que l'exposition à la lumière blanche, bleue, ambre ou rouge chez des patients ayant une vision normale. Les chercheurs ont évalué chez 69 patients migraineux l'intensité du symptôme, les palpitations et l'étendue sur le scalp du mal de crâne. Les lumières étaient présentées à 1, 5, 20, 50 et 100 cd/m^2 dans une coupole Ganzfeld. À 100 cd/m^2, 80 % des patients ont éprouvé une intensification de la migraine. Il a été trouvé que la lumière verte (520 - 540 nm) exacerbe la migraine significativement moins que les lumières blanches, bleues (447 $\pm$ 10 nm), ambrées (590 $\pm$ 10 nm), ou rouges (627 $\pm$ 10 nm). Chez 43 patients, l'électrorétinogramme en vert ne diffère pas de l'ERG en blanc, ambre ou rouge. L'amplitude de l'ERG *flicker* est significativement plus faible en vert que pour les autres couleurs. Chez 28 patients, l'amplitude des potentiels évoqués visuels[53] est moindre en vert que dans les autres couleurs. Les résultats suggèrent que les mécanismes de la migraine ophtalmique pourraient avoir leur origine dans la voie retino-thalamique et plutôt leur siège dans le cortex. Les enregistrements unicellulaires chez le rat semblent aller dans le même sens (Noseda *et al.*, 2016).

La lumière verte a le pouvoir de soulager la douleur chez des rats sains et chez des rats atteints d'un traumatisme médullaire chronique (*spinal nerve ligation*, SNL). La lumière verte, agissant par l'intermédiaire du système visuel, aurait pour effet de relâcher des opioïdes endogènes dans le cerveau. Les rats, placés dans des cages transparentes, ont été exposés durant 8 heures, pendant 5 jours consécutifs, à la lumière de différents types de LED de couleur, et aussi à la lumière naturelle et à la lumière fluorescente. Avec la LED de 525 nm, le temps de latence du retrait de la patte d'une surface chaude a augmenté de 25 %. La LED bleue (472 nm) avait un effet moindre, mais encore significatif. Un éclairement de 4 lx est suffisant (Ibrahim *et al.*, 2017).

3.7.2.1.7 Variabilité individuelle et conséquences du vieillissement sur la perception du confort

Des différences d'appréciation de la lumière, ethniques ou culturelles, ont été relevées. Des observateurs coréens et caucasiens (une trentaine pour chaque session expérimentale) ont été appelés à évaluer la température de couleur et l'éclairement optimaux de divers scénarios d'éclairage à LED, dans des bureaux ou dans des locaux domestiques. Les jugements s'appuyaient sur l'aptitude de la lumière à faciliter la concentration, favoriser l'activité, apporter de l'agrément, occasionner de la fatigue visuelle. Les caucasiens ont choisi un éclairement plus élevé que les coréens, et une température de couleur moins froide pour se concentrer, lire et écrire. Pour le travail informatique, les caucasiens ne se sont

[52] On définit le champ récepteur par la région de la rétine sur laquelle un stimulus déclenche la réponse du neurone. Fonctionnellement, le centre du champ récepteur répond directement au stimulus, le pourtour répond avec le signe opposé.

[53] Le potentiel évoqué visuel (PEV) est la réponse électrique du cortex qui est provoquée par une stimulation visuelle. Les PEV résultent de l'enregistrement des variations de potentiels générés par l'activité bio-ionique du cortex occipital consécutif à un stimulus visuel dont un paramètre varie dans le temps.

préoccupés que de la fatigue visuelle, alors que les coréens ont également optimisé la luminosité. (Ko *et al.*, 2017)

L'effet de l'âge se fait sentir sur la limite entre le confort et l'inconfort (*Borderline between Comfort and Discomfort* : BCD), mais de manière très disparate. Une comparaison de l'éblouissement d'inconfort ressenti chez 6 sujets jeunes (22-23 ans) et 18 sujets agés (65-79 ans) a été menée en laboratoire, avec une source étendue ($5{,}6\times10^{-1}$ sr) ou petite ($6{,}3\times10^{-4}$ sr) dont la luminance variait de 700 cd/m^2 à 20 000 cd/m^2. En moyenne, pour la source étendue, la limite BCD augmente quand l'éclairement sur la rétine augmente, mais l'effet s'inverse pour les petites pupilles. Alors que, pour la petite source, la limite BCD diminue au fur et à mesure que l'éclairement sur la rétine augmente (cf. Figure 72). Ceci indiquerait qu'en vieillissant, les sujets sentiraient relativement moins d'inconfort si les sources devenant éblouissantes sont petites. Les auteurs n'indiquent pas la nature et les caractéristiques de la source (Akashi *et al.*, 2017).

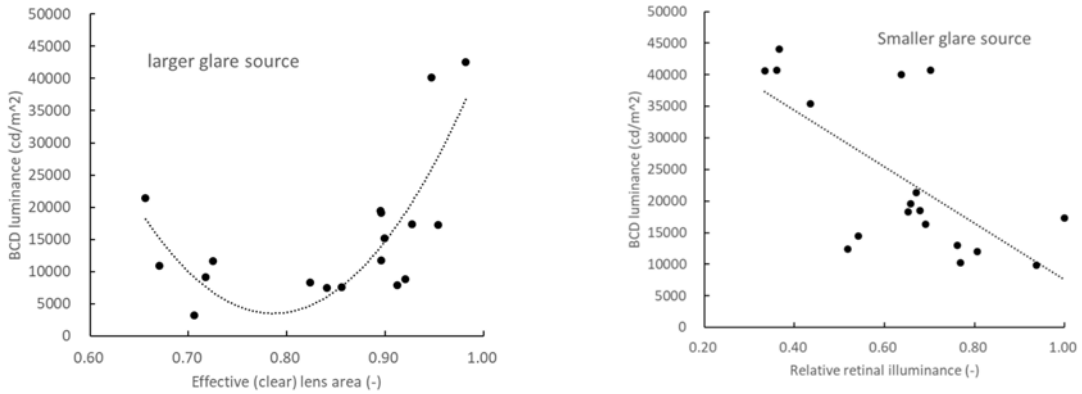


Figure 72 : valeur limite BCD en fonction de la surface effective (cristallin transparent) de la pupille

18 sujets agés - à droite : petites sources ; à gauche : sources étendues. Source : *Akashi et al., 2017*

3.7.2.1.8 Une perception particulière de la lumière relayée par les cellules à mélanopsine

Aux niveaux photopiques élevés, et en vision périphérique, la discrimination des couleurs ne peut plus s'expliquer uniquement par des réponses de cônes. L'hypothèse la plus vraisemblable serait que les cellules à mélanopsine contribuent aussi à la vision des couleurs (Horiguchi *et al.*, 2012).

Dans une expérience psychophysique, six sujets ont perçu une augmentation de la luminosité au fur et à mesure que l'excitation de la mélanopsine, seule, augmentait (Brown *et al.*, 2012).

Une étude en IRM fonctionnelle chez 14 sujets a révélé des régions corticales activées spécifiquement par la mélanopsine. Il a été possible de créer une stimulation différentielle des CGM, à l'aide de 7 LED colorées, sans modifier le signal des cônes et des bâtonnets. Cette possibilité est donnée par la substitution de stimuli métamères, inexploitable par les cônes. Quatorze participants ont subi un examen d'IRM fonctionnelle, regardant alternativement une lumière excitant au maximum (lumière HM : *high melanopic*) la mélanopsine et une lumière l'excitant au minimum (lumière LM : *low melanopic*), présentée sur tout le champ visuel, la région fovéale exceptée. L'expérience s'est trouvée compliquée du fait que chaque observateur présentait de légères variations de vision des couleurs et percevait des différences de couleur entre HM et LM. Des tests psychophysiques supplémentaires ont permis de personnaliser HM et LM. Des expériences complémentaires ont permis d'exclure toute participation des cônes (*cf.* Figure 73).

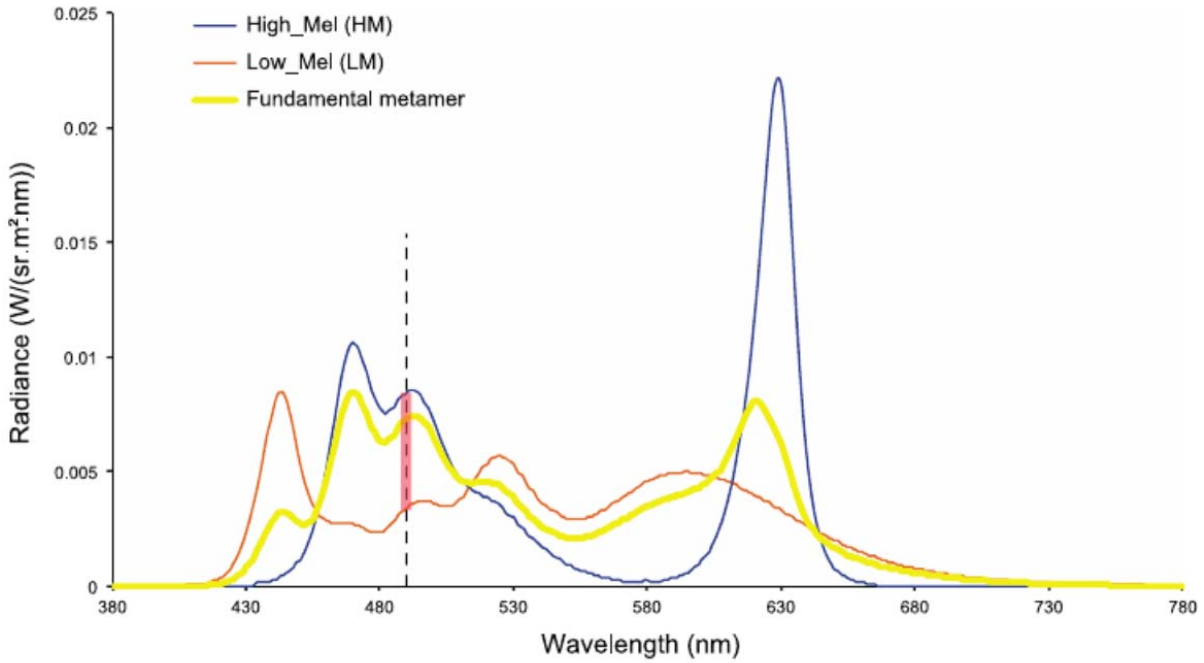


Figure 73 : répartition spectrale de la paire de lumières blanches métamères excitant au maximum la mélanopsine (lumière HM, High_mel) et une lumière LM (Low_Mel) excitant au minimum la mélanopsine

Source : Hung et al., 2017

Le signal BOLD (*blood-oxygen-level dependent*) de l'IRM fait apparaître une suractivité dans le champ oculomoteur frontal binoculaire, en présence du stimulus excitant au maximum la mélanopsine (lumière HM). En outre, une activité bilatérale a aussi été trouvée au niveau du gyrus temporal inférieur et du noyau caudé. Pour la première fois, cet article montre que la lumière captée par les CGM déclenche des signaux qui engagent des régions corticales identifiées et reconnues pour leur rôle dans l'attention et les mouvements des yeux (au fur et à mesure que l'excitation de la mélanopsine, seule, augmentait (Hung *et al.*, 2017).

La stimulation de la mélanopsine est perceptible par l'humain. En intervertissant momentanément (pendant 3 s) deux lumières orange dont les spectres ont été spécialement conçus pour exacerber la stimulation de la mélanopsine, les auteurs ont enregistré une réponse caractéristique dans l'aire visuelle primaire V1, par IRM fonctionnelle, chez 4 sujets. Les cônes ne pouvaient pas détecter l'impulsion parce que la couleur ne changeait pas, ou trop peu. Un contrôle pupillométrique était effectué pour s'assurer que le signal provenait des cellules ganglionnaires à mélanopsine. Ensuite, les mêmes impulsions ont été montrées à 20 observateurs qui les ont jugées déplaisantes, floues et faiblement lumineuses (Spitschan *et al.*, 2017).

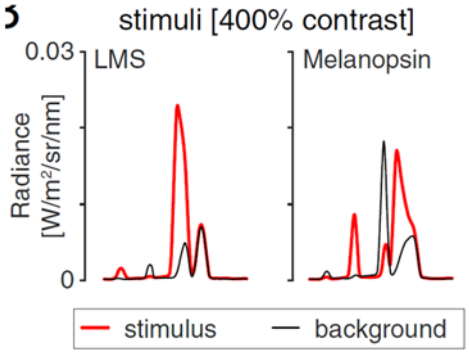


Figure 74 : répartition spectrale d'énergie de lumières orange métamères présentées alternativement comme stimulus pendant 3 s ou comme lumière de fond

Source : Spitschan et al., 2017

3.7.2.2 Performances visuelles de nuit obtenues avec des éclairages à LEDs

Les études sont nombreuses, notamment en éclairage public et en conduite routière.

3.7.2.2.1 Conduite automobile et éclairage routier

Différentes technologies de feux de route ont été comparées en regard d'indicateurs objectifs de performance en conduite automobile et de l'appréciation subjective des conducteurs. Cinq véhicules instrumentés ont été équipés d'ampoules halogène-tungstène, de lampes à décharge, ou d'ampoules à LED de température de couleur proximale T_{cp} 4 500 K, 5 500 K ou 6 500 K. Vingt-cinq sujets ont conduit successivement les cinq véhicules, en début de nuit, sur un parcours de 21,5 km ouvert à la circulation, traversant des secteurs urbains ou routiers, comportant des lignes droites et des courbes, des montées et du plat. Les mesures objectives de performance de conduite – contrôle de la vitesse, maintien dans la file et charge du travail déduite de la tenue du volant – varient considérablement selon le tronçon routier, mais ne donnent pas de résultats différents entre les cinq types de lampes. Les appréciations subjectives présentent de fortes disparités selon la technologie – les lampes halogène-tungstène, et parfois les lampes à décharge étant moins appréciées – avec une légère tendance vers un jugement plus positif pour les *T*cp plus élevées. Précisément, les sujets âgés préfèrent les *T*cp élevées et les jeunes les *T*cp basses. Mais tous ces effets n'ont rien de comparable aux variations constatées selon le type de route. On peut regretter l'absence de mesures comparatives sur la visibilité des obstacles ou des piétons, et sur l'éblouissement provoqué par les différentes technologies de feux de route chez un conducteur approchant de face (Flannagan *et al.*, 2014).

Une étude de cas compare quatre installations d'éclairage public à LED réalisées en Finlande pour remplacer une installation HPS (sodium haute pression). Les calculs reposent sur le modèle de photométrie mésopique établi par la CIE (CIE, 2010) sur la base de la performance de détection visuelle. Les quantités photométriques mésopiques favorisent les courtes longueurs d'onde pour les faibles niveaux lumineux car elles prennent en compte la sensibilité spectrale scotopique, décalée vers les courtes longueurs d'onde par rapport à la sensibilité spectrale photopique, plus précisément le rapport S/P de l'efficacité lumineuse scotopique S sur l'efficacité lumineuse photopique P. Ce dernier est égal à 1,16 pour les LED à 3 220 K et à 2,18 pour les LED à 6 660 K. En matière routière, la perte de visibilité est évaluée par l'indice TI (« *threshold increment* ») qui se calcule à partir d'un rapport entre la luminance de voile et la luminance moyenne de la chaussée. La luminance de voile est additive pour plusieurs luminaires. TI exprime le pourcentage de contraste supplémentaire à produire pour qu'un objet devienne juste visible en présence de luminance de voile. Les mesures collectées pendant l'expérience menée grandeur nature, montrent que les indices TI mesurés sont tous plus grands (défavorables) que les indices TI calculés. La différence

provient du fait que plusieurs paramètres sont mal pris en compte comme l'espacement des luminaires, le tracé de la route, la réflectance de la chaussée. L'éblouissement en éclairage routier et public mérite davantage de recherche (Ylinen *et al.*, 2011).

Des solutions innovantes, fondées sur le rapport S/P et jouant sur le rapport cyclique de la technologie PWM, sont proposées pour optimiser la couleur et le niveau lumineux de l'éclairage automobile, mais pas encore validées (Wu *et al.*, 2017).

La réglementation actuelle des feux de signalisation (EN 12368 2006) fixe des limites d'intensité à respecter de jour et de nuit. En technologie classique, des limites d'intensité sont facilement transposables en limites de luminance. Ce n'est plus le cas avec la technologie à LED constituée de points lumineux que l'on commence à distinguer à l'approche du feu. La luminance maximum réelle d'un feu en technologie LED est toujours supérieure à la luminance moyenne. Dans un exemple particulier, elle est 25 fois supérieure à la luminance moyenne ; elle dépasse 15 fois la luminance maximum à respecter (Ixtaina *et al.,* 2015).

Les deux technologies ont ensuite été comparées.

La sensation d'inconfort a été évaluée par 30 observateurs en situation de laboratoire simulant une situation de circulation, le feu présenté à 5 m sur un arrière-plan d'adaptation à 1,5 cd/m². Un des feux est constitué d'une matrice de LED (LED rouges ou vertes de 5 mm espacées de 9 mm). L'autre est un feu classique couvert d'un disque coloré, rouge ou vert, uniformisant la source. Les deux feux sont équivalents du point de vue de la distribution géométrique de luminance. En moyenne, le groupe d'observateurs juge les sources à LED visibles significativement plus éblouissantes que les sources uniformes : « *Disturbing* » *vs* « *Just admissible* ». Ni le calcul de la luminance de voile, ni l'indice TI ne prédisent une telle dégradation. L'indice G (*Glare Constant*) est plus adapté. La limite acceptable d'inconfort pour l'indice G se situe à 150, pour une petite source, avec L_s la luminance de la source, L_f la luminance du fond et W l'angle solide de la source :

$$G = \frac{L_s W}{L_f}$$

D'après la Figure 75 ci-dessous, une luminance acceptable de jour peut être inacceptable de nuit (Ixtaina *et al.*, 2015).

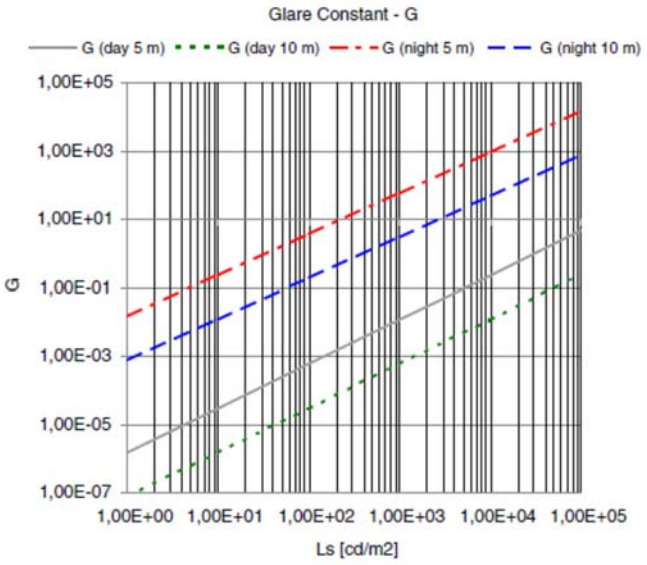


Figure 75 : valeur de l'indice d'éblouissement *G* (*Glare Constant*), de nuit et de jour

Source : Ixtaina et al., 2015

La visibilité d'un piéton a été mesurée, dans une rue éclairée ou non, en présence ou en l'absence des feux d'un véhicule à contre sens. Vingt-trois conducteurs, roulant à 35-40 km/h dans des voitures équipées de phares xénon-HID (xenon Hight Intensity Discharge) ont participé à l'expérience. Dans la rue non éclairée, la distance à laquelle le piéton est vu avec les phares d'en face allumés est moitié de ce qu'elle est avec les phares éteints. Quand la rue est éclairée, les distances sont deux fois plus grandes. Les distances de visibilité sont les mêmes avec des sources à LED (4 000 K, 1,7 lx) ou des sources aux halogénures métalliques (4 200 K, 2,6 lx), toutes deux donnant de meilleurs résultats que les sources à sodium haute pression (2 500 K, 2,9 K). Sur les courbes donnant l'éclairement vertical du piéton à différentes distances d'un lampadaire, on remarque que l'éclairement est plus régulier (en fonction de la distance) avec l'éclairage à LED. On conclut que les LED donnent des résultats très satisfaisants. Il serait possible de réduire les niveaux d'éclairement en aménageant les séparateurs de voies (2 x 2voies) afin de limiter la vision des phares. La présence de ces séparateurs pourrait être prise en compte pour la détermination des niveaux d'éclairement à atteindre (Saraiji *et al.*, 2016).

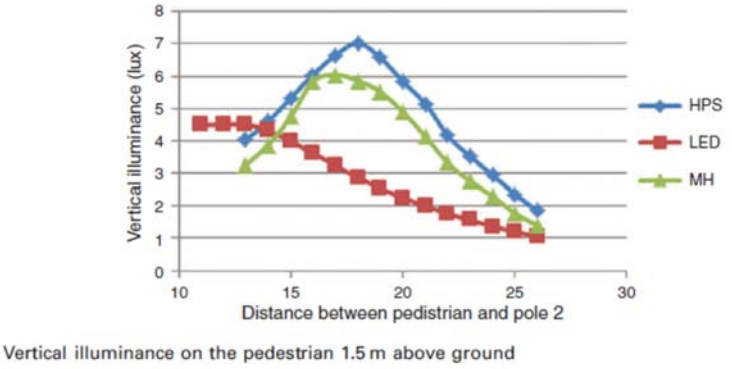


Figure 76 : éclairement vertical d'un piéton à différentes distances d'un lampadaire

Source : Saraiji et al.*, 2016*

Soixante-huit conducteurs de taxis, questionnés sur leurs symptômes d'inconfort causés par les sources LED ou autres en conduite de nuit, mentionnent que l'éblouissement constitue leur plus grand souci, et que les feux de freinage rouges sont pires que les lumières blanches entourant les phares. Les sujets migraineux rencontrent les plus grands problèmes, entre autres l'inconfort, la douleur, la gêne, le papillotement, le dédoublement des images et le déclenchement de maux de tête (Salviaia *et al.*, 2014).

Une expérience a été menée sur route pour tester la visibilité d'un plot à 4 LED ambre placé sur la chaussée. Quarante-deux participants ont été répartis en 7 groupes distincts par les conditions atmosphériques. Le plot était allumé 4 secondes, entre 0 et 2,2 cd. Pour ces intensités, le plot n'est jamais éblouissant. Il s'avère que l'éclairement horizontal, la position relative du soleil et leur interaction impactent la visibilité. De ce fait, pour cette application routière, il serait souhaitable d'ajuster l'intensité du plot aux conditions externes d'utilisation. L'éblouissement créé par le même plot en condition nocturne a été testé en laboratoire, simulant une chaussée recevant un éclairement de 1 lx. Sur une échelle à 4 paliers, l'intensité la plus confortable se situe entre 0,10 cd et 0,31 cd (Villa *et al.*, 2015).

Vingt-neuf sujets jeunes ont testé la lisibilité de panneaux à messages variables à LED, et leur confort. La distance d'observation variait entre 9,8 m et 57 m ; l'ambiance lumineuse correspondait à une journée ensoleillée : 30 000 lx, ou à un jour couvert : 5 000 lx ou à la nuit : 10 lx. Lorsque les messages sont affichés sur fond noir, l'évaluation subjective n'est pas différente de près ou de loin, tandis que lorsqu'ils sont affichés sur un fond lumineux, plus ils sont loin, plus ils sont lisibles. Comme on peut s'y attendre, l'éblouissement est moins étendu de jour que de nuit, et c'est le contraste 3 :1 (L_{max} = 3 100 cd/m²,

L_{fond} = 1 033 cd/m²) qui est le moins inconfortable et le moins éblouissant (Wu, Liou et Lin, 2012).

La plupart des modèles d'éblouissement d'inconfort développés pour l'extérieur sont limités à l'éblouissement généré par des sources situées à moins de 20 degrés de la ligne de visée. Des tests avec piétons ont été menés dans une rue longue d'environ 100 m, éclairée par des luminaires à LED de 4 m de haut et séparés de 13,3 m ou 26,6 m pour recevoir un éclairement de 10 à 15 lx. Il a été constaté que ces modèles ne sont pas adaptables à l'inconfort éprouvé par un piéton (Villa *et al.*, 2017a). Expérimentant en situation urbaine réelle, le long d'une rue bordée de lampadaires à LED (4 000 K, R_a=75, 10 à 15 lx sur la chaussée), .la même équipe a montré que le logarithme de l'indice CBE (*Cumulative Brightness Evaluation*) est représentatif de l'inconfort éprouvé par les piétons (33 piétons), au contraire de l'UGR qui est inadapté (Villa *et al.*, 2017b).

3.7.2.2.2 Modernisation de l'éclairage résidentiel

Des piétons ont été interrogés sur leur ressenti dans les allées d'un parc de la ville de Belgrade. Qu'ils aient été conscients ou non vis-à-vis de la technologie de lumière, les 112 sujets qui ont répondu ont nettement préféré l'usage des lampes aux halogénures métalliques à celui des LED, contredisant ainsi les affirmations des fabricants (Kostic et Djokic, 2014).

Un test comparatif a été effectué dans deux résidences. Dans l'une, l'éclairage à sodium haute pression (2 100 K) avec des lampes fluocompactes dans les entrées (2 700 K), se déclenchant à 100 lx, a été remplacé par un éclairage à LED. Dans l'autre, l'éclairage à vapeur de mercure (2 700 K), se déclenchant à 230 lx, a été remplacé par un éclairage à LED (3 000 K). Soixante résidents ont répondu à des questionnaires, en hiver, après la tombée de la nuit. Les réponses ont montré que l'installation des LED avait augmenté la luminosité et la douceur, le naturel des couleurs, et dans une certaine mesure l'accessibilité visuelle, la perception de dangerosité étant demeurée basse. (Kuhn *et al.*, 2013).

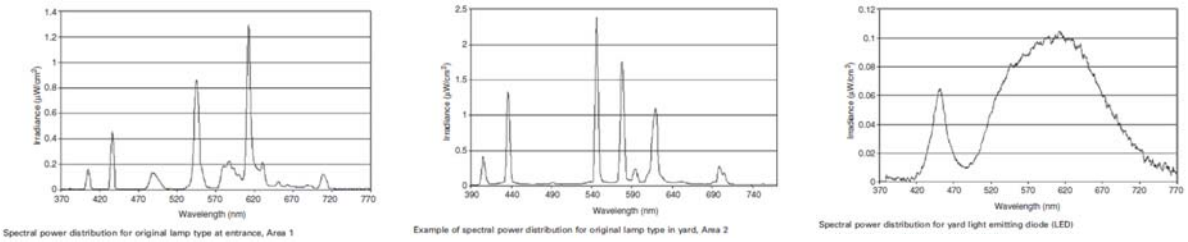


Figure 77 : répartition spectrale d'énergie des sources dans le test comparatif de deux résidences

Source : Kuhn et al.*, 2013*

3.7.2.2.3 Conclusion partielle sur les performances visuelles de nuit obtenues avec des éclairages à LED

Il n'est pas clair que les LED soient mieux ou moins bien évaluées que les autres sources. Si la quantité de lumière émise et l'uniformité restent des critères décisifs pour l'acceptabilité des LED, l'effet de l'âge des sujets est variable. Les mesures sur site sont intéressantes. La possibilité d'ajuster l'intensité des LED pour éviter l'éblouissement de nuit, tout en garantissant une bonne visibilité de jour mérite d'être exploitée.

3.7.2.3 Performances visuelles de jour obtenues avec des éclairages à LED

3.7.2.3.1 Éclairage intérieur

Pour l'éclairage de bureau, les préférences des personnes ont été comparées pour trois types de luminaires : panneau LED carré, plafonnier LED spot, panneau tubes fluorescent

T5. Quarante sujets jeunes, en situation réelle bien maitrisée, ont évalué l'éblouissement, entre autres (l'agrément, l'éblouissement, la facilité de lecture, l'aspect naturel des couleurs, la discrimination de détails au mur, la satisfaction du niveau d'éclairement, le caractère naturel des ombres, l'apparence des luminaires), grâce à un questionnaire. Très peu d'éblouissement a été perçu lors des tests. La lecture a été aussi facile à 600 lx qu'à 1 000 lx, même si cette dernière valeur a été jugée un peu plus éblouissante ; la lecture et la discrimination des détails sont moins faciles et moins agréables à 300 lx. Ainsi, l'éclairement à 600 lx est optimal, comparé à 300 lx ou 1 000 lx. L'éblouissement est similaire à 3 000, 4 500 ou 6 000 K ; la température de couleur préférée se situe autour de 4 150 K. Mais il y a de larges écarts constatés dans les préférences individuelles, non expliquées par l'âge. Les évaluations subjectives sont faiblement corrélées à l'indice UGR (Viitanen *et al.*, 2013).

En matière de performance de lecture et de discrimination des couleurs, l'éclairage à LED (4 870 K , 1 267 lx), testé dans une réplique de la station orbitale internationale construite à terre, est aussi performant que la lumière du jour indirecte (221 lx) ou le plafonnier fluorescent (4 870 K, 531 lx). En ce qui concerne l'éclairage par LED et le déroulé après/avant lumière de chaque nuit, la suppression de la sécrétion de mélatonine par la lumière progresse comme attendu par l'augmentation de l'éclairement donné par les LED. L'expérience a été menée avec 8 astronautes en bonne santé, âgés d'une quarantaine (39,7 ± 2,8) d'années (Brainard *et al.* 2013).

L'effet de non-uniformité de la source ne disparait pas aux grands angles. L'inconfort apporté par un plafonnier à matrice de LED 7×7 a été jugé par 17 sujets chinois âgés de 25 à 45 ans, effectuant une tâche sur écran à 70 cd/m² sur un plan de travail recevant 180 lx. La limite d'inconfort se situe à 8 300 cd/m² à 55 deg (valeur plus faible que la limite de Boyce à 16 500 cd/m² à 53 deg). Les luminaires non-uniformes génèrent plus d'éblouissement « *overhead* » que les luminaires uniformes. Toutefois, la température de couleur du luminaire n'est pas indiquée. Le luminaire ne provoque pas d'éblouissement d'incapacité, car les performances de lecture restent les mêmes. La corrélation est très bonne entre l'inconfort subjectif et l'angle de position du luminaire, de 55 à 90 degrés, mais les valeurs absolues de l'UGR ne sont pas correctes. L'UGR calculé à partir de la luminance moyenne donne des valeurs trop basses. L'UGR calculé à partir des petites sources (formule additive avec l'intensité) donnent des valeurs trop élevées,(Xia *et al.*, 2011).

Selon Ryckaert *et al.*,, les premiers tubes à LED destinés au remplacement des tubes fluorescents ont bien validé l'économie d'énergie attendue, de l'ordre de 70 %, mais ont montré des défauts en matière d'appréciation subjective. Ainsi, une évaluation de trois types de tubes du commerce (LED blanches à un phosphore), réalisée par 44 jeunes observateurs, a montré que le ressenti en matière de luminosité ambiante, de confort, de rendu des couleurs, d'uniformité, et d'éblouissement direct ou indirect était significativement réduit en regard de la qualité d'un tube fluorescent classique.(Ryckaert *et al.*, 2012). Toutefois, il faut regretter que la comparaison n'ait pas été menée à éclairement et température de couleur identiques, d'autant plus que la technologie des tubes LED a considérablement évolué depuis lors.

La facilité de lecture a été comparée sous un éclairage à LED (6 500 K) et sous un éclairage à lampes fluocompactes (2 700 K). Quarante-quatre étudiants, ayant une acuité de 10/10, ont passé une épreuve de vision des couleurs (Ishihara) qu'ils ont mieux réussie – moins d'erreurs et plus de rapidité – sous l'éclairage à LED. L'épreuve de lecture consistait à lire à haute voix une série de textes différant par leur contraste : noir/blanc, bleu/jaune, bleu/rouge, rouge/orange, et par la taille de leur police : 10, 12, 14, 16. La facilité de lecture, déterminée par le nombre de mots lus par seconde, est légèrement en faveur des LED. Outre l'effet possible de la différence de température de couleur entre les sources et celui de l'ordre de passage des tests qui n'a pas été contrebalancé, on peut regretter l'absence de données d'écart-type pour déterminer la puissance statistique des tests (Sathya & Natarajan, 2016).

La préférence des utilisateurs pour un spectre de LED blanche de type simple phosphore d'intensité réglable, enrichi d'une quantité fixe de lumière rouge (636 nm) ou bleue (453 nm),

a été testée auprès de 26 jeunes coréens, à 4 niveaux d'éclairement entre 278 lx et 716 lx. Installés dans une salle de test, les sujets devaient effectuer des tâches de lecture/écriture – sur leurs genoux – et répondre à des questionnaires de satisfaction. La préférence a été donnée au spectre enrichi en rouge. Un éclairement de 440 lx donne satisfaction en blanc additionné de rouge et il conviendrait de l'extrapoler à 828 lx pour atteindre le même degré de satisfaction en blanc additionné de bleu. L'éclairage teinté de rouge tend à paraître plus lumineux et plus confortable. Aucune variation significative de performance selon la source ou le niveau de l'éclairement n'est constatée. Les deux éclairages permettent des économies d'énergie, et le spectre enrichi en bleu nécessite moins de climatisation (Yun *et al.*, 2013).

3.7.2.3.2 Éclairage des écrans

L'impact des écrans à LED sur le sommeil et la vigilance est exposé à la section 3.4 de ce rapport.

L'usage prolongé du *smartphone* induit une fatigue qui a été étudiée par une équipe du ministère taiwanais de l'industrie (Wu *et al.,* 2016). Les chercheurs ont comparé deux technologies : la technologie TFT-LCD (*thin film transistor-liquid crystal display*) et la technologie AMOLED (*active matrix organic light-emitting diode*). Ils ont mesuré les micro-fluctuations d'accommodation (hautes fréquences), pour objectiver la fatigue oculaire, la durée maximum de tolérance à l'usage du *smartphone*, quand le sujet met fin à l'activité et la performance visuelle : nombre de mots lus et score au jeu.

Chez 19 sujets jeunes, les auteurs ont montré une différence significative entre le moment où les micro-fluctuations dépassent le seuil de fatigue, de l'ordre d'une heure, et le moment où les sujets la ressentent, après plus de deux heures. La fatigue survient plus tôt avec l'écran AMOLED qu'avec l'écran TFT-LCD. Les sujets trouvent l'écran AMOLED plus éclatant. Quelques-uns souffrent de migraine. La tâche de lecture génère une fatigue plus précoce que l'activité de jeu, sans doute parce qu'elle demande plus d'effort, mais l'une et l'autre sont également tolérées. La performance visuelle ne permet de tirer aucune conclusion. Constatant que les sujets ne sont pas conscients de la fatigue oculaire qui s'installe avec l'usage du *smartphone*, les auteurs recommandent d'alerter l'utilisateur lorsqu'il dépasse le seuil de fatigue (Wu *et al.*, 2016).

Les contraintes énergétiques impliquent que l'affichage sur un écran OLED soit adaptatif : l'affichage dépend du contenu de l'image, variant environ comme l'inverse du carré de la surface affichée en blanc. Une équipe d'un constructeur de téléphones mobiles a fait confirmer par 20 sujets que l'affichage optimum, pour une vidéo visionnée dans des conditions d'éclairage domestique, correspondait à une luminance maximum d'écran de 400-450 cd/m², pour une luminance plein écran de 150 cd/m² (Lee *et al.*, 2012).

3.7.2.3.3 Les OLED comme source de lumière en intérieur

La technologie OLED concurrence les panneaux lumineux à éclairage latéral par LED. Une étude préliminaire avec 5 sujets n'a montré aucune différence significative entre un panneau OLED à 3 000 K et un panneau à éclairage latéral à 4 000 K (Mou *et al*., 2017) (*cf*. Figure 78). Les deux technologies génèrent un éblouissement d'inconfort vers 5 000 cd/m² et au-delà. Les auteurs donnent une préférence au modèle OSP d'éblouissement d'inconfort qu'ils promeuvent sur le modèle UGR de la CIE pour prédire leurs résultats.

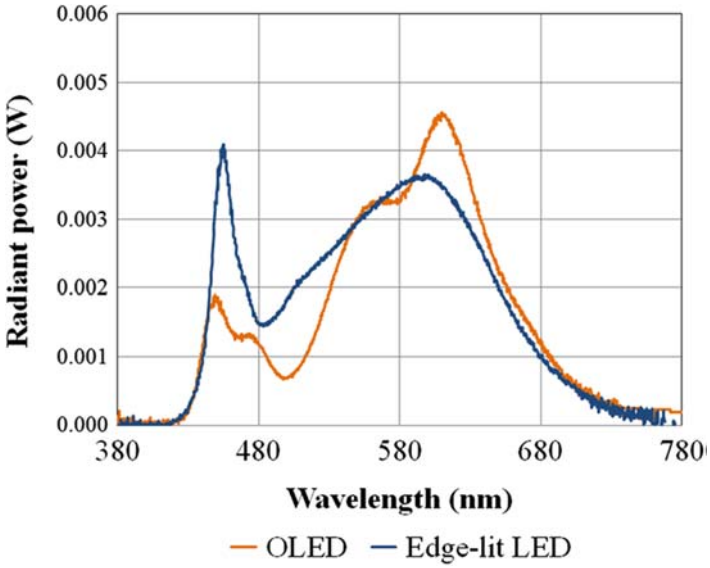


Figure 78 : répartition spectrale d'énergie d'un panneau OLED et d'un panneau à éclairage latéral par LED

Source : Mou et al., 2017

Dans une étude conduite par Dumortier *et al*., trente sujets japonais et 30 sujets français ont eu à comparer des éclairages à LED et à OLED, à 3 000 K et à 5 000 K (*cf.* Figure 79). Les sujets sont revenus 4 fois dans les mêmes environnements de bureau. Aucune différence de performance n'a été notée, ni de variation de rythme cardiaque. En revanche, tous ont préféré les éclairages LED ou OLED à 3 000 K, pour lire ou jouer.

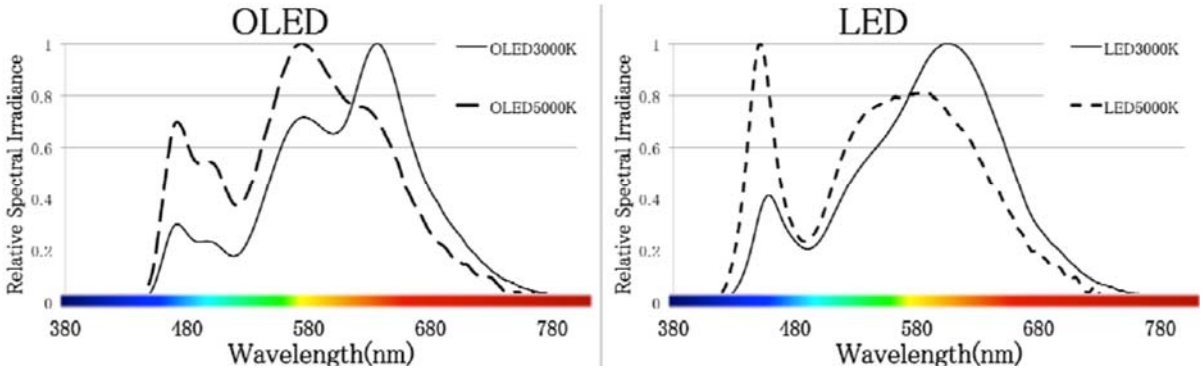


Figure 79 : répartition spectrale d'énergie des OLED et des LED

Les indices de rendu de couleur ne sont pas indiqués, mais on peut noter sur les graphiques que les spectres sont plus étendus à 3 000 K.

3.7.2.3.4 Introduction de LEDdans de nouveaux équipements

Un prototype à base de LED a été construit pour étudier l'effet perturbateur d'une source éblouissante en vision de nuit. Il s'agit d'un réseau rayonnant de sources LED calibrées, dont la LED centrale est une LED blanche extrêmement intense, et les LED disposées en périphérie sont plus petites. La LED centrale est éblouissante, créant un halo et un motif entoptique en étoile. Les 240 LED périphériques réparties le long de 24 rayons sont individuellement ajustées jusqu'à être tout juste perceptibles (Linhares *et al.*, 2013). Ce dispositif réaliste constitué de véritables sources physiques permet de tester rapidement les effets réels de l'éblouissement et de sonder précisément l'étendue de la zone de perturbation. La luminance de la source éblouissante peut se régler entre 0 et 3 000 cd/m² et

la luminance des lumières à détecter entre 0 et 150 cd/m². Les lumières tests s'allument séquentiellement à partir du centre, jusqu'à ce qu'elles soient détectées. Vingt sujets en bonne santé ont participé à l'évaluation et différents paramètres sont étudiés. Pour les observateurs, et contre toute attente, que le diamètre pupillaire soit de 3 mm ou 6 mm, cela ne change rien à la perturbation. En outre, l'augmentation de la luminance de la source éblouissante n'est pas compensée par la contraction pupillaire (myosis) qu'elle devrait induire. Notons qu'Il s'agit bien de la détection d'une cible lumineuse et non de sa reconnaissance (Ferreira-Neves *et al.*, 2015).

3.7.2.3.5 Conclusion partielle sur les performances visuelles de jour obtenues avec des éclairages à LED

L'UGR est inadapté pour les sources non-uniformes. L'évaluation de l'appréciation des sources est légèrement en faveur des LED. On note une large variabilité inter-individuelle de l'appréciation des sources. Des signes de fatigue visuelle peuvent apparaître bien plus tôt que le ressenti d'inconfort.

3.7.3 Conclusions sur les effets de l'exposition aux LED sur le confort et les performances visuelles

On distingue la perturbation de la vision de l'inconfort visuel résultant d'un éblouissement. L'origine et l'évaluation de l'éblouissement d'inconfort sont difficiles à caractériser.

Effet des LED sur les performances visuelles

Une source ponctuelle de luminance élevée présente dans un champ obscur (inhomogénéité spatiale) provoque un phénomène d'éblouissement, dit « éblouissement d'incapacité », ou « éblouissement perturbateur » (*disability glare*, en anglais) comme si la source répandait un voile lumineux sur l'ensemble du champ de vision. Ce voile perturbe la vision et provoque une baisse transitoire des performances visuelles. Cette situation se retrouve lorsque les LED nues sont visibles par le sujet. L'âge est un facteur aggravant. Les effets à long terme de la répétition de ces éblouissements ne sont pas connus.

Des signes de fatigue visuelle (micro-fluctuations d'accommodation) peuvent apparaître bien plus tôt que le ressenti d'inconfort (une étude expérimentale).

Effet des LED sur le confort visuel

Toutes les études s'accordent à montrer que les sources non-uniformes sont plus éblouissantes que les sources uniformes de même luminance moyenne, et que plus le contraste est élevé, plus la sensation d'inconfort est grande.

Il apparaît que la multiplicité des sources ponctuelles (LED) visibles dans les luminaires aggrave notablement l'inconfort.

Les études disponibles, en revanche, ne permettent pas de conclure sur un effet spécifique des LED sur le confort la nuit.

Tant pour les sources à LED que pour les sources traditionnelles, il n'apparaît pas clairement que la température de couleur soit un facteur déterminant pour le confort ou l'inconfort et l'éblouissement. En revanche, et bien que le spectre des LED se soit notablement amélioré depuis 2010 (IRC augmenté), ce qui d'ailleurs brouille un peu les résultats des études sur l'impact des LED, le spectre des LED, riche en rayonnement bleu-violet (source probable d'inconfort), et pauvre aux alentours de 490 nm (limitant alors le réflexe pupillaire), reste déséquilibré. Il a des conséquences probables sur l'inconfort visuel.

L'effet de l'appauvrissement du spectre aux alentours de 490 nm sur la contraction pupillaire est mesurable mais de faible amplitude chez l'Homme.

Les sujets migraineux pourraient être spécialement sensibles au contenu spectral de la lumière (Wilkins, 2016).

Populations sensibles

Il existe une large variabilité individuelle dans la population générale, quant à l'appréciation des situations éblouissantes.

L'âge est certainement un facteur aggravant de l'éblouissement, de jour comme de nuit, quelle que soit son origine. La dégradation de l'acuité visuelle s'accélère au-delà de 60 ans, plus ou moins gravement selon les individus. Le voile de luminance généré autour des sources augmente considérablement avec l'âge, abaissant le contraste des objets et, de ce fait, les performances visuelles.

Quelques études incluent des sujets migraineux mais ceux-ci semblent être spécifiquement sensibles à l'éblouissement causé par certaines irrégularités de la répartition spectrale d'énergie de la lumière, les feux de freinage rouges à LED notamment, ou encore les écrans AMOLED.

Questions en suspens

En dépit du faible nombre de résultats recueillis, on note que les résultats des différents laboratoires sont souvent concordants. Il existe souvent une grande variabilité dans les résultats des individus.

Même s'ils ne perçoivent pas formellement la nature de l'inconfort, les sujets peuvent ressentir quelque-chose d'indéfinissable. Leurs performances visuelles peuvent être maintenues mais l'apparition de modification des micro-fluctuations d'accommodation démontre que des signes de fatigue ont pu être objectivés.

L'installation de dispositifs à intensité réglable permettrait d'améliorer le confort individuel.

Notons que les études sur le confort ressenti dans un local domestique sont généralement réalisées de jour et ne tiennent pas compte de l'heure de la journée ou de la nuit à laquelle l'individu est soumis à un type d'éclairage ou à un autre.

3.8 Effet des LED sur les pathologies cutanées

3.8.1 Généralités sur l'interaction de la lumière avec la peau

3.8.1.1 Anatomie de la peau et caractéristiques optiques

La peau, qui constitue l'enveloppe du corps, est le plus grand organe chez l'humain, avec une surface d'environ 2 m². La peau est formée de deux couches cellulaires : le derme (couche profonde) et l'épiderme, couche fine et superficielle. L'ensemble peau et phanères (ongles, cheveux, poils) se nomme le tégument. Le tégument mesure entre 1 et 4 mm d'épaisseur selon les zones du corps (Prost-Squarcioni, 2006) .

L'épiderme, couche superficielle de la peau, est à son tour composée de trois couches, la plus externe ou *stratum corneum* est composée de cellules kératinisées qui desquament. La couche intermédiaire est constituée d'empilements de 5 à 10 cellules et la couche basale présente des cellules qui se divisent activement pour régénérer la peau. Cette couche contient aussi les mélanocytes, cellules produisant la mélanine, pigment responsable de la couleur de la peau (Prost-Squarcioni, 2006).

Le derme est constitué d'un tissu conjonctif (tissus de soutien), à la fois flexible et résistant. Il est riche en récepteurs sensoriels, vaisseaux sanguins et lymphatiques.

La peau a quatre lignes de défense :

- la couche cornée est responsable de l'imperméabilité cutanée. Elle empêche la pénétration des substances et évite l'évaporation (Madison, 2003) ;
- la pigmentation protège les cellules contre la lumière et plus particulièrement contre les UV (Miyamura *et al.*,2007) ;

- les cellules de Langerhans situées sous la couche cornée et venant de la moelle osseuse capturent les substances étrangères afin d'alerter le système immunitaire (Valladeau, 2006) ;
- le derme et ses réseaux de collagène et d'élastine qui constituent une barrière mécanique (Dubertret, 2000).

3.8.1.2 Caractéristiques optiques de la peau

Le rayonnement incident sur la peau subit des réflexions, des diffusions et une absorption à son passage à travers ses différentes structures. De ce fait, la pénétration du rayonnement reçu dépend de son intensité mais aussi de sa longueur d'onde, comme illustré dans la Figure 80.

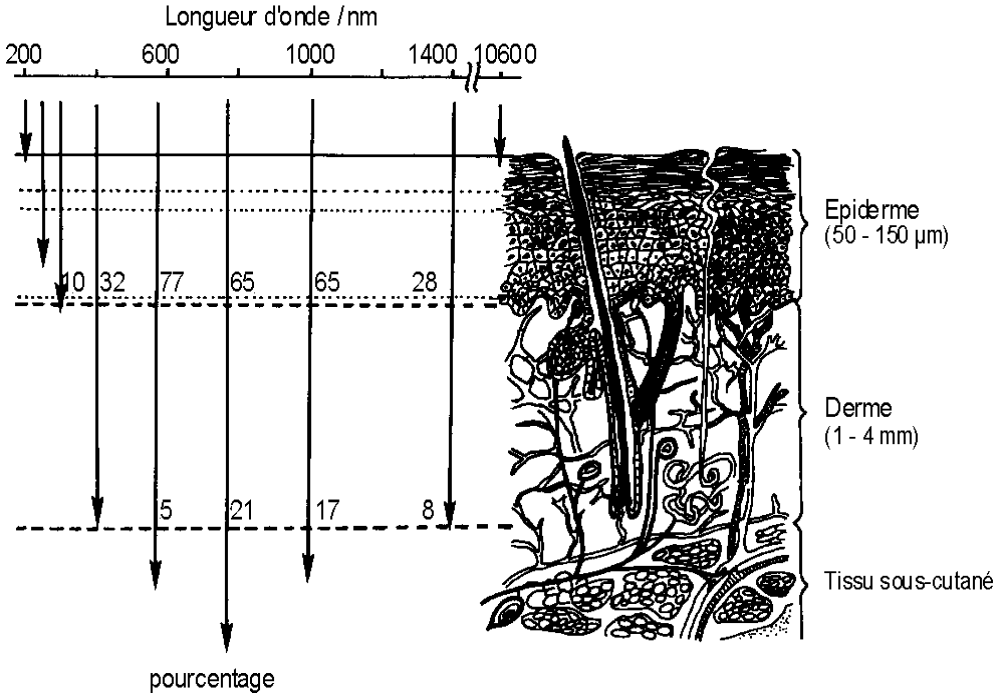


Figure 80 : pénétration des différentes longueurs d'onde dans la peau

Source : Anses, 2010.

3.8.1.3 Lésion et cicatrisation

L'ampleur des dommages infligés à la peau à la suite d'une blessure dépend, entre autres, de la profondeur de cette blessure. La blessure est classifiée en trois degrés d'atteinte : les plaies de premier degré qui ne touchent que l'épiderme, les plaies de second degré qui endommagent les terminaisons nerveuses du derme et les plaies de troisième degré qui présentent une destruction complète de l'épiderme et du derme.

La peau endommagée peut guérir par un processus connu sous le nom de cicatrisation (Reinke et Sorg, 2012 ; Gurtner *et al.*, 2008). Il s'agit d'un ensemble de mécanismes qui conduisent à la fermeture de la brèche et à la récupération fonctionnelle de la peau. Le processus de cicatrisation est différent entre l'épiderme et le derme. En effet, l'épiderme guérit par régénération, ce qui rétablit la structure du tissu, tandis que le derme guérit par réparation : les tissus d'origine sont remplacés par un tissu conjonctif non spécifique qui entraine une cicatrice non fonctionnelle. Le processus de cicatrication peut être affecté par une exposition à la lumière.

Dans le cadre de la cicatrisation d'une plaie, plusieurs étapes se succèdent (*cf.* Figure 81 ci-dessous) :

- inflammation : hémostase suivie de colonisation par des cellules inflammatoires ;

- organisation de l'exsudat inflammatoire : réépithélialisation et formation du tissu de granulation ;
- remodelage : remodelage matriciel avec réduction de la vascularisation et de la densité cellulaire.

Figure 10 : Réépithélialisation

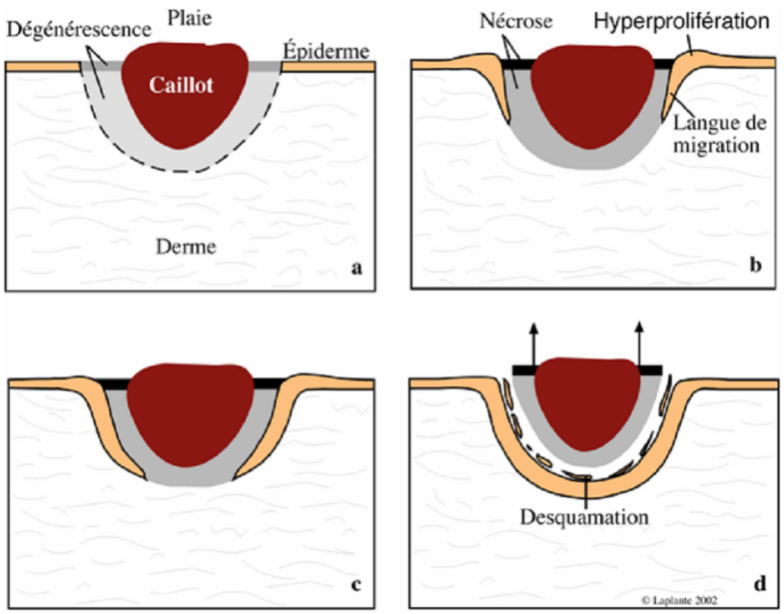


Figure 81 : étapes de la cicatrisation.

L'hémorragie déclenchée par la blessure entraîne la formation d'un caillot dont la fonction est d'arrêter cette hémorragie (a). Le tissu qui entoure le caillot se nécrose et est remplacé par des cellules épithéliales (b) qui vont réétablir la continuité de l'épithélium (c). Une fois la brèche comblée le caillot et les vestiges de peau dégénérée desquament et sont éliminés (d).

3.8.1.4 La peau de l'enfant

La peau de l'enfant a une structure similaire à celle des adultes, avec certaines variations. Pour commencer, la couche cornée est plus fine. La couche basale de l'épiderme, qui est plus ou moins ondulée selon l'âge et la localisation dans le corps, est particulièrement ondulée chez l'enfant, ce qui explique l'exposition plus intense des couches basales au sommet des crêtes épidermiques (West *et al.*, 2008). La jonction dermo-epithéliale est aussi moins adhérente que chez l'adulte. De ce fait, les réactions inflammatoires qui se traduisent par la formation de collections séreuses (les ampoules par exemple) sont plus fréquentes et intenses chez les jeunes enfants.

3.8.2 Lumière et pathologies cutanées

3.8.2.1 Les photodermatoses

Les photodermatoses constituent des affections dans lesquelles il y a une réaction cutanée à des longueurs d'onde spécifiques dans le domaine de l'ultraviolet ou dans le spectre visible. Cliniquement, elles peuvent se présenter comme des urticaires, des eczémas ou même des lésions de lupiques[54] (Millard et Hawk, 2002) La dermatose la plus fréquente est l'éruption polymorphe induite par la lumière (Epil), suivie par l'urticaire solaire et la dermatite actinique.

[54] Lésions de lupus érythémateux aigu.

L'Epil, aussi appelée allergie au soleil, se présente plus fréquemment chez les jeunes femmes à peau claire mais elle peut se retrouver à n'importe quelle âge et sur n'importe quel couleur de peau. Dans ce cas, il n'y a pas de changements histologiques patognomiques. Ceci la distingue de l'urticaire solaire pour laquelle la dermatose est médiée par une hypersensibilité induite par les IgE (immunoglobuline E, classe d'anticorps) et qui répond, en conséquence, aux anti-histaminiques. L'urticaire solaire est due à l'exposition aux UV mais aussi, moins fréquemment, à la lumière visible (Komarow *et al.*, 2015) .

3.8.2.2 Les photo-génodermatoses

On désigne comme génodermatose une affection cutanée d'origine génétique. Des gènes concernant différents tissus peuvent être affectés, comme ceux de l'épiderme (comme dans les keratodermites congénitales), du tissu conjonctif (syndrome de Werner), de la crête neurale qui subit des malformations pendant l'embryogenèse (neurofibromatose). Des altérations métaboliques peuvent également survenir comme dans le cas de la phenylcétonurie (Bergman, 2008) Les photo-génodermatoses se caractérisent par le fait qu'elles conduisent à une hypersensibilité à l'exposition lumineuse. Tel est le cas du *Xeroderma pigmentosum* où les défauts de la réparation de l'ADN induisent une dermatose allant jusqu'à l'apparition, très fréquente, de cancers de la peau (Hasan et Saeed, 2015)

3.8.2.3 Les porphyries

Ces maladies génétiques concernent les enzymes de synthèse du groupe hème[55], qui est important pour la synthèse d'hémoglobine et d'autres enzymes du métabolisme (Christiansen, *et al.*, 2016). Les porphyries génèrent une accumulation de porphyrines (précurseur de synthèse du groupe hème) ou de ses précurseurs dans le foie ou la moelle osseuse. Les porphyries chroniques induisent des lésions cutanées bulleuses ou des sensations douloureuses de la peau exposée au soleil (photo-algie). Des cératines porphyries aiguës (porphyrie variegata et coproporphyrie héréditaire) peuvent également induire une photosensibilité cutanée.

3.8.2.4 Le lupus érythémateux

Le lupus érythémateux disséminé est une maladie auto-immune qui affecte essentiellement le tissu conjonctif. Il survient le plus fréquemment chez la femme en période d'activité ovarienne. Ses manifestations cliniques sont très polymorphes, elles évoluent par poussées. Biologiquement, on trouve des anticorps antinucléaires, particulièrement anti-ADN natif. Au niveau de la peau, on dénote le caractère photosensible de l'éruption lupique. Le lupus subaigu est une forme particulière de lupus érythémateux. Dans cette forme, la photosensibilité est constante. Par ailleurs, la photosensibilité est une des caractéristiques les plus marquantes du lupus néonatal (Goffin *et al.*, 2005).

3.8.2.5 La photosensibilité induite

La photosensibilisation se définit comme un processus délétère qui apparait suite à l'exposition à un rayonnement électromagnétique normalement inoffensive ; elle est due à l'introduction d'un élément absorbant de la dite radiation (l'agent de photosensibilisation). L'UVA est impliqué dans la plupart des réactions photo-allergéniques car il pénètre plus profondément dans la peau.

[55] L'hémoglobine est constituée de deux sous-unités d'alpha-globine et de deux sous-unités de bêta-globine. Chaque unité globine est associée à un groupe hème, qui contient un atome de fer capable de s'associer à l'oxygène.

3.8.2.6 Photosensibilité aux produits chimiques et aux médicaments

3.8.2.6.1 Médicaments

Les médicaments photosensibilisants sont des composés cycliques contenant un noyau isoprène. Ils absorbent dans le visible ou l'ultraviolet (Monteiro *et al.*, 2016).

Les photosensibilisants absorbent l'énergie du photon, la transforment en énergie chimique et maintiennent la molécule affectée dans un état excité. Elle peut alors se transformer en un métabolite, le photo-produit, transférer l'énergie à une molécule biologique, une protéine, par exemple, ou le disperser sous forme de lumière ou de chaleur. L'action d'un grand nombre de photosensibilisants dépend de l'oxygène disponible dans son entourage par l'intermédiaire duquel les réactions d'oxydation sur les biomolécules ont lieu.

Plusieurs médicaments sont considérés comme des photosensibilisants. À titre d'exemples, on trouve des antibiotiques (quinolones tétracyclines, entre autres, des anti-histamine (cetirizine, lorantidine), des anti-inflammatoires (ibuprofen, piroxican), des anti-malaria (chloroquine, sulfadoxine), des médicaments pour le système cardiovasculaire (amiodarone, furosemide, diltiazem) ou encore des médicaments agissant sur le système nerveux central (chorpromazine, phenothizides). Certains d'entre eux peuvent être inducteurs d'un lupus érythémateux. L'hydrochlorothiazide, la griséofulvine, certaines cyclines et inhibiteurs de l'enzyme de conversion de l'angiotensine ainsi que certains anti-inflammatoires non stéroïdiens en sont des exemples.

La photosensibilisation peut se manifester au niveau de la peau (sous forme de rougeurs, d'eczéma, …) mais également des phanères avec des épisodes d'onycolyse (destruction des ongles). D'ailleurs, l'onycolyse peut être la seule manifestation de phototoxicité chez les personnes de forte pigmentation (Zammit, 2010).

3.8.2.6.2 Substances d'application topique

En dehors des médicaments, d'autres agents tels que certaines crèmes et savons ou des huiles essentielles (bergamote, lime, citron) peuvent être photosensibilisants (Zammit, 2010). Même des plantes et fleurs (céléri, moutarde, chrisantèmes) peuvent avoir des effets similaires.

3.8.2.7 Les dermatoses photo-aggravées

L'exposition solaire joue un rôle important dans les interactions de l'herpes simplex virus (HSV) avec l'organisme. Une réactivation du virus HSV dans le ganglion serait possible *via* des éléments régulateurs du génome viral sensibles aux UV (Brown, 2017). Le virus migre alors le long de l'axone et se réplique dans l'épiderme. De même, certains *papillomavirus* (HPV) cutanés sont susceptibles d'interagir avec les UV et d'induire des lésions et même une carcinogenèse de l'épiderme chez des patients immunodéprimés (greffés, patients atteints d'une épidermodysplasie verruciforme) (Kranjec et Doorbar, 2016). Le virus de l'immunodéficience humaine (VIH), pourrait aussi être influencé par l'exposition au soleil (Goffin *et al.*, 2005).

3.8.2.8 Les cancers cutanés

L'augmentation des expositions au soleil liées aux phénomènes de mode et à l'allongement de la durée de la vie a entrainé un doublement du nombre de cancers de la peau tous les dix ans depuis 1940. Ainsi, un enfant né en 2000 aura un risque sur 7 de développer un cancer basocellulaire et un sur 75 d'être atteint d'un mélanome malin au cours de sa vie (Apalla *et al.*, 2017). L'exposition cumulative aux UV est responsable du vieillissement accéléré de la peau et des carcinomes basocellulaires et spinocellulaires. Les mélanomes malins, première cause de mortalité par cancer des adultes jeunes, sont la conséquence des expositions aiguës et chroniques pendant l'enfance et l'adolescence (Apalla *et al.*, 2017).

Il est important de signaler l'importance de la dose. À petites doses, le soleil permet à la peau de synthétiser la vitamine D, d'améliorer ses capacités de barrière et de mieux résister

aux expositions aiguës. Le débit de la dose a aussi son importance. La même dose délivrée de façon aiguë ou chronique aboutit à des effets différents (Savoye *et al.*, 2016). Les données physiques ont aussi leur importance. La découverte relativement récente de la toxicité des UVA remet en cause toute la pédagogie utilisée jusqu'à présent pour les produits solaires qui filtrent essentiellement l'UVB. L'Anses a déjà statué sur l'exposition aux UV artificiels, en recommandant l'arrêt de l'utilisation de cabines de bronzage (saisine 2012-SA-0263).

3.8.3 LED et peau

3.8.3.1 Utilisation des LED en dermatologie

Malgré le manque d'information sur les effets des rayonnements visibles sur la peau, les photothérapies pour traiter les affections cutanées prolifèrent. En plus d'être utilisées pour les traitements de la rhinite, l'arthrite, la jaunisse, *etc.*, les LED sont utilisées pour le soulagement du stress, les troubles affectifs saisonniers et les troubles de l'horloge biologique. Les LED sont aussi en plein essor dans le domaine du photo-rajeunissement. La photothérapie dynamique à base de LED a même été étendue pour le traitement du cancer. À titre d'illustration, un certain nombre d'applications sont listées ci-dessous, sans jugement de leur efficacité.

3.8.3.1.1 Dermatite radio-induite

Des dispositifs ont été conçus pour le traitement de la peau brulée par la radiothérapie. Les arguments scientifiques mis en avant soulignent que l'exposition aux LED augmente la cicatrisation et la synthèse de collagène et diminue la synthèse de cytokines pro-inflammatoires et l'expression de métalloprotéases *in vitro*. Le mécanisme proposé pour expliquer ces effets implique l'absorption des cytochromes cellulaires entre 520 et 600 nm. Les effets des LEDs sur les radio-dermatites sont variables selon leur spectre. Certains auteurs suggèrent que les LEDs à 590 nm pourraient avoir un effet négatif sur la cicatrisation, sauf quand la dermatite est très importante(Fife *et al.*, 2010). En revanche, dans un papier récent, Strouthos *et al*. mettent en évidence dans le cadre d'une étude clinique que le traitement par une exposition à une grille de LED de longueurs d'onde comprises entre 660 et 850 nm, avant la radiothérapie, réduit les réactions de la peau à la radiothérapie (Strouthos *et al.*, 2017).

3.8.3.1.2 Acné

Les patients avec une acné dont l'origine est *Propionibacterium acnes* sont difficiles à traiter, car la souche est résistante à la plupart des antibiotiques. Les lésions d'acné se produisent par une hyperplasie des kératinocytes folliculaires qui bouchent le pore et déclenchent l'infection et la puissante réaction inflammatoire qui se suit. Les symptômes présentés par ces patients sont réduits en été. L'explication est que l'UV et la lumière bleue du soleil modifient les prophyrines bactériennes en causant leur mort.

Gold *et al*. ont utilisé des dispositifs émettant de la lumière bleue sur un échantillon de 30 patients et ont montré une efficacité limitée de ces traitements avec un temps de guérison estimé à 99 h pour les patients traités contre 122 pour le groupe contrôle (Gold *et al.*, 2011).

3.8.3.1.3 Rides

Le vieillissement de la peau induit par les UV implique l'inhibition de la synthèse des collagènes 1a et B. Le niveau de ces protéines est également régulé par les metalloproteinases qui, elles, sont suractivées. Les LED sont utilisées pour la réjuvénation car elles produisent une augmentation de la synthèse de collagène, une réduction de la pigmentation et une réduction des rides. Le mécanisme de cette action est encore inconnu, mais des hypothèses suggèrent qu'il passerait par une augmentation de la synthèse d'ATP par la cellule. De précédentes études avaient montré que l'éclairage de la peau avec des LED émettant une lumière dont la longueur d'onde est comprise entre 590 et 660 nm la

rajeunit (études *in vitro* et *in vivo*). Kim *et al*. montrent que l'exposition d'explants de peau à des LED de longueurs d'onde 633 nm n'est pas toxique, ni pour le fibroblaste, ni pour les kératinocytes de la peau et ne provoque pas de réaction allergique. De plus les modifications sur les metalloproteases (2 d'entre elles diminuent leur expression) suggèrent que ce traitement peut être bénéfique pour lutter contre les rides (Kim *et al.*, 2015). L'illumination des fibroblastes avec une lumière monochromatique augmente la synthèse de procollagène par ces cellules et diminue celle de la metalloproteinase ou de la collagénase, enzymes proteolytiques qui interviennent dans le vieillissement de la peau (Gold, 2011).

3.8.3.1.4 Hyperbilirubinémie

Lors de la jaunisse pathologique du bébé (kenicterus), un traitement consiste à exposer les enfants à la lumière du soleil, car la bilirubine (responsable de la jaunisse) se transforme alors en photobilirubine et en lumirubin, facilement éliminables sans la participation du foie. Depuis un certain temps, ceci se fait en hôpital en utilisant des tubes fluorescents, des halogènes, des fibres optiques ou des LED. Certaines études avaient montré que la dégradation de la bilirubine était plus importante avec des LED bleues. La longueur d'onde optimale était de 460 +/- 10 nm (Reddy et Prasad, 2014). Une étude multicentrique randomisée comprenant 272 nouveaux nés (contre 60 dans l'étude précédente) a comparé l'efficacité de la photothérapie selon que l'on utilise des LFC ou des LED. Ils ne trouvent pas de différence d'efficacité entre les deux dispositifs (Kumar *et al.*, 2010).

3.8.3.1.5 Analgésie

La thérapie par la lumière a été utilisée pour induire la guérison des altérations neurales. Cidral-Filho *et al*. ont utilisé à cet effet un modèle expérimental murin qui consiste à comprimer le nerf sciatique de l'animal. Sept jours après l'intervention, les pattes des animaux sont exposées à des LED de longueur d'onde 950 nm (2,5 J/cm^2) pendant 15 jours. Les animaux traités présentent une diminution des cytokines pro inflammatoires au niveau du nerf sciatique et de la moelle épinière. Les auteurs constatent une diminution de l'hypersensibilité mécanique de la patte de l'animal. En revanche, la sensibilité au froid, la récupération motrice et histologique ne se voient pas affectées (Cidral-Filho *et al.*, 2013). Une autre étude chez le rat a montré un effet antinociceptif des LED de longueur d'onde 940 nm (infrarouge) sur les brûlures superficielles. Cet effet est le résultat de la diminution de facteurs intervenant dans l'inflammation et la douleur tels que COX-2, la prostaglandine E2 ou l'interleukine pro-inflammatoire IL-6 (Chia *et al.*, 2017).

3.8.3.1.6 Asepsie

Des dispositifs utilisant des LED bleues sont utilisés pour leurs propriétés bactéricides et fongicides. Des longueurs d'onde à 470 nm sont efficaces sans photosensibilisation préalable. Une bonne partie d'agents pathogènes sont sensibles à la lumière bleue, car ils possèdent des photo sensibilisateurs naturels tels que les porphyrines et les flavines (Lubart *et al.,* 2011).

3.8.3.1.7 Photothérapie dynamique

La photothérapie dynamique s'opère par la combinaison d'agents photosensibilisants non toxiques qui, par action de la lumière visible, produisent des espèces réactives de l'oxygène (Ormond et Freeman, 2013). L'efficacité de ce traitement a été bien démontrée *in situ* dans le traitement de carcinomes basocellulaires superficiels, de kératoses actiniques et de carcinomes épidermoïdes en dehors de maladie génétique prédisposante. Les agents photosensibilisants sont multiples : porphyrines, l'acide 5-aminolévulinique (5-ALA), la méthyl aminolévulinate (MAL), la méso-tétrahydroxyphénylchlorine ou le dérivé mono-acide de la benzoporphyne (BPD-MA) (Visudyne) dont la principale utilisation reste le traitement de la dégénérescence maculaire liée à l'âge ou DMLA (Wolf-Schnurrbusch *et al.*, 2011).

3.8.3.2 Effets constatés

3.8.3.2.1 Sur les cellules de la peau

Des expériences menées sur des monocouches de myoblastes C2C12, de fibroblastes NIH/3T3 et de kératinocytes BICR10 ayant subi des lésions mécaniques, ont montré que l'éclairage a un effet significatif sur la cicatrisation (Teuschl *et al.*, 2015 ; Knels *et al., 2016*). Par contre, l'exposition à une lumière bleue (470 nm) diminue fortement la prolifération et augmente l'apoptose des trois types cellulaires. Elle produit, en sus, la nécrose des C2CA2 et des NIH/3T3. La diminution de la survie cellulaire suite à une exposition à la lumière bleue a aussi été constatée par LEE *et al.* (Lee *et al.*, 2016). En revanche, la lumière rouge (630 nm) n'induit l'apoptose d'aucun des types cellulaires, mais stimule leur prolifération et diminue le temps de fermeture de la lésion.

Les effets de la lumière bleue sur les fibroblastes dermiques a été beaucoup étudiée par le groupe de Suscheck. Ils ont investigué les effets de LED à 410, 420, 453 et 480 nm et à différentes doses. Ils ont montré que les longueurs d'onde les plus grandes (480 nm) n'ont pas d'effet sur les cellules tandis qu'à 410, 420 et 453 nm ils observent une diminution de la capacité antioxydante des cellules et, à doses non toxiques, une diminution de la prolifération de fibroplastes (Opländer *et al.*, 2011). Au dessus d'un éclairement de 60 J/cm², on observe une cytotoxicité aux longueurs d'onde de 410 et 420 nm. Il est intéressant de remarquer que ces effets sont minorés par l'ajout d'azide de sodium (qui diminue la concentrations d'espèces réactives de l'oxygène) et augmentés par le deuterium qui augmente la vie moyenne de ces molécules (Opländer *et al.*, 2011) Le travail de Mamalis *et al.*, sur la prolifération et la migration des fibroblastes de peau humaine *in vitro* sont en accord avec ces données car ils montrent une diminution de la migration cellulaire lorsque les cultures sont exposées à une lumière à 415 nm (dose de 5-80 J/cm²) (Mamalis *et al.*, 2015). Ils montrent également une protection par le Resvaratrol, ce qui leur permet d'impliquer le stress oxydant dans cet effet (Mamalis *et al.*, 2016).

Les effets de la lumière ont aussi été étudiés sur les keratinocytes, en particulier en utilisant la lignée HaCat. Dans ces cellules, la lumière verte induit une importante augmentation de la leptine, IL-8 et VEGF, des facteurs activés pendant la cicatrisation, connus pour stimuler la croissance des cellules endothéliales et des keratinocytes (Fushimi *et al.*, 2012). Liebmann *et al.* (Liebmann *et al.,* 2010), travaillant également sur les keratinocytes montrent que l'exposition de ces cellules à des longueurs d'onde de 632-940 nm n'est pas toxique quelle que soit la dose. Par contre, l'exposition à 412-426 nm provoque des effets toxiques dès 500 J/cm^2. Il est intéressant de remarquer qu'entre 5 J/cm^2 et 66 J/cm^2, la lumière bleue réduit la prolifération et favorise la différenciation par un mécanisme d'oxyde d'azote dépendant (Liebmann *et al.,* 2010).

Sur les mélanocytes, cellules capables de produire la mélanine, responsable de la couleur de la peau, l'exposition à des rayonnements de longueur d'onde 660 nm produit une inhibition de la synthèse de mélanine à cause d'une diminution de l'activité de la tyrosinase dont la synthèse dépend de l'activité de ERK. Ces résultats, qui ont été confirmés chez la souris pigmentaire *hairless* HRM-2, suggèrent que ces longueurs d'ondes pourraient être utilisées pour le traitement des affections pigmentaires de la peau telles que l'hyperpigmentation post inflammatoire ou les tâches de rousseur (Oh *et al.* 2017), . L'exposition à la lumière rouge permet aussi de réguler la synthèse de collagène qui conduit à la production de fibres plus épaisses et permet une amélioration la cicatrisation (Nogueira *et al.*, 2016).

3.8.3.2.2 Sur la peau in vivo

- Production de monoxyde d'azote

La peau contient des dérivés azotés qui, sous l'effet des UV-A, peuvent se décomposer en libérant de l'oxyde d'azote (NO). Celui-ci a, entre autres, des propriétés antibactériennes et vasodilatatrices pour les vaisseaux du derme superficiel. L'équipe de Suschek a montré

qu'un effet similaire peut être obtenu en utilisant de la lumière bleue (420-453 nm) (Opländer, 2013). Chez le volontaire sain, le NO produit augmente de 17 fois par rapport au contrôle non exposé ou aux individus exposés à d'autres longueurs d'onde (vert, 524 nm ; rouge, 689 nm, ; infrarouge, 834 nm). Au niveau de l'épiderme, le NO ainsi produit peut migrer vers les tissus sous-jacents et avoir un effet vasodilatateur au niveau des vaisseaux dermiques. Les auteurs n'ont pas détecté de toxicité en utilisant la technique *Tunel* comme marqueur d'induction de mort cellulaire.

- Effets sur la peau de l'adulte

Les LED sont utilisées pour de multiples applications. Les patients souffrant de cancer du sein et traités par radiothérapie présentent une dermatite. L'utilisation d'une « photomodulation » par LED a été préconisée, c'est-à-dire une exposition de la peau à de la lumière visible, dans la gamme du rouge. En effet, il a été montré qu'à ces longueurs d'onde, la cicatrisation est meilleure. Ceci est attribué à une augmentation de la synthèse de collagène et une diminution de la synthèse de cytokines pro-inflammatoires et des métalloprotéases (Silveira *et al*., 2016) Le mécanisme proposé pour expliquer ces effets implique de l'absorption des cytochromes cellulaires entre 520 et 600 nm (Fife *et al.*, 2010) D'autres travaux investiguent les effets de LED de différentes couleurs sur la cicatrisation de la peau chez la souris. Ils montrent que la cicatrisation est accélérée par les LED rouges et vertes (Fushimi *et al.*, 2012). En revanche, d'autres auteurs soutiennent le contraire. En effet, le travail de Adamskaya *et al*. montre une augmentation de la cicatrisation avec la lumière bleue à 470 nm comparée à la cicatrisation à 630 nm (Adamskaya *et al.,* 2011) . Ce résultat est quand même en opposition aux études des effets d'exposition à la lumière rouge (photomodulation) qui montrent les effets bénéfiques des longueurs d'ondes comprises entre 600 et 700 nm. En particulier, une étude parue en 2005 et regroupant 300 patients, montre une amélioration de l'élasticité de la peau et une diminution des rides lorsque les patients sont exposés à des LED à 590 nm (Weiss *et al.*, 2005). Il y a aussi une amélioration de la cicatrisation des plaies au niveau de la peau (Li *et al.*, 2016) ou des gencives (Chang *et al.*, 2013) et une diminution de la fibrose pathologique (Mamalis *et al.*, 2016 a ; Mamalis *et al.* ;2016 b).
Récemment, Nakashima *et al.* (Nakashima *et al.*, 2017) ont investigué les effets de la lumière bleue sur la peau *in vivo*. Les études ont porté sur des modèles animaux (souris) et humain. Concernant le modèle souris, les auteurs ont utilisé des souris transgéniques sur fond C57BL6, c'est-à-dire des souris pigmentées. Ces souris présentent la caractéristique d'être sans poil (par croissement sélectif avec des souris « *hairless* ») et d'exprimer un transgène, celui de la GFP (*green fluorescent protein*) sensible à la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) (roGFP). De ce fait, lorsqu'une région de la peau de la souris produit des ROS, elle fluoresce. Sur ce schéma commun, deux sites de GFP ont été observés : la GFP exprimée dans le cytoplasme cellulaire et la GFP exprimée dans la mitochondrie. Les souris ont par la suite été exposées à une dose énergétique de 44 mW/cm^{-2} avec des LED de différentes longueurs d'onde : UVA à 365 nm, bleue à 460 nm, vert à 523 nm, rouge à 623 nm et infrarouge à 740 nm et 850 nm. Les souris exprimant la roGFP dans le cytosol ont présenté une augmentation des ROS seulement sous UVA. Par contre, les souris exprimant la construction mitochondriale présentent une production de ROS autour de 460 nm (même si elle est un peu plus faible), longueur d'onde la plus proche des UVA. Il est intéressant de noter qu'à 470 nm la fluorescence émise par la roGFP est détectable à partir de seulement 4 min d'exposition. Les auteurs ont comparé l'efficacité de la lumière à 470 nm à produire des ROS avec celle des UVA. Ils ont couclu à une efficacité de 68%. C'est-à-dire que si une dose donné de UVA porduit une quantite donné de ROS, la même dose de lumière bleue à 470 nm produira seulement un peu plus de la moitié. C'est moins, mais ce n'est pas une quantité nulle comme on pouvait l'espérer.
Plus intéressant encore, les auteurs travaillent avec des volontaires humains pour investiguer la question de la réponse de la peau à la lumière bleue. L'échantillon présente un petit nombre de patients (5) mais le résultat obtenu va dans le même sens que les résultats obtenus chez la souris. Chez l'humain, la démarche a été un peu différente. Les auteurs se

sont ici concentrés sur la diminution de la fluorescence produite par les flavines comme signe indicateur de la production de ROS. Les patients ont été illuminés au niveau de la peau du dos de la main pendant 10 min à une irradiance de 11 mW/cm². Ils constatent une diminution significative de la fluorescence des flavines débutant seulement 2 minutes après exposition.
Finalement, les auteurs utilisent des modèles cellulaires *in vitro* pour essayer d'expliquer la différence des résultats obtenus chez les souris exprimant les deux constructions de la GFP et montrent que les UVA ont tendance à produire de l'oxygène singulet tandis que la lumière bleue induit la production de superoxyde.

Récemment, Lee *et al*. ont étudié les médiateurs de l'inflammation cutanée chez les souris RLMS. Ce sont des souris qui ont une affection de la peau similaire à la rosace et qui présentent une diminution des molécules inflammatoires lorsqu'elles sont traitées par des LED à 850 et 940 nm (Lee *et al.*, 2016). Figurova *et al*. ont étudié, sur un modèle de porc, l'effet d'une combinaison de lumière bleu et rouge (470 et 695 nm) sur la cicatrisation cutanée. Leurs résultats sont en accord avec les résultats précédents. Ils constatent une meilleure cicatrisation des plaies avec cette combinaison. Les effets moléculaires de chaque longueur d'onde ne sont pas analysés dans ce travail (Figurová *et al.*, 2016).

- Effets sur la peau de l'enfant

Des études précédentes avaient montré que la dégradation de la bilirubine était plus importante avec des LED bleus. La longueur d'onde optimale a été fixée à 460 +/- 10 nm. *In vitro*, les LED bleues semblent également plus efficaces (Addi *et al.*, 2006). Ceci dit, une étude multicentrique sur 272 néonates dont 142 seront exposés aux LED et 130 au CFL avec des conditions d'inclusion strictes ne trouvent pas de différence entre les deux dispositifs *in vivo* (Kumar *et al.*, 2010).

Il existe des évidences indiquant que la peau du nouveau-né reste immature pendant ses deux premières années de vie et que les modifications induites par les UV peuvent débuter dès le premier été, puisque la production de mélanine est limitée chez le jeune enfant. Compte tenu de l'incidence accrue du mélanome ces dernières années, les experts ont commencé à remettre en question l'effet de la photothérapie à la lumière bleue sur la peau néonatale. De ce fait, cinq études ont évalué le risque de développer des lésions mélanocytaires bénignes ou malignes après la photothérapie néonatale à la lumière bleue. Les résultats sont contradictoires. Trois de ces cinq études ont montré un nombre accru de nevi (grains de beauté) commun ou atypique chez les enfants qui ont été exposés à une photothérapie néonatale, avec une prévalence significativement plus élevée de lésions mélanocytaires cutanées et uvéales (Paller *et al.*, 2011).

- La photosensibilisation

Les spécialistes de la santé au travail constatent souvent, chez les travailleurs photosensibilisés, les effets nocifs de l'exposition professionnelle aux UV. Les réactions sont autant photo-allergique (réaction allergique de la peau) que phototoxique (irritation de la peau) après l'exposition aux UV d'origine solaire ou industrielle (les réactions de photosensibilisation sont également courantes en cas d'utilisation de matériel de bronzage). La photosensibilisation aux UV découle de l'utilisation de certains médicaments (médicaments pris par voie buccale ou par injection) ou de l'application topique de certains produits (parfums, lotions hydratantes, crèmes, pommades) ou encore de l'utilisation d'inhalateurs sur prescription médicale.
Les produits les mieux connus sont les psoralènes (Almutawa *et al.*, 2015). Ils sont utilisés dans le traitement du psoriasis, ou le vitiligo où la stimulation des mélanocytes est recherchée. Cependant, en absence de mélanocytes, on obtient des brûlures au lieu d'un brunissement. Les psoralènes s'intercalent dans l'ADN. Sous l'effet de la lumière ils sont activés, même en absence d'oxygène, et établissent des liaisons covalentes donnant lieu à des adduits. En présence d'oxygène, il y a en plus formation de radicaux superoxydes qui altèrent L'ADN. Généralement, une lumière ultraviolette (entre 320 et 380 nm) est utilisée

pour activer les psoralènes. Certains auteurs suggèrent le remplacement de l'UV dans l'activation des psoralènes par de la lumière bleue (Pfaff *et al.*, 2015 ; Félix Garza *et al.*, 2017) qui semble être aussi efficace.

3.8.4 Conclusions sur les LED et les pathologies cutanées

3.8.4.1 Synthèse

La présence d'une importante quantité de lumière bleue dans la composition des LED « blanches » soulève la question des effets qu'elle peut avoir sur la peau. Il s'agit d'une question encore peu étudiée. En effet, les lésions induites par les rayonnements électromagnétiques sur la peau se sont concentrées sur l'UVB, les altérations de l'ADN qu'il produit et l'apparition des cancers de la peau. Plus récemment, les effets carcinogéniques de l'UVA, qui endommage la peau indirectement à travers la production de ROS, ont été admis (El Ghissassi *et al.*, 2009). En fait, la distinction stricte entre UVB, UVA, et lumière bleue semble arbitraire dans le sens où les effets produits dépendent de l'absorption de la cible, qui n'est jamais ponctuelle (à une longueur d'onde précise) et de l'énergie transportée par la lumière qui dépend de façon continue (non discrète) de la longueur d'onde.

Il est à noter que les personnes exposées fortement au soleil présentent un vieillissement prématuré de la peau. Or, le vieillissement de la peau et les altérations produites par le soleil ont les mêmes causes : l'instabilité génomique, l'accumulation de mutations dans l'ADN mitochondrial, la sénescence cellulaire, le raccourcissement des télomères. On peut donc se demander si la lumière bleue, à l'instar de l'UVA, peut aussi produire ce type d'altérations. Les résultats de Nakashima *et al*. semblent répondre positivement à cette question, car ils ont prouvé que l'exposition à la lumière bleue induit la production de ROS chez la souris et la disparition de flavines chez l'Homme (le protocole expérimental utilisé chez la souris n'étant pas applicable techniquement à l'Homme).

Ces résultats sont aussi en accord avec d'autres travaux qui montrent la nécrose et l'apoptose cellulaire sur des cellules de la peau en culture (Teuschl *et al.*, 2015 ; Opländer *et al.*, 2011 ; Mamalis *et al.*, 2015 ; Fushimi *et al.*, 2012) et avec des études sur la peau saine montrant l'augmentation de la production de monoxyde d'azote, une molécule qui induit la vasodilatation et contribue à cantonner la flore cutanée mais qui peut aussi induire la nytrosylation protéique (Opländer *et al.*, 2013).

Une attention particulière doit être portée sur la peau des nouveaux nés ,car elle est immature. Des cinq études réalisées pour évaluer le risque de développer des lésions mélanocytaires bénignes ou malignes après la photothérapie néonatale à la lumière bleue, trois ont montré un nombre accru de nevi commun ou atypique chez les enfants exposés (Paller *et al.*, 2011).

En ce qui concerne la peau pathologique, les données sont concentrées sur les UV qui aggravent en général ces peaux très sensibles à la lumière mais sans investiguer plus particulièrement les effets potentiellement dus à la partie bleue de la lumière. Etant donné que la partie bleue du spectre peut induire la production de radicaux libres, on peut penser que les photodermatoses pourraient être aggravées, en particulier les genodermatoses graves telles que le Xeroderama pigmentosum où au défaut de réparation de l'ADN s'ajoute une gestion déficiente du stress oxydant (Parlanti *et al.*, 2015).

En ce qui concerne la question de la photosensibilisation, une myriade de produits, d'utilisation topique ou générale, la produisent et là encore les études se sont concentrées sur les UV.

Un élément supplémentaire en faveur d'une influence non anodine de la lumière sur la peau, et ce malgré le manque d'information précise, vient du développement explosif de dispositifs médicaux utilisant différentes longueurs d'onde pour le traitement de différentes affections en dermatologie et qui détiennent une autorisation de mise sur le marché. Les dispositifs sont variés, les longueurs d'onde et les irradiances aussi, mais la littérature montre que les utilisations des spectres dans la gamme du rouge sont plus utilisées pour les effets

« trophiques » et les longueurs d'onde courtes, dans la gamme du bleu, pour des effets d'asepsie et leur capacité à détruire les bactéries.

Les différentes données synthétisées ici sont très difficilement transposables à une évaluation des effets d'une exposition chronique à une quantité relativement faible de lumière bleue pour la peau, ce qui sera le cas lorsque tout l'éclairage sera fourni par les LED dans leur configuration actuelle. Cet aspect, néanmoins, devrait être pris en considération.

3.8.4.2 Classement de l'effet d'une lumière froide sur des pathologies cutanées

Nous dressons ci-dessous le bilan des études chez l'homme et chez l'animal pour classer l'effet d'une exposition à une lumière riche en bleu sur la survenue de pathologies cutanées.

3.8.4.2.1 Niveau de preuve chez l'Homme

Il existe plusieurs_études épidémiologiques qui lient le vieillissement cutané et l'exposition solaire (qui est une lumière froide, riche en bleue, en plein jour).

Des cinq études réalisées pour évaluer le risque de développer des lésions mélanocytaires bénignes ou malignes après la photothérapie néonatale à lumière bleue, trois ont montré un nombre accru de nevi commun ou atypique chez les enfants exposés (Paller *et al.*, 2011).

L'étude de Nakashima *et al.* étudiant l'effet de la lumière bleue sur l'Homme montre une disparition de flavines.

Pour le groupe de travail, les éléments de preuve sont limités chez l'Homme quant à l'effet d'une exposition à la lumière riche en bleu sur la survenue de pathologies cutanées.

3.8.4.2.2 Niveau de preuve chez l'animal

Les résultats de Nakashima *et al.* ont montré que l'exposition à la lumière bleue induit la production de ROS chez la souris et la disparition de flavines chez l'Homme.

Ces résultats sont aussi en accord avec d'autres travaux qui montrent la nécrose et l'apoptose cellulaire sur des cellules de la peau en culture (Teuschl *et al.*, 2015 ; Opländer *et al.*, 2011 ; Mamalis *et al.*, 2015 ; Fushimi *et al.*, 2012) et avec des études sur la peau saine montrant l'augmentation de la production de monoxyde d'azote, une molécule qui induit la vasodilatation et contribue a cantonner la flore cutanée mais qui peut aussi induire la nytroslation protéique (Opländer *et al.*, 2013).

Les éléments de preuve sont limités chez l'animal quant à l'effet d'une exposition à la lumière riche en bleu sur la survenue de pathologies cutanées.

3.8.4.2.3 Classement de l'effet d'une lumière froide sur les pathologies cutanées

Pour le groupe de travail, l'effet d'une exposition à la lumière riche en bleu sur la survenue de pathologies cutanées est possible.

4 Caractérisation des expositions

4.1 Données d'expositions instantanées avec mise en relief sur la gamme du bleu

Afin d'augmenter la connaissance sur les niveaux d'exposition de la population à la lumière artificielle et en particulier à celle issues des LED, différentes campagnes de mesures ont été réalisées par le CSTB :

- une campagne de mesures sur sites (maison, école, bureau, stade, lieux de travail) ;
- une campagne de mesures sur des objets à LED et écrans numériques (écrans d'ordinateurs, écrans de *smartphone*) ;
- une campagne de mesure sur des phares automobiles.

Ces campagnes effectuées sur différents sites et objets ont permis d'obtenir des données utiles pour tenter d'estimer par la suite l'exposition de différentes populations selon des scénarios prédéfinis. Ce travail est détaillé dans la partie 4.2.

Nous présentons ci-dessous succintement les résultats pour chaque campagne de mesures.

4.1.1 Mesures photométriques sur sites et pour des écrans numériques

4.1.1.1 Mesures photométriques réalisées sur site (maison, école, bureau, réseau ferré souterrain)

4.1.1.1.1 Matériel utilisé et grandeurs photométriques mesurées

Dans le cadre de l'évaluation des niveaux d'exposition à la lumière artificielle, diverses opérations de mesurages ont été réalisées afin de constituer des éléments de référence. Les grandeurs photométriques analysées concernent principalement l'éclairement (spectrique) dans le plan de l'œil ainsi que la distribution de luminance dans le champ visuel.
Les équipements de mesure utilisés sont de deux types (*cf.* Figure 82)

- un spectro-photomètre pour le mesurage des niveaux d'éclairements spectriques ;
- un vidéo-luminancemètre pour la constitution de cartographies de luminance dans le champ visuel.

Figure 82 : spectro-photomètre et vidéo-luminancemètre

Pour chaque site étudié, les relevés photométriques ont été réalisés dans le plan de l'œil d'un observateur pour diverses postures. Les mesures ont été réalisées en mai 2017 sur différents sites :

- dans une maison individuelle ;
- dans des bureaux ;
- dans une école maternelle ;
- dans un stade (mars 2017)
- dans un réseau ferré souterrain.

4.1.1.1.2 Mesures dans une maison individuelle

Les relevés photométriques ont été réalisés en l'absence notable de lumière naturelle afin de bien distinguer l'exposition lumineuse attribuable à l'éclairage artificiel de l'éclairage naturel. Les conditions thermiques et d'alimentation des éclairages n'ont pas été contrôlées mais sont supposées être représentatives des conditions normales de fonctionnement.

Les mesures (*cf.* Figure 83) ont été effectuées dans la chambre à coucher (éclairage à LED), dans la cuisine (éclairage à LED), le salon (éclairage avec des tubles fluorescents), le séjour (éclairage à LED) et la salle de bain (éclairage à LED).

Quelle que soit la technologie, les températures de couleur variaient de 2 700 à 3 000 K avec des éclairements sur le plan de l'œil qui se situaient entre 25 et 400 lx. Les indices de rendu de couleur variaient entre 81 et 90.

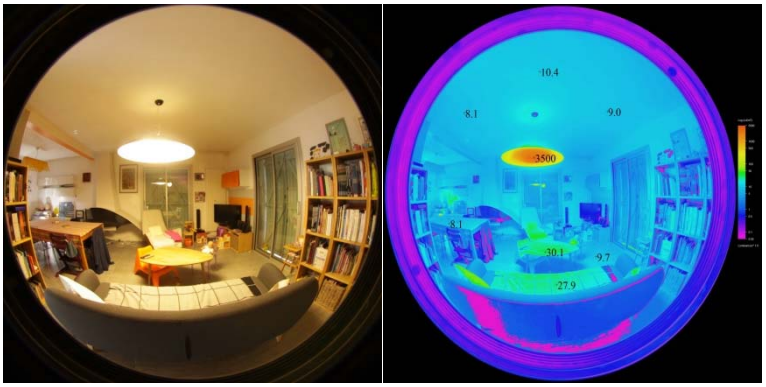


Figure 83 : exemple de cartographies prises dans le séjour

4.1.1.1.3 Mesures dans des bureaux

Les relevés photométriques (*cf.* Figure 84) ont été réalisés dans des bureaux (éclairage en tubes fluocompactes T8), en salle de réunion (éclairages en tubes fluocompacts T5) et à la cafétéria (éclairage à LED).

Quelle que soit la technologie, les éclairements sur le plan de l'œil variaient entre 50 et 300 lx avec des températures de couleur autour de 3 800 K et des indices de rendu de couleur entre 74 et 84.

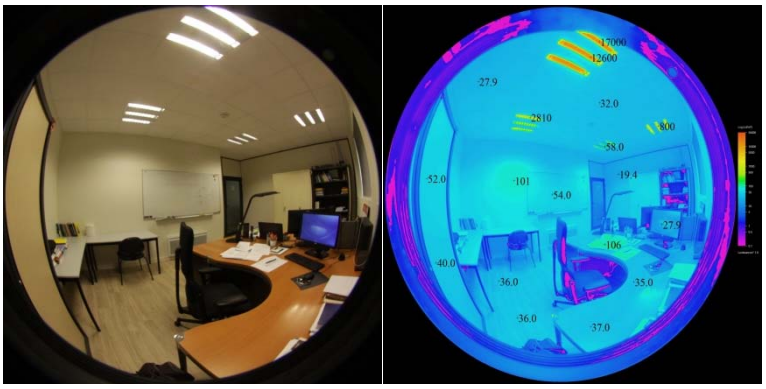


Figure 84 : exemple de cartographies prises dans un bureau

4.1.1.1.4 Mesures dans une école maternelle

Les relevés photométriques ont été réalisés (*cf.* Figure 85), vers 20 heures dans une école maternelle, dans une salle de classe et le dortoir. Malgré quelques précautions visant à réduire la présence de l'éclairage naturel, certains mesurages intègrent des apports indirects naturels (toutefois suffisament faibles pour cette analyse). L'éclairage des lieux utilise des tubles fluorescents T8.

Les mesures ont été réalisées dans la salle de classe et dans le dortoir avec différentes situations d'observateurs (enfant ou adulte). Les niveaux d'éclairement sur le plan de l'œil variaient selon les situations de 80 à 300 lx avec des températures de couleur variant de 3 600 à 3 900 K.

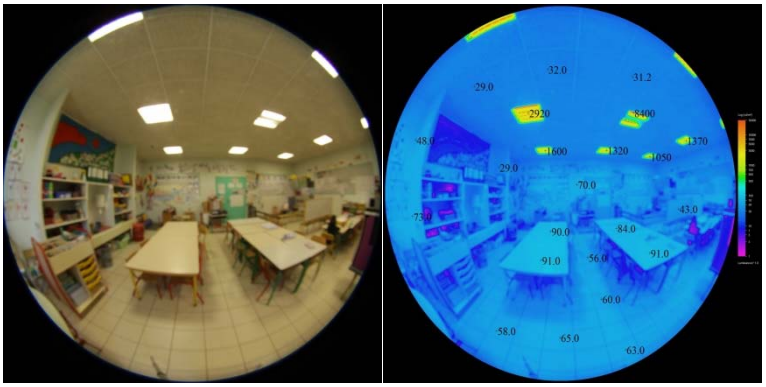


Figure 85 : exemple de cartographies prises à l'école

4.1.1.1.5 Mesures dans un stade

Les relevés photométriques

ont été réalisés de nuit, dans un stade de football. L'aire de jeu est éclairée par environ 150 projecteurs à iodures métalliques de 2 000 watts, assurant un éclairement horizontal de 1 400 lx au milieu du terrain. Les mesurages ont été réalisés sur le terrain et dans les tribunes.

Pour ce qui concerne les joueurs de football, les éclairements sur le plan de l'œil peuvent varier de 600 à 1 500 lx avec des températures de couleurs autour de 6 000 K et des indices de rendu de couleur de l'ordre de 82.

Pour ce qui concerne les spectateurs en tribunes, les éclairements sur le plan de l'œil sont autour de 400 lx, des températures de couleur autour de 6 000 K et des indices de rendu de couleur de 84.

4.1.1.1.6 Mesures dans un réseau ferré souterrain

Des mesures ont pu être réalisées dans un réseau ferré souterrain éclairé avec la technologie à LED. Les relevés photométriques effectués montrent que selon les situations (situation de travail, ou personne utilisant ce réseau ferré, …), les éclairements sur le plan de l'œil variaient entre 50 lux et 400 lux (en moyenne 125 lux) avec des températures plutôt variant entre 3900 et 4 500 K (en moyenne 4 100 K) et des indices de rendu de couleur variant autour de 80.

4.1.1.2 Mesures photométriques d'écrans numériques

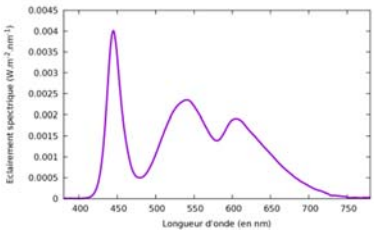
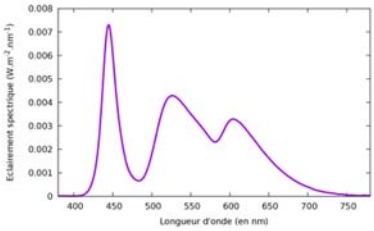
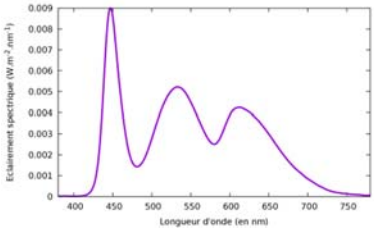
Les relevés photométriques ont été réalisés sur un ensemble d'écrans numériques (moniteurs, tablettes, téléphones), à une distance similaire à celle des conditions d'observation.

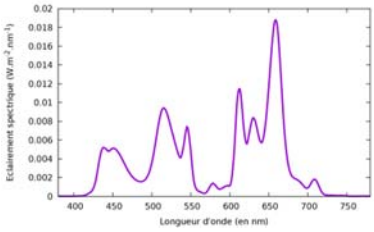
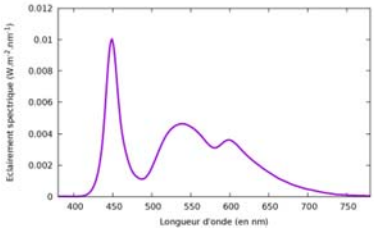
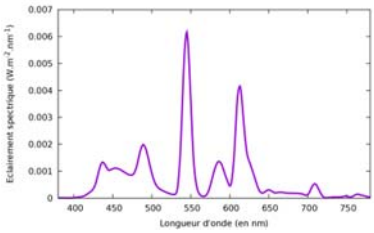
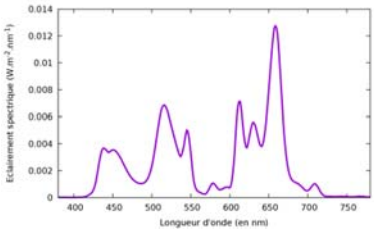
Les mesurages sont réalisés lors de l'affichage d'un écran totalement blanc, sans modification des réglages des utilisateurs (sauf indication contraire).

4.1.1.2.1 Écrans d'ordinateur

Comme illustré dans le tableau ci-dessous, les éclairements dans le plan de l'œil mesurés varient de 20 à 60 lx. Les températures de couleur sont plutôt froides, voire très froides (> 6 000 K).

Tableau 11 : résultats des relevés photométriques sur écrans d'ordinateurs

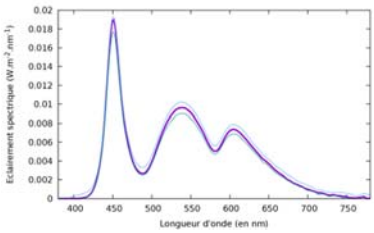
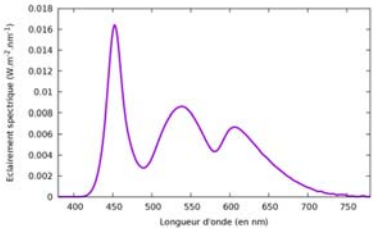
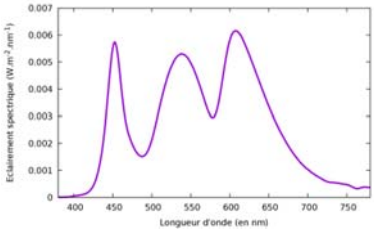
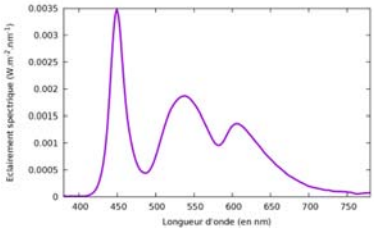
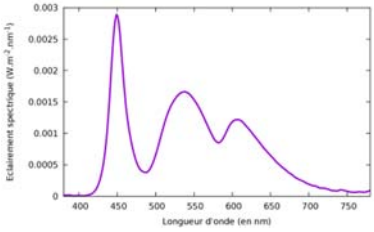
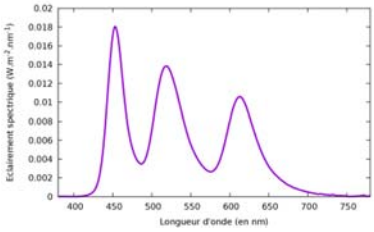
Numéro d'appareil	Distribution spectrale	Éclairement dans le plan de l'œil	Température de couleur
1 Technologie LED		26 lx	5 700 K
2 Technologie LED		45 lx	6 100 K
3 Technologie LED		55 lx	6 200 K

Numéro d'appareil	Distribution spectrale	Éclairement dans le plan de l'œil	Température de couleur
4 Technologie fluorescente		60 lx	4 500 K
5 Technologie LED		52 lx	6 900 K
6 Technologie fluorescente		20 lx	4 700 K
7 Technologie fluocompacte		42 lx	4 800 K

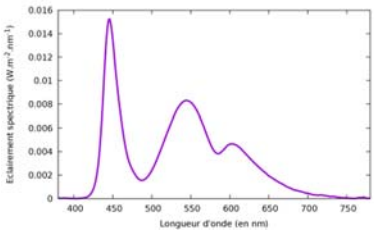
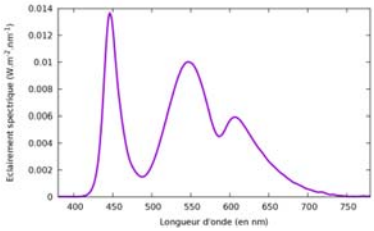
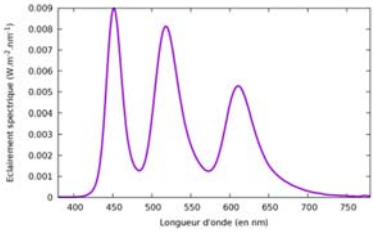
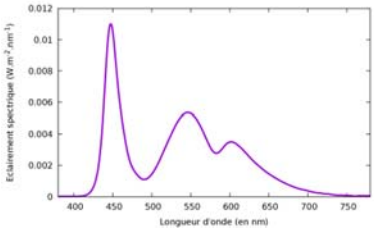
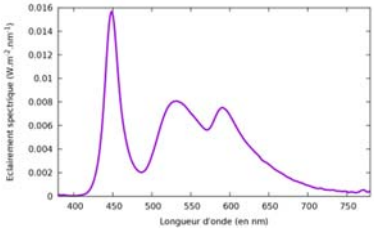
4.1.1.2.2 Écrans de téléphone et de tablettes graphiques

Tous les appareils testés utilisent une technologie à LED. Les éclairements dans le plan de l'œil varient de 1,8 lx à 45 lx et les températures de couleur sont généralement très froides (> 6 000 K), sauf lorsqu'un filtre est activé ou une protection plastique utilisée.

Tableau 12 **: résultats des relevés photométriques sur téléphones et tablettes graphiques**

Numéro d'appareil	Distribution spectrale	Éclairement dans le plan de l'œil	Température de couleur
1	 [56]	10 lx	6 900 K
2		9 lx	7 000 K
3 (modèle 2 avec un filtre anti-bleu activé)		7 lx	4 100 K
4		2 lx	6 800 K
5 (modèle 4 avec protection plastique)		1,8 lx	6 400 K
6		10 lx	7 400 K

[56] Ici les trois spectres qui apparaissent correspondent à des variations autour de la valeur moyenne du spectre

Numéro d'appareil	Distribution spectrale	Éclairement dans le plan de l'œil	Température de couleur
7		8 lx	7 600 K
8		10 lx	6 000 K
9		6 lx	7 250 K
10		5 lx	7 600 K
11		45 lx	6 400 K

4.1.1.3 Bilan des mesures d'éclairement sur sites et objets

Le Tableau 13 présente un récapitulatif des niveaux d'éclairement et des températures de couleur mesurées dans cette section. Selon les situations d'utilisation, les températures de couleur peuvent être chaudes (cela est par exemple possible dans l'éclairage domestique) ou froides comme cela est le cas avec les écrans d'ordinateurs.

Tableau 13 : récapitulatif des éclairements et températures de couleur mesurés sur sites et objets à LED

	Éclairement	Température de couleur	Indice de rendu de couleur
Maison individuelle (chambre à couher- LED, cuisine - LED, salon - tube fluorescents, salle de bain - LED)	25 et 400 lx	2 700 à 3 000 K	81 et 90
Bureaux (bureaux - fluocompactes, salle de réunion - fluocompactes, cafétéria - LED)	50 et 300 lx	3 800 K	74 et 84
École maternelle (tubes fluo)	80 à 300 lx	3 600 à 3 900 K	non mesuré
Stade	600 à 1 500 lx	6 000 K	non mesuré
Réseau ferré souterrain	50 lux et 400 lux	3 900 à 4 500 K	Environ 80
Écrans	20 à 60 lx	> 6 000 K	non mesuré
Téléphones	1,8 à 45 lx	> 6 000 K	non mesuré

4.1.2 Détermination du groupe de risque d'objets à LED

Une campagne de mesures a été lancée pour déterminer le groupe de risque de différents objets composés de LED. Les objets testés ont été les suivants :

- des lampes d'éclairage général (des lampes dites intelligentes et des lampes directionnelles) ;
- des systèmes de luminothérapie ;
- des systèmes d'éclairage portatifs (lampes torches, stylo lumineux) ;
- des jouets comportant des LED (lampes torches pour enfant).

4.1.2.1 Lampes d'éclairage général

Les lampes testées sont des lampes directionnelles (*spot*) et des lampes dites « intelligentes ». Les niveaux de luminance pondérée « lumière bleue » correspondent à des groupes de risques RG 0 et RG 1.

Parmi les lampes testées, une lampe dite « intelligente » permet d'éclairer en couleur. La lumière bleue « pure » émise par cette lampe a été testée. Le groupe de risque est semblable à celui observé en fonctionnement en lumière blanche. Cependant, le facteur d'excitation mélanopique est environ 10 fois plus élevé en lumière bleue pure, ce qui révèle une influence potentielle plus importante des effets non visuels de la lumière. Par contre, il

est important de noter que la lampe testée en éclairage bleu n'est pas associée à un groupe de risque plus élevé car les longueurs d'onde d'émission utilisées sont suffisamment longues pour exciter la mélanopsine, et provoquer ainsi le réflexe de contraction pupillaire.

4.1.2.2 Les lampes de luminothérapie

Les lampes testées sont toutes dans le groupe de risque RG 0. On note néanmoins que les luminances pondérées sont environ 100 fois moins élevées (voir la Figure 86) pour les lampes munies d'un diffuseur, par rapport à la lampe testée comportant des LED nues. Parmi les lampes comportant un diffuseur, la lampe utilisant des LED a un niveau de luminance pondérée semblable à la lampe à base de sources fluorescentes.

Le facteur d'excitation mélanopique de l'une de ces lampes testées est supérieur à 1 (valeur maximale constatée sur l'ensemble des lampes testées), ce qui est normal au vu de l'application recherchée.

4.1.2.3 Les lampes d'éclairage portatif

Le stylo lumineux comporte une seule LED dont la luminance n'est pas suffisamment élevée pour dépasser le groupe de risque RG 0.

La lampe frontale de loisirs a un niveau de luminance pondérée beaucoup plus important. Elle est classée en groupe de risque RG 2 à la distance de 200 mm et à la distance de 500 mm. À des distances plus grande (1 m et au-delà), le groupe de risque redescend à RG 0.

Les lampes torches LED testées sont des sources très lumineuses émettant une lumière blanche très froide, comportant beaucoup de bleu. Les niveaux de luminance pondérée sont les plus élevés de l'ensemble des produits testés. Les niveaux sont compris entre 25 000 W/m²/sr et plus de 30 000 W/m²/sr jusqu'à des distances de plusieurs mètres. Ainsi, les groupes de risque sont RG 2, au moins jusqu'à la distance maximale testée de 2 m.

La lampe frontale de loisirs et les deux torches sont associées à un facteur de risque rétinien de la lumière bleue potentiellement aggravé par une faible excitation mélanopique, qui implique une diminution du réflexe de contraction pupillaire.

4.1.2.4 Les lampes torches jouets

La lampe torche jouet émettant de la lumière blanche est relativement éblouissante (plus d'un million de cd/m²). Le groupe de risque photobiologique est RG 0.

La lampe torche jouet émettant de la lumière bleue est très particulière car le rayonnement émis est de type « bleu profond », situé à la limite de l'ultraviolet (380 nm). Sa longueur d'onde d'émission maximale est de 402 nm.

Pour ce type de source, une évaluation supplémentaire de la luminance pondérée et du groupe de risque a été effectuée en prenant en compte la courbe de sensibilité photochimique rétinienne des personnes aphaques et pseudophaques. Cette courbe est recommandée par l'Icnirp pour évaluer le risque auprès des enfants de moins de 2 ans. Pour ces enfants, les tissus oculaires sont beaucoup moins filtrants pour les courtes longueurs d'onde, ce qui explique que la sensibilité ne diminue pas en dessous de 430 nm mais continue de croitre dans l'ultraviolet. Bien que recommandée par l'Icnirp, cette évaluation n'est pas incluse dans la norme de sécurité photobiologique NF EN 62471.

L'évaluation « standard » de la torche jouet bleue conduit à un groupe de risque RG 0. Par contre, l'évaluation sur la base de la sensibilité des aphaques conduit à un groupe de risque RG 2 à la distance de 200 mm. Pour les distances plus grandes, le groupe de risque redescend à RG 0.

La lampe torche jouet émettant de la lumière bleue est également particulièrement critique au niveau du facteur de risque rétinien car celui-ci est potentiellement aggravé par la diminution du réflexe de contraction de la pupille, lié à une très faible excitation mélanopique.

4.1.2.5 Synthèse des résultats concernant les objets à LED

La Figure 86 présente les différents groupes de risque des objets à LED testés.

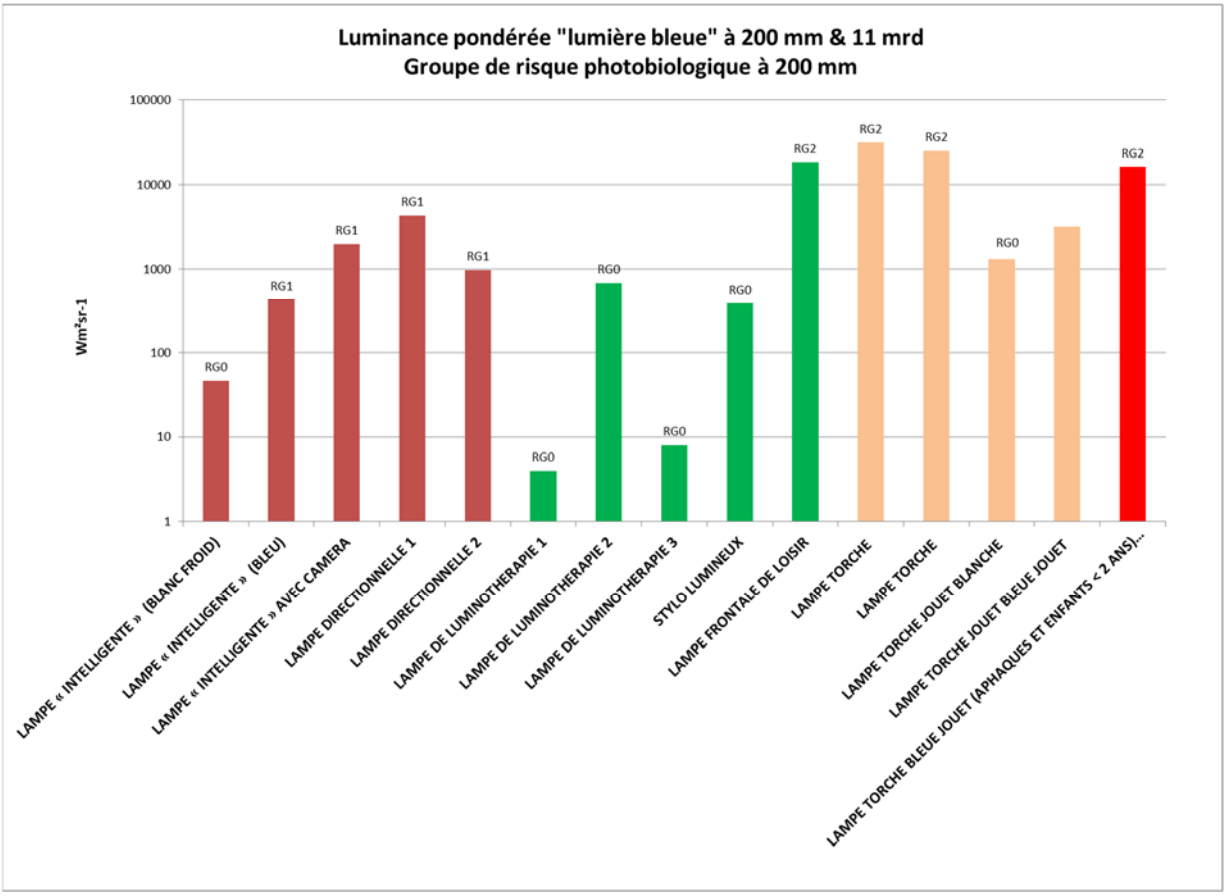


Figure 86 : groupe de risque des différents objets à LED testés.

Il existe de grande disparité dans les groupes de sécurité photobiologiques des objets à LED testés. Les lampes d'éclairage et de luminothérapie testées ne sont pas associées à des groupes de risque supérieur à 1, malgré des niveaux de luminances pouvant varier d'un rapport d'environ 50. A l'inverse, les lampes frontales et les les lampes torches ont des niveaux très élevés d'émission de lumière bleue et sont classées en groupe de risque 2, un groupe de risque interdit pour les produits d'éclairage domestique alimentés sur secteur.

Un jouet testé émet un rayonnement bleu de très courte longueur d'onde situé en limite de l'ultraviolet. Ce jouet présente un risque rétinien particulièrement élevé pour les jeunes enfants, alors que son groupe de risque est de 0 dans le cas de l'évaluation normative applicable à la population générale.

4.1.3 Mesures d'éclairages automobiles

Une campagne de mesures a été réalisée afin de déterminer le groupe de risque photobiologique, selon la norme NF EN 62471, de modules lumineux intégrés dans des projecteurs automobiles. Les technologies mesurées étaient des technologies LED, halogènes et xénon. Les résultats obtenus avec ces différentes technologies ont été comparés.

Après détermination des groupes de risques des différents modules, des durées limites d'exposition ont été calculées pour des piétons en configurations réelles d'exposition, et ce en fonction de l'âge de l'observateur, de la technologie d'éclairage (halogène, xénon, LED) et de la distance d'observation selon les recommandations de l'Icnirp. Les résultats obtenus pour les différentes technologies ont également été comparés.

Dans le cadre de cette campagne de mesure, seuls les rayonnements optiques du domaine visible ont été pris en compte. Les risques photobiologiques liés aux rayonnements ultraviolets et infrarouges n'ont pas été étudiés pour les raisons suivantes :

- la technologie LED intégrée dans les feux testés ne produit pas de rayonnements UV ou IR.
- quelle que soit leur technologie, les feux automobiles émettent des niveaux de rayonnements UV très faibles, limités à 10 µW/lm par le règlement Unece n° 98. L'absence de niveaux significatifs de rayonnement UV a été vérifiée par le CSTB lors des mesures spectrales ;
- seuls les feux halogènes émettent du rayonnement infrarouge avec un niveau significatif.

La comparaison entre les différentes technologies d'éclairage automobile a donc été effectuée en étudiant le risque photobiologique de la lumière bleue, correspondant à l'endommagement de la rétine par des processus photochimiques résultant d'une exposition unique aigüe à la lumière bleue. Ce processus est décrit dans les recommandations internationales de l'ICNIRP citées dans la partie « Évolutions normatives et réglementaires » de ce rapport.

4.1.3.1 Évaluation des groupes de risque selon la norme de sécurité photobiologique NF EN 62471

Les graphes suivants récapitulent les résultats obtenus, en séparant les feux de croisement des feux de routes et des feux DRL.

4.1.3.1.1 Feux de croisement

Comme l'illustre la Figure 87 ci-dessous, tous les feux de croisement à LED testés sont en groupe de risque 2 (risque modéré).

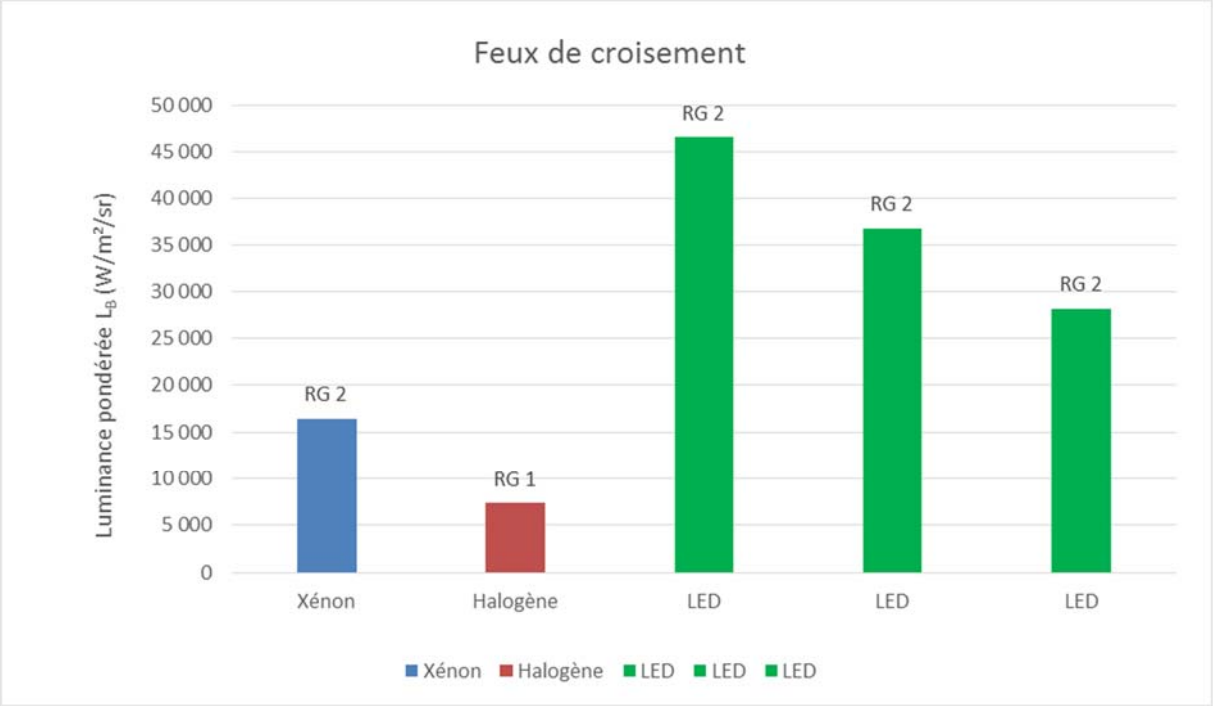


Figure 87 : luminance pondérée pour les feux de croisement

Les luminances pondérées dans le bleu des feux de croisement LED sont 4 à 6 fois plus élevées que celle du feu de croisement halogène. Le feu de type xénon testé a une

luminance pondérée dans le bleu environ deux fois plus élevée que celle du feu de croisement halogène. Il est également classé en groupe de risque 2 (risque modéré). Seul le feu de croisement halogène est classé en groupe de risque 1 (risque faible).

4.1.3.1.2 Feux de route

À l'exception du feu LED, fonctionnant en complément du feu au xénon, les feux de route de type xénon et LED testés (*cf.* Figure 88) sont tous classés en groupe de risque 2 (risque modéré).

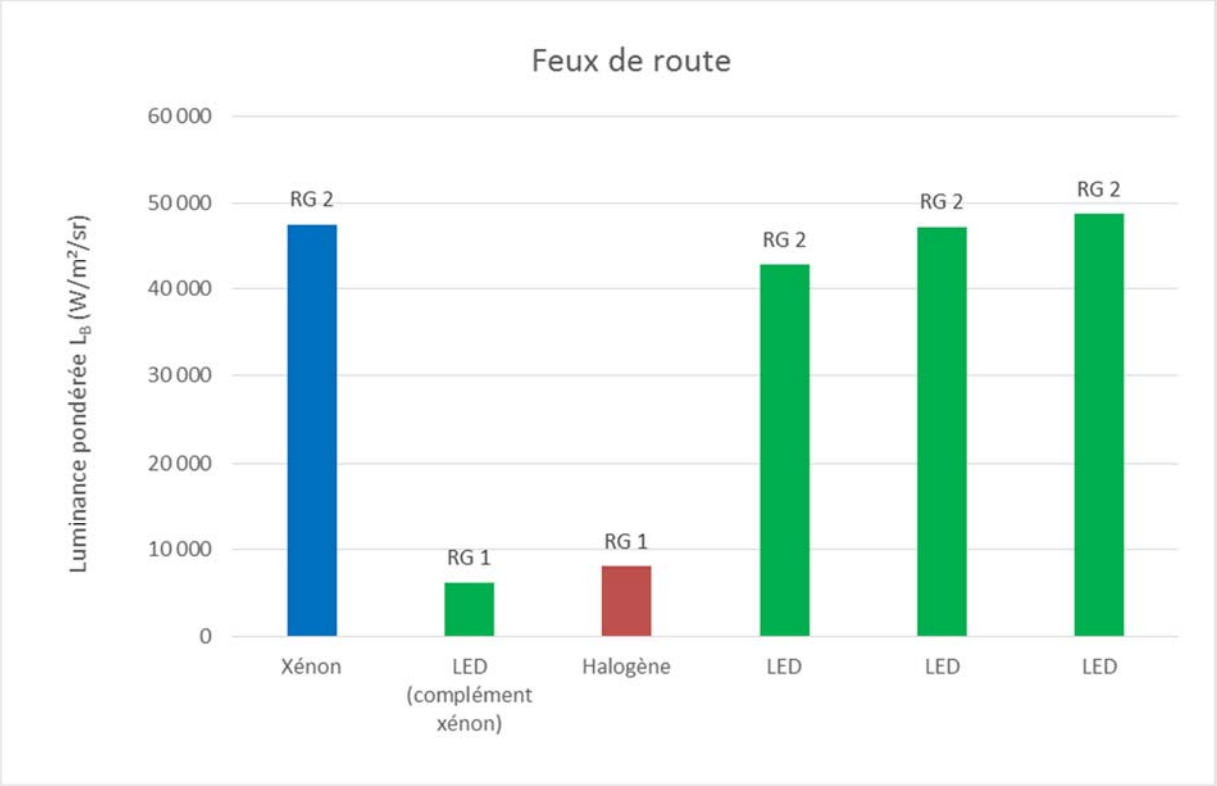


Figure 88 : luminance pondérée pour les feux de route

Les luminances pondérées dans le bleu des feux de route xénon et LED ont des niveaux semblables, environ 5 fois plus élevés que celle du feu halogène testé.

4.1.3.1.3 Feux de jour (Daytime Running Light - DRL)

Les groupes de risque photobiologique mesurés (*cf.* Figure 89) sur les DRL testés sont 0 (sans risque) et 1 (risque faible).

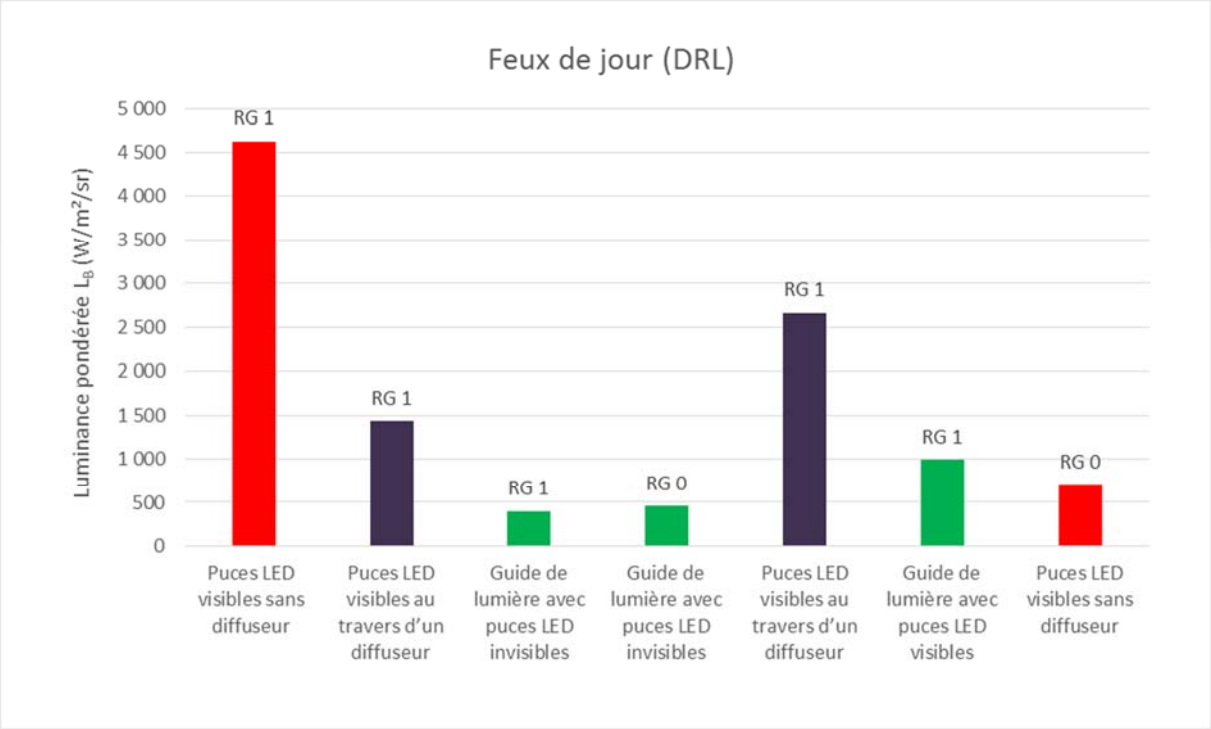


Figure 89 : luminance pondérée pour les feux de jour (DRL)

Le niveau de luminance le plus élevé correspond à un DRL ayant des LED dont les puces sont directement visibles par l'observateur.

Le niveau de luminance le plus faible correspond également à un DRL utilisant ce principe, mais avec des niveaux d'intensité inférieurs.

Les dernières générations de DRL sont conçues avec un guide de lumière qui évite la vision directe des LED. Les luminances sont plus faibles que celles des DRL conçus avec des LED visibles (visibles directement ou au travers d'un élément optique diffusant).

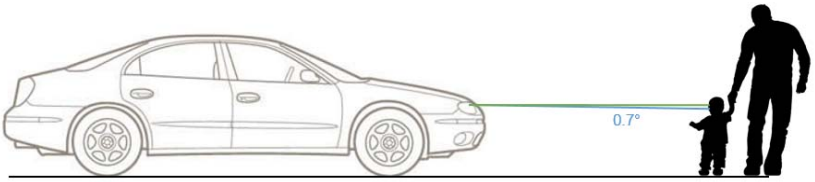
Les feux de position testés sont tous classés en groupe de risque 0 (sans risque).

4.1.3.2 Évaluation des durées limites d'exposition

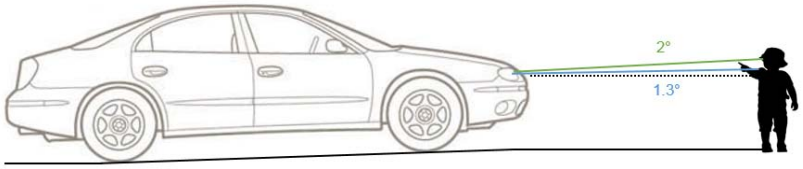
4.1.3.2.1 Scénarios d'exposition

Les scénarios d'exposition sont basés sur l'exposition d'un piéton immobile dont les yeux sont exposés à l'éclairage d'une automobile à l'arrêt, dans la direction du maximum d'intensité pour chacun des 4 feux considérés : route, croisement, DRL et position. Les distances d'exposition varient de 0,2 m à 30 m. L'âge de l'observateur est déterminé par la hauteur du point d'incidence du maximum d'intensité du faisceau. Plus il est bas, plus l'observateur correspondant est jeune.

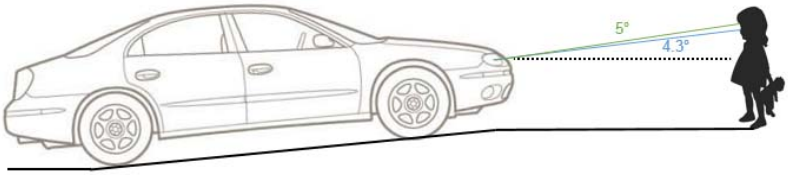
Plusieurs inclinaisons de véhicules ont été considérées (*cf.* Figure 90) : véhicule à plat avec un éclairage bien réglé, véhicule chargé à l'arrière sans compensation d'assiette de l'éclairage, véhicule sur des pentes montantes de 3,5 %, 8,7 % et 14 %.



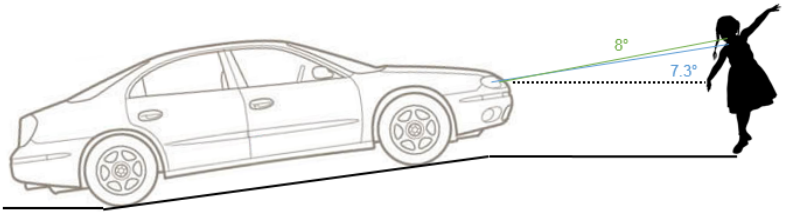
Cas a : véhicule à plat



Cas b : véhicule sur une pente de 3.5%



Cas c : véhicule sur une pente de 8.7%



Cas d : véhicule sur une pente de 14%

Figure 90 : différentes inclinaisons de véhicules considérées

4.1.3.2.2 Analyse des résultats selon l'âge

Le graphe ci-dessous (*cf.* Figure 91) rassemble l'ensemble des durées limites d'exposition obtenues pour les feux de route, les feux de croisement et les DRL en fonction de l'âge des observateurs ayant les yeux dans le maximum d'intensité du faisceau considérée, pour des distances allant de 0,2 m à plus de 10 m.

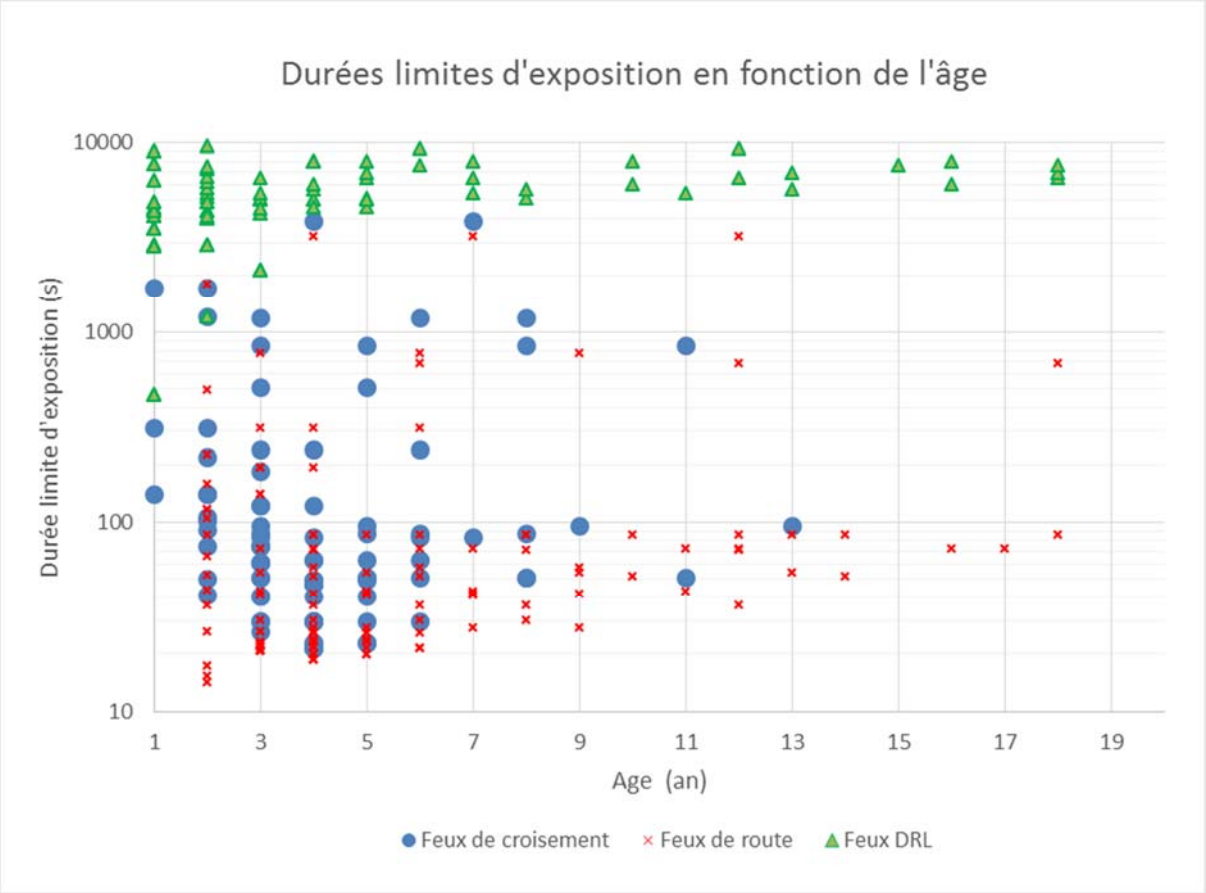


Figure 91 : durée limite d'exposition en fonction de l'âge

On constate que, dans les toutes les configurations étudiées, ce sont toujours les très jeunes enfants qui subissent l'exposition la plus critique (durées limites d'exposition les plus faibles correspondant aux luminances les plus élevées). En effet, la hauteur des yeux des jeunes enfants est proche de la hauteur des feux automobiles. Lorsque le véhicule éclaire normalement (à plat ou avec une faible inclinaison), les yeux sont exposés au maximum de luminance des feux à des distances assez courtes (de 20 cm et quelques mètres).

On constate logiquement que l'exposition aux feux de route, qui sont les plus puissants, est la plus critique (durées limites d'exposition les plus faibles) : les durées limites d'exposition augmentent à peu près linéairement de 14 s pour un enfant de 2 ans (distance 0,2 m) à 86 s pour un adulte (distance supérieure ou égale à 6 m).

Dans le cas des feux de croisement, les durées limites d'exposition les plus courtes sont comprises entre 19 s pour un observateur de 4 ans (distance comprise entre 4 et 5 m) pour un observateur de 13 ans (distance de 4 m).

Dans le cas des DRL, la durée limite d'exposition la plus courte est de 463 s pour un enfant de 1 an exposé au maximum du faisceau à la distance de 0,2 m. Il s'agit dans ce cas d'un feu DRL utilisant des LED directement visibles par l'observateur. Les DRL de conception plus récente, utilisant des LED associées à des guides de lumière, conduisent à des expositions moins critiques. Les durées limites d'exposition les plus couramment obtenues sont toujours supérieures à 1 000 s.

4.1.3.2.3 Analyse des résultats selon la technologie

La Figure 92 rassemble l'ensemble des durées limites d'exposition obtenues en fonction de la distance d'observation, pour tous les feux de croisement testés et pour tous les âges d'observateurs. Les durées limites d'exposition (*cf.* Figure 92) pour la technologie halogène

n'est jamais inférieure à 100 s, tandis qu'elle peut être de l'ordre de 40 s pour les technologies xénon et LED.

Les résultats montrent que les feux de croisement LED produisent des situations d'exposition plus critiques que les feux de croisement xénon, qui eux-mêmes produisent des situations d'expositions plus critiques que les feux de croisement halogène.

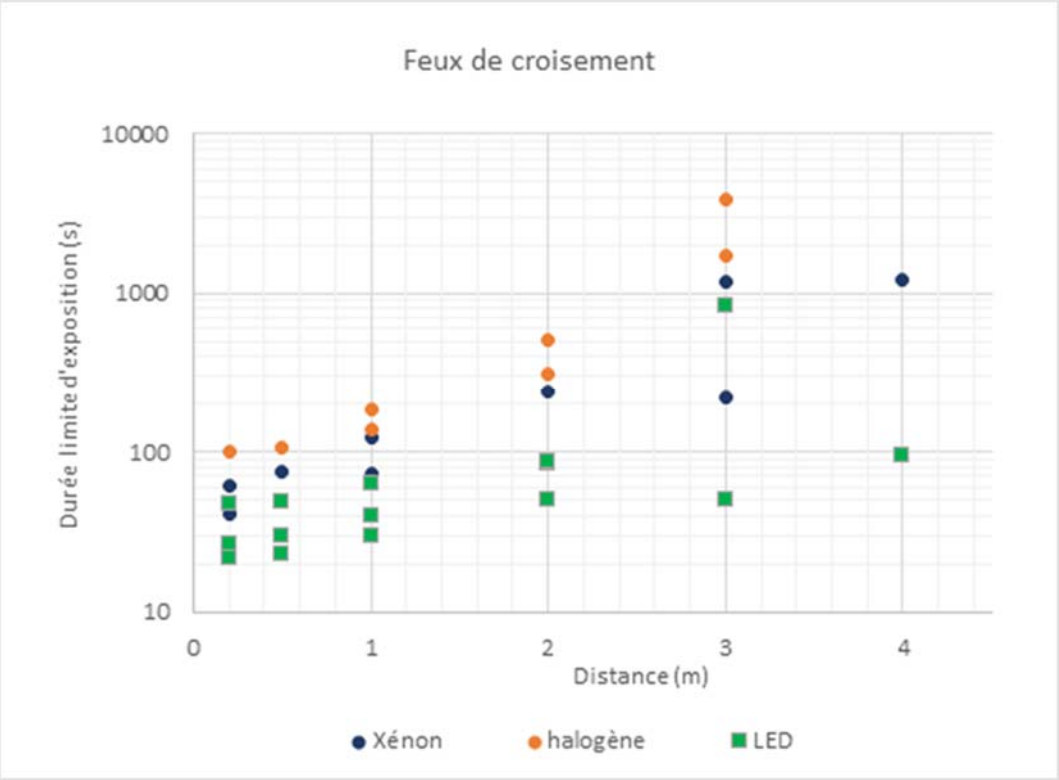


Figure 92 : durée limite d'exposition pour les différentes technologies de feux de croisement

La Figure 93 rassemble l'ensemble des valeurs obtenues de duréess limite d'exposition en fonction de la distance d'observation, pour tous les feux de route testés et pour tous les âges d'observateurs.

Pour les feux de route, les technologies LED et xénon donnent des durées limites d'exposition assez similaires. Les feux de route halogène sont associés à des durées limites d'exposition ne descendant pas en dessous de 100 s. Les feux de route LED et xénon sont associés à des durées limites d'exposition comprises en 14 s et 20 s à très courte distance (0,2 m).

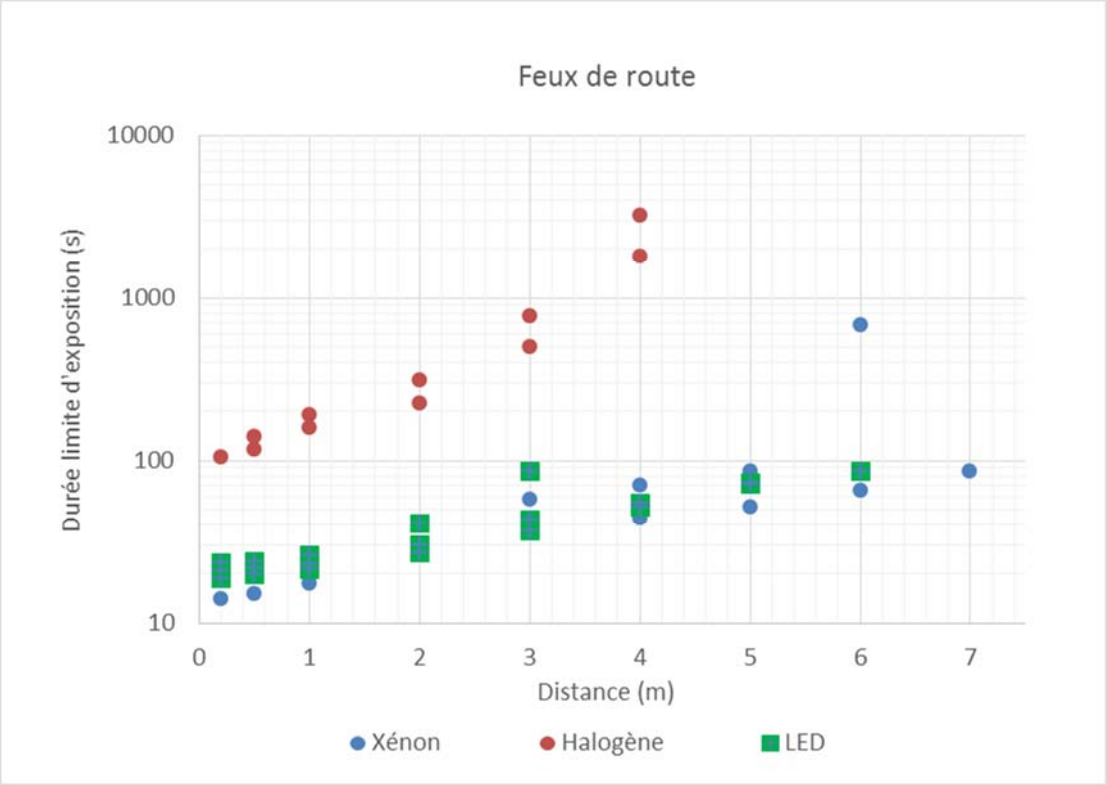


Figure 93 : durée limite d'exposition pour les différentes technologies de feux de route

La Figure 94 rassemble l'ensemble des valeurs obtenues de durées limites d'exposition en fonction de la distance d'observation, pour tous les DRL testés et pour tous les âges d'observateurs. Cette figure ne fait cependant pas apparaître les feux DRL qui ne sont pas associés à une durée limite d'exposition (pas de dépassement de la VLE) : feux DRL à puces LED visibles sans diffuseur et feux DRL à guide de lumière.

On constate que les durées limites d'exposition les plus longues (exposition les moins critiques) correspondent aux DRL fonctionnant sur le principe d'un guide de lumière dont les puces LED sont invisibles.

Pour les cinq feux DRL associés à un dépassement de la VLE, les durées limites d'exposition varient entre 463 s et 10 000 s pour des distances allant de 0,2 m à 12 m.

La durée d'exposition la plus courte (exposition la plus critique) correspond à un feu DRL dont les puces LED sont visibles directement par l'observateur. Cette situation d'exposition la plus critique correspond à un enfant de 1 an exposé à ce feu DRL à la distance à 0,2 m. Dans ce cas, la durée limite d'exposition est de 463 s (entre 7 et 8 minutes).

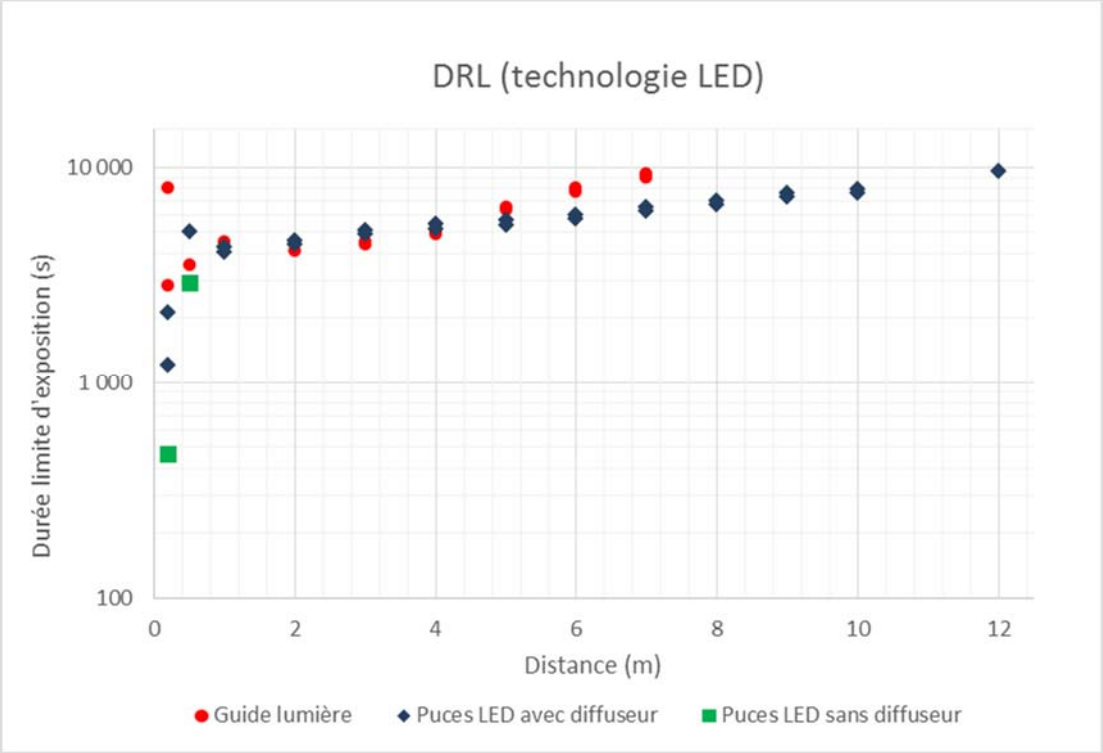


Figure 94 : durée limite d'exposition pour les différents types de système d'éclairage automobile à LED

4.1.3.2.4 Analyse des résultats selon l'âge et la technologie

La Figure 95 représente les mesures obtenues pour les feux de croisement, en fonction de l'âge et en différentiant les 3 technologies d'éclairage.

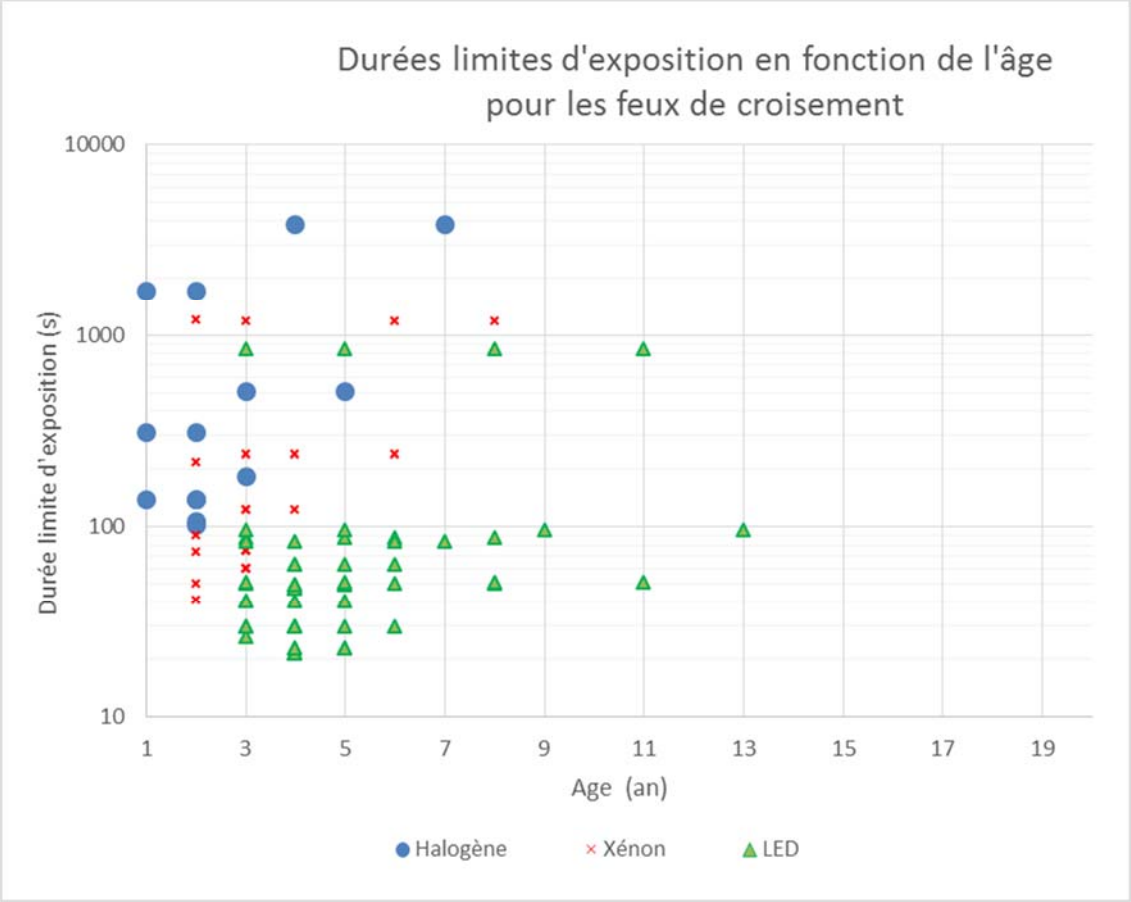


Figure 95 : durée limite d'exposition en fonction de l'âge pour les feux de croisement

Cette figure indique que les feux de croisement à LED conduisent à des expositions plus critiques (durées limites d'exposition plus courtes) chez les enfants, par rapport aux technologies xénon et halogène. La durée d'exposition la plus courte (22 s) est observée pour un enfant de 4 ans exposé à un feu de croisement à LED à 0,2 m.

La Figure 96 représente les mesures obtenues pour les feux de route, en fonction de l'âge et en différentiant les 3 technologies d'éclairage.

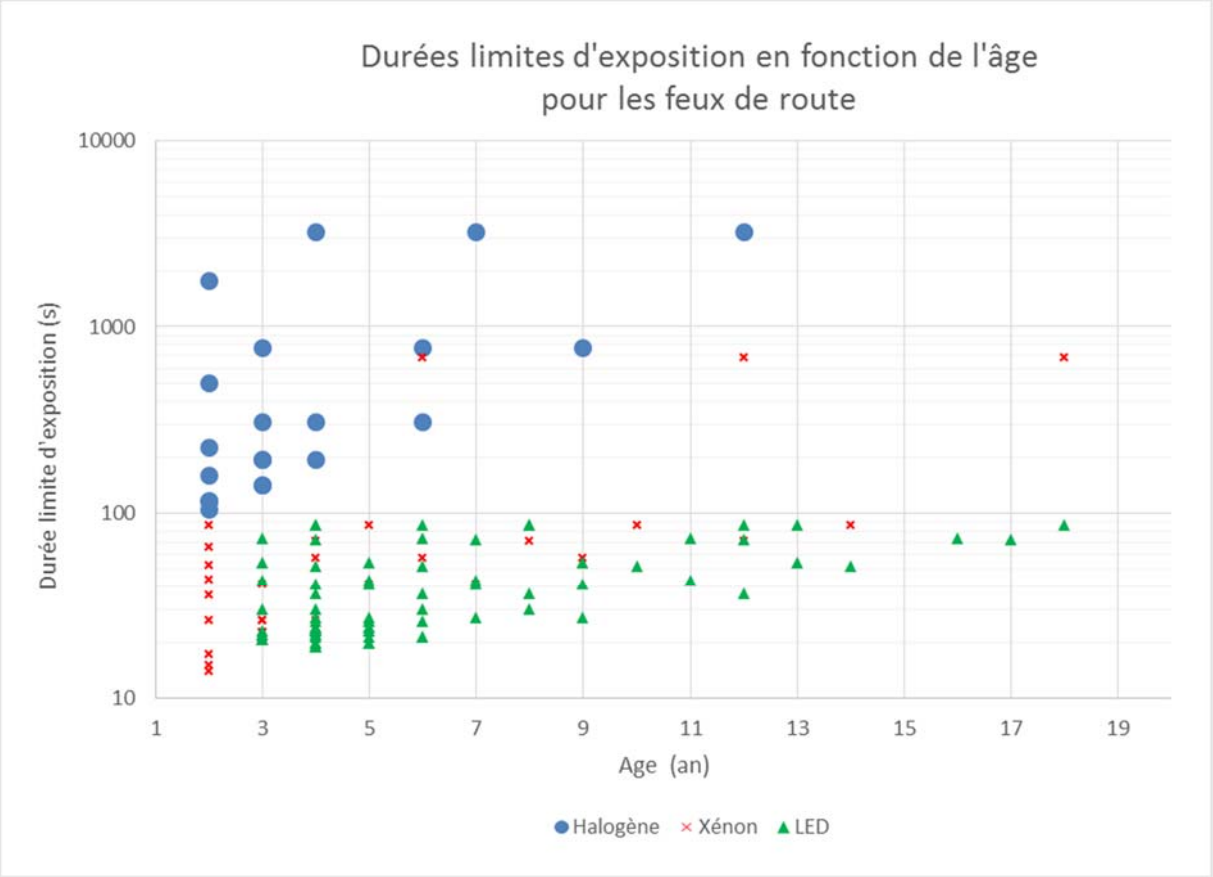


Figure 96 : durée limite d'exposition en fonction de l'âge et de la technologie pour les feux de route

Bien que la situation d'exposition la plus critique observée concerne celle d'un enfant de 2 ans par un feu de route au xénon, on constate que pour les observateurs âgés de 3 ans et plus, les feux de route à LED conduisent à des expositions plus critiques que celles produites par les feux de route au xénon et les feux de route halogènes.

4.1.3.3 Conclusions

Les situations d'exposition les plus critiques évaluées sont logiquement associées aux feux de route, plus puissants, puis aux feux de croisement et ensuite aux feux de jour.

Les mesures effectuées ont pu mettre en avant que les luminances pondérées dans le bleu des feux à LED (croisement et route) sont plus élevées que celle du feu de croisement halogène. Les luminances pondérées dans le bleu des feux de route xénon et LED ont des niveaux semblables, environ 5 fois plus élevés que celle du feu halogène testé. L'ensemble des feux de croisement et de route à LED sont classés en groupe de risque 2 (risque modéré), ce qui est aussi le cas pour les feux xénon, mais non pour les halogènes

Dans le cadre des scénarios d'exposition définis, dans toutes les configurations étudiées, ce sont toujours les très jeunes enfants qui subissent l'exposition la plus critique (durées limites d'exposition les plus faibles correspondant aux luminances les plus élevées), la hauteur de leurs yeux correspondant souvent à la hauteur des feux. L'exposition aux feux de route, qui sont les plus puissants, est logiquement toujours la plus critique.

Les résultats montrent que les feux de croisement à LED présente des groupes de risques plus élevés que les feux de croisement au xénon, qui eux-mêmes présentent des groupes de risques plus élevés que les feux de croisement halogène. En revanche, pour les feux de route, les technologies LED et xénon donnent des durées limites d'exposition assez similaires.

Alors que dans l'éclairage général, la réglementation impose une limitation du groupe de risques photobiologiques à 1, il n'existe à ce jour aucune règlementation quant à la limitation du groupe de risque pour les phares automobiles. Les produits donnent lieu à une homologation, et les contraintes se concentrent majoritairement sur les aspects de sécurité routière avec une réglementation qui exige des performances notamment pour détecter les personnes, les obstacles, etc.

4.1.4 Modulation temporelle de la lumière de lampes halogènes, fluocompactes et LED disponibles sur le marché grand public français

4.1.4.1 Mesures de Kitsinelis *et al*. publiées en 2012

En 2012, des mesures de modulation temporelle portant sur des lampes grand public achetées en France en 2011 ont été publiées (Kitsinelis *et al.*, 2012). L'échantillon testé comprenait 3 lampes halogènes, 6 lampes fluocompactes et 19 lampes LED.

Les fréquences de modulations mesurées étaient toutes égales à 100 Hz. Les résultats de cette étude sont résumés dans le Tableau 14 et la Figure 97. Les conclusions concernant les lampes sont les suivantes :

- 10 lampes LED sur les 19 testées n'avaient pas de modulation temporelle détectable ;
- 2 lampes LED sur les 19 testées avaient un pourcentage de modulation compris entre 6 % et 8 %, de l'ordre de ceux des lampes fluocompactes testées ;
- 3 lampes LED sur les 19 testées avaient un pourcentage de modulation compris entre 17 % et 36 %, supérieur aux valeurs observées pour les technologies halogènes et fluocompactes. Ces valeurs sont comparables à celles qui caractérisaient les anciennes générations de tubes fluorescents à ballast ferromagnétiques désormais interdits par la réglementation européenne ;
- 4 lampes LED sur les 19 testées avaient un pourcentage de modulation très élevé (supérieur à 70 %) à 100 Hz.

Tableau 14 : résultats des mesures de modulation temporelle concernant un échantillon de lampes à destination du grand public

Lampe	Pourcentage de modulation (%)	Lampe	Pourcentage de modulation (%)
Lampe Halogène 1	14,3	Lampe LED 6	100
Lampe Halogène 2	3,47	Lampe LED 7	0
Lampe Halogène 3	10,3	Lampe LED 8	86,4
Lampe CFL 1	7	Lampe LED 9	8,37
Lampe CFL 2	11	Lampe LED 10	24,5
Lampe CFL 3	14,2	Lampe LED 11	17,6
Lampe CFL 4	8,89	Lampe LED 12	0
Lampe CFL 5	9,9	Lampe LED 13	0
Lampe CFL 6	9,6	Lampe LED 14	0
Lampe LED 1	36,1	Lampe LED 15	0
Lampe LED 2	6,7	Lampe LED 16	85,7

Lampe	Pourcentage de modulation (%)	Lampe	Pourcentage de modulation (%)
Lampe LED 3	0	Lampe LED 17	0
Lampe LED 4	0	Lampe LED 18	0
Lampe LED 5	0	Lampe LED 19	93,2

Source : (Kitsinelis et al., 2012)

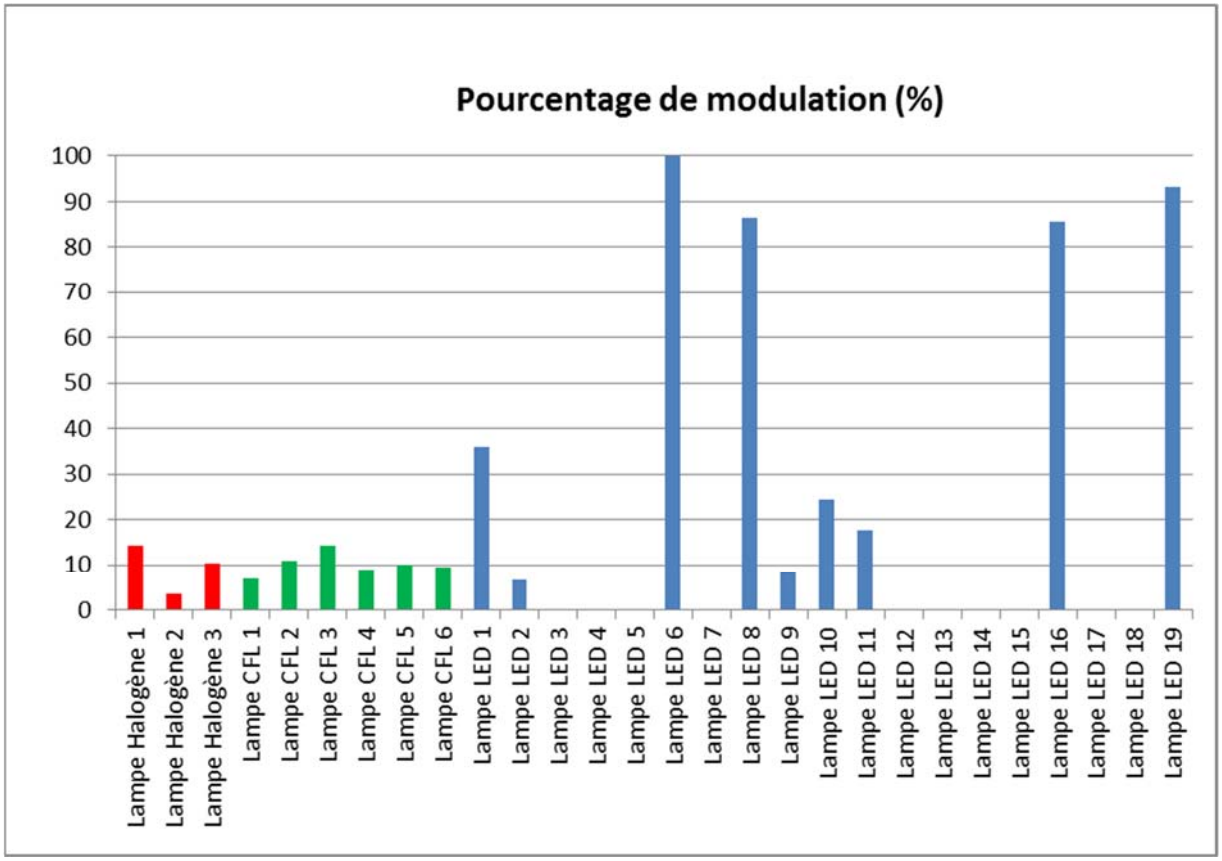


Figure 97 : résultats des mesures de modulation temporelle concernant un échantillon de lampes à destination du grand public en France

Source : (Kitsinelis et al., 2012)

4.1.4.2 Mesures réalisées par le CSTB en 2015

En 2015, le CSTB (CSTB, 2016) a effectué une campagne de mesures sur un échantillon de lampes disponibles à la vente au grand public en France. L'échantillon de lampes testées comprenait 8 lampes halogènes, 8 lampes fluocompactes et 11 lampes LED.

Le CSTB a mesuré notamment la forme d'onde de la modulation temporelle de la lumière, sa fréquence dominante et le pourcentage de modulation. Les résultats mesurés sont donnés dans le Tableau 15 et la Figure 98.

À l'exception de la lampe LED *I*, toutes les lampes qui exhibaient une modulation temporelle le faisaient à une fréquence de 100 Hz, fréquence double de celle du secteur.

La lampe LED *I* possédait une modulation temporelle à très haute fréquence (110 kHz). Cette fréquence est certainement liée à un composant électronique à découpage permettant de convertir le courant secteur alternatif en courant continu.

Les lampes halogènes ont un pourcentage de modulation compris entre 2 % et 6 %. Les lampes fluocompactes testées ont des pourcentages de modulation légèrement supérieurs en moyenne, atteignant presque 7 % pour la lampe fluocompacte *e*.

En ce qui concerne les lampes LED, on constate que :

- 5 lampes LED sur les 11 testées n'avaient pas de modulation temporelle détectable ;
- 1 lampe LED sur les 11 testées n'avait pas de modulation temporelle à 100 Hz mais un résidu de modulation temporelle à une fréquence élevée égale à 110 kHz ;
- 2 lampes LED sur les 11 testées avaient un pourcentage de modulation compris entre 4 % et 7 %, de l'ordre de ceux des lampes fluocompactes testées ;
- 3 lampes LED sur les 11 testées avaient un pourcentage de modulation compris entre 15 % et 24 %, supérieur aux valeurs observées pour les technologies halogènes et fluocompactes. Ces valeurs sont comparables à celles qui caractérisaient les anciennes générations de tubes fluorescents à ballast ferromagnétiques désormais interdits par la réglementation européenne ;
- aucune lampe LED, sur les 11 testées, n'avait un pourcentage de modulation très élevé (supérieur à 80 %).

Tableau 15 : résultats des mesures de la modulation temporelle effectuées par le CSTB en 2015 sur un échantillon de lampes à destination du grand public en France

Lampe	Pourcentage de modulation (%)	Lampe	Pourcentage de modulation (%)
Halogène a	3,9	LED a	0
Halogène b	4,7	LED b	6,1
Halogène c	2,4	LED c	0
Halogène d	5,9	LED d	4,6
Halogène e	2,3	LED e	0
Halogène f	3,4	LED g	15,9
Halogène g	2,5	LED h	24
Fluocompacte a	3,3	LED i	19,1
Fluocompacte b	3	LED j	0
Fluocompacte c	2,5	LED k	0
Fluocompacte d	2,8	LED l	1,9 (fréquence dominante 110 kHz)
Fluocompacte e	6,8		
Fluocompacte f	2,7		
Fluocompacte g	2,5		

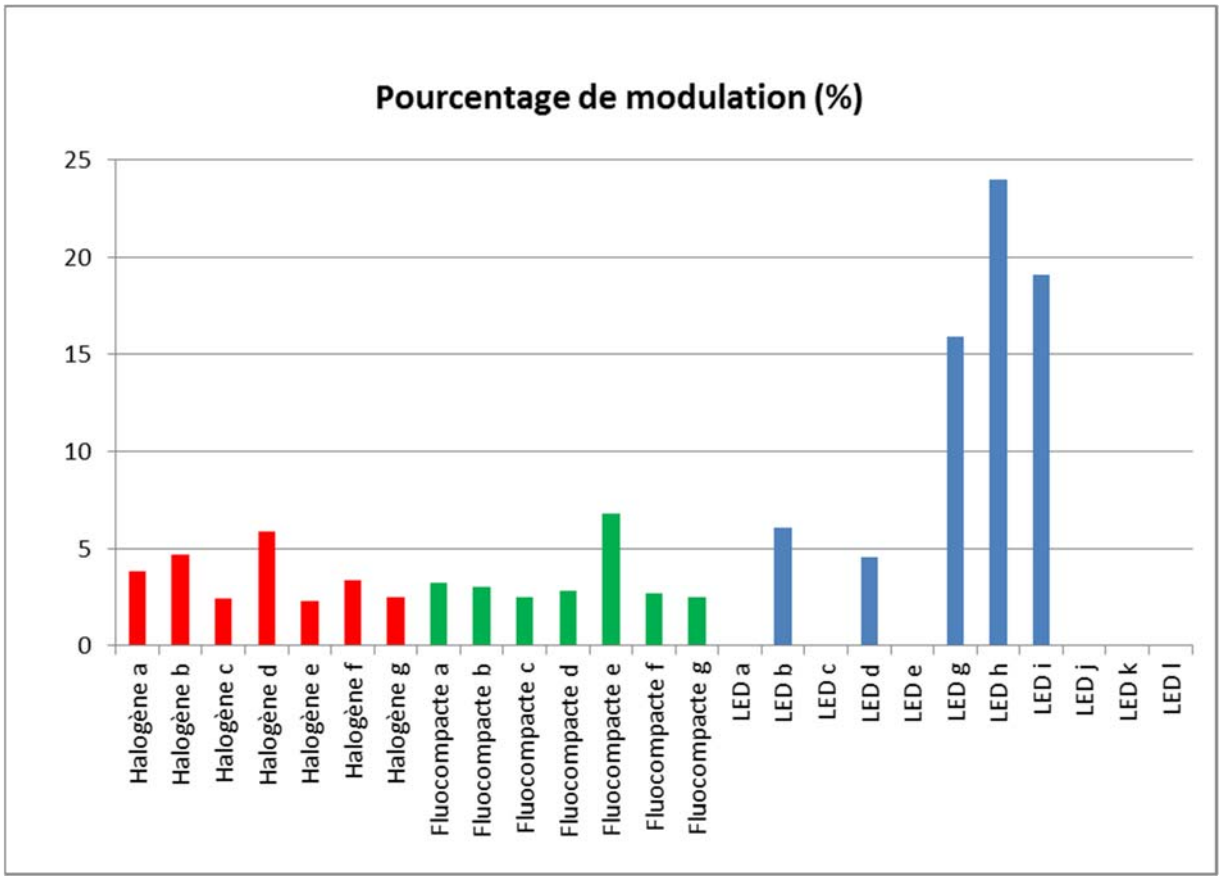


Figure 98 : résultats de mesures de la modulation temporelle effectuées par le CSTB en 2015 sur un échantillon de lampes à destination du grand public en France

4.1.4.3 Résultats de mesure de caractéristiques de lampes LED disponibles au Royaume-Uni

En 2015 et 2016, une campagne de mesures de grande envergure sur les lampes et luminaires à LED a été menée au Royaume-Uni par l'Agence anglaise de santé publique (*Public Health England*). Les résultats ont été publiés en 2017 (CIBSE, 2017). Cette étude portait sur la caractérisation, en laboratoire, d'un échantillon de 128 lampes et luminaires à LED, représentant 38 modèles différents. Les produits testés étaient disponibles sur le marché britannique.

L'échantillon de lampes et luminaire mesurés comprenait :

- 24 modèles différents de lampes LED domestiques (marché grand public) ;
- 8 modèles différents de luminaires LED de type plafonniers encastrés pour l'éclairage tertiaire (bureaux) : grands panneaux LED de 600 x 600 mm et petits panneaux LED de dimensions inférieures ;
- 8 modèles différents de luminaires d'éclairage public à matrices de LED.

Parmi les caractéristiques mesurées, on trouve la forme d'onde de la modulation temporelle, la fréquence de modulation dominante, le pourcentage de modulation (*flicker percent*) et l'indice de papillotement (*flicker index*). Les mesures ont été effectuées à pleine puissance. Cependant, lorsqu'un produit était « gradable » (réglable en intensité lumineuse), des mesures ont également été effectuées au régime d'éclairement minimal atteignable avec un gradateur compatible.

4.1.4.3.1 Résultats obtenus sur les lampes domestiques

La fréquence dominante de la modulation temporelle était de 100 Hz pour tous les modèles testés. Le plus souvent, des composantes résiduelles à hautes fréquences, au-delà de 1 kHz, étaient observées. Le Tableau 16 et la Figure 99 présentent les pourcentages de modulation mesurés, en régime normal et en régime d'abaissement minimal (gradation).

Tableau 16 : résultats des mesures de modulation temporelle de lampes LED domestiques

Référence de la lampe LED	Pourcentage de modulation sans gradation	Pourcentage de modulation à puissance minimale (avec gradateur)
Lampe halogène 1	0	0
Lampe halogène 2	9,9	11,7
Lampe halogène 3	11	12,3
Lampe halogène 4	11,9	14,9
Lampe halogène 5	12	15,1
Lampe halogène 6	12,3	15,5
Lampe CFL 1	55,7	*lampe non gradable*
Lampe CFL 2	26,9	*lampe non gradable*
Lampe LED 1	1,4	*lampe non gradable*
Lampe LED 2	4,1	*lampe non gradable*
Lampe LED 3	4,3	*lampe non gradable*
Lampe LED 4	16,2	*lampe non gradable*
Lampe LED 5	1,2	*lampe non gradable*
Lampe LED 6	54,9	68,6
Lampe LED 7	18,1	35,2
Lampe LED 8	10,3	94,8
Lampe LED 9	0,6	*lampe non gradable*
Lampe LED 10	3	21,4
Lampe LED 11	14,6	*lampe non gradable*
Lampe LED 12	20	*lampe non gradable*
Lampe LED 13	65,8	*lampe non gradable*
Lampe LED 14	69,4	*lampe non gradable*
Lampe LED 15	97	100
Lampe LED 16	97,9	100
Lampe LED 17	97,2	100
Lampe LED 18	0,5	*lampe non gradable*
Lampe LED 19	0,4	0,8
Lampe LED 20	8,9	14,3
Lampe LED 21	76,6	*lampe non gradable*
Lampe LED 22	62	*lampe non gradable*
Lampe LED 23	46,9	*lampe non gradable*
Lampe LED 24	84,8	*lampe non gradable*

Source : (CIBSE, 2017)

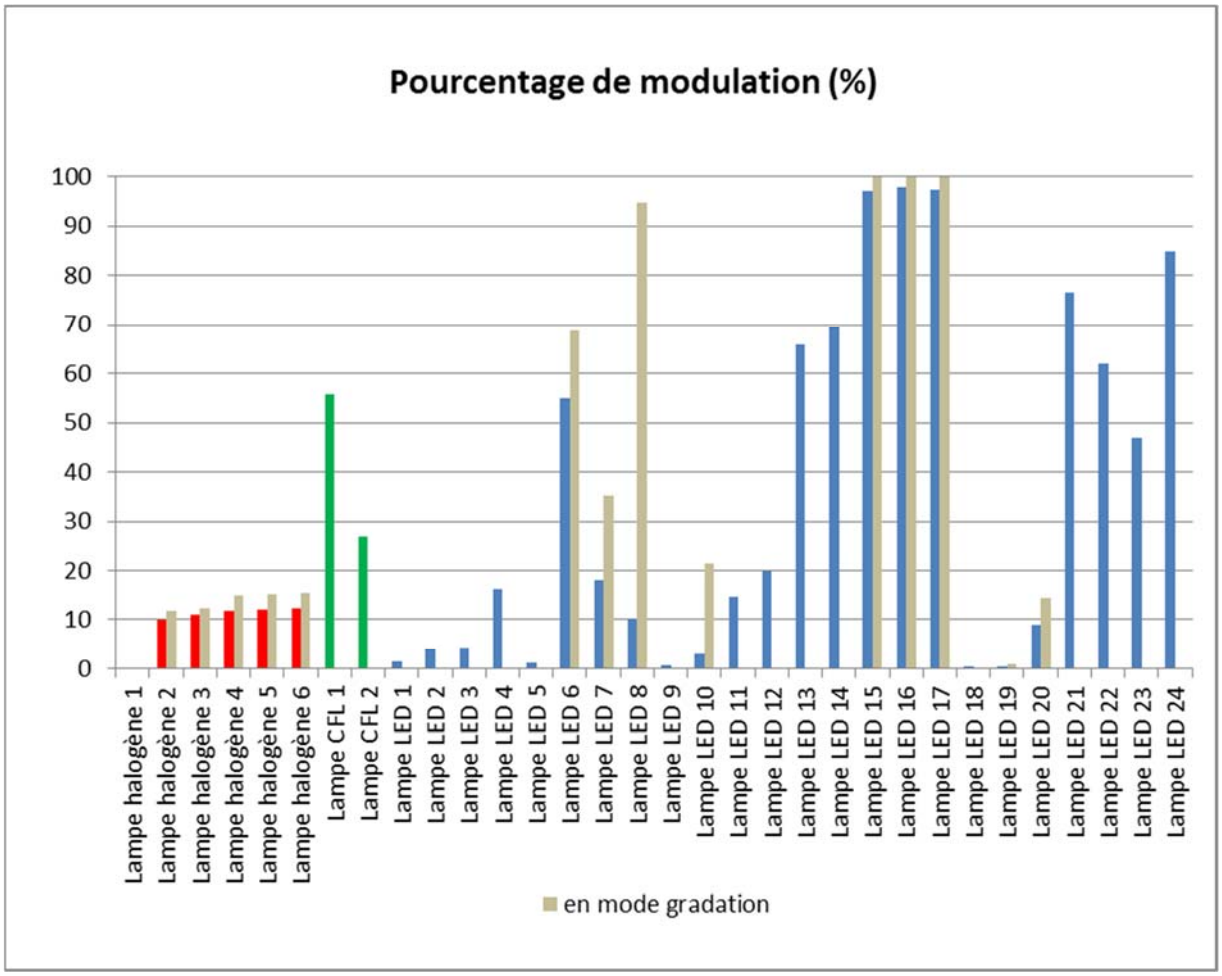


Figure 99 : résultats de mesures de modulation temporelle de lampes LED domestiques

Source : (CIBSE, 2017)

Les lampes halogènes avaient un pourcentage de modulation compris entre 0 et 15 %. Les deux lampes fluocompactes testées avaient un pourcentage de modulation anormalement élevé par rapport aux valeurs attendues : environ 27 % et 56 %. Ces valeurs sont beaucoup plus élevées que celles obtenues sur les lampes fluocompactes mesurées en France par Kitsinelis *et al.* et par le CSTB. Les auteurs du rapport expliquent que ces valeurs sont très certainement surestimées en raison de la présence de composantes à très haute fréquences dans la forme d'onde mesurée, typiquement des pics très intenses de très courte durée.

En ce qui concerne les lampes LED utilisées sans gradateur, on constate que :

- 3 lampes LED, sur les 24 testées, avaient une modulation temporelle virtuellement nulle, de l'ordre de 0,5 % ;
- 7 lampes LED sur les 24 testées avaient un pourcentage de modulation compris entre 1 % et 12 % (ordre de grandeur correspondant aux lampes halogènes testées dans la même étude) ;
- 9 lampes LED sur les 24 testées avaient un pourcentage de modulation compris entre 12 % et 69 %, supérieur aux valeurs observées pour les technologies halogènes et fluocompactes. Ces valeurs sont comparables à celles qui caractérisaient les anciennes générations de tubes fluorescents à ballast ferromagnétiques désormais interdits par la réglementation européenne ;
- 5 lampes LED, sur les 24 testées, avaient un pourcentage de modulation très élevé (supérieur à 70 %).

Les mesures de modulation temporelle effectuées en mode gradation au niveau d'éclairement minimal ont montré que l'utilisation d'un gradateur augmentait toujours le pourcentage de modulation temporelle. Certaines lampes montrent une augmentation très importante de la modulation temporelle lorsqu'elles sont utilisées en mode gradation. C'est le cas, par exemple, de la lampe LED 8 dont le pourcentage de modulation passe de 10,8 % en éclairement normal à 94 % en mode d'éclairement minimal.

4.1.4.3.2 Résultats obtenus sur les luminaires de bureaux à LED

Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 17 et la Figure 100. La fréquence de modulation dominante mesurée était de 100 Hz pour les luminaires LED 1 à 4 (*small panels*). Pour les luminaires de dimension 600 mm x 600 mm, les auteurs indiquent que la fréquence de modulation était plus élevée (*high frequency*) mais sans donner de valeur numérique. Les conclusions concernant les luminaires LED utilisés sans gradateur sont les suivantes :

- 4 luminaires sur les 8 testés avaient un pourcentage de modulation inférieur à 13 %, une valeur correspondant à la valeur maximale pour les lampes halogènes testées dans la même étude ;
- 2 luminaires sur les 8 testés avaient un pourcentage de modulation compris entre 13 % et 36 %, valeurs comparables à celles qui caractérisaient les anciennes générations de tubes fluorescents à ballast ferromagnétiques désormais interdits par la réglementation européenne ;
- 2 luminaires à LED sur les 8 testés avaient un pourcentage de modulation très élevé, de l'ordre de 100 %.

Tableau 17 : résultats des mesures de modulation temporelle effectuées sur des luminaires à LED de bureaux de type plafonniers encastrés

Référence du luminaire LED	Pourcentage de modulation sans gradation	Pourcentage de modulation à puissance minimale (avec gradateur)
Luminaire LED 1 (*small panel*)	1,4	14,4
Luminaire LED 2 (*small panel*)	100	100
Luminaire LED 3 (*small panel*)	30,6	54,5
Luminaire LED 4 (*small panel*)	97,5	100
Luminaire LED 5 (600 mm x 600 mm *panel*)	6,5	luminaire non gradable
Luminaire LED 6 (600 mm x 600 mm *panel*)	13	luminaire non gradable
Luminaire LED 7 (600 mm x 600 mm *panel*)	1,8	luminaire non gradable
Luminaire LED 8 (600 mm x 600 mm *panel*)	35,6	luminaire non gradable

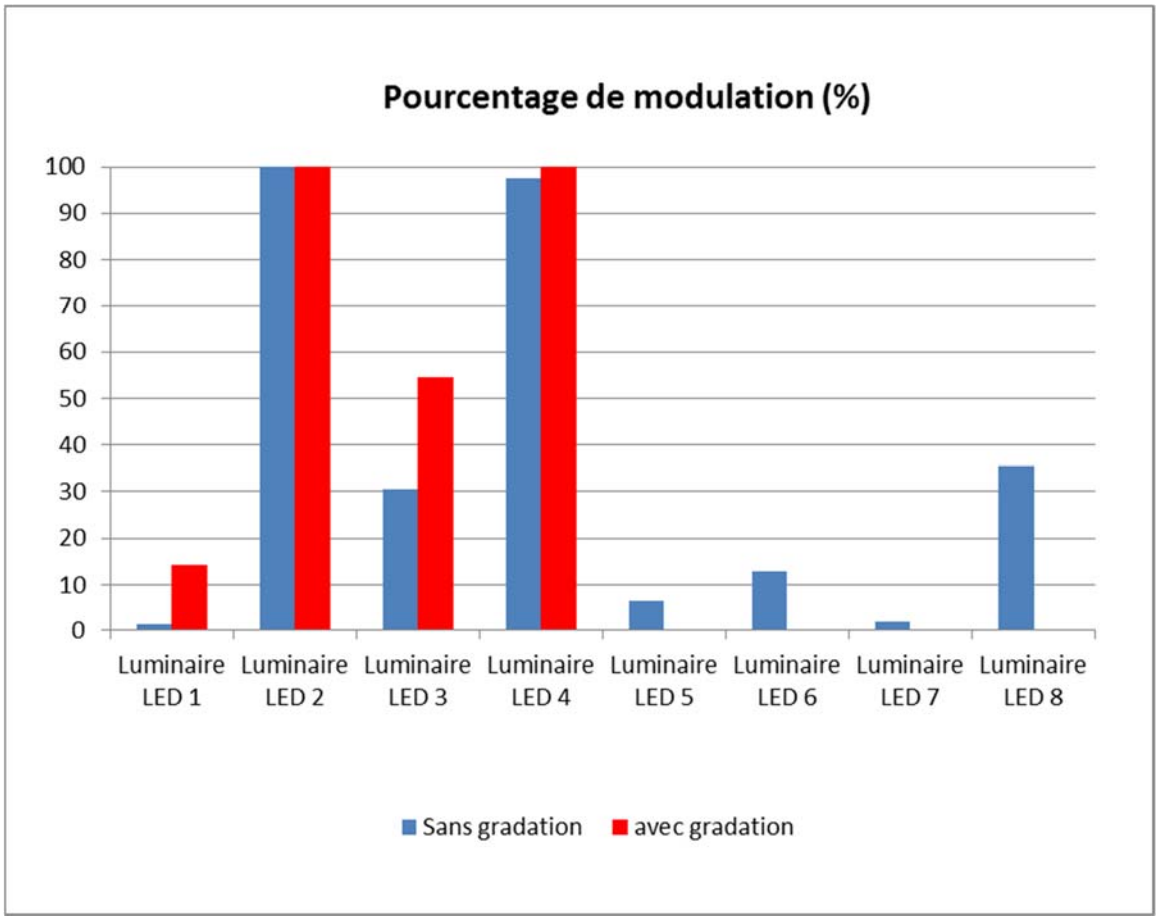


Figure 100 : résultats des mesures de modulation temporelle effectuées sur des luminaires à LED de bureaux de type plafonnier encastrés

Pour les 4 luminaires compatibles avec la gradation, l'utilisation d'un gradateur conduit à augmenter significativement le pourcentage de modulation temporelle.

4.1.4.3.3 Résultats obtenus sur les luminaires d'éclairage de rue à LED

Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 18 et la Figure 101. La fréquence de modulation dominante mesurée était de 100 Hz pour tous les luminaires LED testés.

Les conclusions concernant les luminaires sont les suivantes :

- 1 luminaire LED sur les 8 testés avait un pourcentage de modulation temporelle très faible (0,9 %) ;
- 4 luminaires sur les 8 testés avaient un pourcentage de modulation inférieur à 7 %, une valeur correspondant à des lampes halogènes ;
- 3 luminaires sur les 8 testés avaient un pourcentage de modulation compris entre 12 % et 16 %, valeurs correspondant à des lampes fluocompactes ;

Aucun luminaire sur les 8 testés n'avait un pourcentage de modulation supérieur à 16 %.

Tableau 18 : résultats des mesures de modulation temporelle effectuées sur des luminaires à LED d'éclairage de rue

Référence de la lampe LED	Pourcentage de modulation sans gradation	Pourcentage de modulation à puissance minimale (avec gradateur)
Luminaire LED 1	13,1	*luminaire non gradable*
Luminaire LED 2	2,9	*luminaire non gradable*
Luminaire LED 3	12,9	*luminaire non gradable*
Luminaire LED 4	16	*luminaire non gradable*
Luminaire LED 5	2,4	*luminaire non gradable*
Luminaire LED 6	0,9	*luminaire non gradable*
Luminaire LED 7	6,8	*luminaire non gradable*
Luminaire LED 8	3,7	*luminaire non gradable*

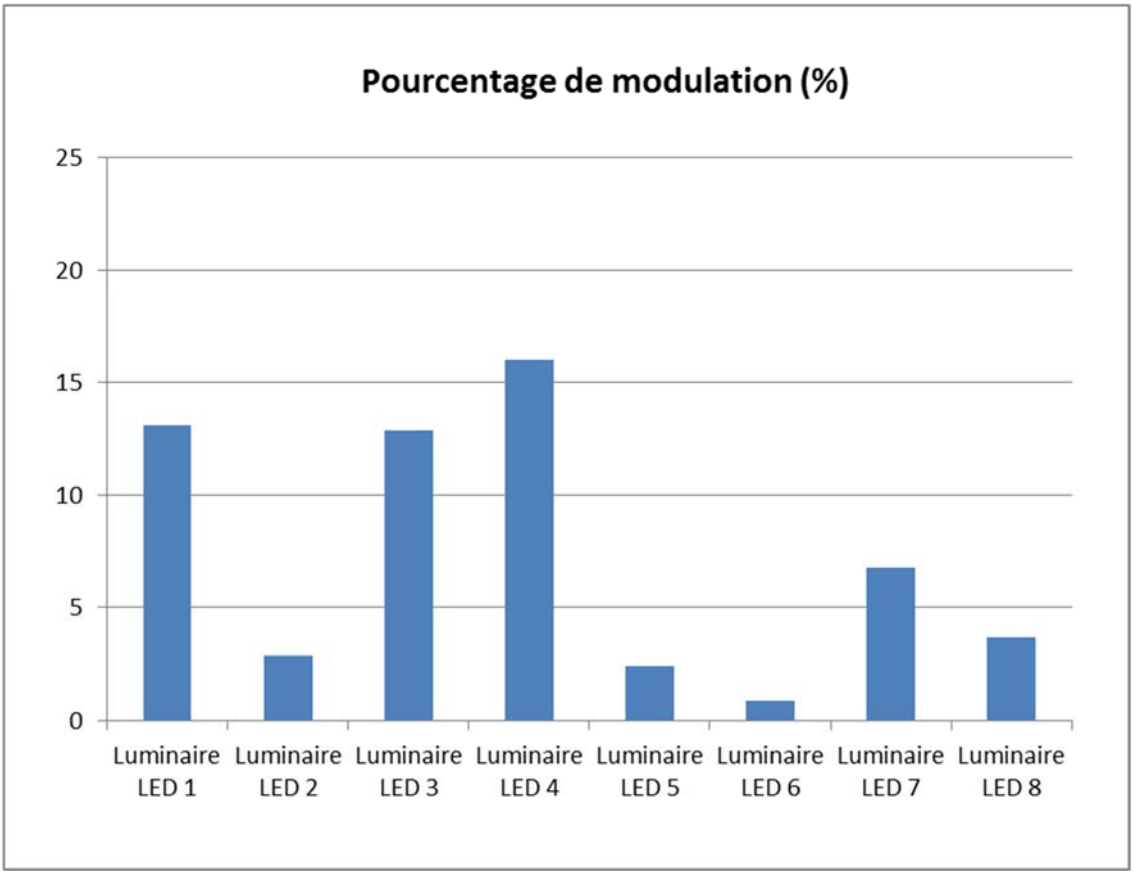


Figure 101 : résultats des mesures de modulation temporelle effectuées sur des luminaires à LED d'éclairage de rue

4.1.4.4 Analyse statistique des mesures de modulation temporelle des lampes LED à usage domestique

L'analyse des résultats obtenus par Kitsinelis *et al.*, le CSTB et le CIBSE sur des lampes LED à usage domestique fournit des conclusions portant sur un échantillon total de 53 lampes LED achetées entre 2011 et 2015 en France et au Royaume-Uni.

Le graphe de la Figure 101 résume l'ensemble des résultats obtenus.

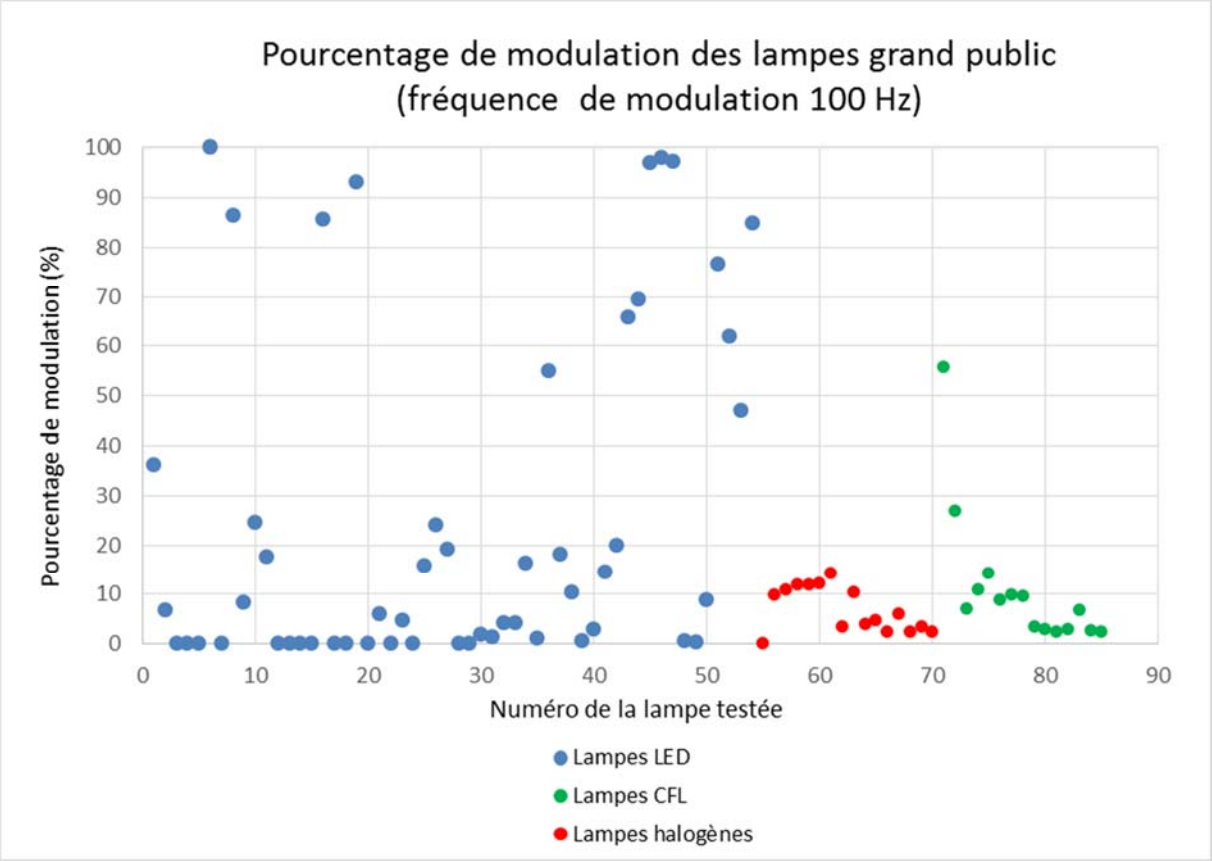


Figure 102 : résultats des mesures de pourcentage de modulation obtenus dans 3 études

Source : Kitsinelis *et al.*, 2012 ; CSTB, 2016 ; CIBSE 2017

Les conclusions sont les suivantes pour les lampes LED :

- 18 lampes sur les 53 testées (environ 34 %) ont une modulation temporelle très faible (pourcentage de modulation inférieur à 1 %) ;
- 12 lampes sur les 53 testées (environ 23 %) ont un pourcentage de modulation temporelle compris entre 1 % et 12 %, semblable à celui des lampes halogènes et fluocompactes ;
- 14 lampes sur les 53 testées (environ 26 %) ont un pourcentage de modulation compris entre 12 % et 70 %, des valeurs significativement plus élevées que celles des technologies halogènes et fluocompactes ;
- 9 lampes sur 53 testées (environ 17 %) ont un pourcentage de modulation très élevé, supérieur à 70 % et pouvant atteindre 100 %.

En agrégeant les proportions précédentes, on constate que pour les LED :

- 57 % des lampes testées ont un pourcentage de modulation inférieur ou égal à celui des technologies halogènes et fluocompactes ;
- 43 % des lampes testées ont un pourcentage de modulation supérieur à celui des technologies halogènes et fluocompactes ;

On estime donc qu'environ 43 % des lampes à usage domestique ont des performances dégradées en matière de modulation temporelle par rapport aux technologies halogènes et fluocompactes.

4.1.4.5 Conclusions tirées des mesures de modulation temporelle de lampes et luminaires à LED

Dans le secteur résidentiel, les lampes halogènes et les lampes fluorescentes compactes récentes exhibent toutes de la modulation temporelle de la lumière à la fréquence de 100 Hz (120 Hz aux États-unis et au Japon) avec des pourcentages de modulation inférieurs à 15 %.

En éclairage professionnel (éclairage public et éclairage des lieux de travail), les anciennes générations de lampes à décharge fonctionnaient avec des ballasts ferromagnétiques, que ce soit en éclairage public (lampe à vapeur de mercure, lampes sodium haute pression, lampes à iodures métalliques) ou en éclairage intérieur (anciens tubes fluorescents). Ces produits avaient tous une modulation temporelle très importante à 100 Hz, avec un taux de modulation compris entre 30 % et 50 %. L'interdiction des ballasts ferromagnétiques au niveau européen a conduit à l'utilisation de ballasts électroniques à haute fréquence (supérieures à 20 kHz) qui ont une modulation temporelle faible à 100 Hz (quelques %). Les ballasts électroniques ont contribué à faire disparaître presque totalement la problématique de la modulation temporelle de la lumière et de ses effets pour ces types de lampes.

L'arrivée des produits d'éclairage à LED a changé cet état de fait. En effet, les lampes et luminaires à LED se distinguent par leur grande variabilité puisque certains produits n'ont aucune modulation temporelle et d'autres ont des modulations de plus grande amplitude que celles des lampes halogènes et des lampes à décharge à ballast électronique et atteignent les valeurs que l'on rencontrait autrefois avec les lampes et tubes à ballast ferromagnétiques. Certains produits testés ont même des pourcentages de modulation de 100 % à 100 Hz (extinction totale de la lumière toutes les 10 ms). Les campagnes de mesures menées récemment en France et au Royaume-Uni ont montré que plus de 40 % des lampes LED à usage domestiques testées avaient une modulation temporelle plus importante que celle des lampes fluocompactes et halogènes.

Les lampes et luminaires à LED utilisés avec un variateur de lumière avec lequel ils ne sont pas compatibles peuvent produire des modulations temporelles anormales, différentes de celles produites par le produit utilisé sans variateur. Ces modulations anormales produisent très fréquemment des effets visuels observables, le plus souvent du papillotement. Ces modulations anormales sont susceptibles de produire également l'ensemble des autres effets identifiés pour l'Homme. En effet, les modulations anormales de lumière produites par des produits défectueux ou non compatibles entre eux peuvent être associées à des fréquences et des amplitudes de modulation très variables.

Il existe une grande diversité d'associations possibles entre les nombreux produits d'éclairage à LED et les nombreux modèles de variateurs et de dispositifs de contrôle-commande. Actuellement, il est impossible de savoir si ces produits sont compatibles entre eux. Dans le cas où le gradateur et la lampe LED sont compatibles entre eux, les mesures ont montré que la modulation temporelle augmente significativement, parfois de manière très importante, lorsque la lampe LED est réglée à un éclairement plus faible que la valeur maximale.

4.2 Données d'expositions cumulées

4.2.1 Définition de scénarios d'exposition

Le groupe de travail a listé un nombre important de scenarios d'exposition à la lumière qu'il serait pertinent de documenter afin notamment d'identifier l'existence ou non de différences de niveaux d'exposition selon la nature de l'éclairage artificiel utilisé (halogène, fluocompacte ou éclairage à LED). Pour ce faire, un logiciel dédié (logiciel Lumexpo) a été développé et a ainsi permis d'évaluer l'exposition lumineuse selon différents scénarios, sur plusieurs durées (une année, une saison ou une journée)

Cinq scenarios ont été établis :

- employé de bureau ;
- travailleur de nuit ;
- enfant en maternelle ;
- adolescent ;
- personne âgée.

Les populations choisies représentent soit des populations sensibles pour ce qui concerne leur exposition à la lumière bleue (enfant, adolescent, personnes âgées, travailleurs de nuit) soit une grande partie de la population (employés de bureau).

4.2.2 Présentation du logiciel Lumexpo

Le niveau d'exposition à la lumière varie naturellement au cours de la journée et de l'année en fonction des activités pratiquées, des environnements dans lequel se trouve un individu et des sources de lumière artificielle utilisées. Les mesurages réalisés dans divers environnements (maison individuelle, bureau, école, transports, …) s'ils sont utiles, ne sont donc pas suffisants pour quantifier l'exposition annuelle globale d'un individu ni pour étudier l'évolution de ce niveau d'exposition au cours d'une journée moyenne. Une évaluation réaliste de l'exposition doit donc intégrer un scénario d'exposition prenant également en compte les apports directs et indirects de l'éclairage naturel.

Un logiciel spécifique a donc été développé afin de réaliser ces bilans d'exposition. Sur la base d'un ensemble d'éléments décrivant les situations dans lesquelles évoluent des sujets types, cet outil recompose alors l'évolution de l'exposition globale à la lumière. Chaque scénario est construit à partir de la description des éléments suivants :

- un calendrier annuel ;
- des journées types ;
- des situations (travail de bureau, lecture, ...) ;
- des environnements (domicile, bureau, extérieur, ...) ;
- des sources d'éclairage artificielles ou naturelles.

En parcourant simplement toutes les situations d'une année type d'une manière chronologique, ce logiciel détermine les conditions d'expositions à chaque instant et permet la réalisation d'analyses diverses (exposition globale, évolution temporelle, étude spectrale ou analyses sur la base d'indicateurs plus agrégés).

4.2.2.1 Mode de fonctionnement

Le logiciel LumExpo fonctionne essentiellement comme un séquenceur faisant défiler les situations de manière chronologique selon le calendrier saisi. Pour chaque instant de la journée, il traduit donc les situations rencontrées sous la forme de périodes d'expositions à quelques sources artificielles (décrites pour trois types de technologie) et à l'éclairage naturel.

Les conditions d'exposition à la lumière artificielle sont donc totalement décrites par l'utilisateur mais le niveau d'exposition à la lumière naturelle dépend, à chaque instant, du type de local dans lequel se déroule chaque situation, de son orientation et de la ville dans laquelle il est placé.

Pour l'évaluation des niveaux d'exposition à la lumière naturelle, LumExpo exploite le principe d'un ciel paramétrique (couramment utilisé maintenant en simulation d'éclairage (Martinez *et al.*, 2011) et de précalculs réalisés sur divers locaux types. Cette approche

permet de dissocier la disponibilité de la lumière du jour dans un local, des conditions climatiques du site étudié. Une décomposition du ciel en 2 000 zones permet une modélisation fine de la contribution du ciel et du soleil. La description des conditions climatiques fait référence à l'une des huit villes associées à chaque zone climatique de la réglementation thermique 2012 (*cf.* Figure 103). Bien qu'il soit possible de faire référence à des conditions climatiques complémentaires, ces éléments ont l'avantage d'une exploitation courante. Durant une année type, ces éléments décrivent les niveaux de rayonnement et d'éclairement diffus (la part du ciel) et directs (le soleil), avec un pas de temps horaire.

Figure 103 : zones climatiques RT2012

source : http://www.rt-batiment.fr

La distribution angulaire de la luminance du ciel est alors modélisée sur la base des indications de rayonnements et d'éclairements, diffus et directs, selon 5 types de ciel (modèles Perraudeau). La composition spectrale est ensuite reconstruite en fonction du type de ciel (modèle Perez) selon une méthode décrite dans la thèse de Chain publiée en 2004 (Chain, 2004).

À partir de l'exposition globale déterminée dans le plan de l'œil de l'observateur (on parle d'éclairement cornéen), la détermination de l'éclairement rétinien fait alors appel à un modèle d'œil et d'ouverture pupillaire (fonction des conditions d'éclairage et de l'âge de l'observateur) (Le Grand, 1964 ; Watson, 2012). Cette approche permet la détermination d'une cartographie de l'éclairement rétinien et le repérage des zones rétiniennes les plus exposées.

Pour un même scénario d'exposition, les expositions sont déterminées pour les 3 types de technologie (halogène, fluorescence et LED) ainsi que pour l'éclairage naturel seul.

Les grandeurs photométriques calculées sont exprimées dans le domaine visible pour l'Homme (de 380 nm à 780 nm) avec une résolution de 10 nm. Les analyses sont alors réalisées pour chacune de ces bandes et pour quelques indicateurs agrégés (exprimés en lx.heures, effet mélanopique, ratio bleu/rouge, …).

4.2.2.2 Types de résultats obtenus

Lumexpo produit des fichiers de résultats, plus ou moins détaillés, pouvant être exploités par divers logiciels de post-traitements (tableurs, grapheurs, …). Les premières analyses sont généralement basées sur l'évolution journalière des niveaux d'exposition, pour diverses périodes de l'année. Chaque graphe produit présente alors les niveaux d'éclairement

associés à quatre variantes (l'éclairage naturel seul et l'éclairage naturel complété par 3 types d'éclairage artificiel).

Les niveaux d'exposition rétinienne sont également analysés en tenant compte de plusieurs sensibilités spectrales (*cf.* Figure 104) afin d'évaluer :

- la dose lumineuse, exprimée en lx.h, elle est associée au niveau d'éclairement moyen ;
- la dose dans la bande phototoxique, exprimée en mJ/cm², caractérise le risque lié à la « lumière bleue » ;
- la dose dans la bande mélanopique, exprimée en z-lx.h, elle intervient dans la régulation du rythme chronobiologique ;
- le ratio bleu/rouge, sans unité, caractérise l'équilibre spectral entre deux bandes du domaine visible, centrées respectivement sur 490 nm et 670 nm.

Ces doses représentent la quantité d'énergie reçue par unité de surface rétinienne, pondérée par les distributions spectrales.

Le ratio bleu/rouge exprime le rapport entre la dose mélanopique et celle associée à la courbe de sensibilité nommée « ratio rouge ».

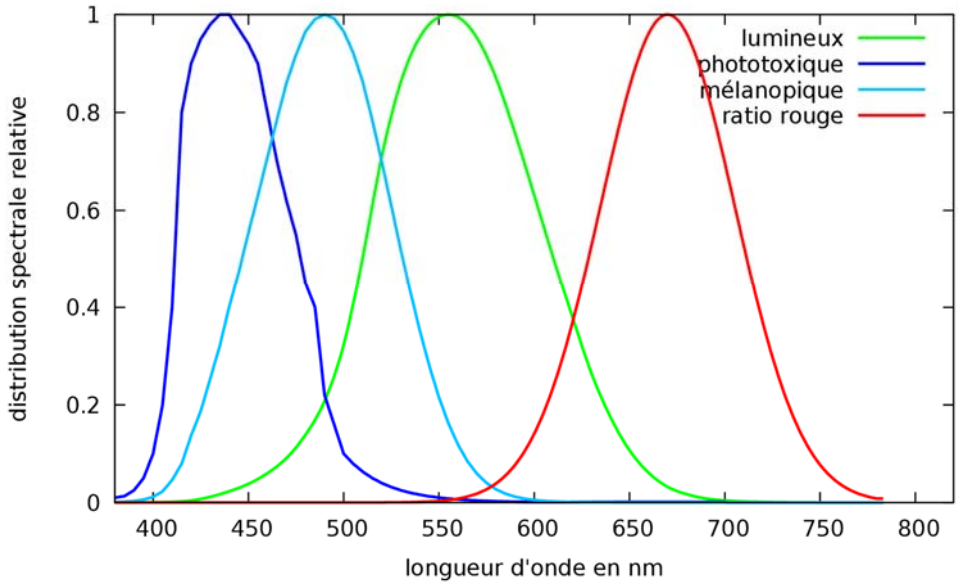


Figure 104 : courbes exploitées pour considérer les différentes bandes lumineuses : phototoxique, mélanopique et la bande spectrale rouge

Les analyses ont également porté sur les niveaux d'exposition moyens journaliers sur la cornée et sur la rétine, pour chaque saison ainsi que pour l'année entière. Une synthèse des résultats concernant l'éclairement rétinien est disponible en Annexe 4.

Les indicateurs présentés sont déterminés sur la zone la plus éclairée de la rétine pour quatre types de technologie d'éclairage artificiel sauf pour les indicateurs liés à la bande mélanopique (où l'éclairement moyen sur la rétine est utilisé). La part d'exposition liée à l'éclairage naturel, est présentée dans une cinquième colonne. On retrouve alors les niveaux d'expositions pour les configurations suivantes :

- la contribution de l'éclairage artificiel pour une installation exploitant majoritairement des lampes halogènes ;
- la contribution de l'éclairage artificiel pour une installation exploitant majoritairement des lampes fluorescentes ;

- la contribution de l'éclairage artificiel pour une installation exploitant majoritairement des lampes à LED ;
- la contribution de l'éclairage artificiel pour une installation « pire cas » exploitant majoritairement des lampes à LED très froides ;
- la part de l'éclairage naturel dans le scénario.

Pour chaque configuration, une cartographie présente la distribution spatiale de l'éclairement sur la rétine (*cf.* Figure 105). Pour une meilleure lisibilité, cette cartographie n'est pas inversée (haut/bas) : les sources les plus importantes étant généralement placées dans la partie supérieure du champs visuel.

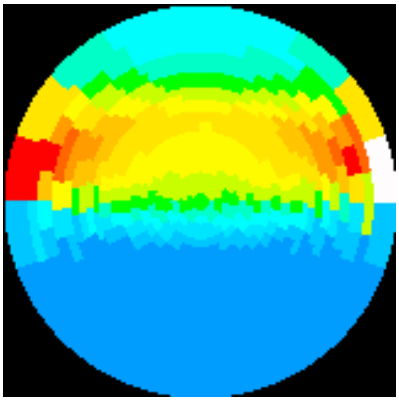


Figure 105 : exemple de cartographie d'exposition rétinienne : à gauche cartographie vue dans le champ de vision, à droite cartographie sur la rétine

Pour chaque scénario d'exposition étudié, les caractéristiques des installations d'éclairage artificiel (*cf.* Figure 106) sont issues des mesurages réalisés sur sites (maison individuelle, bureau, transport, ...). Les sources lumineuses sont représentatives du marché (températures de couleur allant de 2 700 à 4 000 K), à l'exception d'une LED « pire cas » de température de couleur 6450 K. Concernant les écrans, leurs caractéristiques correspondent à celles de la technologie considérée : par exemple en cas d'exposition à la technologie fluorescente, il a été choisi un écran à rétroéclairage fluorescent.

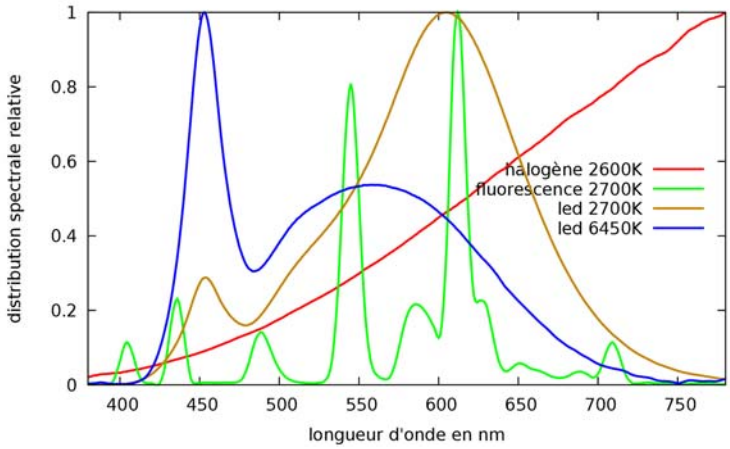


Figure 106 : quelques spectres d'éclairage utilisés

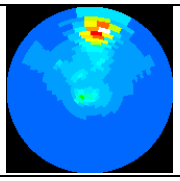
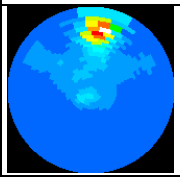
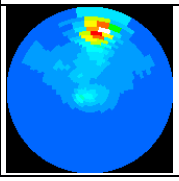
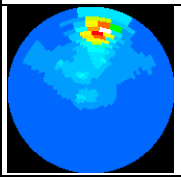
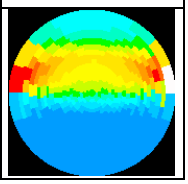
Les résultats d'exposition sur le plan rétinien sont présentés dans un tableau dont un exemple est donné ci-dessous (l'ensemble des résultats est disponible en Annexe 4) (*cf.* Tableau 19). Cet exemple concerne l'exposition journalière moyennée sur une journée entière en hiver pour un employé de bureau avec un scénario d'exposition défini précisément.

Quoique différentes, les unités lx.h, mJ/cm², et mz-lx.h ont toutes la même dimension, à savoir des quantités de lumière reçue par unité de surface rétinienne sur la période considérée.

Voici quelques précisions pour la compréhension des tableaux présentés ci-dessous :

- pour bien différencier les différentes technologies, il a été décidé de comparer les expositions rétiniennes de la lumière à un niveau d'éclairement lumineux identique ;
- pour chaque scénario, il est indiqué la part de la lumière naturelle dans l'exposition totale ;
- pour obtenir l'exposition totale, il convient donc d'additionner la part de l'exposition à un éclairage artificiel et la part de la lumière naturelle ;
- la cartographie permet de visualiser les zones de la rétine (image inversée) exposée avec une échelle de fausses couleurs (rouge pour les valeurs maximales et bleu pour les valeurs minimales).

Tableau 19 : bilan moyen journalier de l'exposition lumineuse d'un employé de bureau en hiver

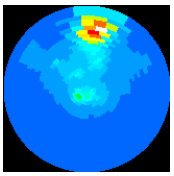
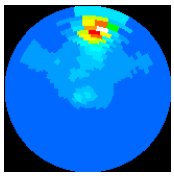
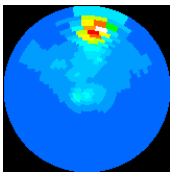
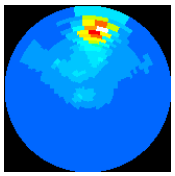
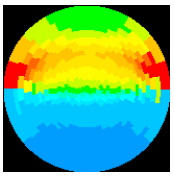
Catégorie	Halogène (seul)	Fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	Naturel (seul)
Dose lumineuse	164 lx.h				128 lx.h
Dose phototoxique	15 mJ/cm²	31 mJ/cm²	26 mJ/cm²	49 mJ/cm²	53 mJ/cm²
Dose mélanopique (2 heures avant le coucher)	141 z-lx.h	122 z-lx.h	138 z-lx.h	163 z-lx.h	154 z-lx.h
Ratio bleu/rouge	0,53	1,77	2,04	2,81	1,60
Cartographie					

4.2.3 Synthèse des résultats des simulations de scenarios d'exposition

4.2.3.1 Scénario « employé de bureau »

Le scénario « employé de bureau » se différencie sur plusieurs périodes de la semaine de travail afin d'intégrer des activités de loisirs diverses, il intègre des semaines de congés (sur la Côte d'Azur, en Normandie) ainsi que des variantes pour la fin de semaine (ensoleillé, pluvieux, et différentes sorties, par exemple pour faire des courses). Le Tableau 20 ci-dessous présente un récapitulatif des résultats de l'exposition sur le plan rétinien pour une journée moyennée sur l'année.

Tableau 20 : synthèse des résultats pour le scenario de « employé de bureau »

Bilan moyen sur une année					
Catégorie	**Halogène (seul)**	**Fluorescence (seul)**	**LED (seul)**	**LED (pire cas)**	**Naturel (seul)**
Dose lumineuse	147 lx.h				264 lx.h
Dose phototoxique	13 mJ/cm²	27 mJ/cm²	23 mJ/cm²	44 mJ/cm²	102 mJ/cm²
Ratio bleu/rouge	0,53	1,78	2,02	2,80	1,47
Cartographie					
Doses mélanopiques moyennes sur deux saisons (été et hiver), 2 h avant le coucher					
Hiver	0,50 z-lx.h	0,40 z-lx.h	0,49 z-lx.h	0,66 z-lx.h	0 z-lx.h
Été	0,3 z-lx.h	0,3 z-lx.h	0,3 z-lx.h	0,5 z-lx.h	2,8 z-lx.h

Pour l'employé de bureau qui séjourne longtemps en intérieur, l'exposition rétinienne aux sources artificielles est loin d'être négligeable : pour une technologie LED, la dose phototoxique est proche de la moitié de la dose phototoxique en lumière naturelle en hiver, proche de 13 % de la dose phototoxique en lumière naturelle en été et proche de 22 % de la dose phototoxique en lumière naturelle sur l'année complète.

Ces niveaux d'exposition sont environ deux fois plus élevés dans le cas de la technologie LED très froide, dite « pire cas », que dans le cas des autres technologies d'éclairage artificiel. Si la différence en dose phototoxique est assez faible entre la technologie LED et la technologie lampes fluorescentes, la technologie LED très froide conduit en effet à des niveaux beaucoup plus importants..

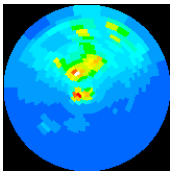
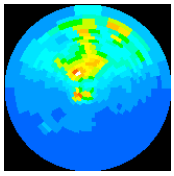
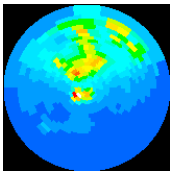
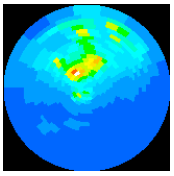
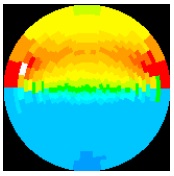
Pour les sources artificielles, les principaux contributeurs à l'exposition sont les luminaires de bureaux et les écrans d'ordinateurs. Le soir, les écrans (télévision, téléphone) constituent la source d'exposition la plus élevée.

Avec les LED, et fortement dans le pire cas, il existe un déficit relatif notable en lumière rouge, alors que l'éclairage tungstène constitue un apport particulièrement riche.

4.2.3.2 Scénario « travailleur de nuit »

Ce scénario se différencie du précédent par la nature et la période d'activité durant la semaine. Le travailleur considéré dans ce scénario évolue dans un environnement dépourvu de lumière naturelle et exclusivement éclairé en lumière artificielle lors de la période de travail (entre minuit et 8 heures du matin avec environ 1 heure de pause). Durant sa période de travail, l'éclairage est principalement assuré par des sources dont la température de couleur est proche de 4 000 K pour les technologies « fluorescence » et « LED ». Les périodes de fin de semaine et de congés sont inchangées. Le Tableau 21 ci-dessous présente un récapitulatif des résultats pour une journée moyennée sur l'année.

Tableau 21 : synthèse des résultats pour le scénario « travailleur de nuit »

Bilan moyen sur une année					
Catégorie	**Halogène (seul)**	**Fluorescence (seul)**	**LED (seul)**	**LED (pire cas)**	**Naturel (seul)**
Dose lumineuse	58 lx.h				196 lx.h
Dose phototoxique	5 mJ/cm²	7 mJ/cm²	7 mJ/cm²	17 mJ/cm²	76 mJ/cm²
Ratio bleu/rouge	0,52	1,83	1,93	2,85	1,48
Cartographie					
Doses mélanopiques moyennes sur deux saisons (été et hiver), 2 h avant le coucher					
Hiver	1,06 z-lx.h	0,95 z-lx.h	1,23 z-lx.h	2,1 z-lx.h	0,4 z-lx.h
Été	0 z-lx.h	0 z-lx.h	1 z-lx.h	1 z-lx.h	12 z-lx.h

L'exposition rétinienne aux sources artificielles est également importante dans ce scénario : en hiver, la dose phototoxique de la configuration « LED » représente environ 17 % de l'apport naturel (8 % sur l'année complète).

Pour ce scénario, l'exposition aux sources LED est similaire à celle des sources fluorescentes mais l'usage de sources LED très froides (pire cas) peut conduire à des niveaux 2,5 fois plus élevés.

Sur l'année complète, pour la cornée, l'exposition du soir est environ 2 fois plus faible que le matin (780 lx en moyenne sur les 2 dernières heures).

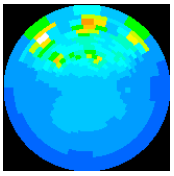
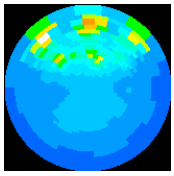
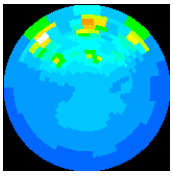
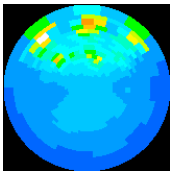
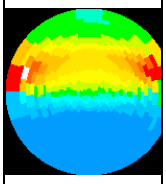
Sur l'éclairement rétinien moyen, ce rapport est identique (4 lx en moyenne sur les 2 dernières heures).

4.2.3.3 Scénario « enfant à la maternelle »

Ce scénario s'appuie sur les activités quotidiennes d'un enfant de 4 ans scolarisé à la maternelle. Ce scénario inclut notamment, sur la journée d'école, un déjeuner à la cantine et un accueil périscolaire jusqu'à 18 heures. Sa sensibilité au risque photobiologique à la lumière bleue est plus importante que celle d'un adulte. Le Tableau 22 ci-dessous présente un récapitulatif des résultats pour une journée moyennée sur l'année.

Tableau 22 : synthèse des résultats pour le scénario « enfant à la maternelle »

Bilan moyen sur une année					
Catégorie	**Halogène (seul)**	**Fluorescence (seul)**	**LED (seul)**	**LED (pire cas)**	**Naturel (seul)**
Dose lumineuse	53 lx.h				329 lx.h

Bilan moyen sur une année					
Catégorie	**Halogène (seul)**	**Fluorescence (seul)**	**LED (seul)**	**LED (pire cas)**	**Naturel (seul)**
Dose phototoxique	7 mJ/cm²	10 mJ/cm²	8 mJ/cm²	16 mJ/cm²	295 mJ/cm²
Ratio bleu/rouge	0,25	1,58	1,61	2,73	1,47
Cartographie					
Doses mélanopiques moyennes sur deux saisons (été et hiver), 2 h avant le coucher					
Hiver	1,01 z-lx.h	1,75 z-lx.h	1,08 z-lx.h	2,1 z-lx.h	0 z-lx.h
Été	0,50 z-lx.h	0,30 z-lx.h	0,60 z-lx.h	0,60 z-lx.h	9,4 z-lx.h

L'exposition rétinienne aux sources artificielle est assez faible dans ce scénario : la dose phototoxique associée aux LED représente environ 6 % de la dose naturelle en hiver (moins de 3 % en moyenne sur l'année).

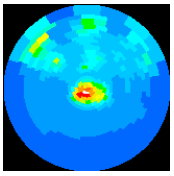
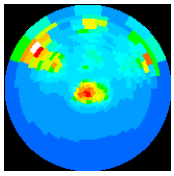
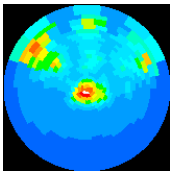
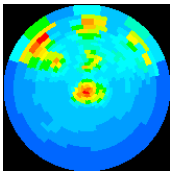
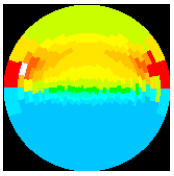
Sur ce scénario, les cartographies mettent en évidence une exposition liée principalement à un éclairage général assez diffus, cet enfant passe peu de temps devant des écrans et profite de l'éclairage naturel.

4.2.3.4 Scénario « adolescent »

Ce scénario concerne un enfant de 14 ans, amateur d'écrans en tous genres... Le rythme de sa journée d'école est marqué par diverses pauses sur son téléphone et moniteur d'ordinateur. Une bonne partie de ses *week-end* et vacances est également consacrée à ces media. Sa sensibilité au risque photobiologique à la lumière bleue est très légèrement plus élevée que celle d'un adulte. Le Tableau 23 ci-dessous présente un récapitulatif des résultats pour une journée moyennée sur l'année.

Tableau 23 : synthèse des résultats pour le scénario « adolescent »

Bilan moyen sur une année					
Catégorie	**Halogène (seul)**	**Fluorescence (seul)**	**LED (seul)**	**LED (pire cas)**	**Naturel (seul)**
Dose lumineuse	41 lx.h				260 lx.h
Dose phototoxique	6 mJ/cm²	8 mJ/cm²	10 mJ/cm²	12 mJ/cm²	119 mJ/cm²
Ratio bleu/rouge	0,58	1,80	2,20	2,78	1,43

Bilan moyen sur une année					
Catégorie	**Halogène (seul)**	**Fluorescence (seul)**	**LED (seul)**	**LED (pire cas)**	**Naturel (seul)**
Cartographie					
Doses mélanopiques moyennes sur deux saisons (été et hiver), 2 h avant le coucher					
Hiver	0,89 z-lx.h	0,74 z-lx.h	0,87 z-lx.h	1,01 z-lx.h	0 z-lx.h
Été	0,6 z-lx.h	0,5 z-lx.h	0,6 z-lx.h	0,7 z-lx.h	2,5 z-lx.h

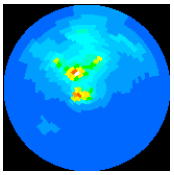
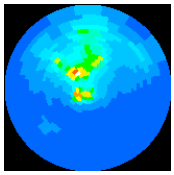
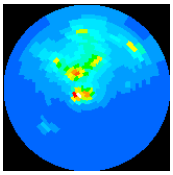
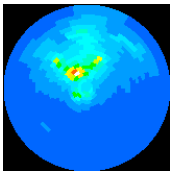
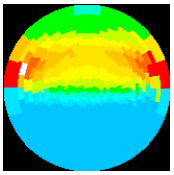
L'exposition rétinienne aux sources artificielles est notable dans ce scénario : pour une installation en LED, la dose phototoxique est proche de 17 % de la dose phototoxique naturelle en hiver et proche de 8 % sur l'année complète.

Les écrans (principalement ceux des téléphones) constituent la principale source d'exposition, notamment avant le coucher comme l'illustrent les cartographies : la partie centrale de la rétine est toujours la plus exposée. La différence avec la configuration « pire cas » est alors plus faible que pour les autres scénarios. La généralisation de l'usage des écrans dans le milieu scolaire pourrait conduire à des expositions encore plus élevées.

4.2.3.5 Scénario « personne âgée »

Ce scénario concerne une personne de 70 ans pour laquelle les activités associées ont été définies comme très variées : intérieur/extérieur, lectures et écrans. Le Tableau 24 ci-dessous présente un récapitulatif des résultats pour une journée moyennée sur l'année.

Tableau 24 : synthèse des résultats pour le scénario « personne âgée »

Bilan moyen sur une année					
Catégorie	**Halogène (seul)**	**Fluorescence (seul)**	**LED(seul)**	**LED (pire cas)**	**Naturel (seul)**
Dose lumineuse	53 lx.h				213 lx.h
Dose phototoxique	4 mJ/cm²	5 mJ/cm²	6 mJ/cm²	16 mJ/cm²	81 mJ/cm²
Ratio bleu/rouge	0,53	1,63	1,89	2,85	1,45
Cartographie					

Bilan moyen sur une année					
Catégorie	**Halogène (seul)**	**Fluorescence (seul)**	**LED(seul)**	**LED (pire cas)**	**Naturel (seul)**
Doses mélanopiques moyennes sur deux saisons (été et hiver), 2 h avant le coucher					
Hiver	0,28 z-lx.h	0,28 z-lx.h	0,27 z-lx.h	0,27 z-lx.h	0 z-lx.h
Été	0,2 z-lx.h	0,1 z-lx.h	0,1 z-lx.h	0,1 z-lx.h	4,8 z-lx.h

L'exposition rétinienne aux sources artificielles est également notable dans ce scénario : pour une installation en LED, la dose phototoxique est proche de 17 % de la dose phototoxique naturelle en hiver et proche de 7 % sur l'année complète.

On retrouve principalement une forte influence de l'éclairage général et des écrans, notamment avant le coucher. Même si l'usage des écrans est plus modéré que celui des adolescents, il concerne des produits plus petits et plus lumineux (tablettes et téléphones) et n'est pas compensé par d'aussi grandes périodes passées à l'extérieur.

Dans ce scénario, l'installation de LED de couleur froide conduit aisément au doublement des doses phototoxiques.

4.3 Conclusions

Les différentes campagnes de mesures et analyses réalisées ont permis d'acquérir de nouvelles données sur les niveaux d'exposition de la population à la lumière artificielle et en particulier celle issue des LED.

Les niveaux moyens rencontrés sur différents sites du quotidien font état d'une luminance avec des températures de couleur globalement peu froide (en habitat plutôt des températures chaudes, en situation de travail plutôt des températures neutres, dans un réseau ferré souterrain, des températures un peu froides).

Certaines technologies comme les écrans et les téléphones présentent des luminances faibles mais des températures de couleur parfois très froides, comme pour certains téléphones dont la température de couleur peut être supérieure à 6 000 K.

Concernant les groupes de risques de certains objets à LED, si les lampes d'éclairage sont généralement dans le groupe de risque 0 (« sans risque » : la limite d'exposition n'est jamais atteinte ou est atteinte au-delà de 10 000 s d'exposition continue), certaines lampes d'éclairage portatif, comme les lampes frontales ou certains jouets, ont des niveaux de luminance très élevés et conduisent à un classement en groupe de risque 2 (« risque modéré » : la limite d'exposition est atteinte pour une durée d'exposition comprise entre 0,25 s et 100 s).

Ces situations de fortes expositions peuvent également se produire avec des phares automobiles à technologie à LED, dans les conditions particulières testées, pour lesquels en position de feux de route ou de croisement, le groupe de risque mesuré est de 2. Les luminances pondérées dans le bleu des feux de croisement LED sont 4 à 6 fois plus élevées que celles de feux de croisement halogène. Les résultats montrent que les feux de croisement LED produisent des situations d'exposition plus critiques que les feux de croisement xénon, qui eux-mêmes produisent des situations d'expositions plus critiques que les feux de croisement halogène.

Concernant les différents scénarios d'exposition testés, plusieurs constats peuvent être établis :

- l'éclairage artificiel contribue de manière non négligeable à l'exposition totale, rajoutant jusqu'à 50% de la dose phototoxique reçue par l'éclairage naturel ; la

part attribuable aux éclairages artificiels vis-à-vis des effets sanitaires de la lumière est donc à considérer ;

- influence des LED sur la phototoxicité : si la différence en dose phototoxique est assez faible entre la technologie LED blanc chaud et les autres technologies (pour toutes les populations), la technologie LED très froide conduit à des niveaux beaucoup plus importants. Selon les scénarios utilisés, l'installation de LED de couleur froide peut conduire au doublement des doses phototoxiques (par rapport à des LED chaudes ou par rapport aux autres types de technologies) ;
- influence de l'éclairage à LED sur les rythmes : si la différence en dose mélanopique est assez faible entre la technologie LED et les autres technologies (pour toutes les populations), la technologie LED très froide pourrait conduire à des niveaux plus importants.
- les technologies à LED présentent des ratios B/R (plus forte exposition en lumière bleue qu'en lumière rouge) plus importants et ce d'autant plus que les LED sont froides.
- les écrans constituent un des plus grands contributeurs artificiels à l'exposition dans la plupart des scénarios (dans la bande phototoxique et la bande mélanopique) : pour les employés de bureau au travers des écrans d'ordinateurs, pour les adolescents particulièrement avant le coucher. Cette dernière tendance est d'ailleurs également observée chez la personne âgée ; le soir, ces écrans (télévision, téléphone, tablette) constituent la source d'exposition la plus importante.

5 Évaluation des dispositifs de protection contre la lumiere bleue destinés au grand public

5.1 Objectif et méthode

Différents moyens de protection contre la lumière bleue émise par les LED sont apparus sur le marché, et le déploiement de certains d'entre eux en entreprise fait l'objet de discussions au sein des comités d'hygiène et de sécurité des conditions de travail. À ce jour, si l'INRS a évalué l'efficacité d'un certain nombre de moyens de protection destinés aux travailleurs dans le cadre d'une étude intitulée « Équipements de protection contre les risques dus aux LED d'éclairage » (objet d'une publication dans la revue « Hygiène et sécurité », numéro hors série de décembre 2016), il n'existe pas d'informations scientifiques suffisantes permettant de juger de l'efficacité des moyens de protection à destination du grand public (filtres pour écrans, verres traités, lunettes filtrantes, protection logicielle).

Après avoir recensé les catégories de moyens de prévention à destination du grand public disponibles sur le marché, la capacité de certains d'entre eux à filtrer le rayonnement bleu d'une part dans la bande phototoxique[57] et d'autre part dans la bande mélanopique (bande de longueur d'onde participant à l'excitation des cellules ganglionnaires à mélanopsine) a été évaluée. Des mesures optiques effectuées en laboratoire ont permis d'évaluer cette efficacité pour différentes solutions de filtrage de la lumière bleue, disponibles dans le commerce pour le grand public et présentées ci-dessous :

- verres ophtalmiques avec différents traitements de filtrage de la lumière bleue (14 lunettes de vue) ;
- lunettes de protection non-correctrices comportant un filtrage des rayonnements bleu (5 produits) ;
- écrans informatiques revendiquant une limitation de l'émission de lumière bleue ou une lumière bleue moins nocive (4 écrans) ;
- une nouvelle technologie de composants LED d'éclairage général censée réduire la quantité de lumière bleue émise (3 dispositifs).

L'évaluation des traitements testés a été effectuée en utilisant une source à LED accordable, reproduisant un spectre quasiment uniforme (proche de l'illuminant *E* normalisé par la CIE) entre 380 nm et 780 nm. L'éclairement spectral est mesuré par la tête de mesure d'un spectroradiomètre placée à 90 cm. Pour mesurer l'impact du traitement anti-bleu sur les verres de lunettes correctrices, le rapport de deux éclairements spectriques, mesurés respectivement avec le verre testé et sans le verre a été calculé.

[57] L'Icnirp (Icnirp, 2013) définit deux courbes de phototoxicité (ou spectre phototoxique), la courbe B, pour la population générale, la courbe A pour les populations sensibles.

5.2 Efficacité des dispositifs pour filtrer les rayonnements bleus phototoxiques

5.2.1 Verres ophtalmiques

Les résultats des mesures effectuées mettent en évidence une efficacité réelle mais modeste du filtrage des rayonnements bleus phototoxiques par les revêtements de protection des verres ophtalmiques testés contre la lumière bleue.

Les verres ophtalmiques traités anti-bleu filtrent entre 7 % et 12 % (selon les marques) des rayonnements bleus phototoxiques émis par les éclairages LED et les écrans à LED. Les différences d'efficacité entre la population générale (spectre phototoxique B) et les enfants de 2 ans et moins (spectre photoxique A) sont très faibles.

Ces verres n'offrent aucune protection contre la phototoxicité rétinienne aigüe de la lumière bleue (type 2 *blue light hazard*), telle qu'elle est définie dans les recommandations de l'Icnirp relatives à l'exposition aux rayonnements optiques visibles. Ainsi, l'utilisation de ces verres pour observer une lampe à LED classée en groupe de risque RG 2 (selon la norme NF EN 62471) ne conduit pas à abaisser le risque rétinien à un équivalent de groupe de risque RG 1 ou RG 0. C'est pourquoi les verres ophtalmiques testés ne peuvent pas constituer des équipements de protection individuelle (EPI) efficaces contre le risque rétinien aigü résultant d'une exposition prolongée à des dispositifs à LED.

Vis-à-vis de la lumière du jour, plus riche en lumière bleue de courte longueur d'onde, l'efficacité de protection des verres ophtalmiques est globalement plus importante que dans le cas de lumières LED. L'utilisation de traitements anti-UV et de matériaux plastiques d'indice plus élevé (indice 1,6 au lieu de 1,5) offrent une protection accrue (jusqu'à 38 % de filtrage) aux enfants de 2 ans et moins (spectre phototoxique A). Pour la population générale, les traitements anti-bleu filtrent entre 12 % et 15 % des rayonnements bleus phototoxiques (spectre phototoxique B) de la lumière du jour.

5.2.2 Lunettes de protection

Les mesures effectuées montrent que les lunettes de protection testées ont une efficacité de filtrage réelle des rayonnements bleus phototoxiques pour la rétine. Cette efficacité est plus importante que celle des verres ophtalmiques testés comportant des revêtements contre la lumière bleue.

L'efficacité de protection est significativement plus forte pour les lunettes dont les verres sont teintés jaunes ou oranges (absorption du bleu par le verre teinté) en plus du revêtement de surface réfléchissant la lumière bleue. Ces lunettes jaune-orangé filtrent entre 28 % et 59 % (selon les modèles testés) des rayonnements bleus phototoxiques émis par les éclairages et les écrans LED, contre 7 % à 12 % pour des verres ophtalmiques traités.

Malgré une efficacité de filtrage plus importante que celle des verres ophtalmiques traités anti-bleu, les lunettes de protection testées ne peuvent pas non plus être utilisées comme équipement de protection individuelle (EPI) face au risque de phototoxicité rétinienne aiguë résultant d'une exposition prolongée à une source LED intense.

En ce qui concerne les rayonnements bleus phototoxiques de la lumière du jour, les lunettes jaune-orangé ont une efficacité de protection très variable entre les modèles testés mais en moyenne supérieure à celles des verres ophtalmiques traités anti-bleu. Les lunettes testées ne sont toutefois pas vendues pour un usage en extérieur, alors que les verres ophtalmiques sont destinés aux usages intérieurs et extérieurs. Notons qu'il existe d'autres gammes de verres de protection teintés mais qui n'ont pas été testés dans cette étude :

- lunettes de protection contre la lumière bleue pour les sportifs ;
- verres opthalmiques thérapeutiques vendus sur prescription médicale.

5.2.3 Écrans

Pour les quatre modèles d'écrans d'ordinateur testés pour lesquels il existait une revendication sur la limitation de l'émission de la lumière bleue ou sur une lumière bleue moins nocive, aucune différence significative n'a été observée dans les proportions de rayonnements bleus émis dans les bandes phototoxique et mélanopique par rapport à d'autres écrans sans revendications particulières sur la protection contre le bleu.

Un modèle d'écran testé associe une diminution de luminosité aux réglages correspondant au filtrage du bleu.

Un autre modèle d'écran testé comporte une émission de bleu très légèrement décalée vers les plus grandes longueurs d'onde par rapport aux autres écrans, sans modifier significativement les fractions d'énergie émise dans les bandes bleues phototoxique et mélanopique.

En revanche, nous avons constaté que les réglages des écrans à des températures de couleur chaude (2 700 K typiquement) conduisent toujours à un abaissement significatif de l'émission de lumière bleue. Ceci est valable pour tous les modèles d'écran, y compris les modèles ne revendiquant aucune protection contre le bleu.

L'abaissement de la température de couleur (passage au blanc chaud) et la baisse de luminosité sont actuellement les seules possibilités de limiter efficacement l'exposition aux rayonnements bleus des écrans. Ce type de réglage est utilisé par les logiciels et les applications de téléphones et tablettes destinés à limiter la lumière bleue des écrans avant l'heure du coucher. Cette solution est actuellement plus efficace que le recours aux écrans testés dans cette étude.

5.3 Efficacité des dispositifs pour filtrer les rayonnements bleus dans la bande mélanopique

5.3.1 Verres ophtalmiques

Les traitements anti-bleus testés filtrent très peu (quelques %) les rayonnements bleus de plus grande longueur d'onde participant à l'excitation des cellules ganglionnaires à mélanopsine (bande mélanopique).

Cette constatation confirme les déclarations de plusieurs fabricants qui affirment que le filtrage du bleu est très sélectif et ne porte que sur les rayonnements de plus courte longueur d'onde responsables de la phototoxicité rétinienne. Dans l'état actuel des connaissances scientifiques, ces traitements ne modifient donc pas significativement l'excitation des cellules ganglionnaires à mélanopsine.

Contrairement à des revendications de certains fabricants et de certains magasins d'optique, et en l'absence de connaissances clairement établies sur la relation dose-effet, les traitements anti-bleus testés ne semblent donc pas permettre d'éviter l'effet de suppression du pic de mélatonine par la lumière. Ils ne seraient donc d'aucune aide pour éviter les décalages d'endormissement le soir après une exposition aux écrans.

5.3.2 Lunettes de protection

Trois des quatre modèles de lunettes de protection testées (celles comportant les verres les plus teintés) ont une efficacité de filtrage significative des rayonnements bleus de plus grande longueur d'onde contribuant à l'excitation des cellules ganglionnaires à mélanopsine de la rétine. Ils filtrent en effet entre 30 % et 43 % (selon les modèles testés) de la lumière bleue dans la bande mélanopique.

Les deux autres paires de lunettes ont une efficacité de filtrage mélanopique réelle mais plus faible. Elles filtrent respectivement 6 % et 14 % des rayonnements bleus dans la bande mélanopique.

À l'inverse des traitements « anti-bleu » des verres ophtalmiques, l'utilisation des lunettes de protections testées contribue à limiter l'excitation des cellules ganglionnaires à mélanopsine de la rétine lors de l'exposition aux éclairages et aux écrans LED.

Cependant, les relations dose-effets étant encore mal connues, il est cependant impossible d'affirmer que ce filtrage est suffisant pour empêcher la suppression du pic de mélatonine induit par une exposition lumineuse en soirée, ainsi que les effets de retard d'endormissement.

5.3.3 Écrans

Cf. 5.2.3.

5.3.4 Efficacité de protection contre les effets de la lumière bleue de LED d'éclairage utilisant une excitation bleue de très courte longueur d'onde associée à trois luminophores rouge, vert et bleu

Les spectres mesurés révèlent que ces LED utilisent une puce émettant du rayonnement bleu de très courte longueur d'onde, autour de 400 nm, proche de l'UV. Cette lumière excitatrice bleue est convertie dans le boîtier de la LED grâce à une combinaison de trois types de luminophores (bleu, vert et rouge).

Cette technologie permet d'obtenir un spectre différent de celui des LED blanches classiques (pic bleu + pic jaune-orangé). On retrouve le pic excitateur, puis trois « bosses » correspondant aux trois types de luminophores.

Ce type de spectre présente beaucoup d'intérêt au niveau colorimétrique. Par rapport aux LED blanches classiques, il contient plus de rouge et ne présente pas de creux significatif vers le bleu-vert. Le rendu de couleur est ainsi amélioré, ce qui permet une qualité d'éclairage plus proche de celle de la lumière incandescente et de la lumière du jour.

Les spectres mesurés sont néanmoins assez différents de celui de la lumière naturelle, contrairement à ce que pourrait laisser penser la dénomination commerciale.

En dépit de l'allure très différente des spectres mesurés, les fractions d'énergie émises dans les bandes bleues phototoxique et mélanopique par ces LED sont très légèrement inférieures à celles correspondant à des LED d'éclairage classique de même température de couleur (3 000 K et 4 000 K). En effet, le spectre des LED testés reste riche en rayonnement bleu. Il est notamment plus riche en rayonnement bleu à la limite de l'UV, du fait de la technologie de la puce émettrice.

Malgré un intérêt certain pour le rendu de couleur, aucune réduction des rayonnements bleus phototoxique ou d'excitation mélanopique n'est associée à ce type de spectre.

5.4 Conclusion

La capacité des moyens de protection à filtrer le rayonnement bleu d'une part dans la bande phototoxique et d'autre part dans la bande mélanopique est très variable d'une référence commerciale à l'autre et peut être inexistante malgré les revendications avancées par le producteur ou metteur sur le marché.

D'après les résultats obtenus sur l'échantillon de produits testés, l'efficacité de protection est significativement plus forte pour les lunettes de protection dont les verres sont teintés jaunes ou oranges (absorption du bleu par le verre teinté), que pour les verres ophtalmiques bénéficiant d'un revêtement de surface réfléchissant la lumière bleue.

Enfin, malgré une efficacité de filtrage plus importante que pour celle des verres ophtalmiques traités anti-bleu, ni les lunettes de protection ni les verres traités ne peuvent être utilisés comme équipement de protection individuelle (EPI) face à un risque de

phototoxicité rétinienne aiguë résultant d'une exposition prolongée à une source LED qui pourrait être qualifiée d'intense.

Tableau 25 : récapitulatif des capacités de filtration du rayonnement bleu des moyens de protection testés

Dispositifs	Filtration des rayonnements bleus phototoxiques issus des LED (BLH A et B)	Filtration des rayonnements bleus issus des LED dans la bande mélanopique
Verres ophtalmiques traités anti bleu	7 % et 12 % (selon les marques)	quelques %
Lunettes de protection fortement teintées	28 % et 59 %	entre 30 % et 43 %
Lunettes de protection		6 % et 14 %
Écrans revendiquant une protection contre la lumière bleue	Pas de filtration spécifique du bleu	Pas de filtration spécifique du bleu
Éclairage utilisant une excitation bleue de très courte longueur d'onde	Aucune réduction	Aucune réduction

6 LED et pollution lumineuse

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'influence du déploiement de la technologie LED sur les nuisances lumineuses causées par la lumière artificielle émise la nuit dans le milieu extérieur, sur l'Homme ou l'environnement, que ce soit dans le cadre bâti des zones urbanisées ou dans les zones naturelles. Ces nuisances sont collectivement désignées par le terme de pollution lumineuse.

6.1 La pollution lumineuse

Les activités humaines sont presque exclusivement associées à des environnements éclairés, essentiels pour le système de vision de l'Homme. Si l'Homme s'est contenté des périodes diurnes durant des millénaires, le développement de l'éclairage artificiel lui a permis de profiter de son environnement à toute heure de la nuit. L'éclairage artificiel nocturne s'est alors largement répandu afin de répondre à des besoins : voir son environnement, être visible pour autrui et détecter les obstacles lors des déplacements urbains puis péri-urbains. Mais son exploitation s'est également étendue à l'éclairage de zones résidentielles, piétonnes, touristiques ou commerciales, avec des niveaux allant parfois très au-delà des simples exigences fonctionnelles.

Si l'éclairage fonctionnel est généralement dimensionné sur la base des exigences minimales pour d'évidentes raisons économiques, d'autres domaines accordent plus d'importance aux aspects esthétiques (mises en lumière de monuments, etc.), publicitaires (zones commerciales, vitrines, etc.) et sécuritaires (parkings, hangars industriels, etc.). L'émission de lumière artificielle à l'extérieur pendant la nuit s'accompagne d'inconvénients ou de nuisances que l'on désigne par le terme assez large de « pollution lumineuse » et de « nuisances lumineuses ».

Une étude publiée en 2017 (Kyba, 2017) a mis en évidence une augmentation à l'échelle du globe des surfaces extérieures éclairées. Des mesures satellitaires étalonnées ont montré que la surface terrestre éclairée a augmenté de 2,2 % par an entre 2012 et 2016, indiquant une augmentation globale de la pollution lumineuse. Cette croissance avérée de l'éclairage extérieur nocturne s'est opérée en parallèle de la diffusion de la technologie LED. Cependant, il est impossible d'attribuer cette augmentation à la seule influence des LED, puisque l'augmentation de l'éclairage extérieur est fortement corrélée à la croissance démographique et au développement économique des territoires. Les auteurs suspectent une contribution des LED à l'augmentation observée car la production de lumière LED est plus économique, ce qui facilite l'installation de nouveaux points lumineux (effet rebond). L'étude n'a cependant pas pu mettre en évidence la part de l'éclairage à LED dans l'augmentation globale de l'éclairage extérieur. En effet, les mesures radiométriques ont été faites dans un domaine spectral compris entre 500 nm et 900 nm, qui n'inclut pas les rayonnements de courtes longueurs d'onde, notamment la lumière bleue.

6.1.1 Contexte réglementaire

L'article 41 de la loi n°2009-967 du 3 août 2009 (loi dite Grenelle I) définit ces nuisances comme étant « les émissions de lumière artificielle de nature à présenter des dangers ou à causer un trouble excessif aux personnes, à la faune, à la flore ou aux écosystèmes, entrainant un gaspillage énergétique ou empêchant l'observation du ciel nocturne ». L'article 173 de la loi dite Grenelle II (loi n°2010-788) instaure l'élaboration d'un dispositif réglementaire visant à prévenir, réduire ou limiter les nuisances lumineuses.

En 2011, la publication du décret n°2011-831 relatif à la prévention et à la limitation des nuisances lumineuses a engagé le gouvernement français à produire des arrêtés

réglementaires concernant les installations lumineuses destinées aux usages suivants : éclairage extérieur public et privé, éclairage des voiries, éclairage de mise en valeur du patrimoine : illumination des monuments, éclairage des parcs et jardins, éclairage des équipements sportifs de plein air ou découvrables, illumination des façades des bâtiments, éclairage intérieur des bâtiments émis vers l'extérieur, éclairage des parcs de stationnements non couverts ou semi-couverts, éclairage événementiel extérieur (constitué d'installations lumineuses temporaires utilisées à l'occasion d'une manifestation artistique, culturelle, commerciale ou de loisirs), éclairage de chantiers en extérieur.

À la date de rédaction de ce rapport, validé le 20 juin 2018 par le groupe de travail, un seul arrêté a été publié dans le cadre de ce décret : l'arrêté du 25 janvier 2013 relatif à l'éclairage nocturne des bâtiments non résidentiels. Ce texte concerne l'éclairage des bâtiments non résidentiels, y compris l'éclairage émis depuis l'intérieur vers l'extérieur, ainsi que l'illumination des façades de ces bâtiments. Il définit des règles générales d'extinction se déclinant de différentes manières : les éclairages intérieurs de locaux à usage professionnel sont éteints une heure après la fin de leur occupation, les éclairages des vitrines de magasins de commerce ou d'exposition sont éteints au plus tard à 1 h ou une heure après la fin de leur occupation si celle-ci intervient plus tardivement.

La publicité extérieure et les enseignes lumineuses sont soumises à une réglementation spécifique (décret n° 2012-118 du 30 janvier 2012) qui impose l'extinction nocturne de ces dispositifs, à l'exception des enseignes des pharmacies et des services de secours.

En 2014, le terme « pollution lumineuse » a été acceptée en France par le Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD) en référence aux écosystèmes et à la santé humaine qui sont affectés par la dégradation de l'actif environnemental que constitue l'obscurité nocturne.

Suite à une procédure menée par trois associations de protection de l'environnement (Fédération Rhône-Alpes de protection de la nature - Frapna, Association nationale de protection du ciel et de l'environnement nocturne - ANPCEN, France Nature Environnement - FNE), le Conseil d'État a pris la décision n°408474, datée du 28 mars 2018, qui enjoint le gouvernement à réglementer avant la fin de l'année 2018 l'ensemble du champ que délimite le décret du 12 juillet 2011 relatif à la prévention et à la limitation des nuisances lumineuses.

6.1.2 Les différents aspects de la pollution lumineuse

Dans son guide publié en 2015 (ANPCEN, 2015), l'ANPCEN indique que la pollution lumineuse désigne les phénomènes suivants :

- augmentation globale de la quantité de lumière artificielle nocturne, et en particulier de lumière dont le spectre a des impacts sur le vivant ;
- rupture de l'alternance jour-nuit (perturbation du rythme circadien) ;
- éblouissements d'inconfort et d'incapacité dus aux sources de lumière mal dirigées, trop intenses et provoquant des contrastes lumineux trop élevés ;
- lumière intrusive qui éclaire les zones non destinées à être éclairées (débordements lumineux) ;
- propagation de lumière à grande distance des sources et halo lumineux.

On peut rassembler ces phénomènes en trois types de nuisances lumineuses, qui ne sont pas forcément indépendantes :

<u>Type 1 : le halo lumineux nocturne ou pollution lumineuse atmosphérique</u>

- diffusion dans l'atmosphère de la lumière émise vers le ciel ;
- diminution de la visibilité des astres observables dans le ciel.

<u>Type 2 : les nuisances pour l'Homme ayant des effets sur le confort visuel et la santé</u>

- éblouissements d'inconfort et d'incapacité ;

- sur-éclairements et sous-éclairements provoquant des variations lumineuses trop grandes ;
- lumière intrusive (débordements lumineux) ;
- perturbation du rythme circadien, résultant de l'exposition humaine à la lumière en soirée et pendant la nuit.

Type 3 : les effets sur les écosystèmes et la biodiversité de la lumière émise volontairement (lumière utile) ou involontairement (débordements lumineux)

De nombreuses recherches sont en cours dans le monde pour étudier les effets indésirables de la pollution lumineuse sur la faune et la flore. Parmi tous les effets étudiés, certains font l'objet du chapitre 0 de ce rapport :

- perturbation de la vision, de l'orientation et du comportement d'espèces animales ;
- perturbation des trajectoires de migration de certaines espèces ;
- perturbation des relations entre proies et prédateurs ;
- expulsion d'espèces fuyant la lumière (pertes d'habitat) ;
- concentration d'espèces attirées par la lumière autour des sources de lumière ;
- perturbation du développement des végétaux, y compris celui des arbres ;
- perturbation des rythmes circadiens ;
- fragmentation des habitats.

6.2 Facteurs d'influence de la pollution lumineuse

De manière générale, les trois types de nuisances lumineuses (pour le ciel, pour l'Homme et pour les écosystèmes et la biodiversité) dépendent des quatre paramètres suivants :

- le flux de lumière globalement émis : puissance et nombre de sources lumineuses. La quantité de lumière globalement émise dans le milieu extérieur de nuit est directement liée au développement économique, à la démographie et à l'urbanisation des territoires ;
- la fraction indésirable du flux lumineux émis par chaque source de manière directe (émission vers le ciel, émission vers des zones non destinées à être éclairées) et indirecte (réflexion par le sol et les façades). Ce paramètre dépend du matériel d'éclairage et d'affichage, mais aussi des conditions de leur installation ;
- le spectre de la lumière émise : spectre étroit ou large, quantité de rayonnement de courte longueur d'onde (bleu et ultraviolet). Ce paramètre dépend de la technologie d'éclairage (lampes halogène, différentes technologies de lampes à décharge, différents types de LED) ;
- les durées et régimes de fonctionnement : les quantités cumulées de lumière artificielle dépendent des heures de fonctionnement des éclairages et de la variation d'intensité appliquée selon l'heure de la nuit. Ces paramètres dépendent des équipements périphériques permettant de contrôler l'éclairage et l'affichage extérieurs, que ce soit au sein des luminaires (capteurs, interrupteurs crépusculaires), des armoires électriques (horloges astronomiques, programmateurs et variateurs de puissance), ou de systèmes déportés permettant la supervision à distance d'une installation. Les systèmes d'éclairage pouvant être abaissés ou éteints contribuent moins longtemps à la pollution lumineuse que les éclairages fonctionnant toute la nuit à plein régime.

Il existe plusieurs catégories d'éclairage et d'affichage extérieurs responsables de nuisances lumineuses. Les sources de lumière artificielle responsables de la pollution lumineuse sont en effet multiples et très différentes. Elles concernent l'éclairage mais aussi l'affichage et les enseignes lumineuses. Elles peuvent être rassemblées en huit catégories différentes :

- l'éclairage public (éclairage des rues et des routes) ;
- l'éclairage des véhicules (automobiles, camions, transports en commun) ;
- l'éclairage des zones commerciales (magasins, centres commerciaux) ;
- l'éclairage des zones agricoles et industrielles (hangars, ateliers, usines, serres horticoles, etc.) ;
- l'éclairage des installations sportives ;
- l'éclairage de mise en valeur architecturale et paysager (illumination de façades et de monuments, éclairage des parcs et des squares, etc.) ;
- les enseignes, affiches et publicités lumineuses ;
- l'éclairage intérieur des bâtiments transmis à l'extérieur par les parties vitrées.

Le passage aux LED de toutes ces catégories d'éclairage et d'affichage est incontestablement en cours. Il est irréversible à l'échelle du globe. Les influences de cette mutation technologique peuvent être étudiées en fonction des quatre classes de paramètres d'influence qui sont listés ci-dessus.

L'analyse présentée dans les paragraphes ci-dessous est, basée sur avis d'experts.

6.3 Évaluation de l'impact des LED sur le halo nocturne

Le halo nocturne résulte de la propagation et de la diffusion atmosphérique de la lumière émise vers le ciel par des sources terrestres. Ce phénomène se traduit par une luminance de la voute céleste plus élevée que la luminance de la plupart des astres, hormis la lune, nuisant ainsi à l'observation du ciel étoilé. Le halo lumineux est souvent visible jusqu'à de très grandes distances par rapport aux sources (plusieurs dizaines de kilomètres). Il affecte des très grandes superficies à l'échelle de territoires, plus vastes que les seules zones urbaines et péri-urbaines.

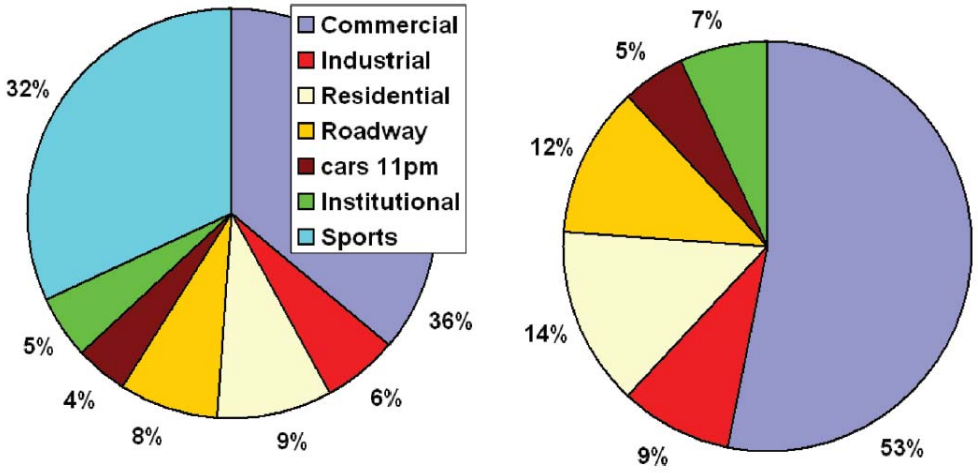
La formation du halo nocturne est très liée à la lumière émise directement vers le ciel, et en particulier à des angles faibles (plus proche de l'horizontale). Celle-ci est plus amplement diffusée par l'atmosphère que la lumière émise à des angles importants (proches de la verticale).

Le spectre de la lumière émise est particulièrement important puisque les rayonnements lumineux de courtes longueurs d'onde, notamment les longueurs d'onde correspondant au bleu, subissent une diffusion plus efficace dans l'atmosphère que les rayonnements de grandes longueurs d'onde (couleurs jaune et rouge par exemple).

L'étude publiée en 2017 par le *Department of Energy* (DoE) des États-Unis (DoE, 2017) a permis de mettre en évidence un effet globalement positif du passage aux LED sur le halo nocturne. En effet, malgré un spectre plus riche en rayonnement bleu (pour des LED à 4 000 K) que celui des lampes à décharges (sodium haute et basse pression, halogénures métalliques), le meilleur contrôle de la directivité (luminaires LED sans émission directe vers le ciel), du nombre d'heures de fonctionnement (pilotage électronique, détection) et de la puissance (abaissement ou extinction nocturne) est très favorable à la technologie LED.

Les auteurs de ce rapport mentionnent qu'il est difficile d'estimer les contributions respectives au halo nocturne de chaque catégorie d'éclairage. Les sources d'éclairage diffuses comme les enseignes ou la lumière intérieure s'échappant par les ouvertures en toitures (lanterneaux, serres) représentent globalement moins de flux mais leur aspect diffus (pas de contrôle de la directivité) peut contribuer de manière importante au halo nocturne.

Une étude publiée en 2009 (Luginbuhl *et al.*, 2009), décrit toutes les sources d'éclairage extérieures utilisées dans la ville de Flagstaff (États-Unis), dans laquelle plusieurs observatoires astronomiques sont implantés. La Figure 107 indique les parts relatives de lumière émise vers le ciel des différentes sources : éclairage commercial, éclairage industriel, éclairage de rue résidentiel, éclairage des routes, éclairage automobile pris à 23 h, éclairage institutionnel (bâtiments publics), éclairage sportif.



(a) **(b)**

Figure 107 : contributions des catégories d'éclairage extérieur à l'émission de lumière vers le ciel utilisées dans la ville de Flagstaff (États-Unis)

Diagramme (a) : en incluant l'éclairage des installations sportives. Diagramme (b) : lorsque l'éclairage des installations sportives est éteint (Luginbuhl, 2009).

Malgré la portée limitée de cette étude (une seule ville américaine), elle révèle néanmoins une contribution majoritaire de l'éclairage des installations sportives extérieures, lorsque celles-ci sont en fonctionnement. Cette contribution importante s'explique par la puissance des sources, leur orientation et leur grande hauteur d'installation. Lorsque l'éclairage des installations sportives est éteint, la principale contribution provient de l'éclairage des zones commerciales (éclairage des parkings, des façades et des enseignes des centres commerciaux). Dans cette étude, l'éclairage résidentiel et l'éclairage des routes représentent, à eux deux, la moitié de la contribution de l'éclairage commercial.

Il n'est pas possible de savoir si ces proportions sont valables en France, car il existe des différences profondes d'urbanisme entre les États-Unis et la France. Des études de ce type, menées sur le territoire français, sont nécessaires pour apporter des informations sur les principaux contributeurs à la pollution lumineuse nocturne.

6.3.1 Influence des LED sur le halo nocturne

En analysant les paramètres déterminants pour la formation du halo nocturne, il est possible d'évaluer de manière qualitative l'influence sur le halo nocturne des différentes catégories d'éclairage extérieur lors du passage à la technologie LED. Cette analyse, basée sur avis d'experts, est présentée dans le Tableau 26. Ces prévisions sont prospectives, elles reposent sur l'étude du marché de l'éclairage à LED, de son développement constaté sur le terrain par les experts du groupe de travail et des données d'exposition présentées dans ce rapport (section 4.1).

Tableau 26 : évolution possible de la contribution au halo nocturne de différentes catégories de l'éclairage/affichage extérieur

Catégorie	Flux et nombre de points lumineux	Directivité lumière émise directement vers le ciel	Quantité de rayonnements de courte longueur d'onde	Contrôle de la durée et de puissance	Influence du passage à la LED sur le halo nocturne
ÉCLAIRAGE PUBLIC (rues et routes)	Globalement inchangé avec les LED	Diminuée grâce à luminaire à ULOR=0	En hausse par rapport aux lampes à décharge, en particulier les lampes sodium haute pression	Contrôle électronique très favorable aux luminaires LED	**Évolution favorable :** l'effet défavorable du spectre est compensé par une meilleure directivité et le contrôle électronique. La contribution actuelle de cette catégorie d'éclairage au halo nocturne est importante.
ÉCLAIRAGE DES VEHICULES	Inchangé avec les LED	Inchangé avec les LED	Globalement inchangé par rapport aux feux automobiles au xénon	Inchangé avec les LED	**Pas d'évolution** : les technologies actuelles des lampes automobiles à décharge (xénon) sont déjà plus riches en bleu que l'halogène. La contribution de l'éclairage automobile au halo nocturne est faible (la lumière est émise de manière rasante et près du sol).
ÉCLAIRAGE DES ZONES COMMERCIALES AGRICOLES ET INDUSTRIELLES, Y COMPRIS PARKINGS	Augmentation significative avec les LED	Inchangé avec les LED	En hausse car plus riche en bleu (à 4 000 K ou plus) que les lampes à décharge, en particulier les lampes sodium haute pression	Inchangé avec les LED	**Évolution défavorable**, en raison du fort développement du nombre de points lumineux et du spectre plus riche en bleu. La contribution actuelle au halo nocturne de cette catégorie d'éclairage est très importante.
ÉCLAIRAGE DES INSTALLATIONS SPORTIVES	Inchangé avec les LED	Inchangé avec les LED	Globalement inchangé par rapport aux lampes à décharge actuellement utilisées (halogénures métalliques)	Inchangé avec les LED	**Pas d'évolution** La contribution actuelle au halo nocturne de cette catégorie d'éclairage est très importante.
ÉCLAIRAGE DE MISE EN VALEUR ARCHITECTURALE ET PAYSAGERE	Fort développement avec les LED	Meilleure directivité des LED	Inchangé avec les LED (éclairage coloré)	Contrôle électronique très favorable aux luminaires LED	**Évolution favorable** : fort développement du nombre de points lumineux mais meilleure directivité des LED et contrôle des horaires d'allumage. La part de la contribution de cette catégorie au halo nocturne est inconnue.

Catégorie	Flux et nombre de points lumineux	Directivité lumière émise directement vers le ciel	Quantité de rayonnements de courte longueur d'onde	Contrôle de la durée et de puissance	Influence du passage à la LED sur le halo nocturne
ENSEIGNES, AFFICHES ET PUBLICITES LUMINEUSES	Fort développement avec les LED. Possible augmentation de la luminance.	Inchangé avec les LED	Inchangé avec les LED (éclairage coloré)	Inchangé avec les LED	**Évolution défavorable**, fort développement du nombre de points lumineux. L'effet de la réglementation française en vigueur est encore très limité et ne semble pas compenser l'augmentation du nombre de dispositifs lumineux. La part de la contribution actuelle au halo nocturne est inconnue.
ÉCLAIRAGE INTERIEUR DES BATIMENTS TRANSMIS A L'EXTERIEUR PAR LES PARTIES VITREES	Inchangé avec les LED	Inchangé avec les LED	Effet défavorable car plus riche en bleu (à 4 000 K ou plus) que les tubes fluorescents	Contrôle électronique très favorable aux luminaires LED	**Évolution favorable** : l'effet défavorable du spectre est compensé par le contrôle électronique. Effet positif de la réglementation thermique des bâtiments et de la réglementation sur les nuisances lumineuses. La part de la contribution actuelle est inconnue sur le halo nocturne.

6.3.2 Conclusions concernant l'impact des LED sur le halo nocturne

Sans évolution du nombre de points lumineux pour l'éclairage public et l'intérieur des bâtiments, et en considérant une forte augmentation du nombre de points lumineux pour l'éclairage de mise en valeur architecturale et paysagère, les catégories d'éclairage pour lesquelles les LED pourraient contribuer à réduire le phénomène de halo nocturne par rapport aux installations « non LED » sont les suivantes :

- l'éclairage public (éclairage des rues et des routes) ;
- l'éclairage intérieur des bâtiments s'échappant à l'extérieur ;
- l'éclairage de mise en valeur architecturale et paysagère.

Cela est principalement du à la meilleure directivité et au contrôle electronique apportés par les LED.
Les catégories d'éclairage pour lesquelles les LED semblent contribuer à aggraver le phénomène de halo nocturne, en particulier en raison de la multiplication du nombre de points lumineux, sont les suivantes :

- l'éclairage des zones commerciales, industrielles et agricoles, y compris les serres et les parkings ;
- les enseignes, publicités et affiches lumineuses.

La contribution actuelle de l'éclairage des véhicules au halo nocturne est faible, car la lumière est émise près du sol, avec des incidences rasantes (les rayons lumineux émis ont une très grande chance d'être bloqué par l'environnement immédiat du bord des routes). Le passage aux LED de l'éclairage automobile, utilisant déjà des lampes à décharge (xénon) plus riches en bleu que les lampes halogènes, ne devrait pas impacter le halo nocturne.

L'éclairage des installations sportives est une contribution très importante au halo nocturne, mais le passage aux LED ne semblerait pas affecter cette contribution.

6.4 Évaluation de l'impact des LED sur les nuisances pour l'Homme

Les nuisances pour l'Homme de l'éclairage extérieur nocturne sont souvent liées à des phénomènes d'éblouissement et de lumière intrusive (débordements lumineux) pouvant parfois entrainer un éclairement indésirable des lieux de vie.

Ces nuisances peuvent provenir d'éclairages fonctionnels non adaptés ou obsolètes mais aussi potentiellement de tous les dispositifs lumineux installés dans le cadre bâti : publicités, enseignes, feux tricolores, projecteurs automobiles, illuminations de Noël, etc.

Les phénomènes d'éblouissement relatifs aux dispositifs à LED sont abordés dans une partie dédiée de ce rapport, tout comme la perturbation des rythmes circadiens.

6.4.1 Influence des LED sur les nuisances lumineuses pour l'Homme

Le Tableau 27 fournit une analyse qualitative, basée sur avis d'experts, de l'évolution des nuisances lumineuses pour l'Homme occasionnée par le passage aux LED de l'éclairage extérieur nocturne. Ces prévisions sont prospectives, elles reposent sur l'étude du marché de l'éclairage à LED, de son développement constaté sur le terrain par les experts du groupe de travail et des données d'exposition présentées dans ce rapport (section 4.1)

Tableau 27 : évolution de la contribution aux nuisances lumineuses sur l'Homme de différentes catégories de l'éclairage/affichage extérieur

Catégorie	Nombre de points lumineux	Débordement lumineux	Luminance - Eblouissement	Contrôle de la durée et de puissance	Impact des LED sur les nuisances lumineuses pour l'homme (éblouissement, lumière intrusive)
ÉCLAIRAGE PUBLIC (rues et routes)	Globalement inchangé avec les LED	Meilleur contrôle de la directivité avec les LED	Eblouissement d'inconfort parfois plus élevé	Pilotage des luminaires LED	**Évolution favorable :** meilleure directivité, contrôle électronique de la puissance.
ÉCLAIRAGE DES VEHICULES	Inchangé	Inchangé avec les LED	En feu de croisement, les luminances des projecteurs full-LED sont plus élevées que les projecteurs halogènes et xénon.	Inchangé avec les LED	**Évolution défavorable**, la technologie full-LED des projecteurs automobiles augmente l'exposition des piétons à la lumière bleue, en particulier pour les enfants. Les phénomènes d'éblouissement des piétons sont plus marqués.
ÉCLAIRAGE DES ZONES COMMERCIALES AGRICOLES ET INDUSTRIELLES, Y COMPRIS PARKINGS	Augmentation significative de l'éclairage extérieur LED	Inchangé avec les LED	Inchangé	Inchangé avec les LED	**Évolution défavorable**, en raison du fort développement du nombre de points lumineux dans les zones commerciales, industrielles, agricoles et les parkings associés.
ÉCLAIRAGE DES INSTALLATIONS SPORTIVES	Inchangé avec les LED	Inchangé avec les LED	Globalement inchangé par rapport aux lampes à décharge actuellement utilisées (halogénures métalliques).	Inchangé avec les LED	**Pas d'évolution** Contribution importante de cette catégorie sur la lumière intrusive et l'éblouissement.
ÉCLAIRAGE DE MISE EN VALEUR ARCHITECTURALE ET PAYSAGERE	Fort développemen t avec les LED	Meilleure directivité des LED	En baisse avec les LED	Contrôle électronique favorable aux luminaires LED	**Évolution favorable** : fort développement du nombre de points lumineux mais meilleure directivité des LED, flux plus faibles et contrôle électronique des horaires d'allumage.

Catégorie	Nombre de points lumineux	Débordement lumineux	Luminance - Eblouissement	Contrôle de la durée et de puissance	Impact des LED sur les nuisances lumineuses pour l'homme (éblouissement, lumière intrusive)
ENSEIGNES, AFFICHES ET PUBLICITES LUMINEUSES	Fort développemen t avec les LED	Inchangé avec les LED	En hausse avec les LED	Inchangé avec les LED	**Évolution défavorable**, fort développement du nombre de points lumineux. L'effet de la réglementation française en vigueur et encore très limité et ne semble pas compenser l'augmentation du nombre de dispositifs.
ÉCLAIRAGE INTERIEUR DES BATIMENTS TRANSMIS A L'EXTERIEUR PAR LES PARTIES VITREES	Inchangé avec les LED	Inchangé avec les LED	Inchangé avec les LED	Contrôle électronique très favorable aux luminaires LED	**Évolution favorable** : l'effet favorable du contrôle électronique. Effet positif de la réglementation thermique des bâtiments et de la réglementation sur les nuisances lumineuses.

6.4.2 Conclusions sur l'impact des LED sur les nuisances lumineuses pour l'homme (éblouissement, débordements lumineux)

Les catégories d'éclairage pour lesquelles les LED pourraient contribuer à réduire les nuisances sur l'Homme par rapport aux installations « non LED » sont les mêmes que pour le halo nocturne, à savoir les suivantes :

- l'éclairage public (éclairage des rues et des routes) ;
- l'éclairage de mise en valeur architecturale et paysagère ;
- l'éclairage intérieur des bâtiments s'échappant à l'extérieur.

Les catégories d'éclairage pour lesquelles les LED semblent contribuer à aggraver les nuisances humaines sont les suivantes :

- l'éclairage des véhicules (luminances plus élevées des projecteurs full-LED en feu de croisement) ;
- l'éclairage des zones commerciales, industrielles et agricoles, y compris les parkings (nombre de points lumineux en augmentation) ;
- les enseignes et affiches lumineuses LED (luminances élevées des LED, nombre de points lumineux en hausse).

L'éclairage des installations sportives est une contribution très importante aux nuisances humaines mais le passage aux LED n'affecterait pas cette contribution.

6.5 Lumières ayant un impact sur les écosystèmes et la biodiversité

Les impacts de la lumière artificielle émise à l'extérieur pendant la nuit fait l'objet d'une partie spécifique de ce rapport (voir le chapitre 0).

6.5.1 Influence des LED sur les nuisances lumineuses pour les écosystèmes et la biodiversité

Le tableau suivant (*cf.* Tableau 28) fournit une analyse qualitative, basée sur avis d'experts, de l'influence du passage aux LED des sources d'éclairage artificiel extérieur sur les impacts pour les écosystèmes et la biodiversité. Ces prévisions sont prospectives, elles reposent sur l'étude du marché de l'éclairage à LED, de son développement constaté sur le terrain par les experts du groupe de travail et des données d'exposition présentées dans ce rapport (section 4.1)

Tableau 28 : évolution de la contribution aux impacts sur la biodiversité et sur les écosystèmes de différentes catégories de l'éclairage/affichage extérieur.

Catégorie	Flux et nombre de points lumineux	Directivité et débordement lumineux	Spectre	Contrôle de la durée et de puissance	Impact des LED sur les nuisances pour les écosystèmes et la biodiversité
ÉCLAIRAGE PUBLIC (rues et routes)	Globalement inchangé avec les LED	Meilleur contrôle de la directivité avec les LED	Spectre large des LED globalement moins favorable que les lampes à spectre étroit (sodium)	Pilotage des luminaires LED	**Évolution favorable :** l'effet défavorable du spectre peut être compensé par une meilleure directivité et un contrôle électronique du flux (gradation, extinction).
ÉCLAIRAGE DES VEHICULES	Inchangé avec les LED	Inchangé avec les LED	Spectre plus large des LED par rapport aux feux au xénon (spectre de raies étroites) mais le xénon émet beaucoup de courtes longueurs d'onde.	Inchangé avec les LED	**Pas d'évolution :** les technologies actuelles des lampes automobiles à décharge (xénon) sont déjà plus riches en bleu que l'halogène.
ÉCLAIRAGE DES ZONES COMMERCIALES AGRICOLES ET INDUSTRIELLES, Y COMPRIS PARKINGS	Augmentation significative de l'éclairage extérieur LED	Inchangé avec les LED	Spectre large des LED globalement moins favorable que les lampes à spectre étroit (sodium)	Inchangé avec les LED	**Évolution défavorable** : en raison du fort développement du nombre de points lumineux à LED dans ces zones et du spectre large des LED.
ÉCLAIRAGE DES INSTALLATIONS SPORTIVES	Inchangé avec les LED	Inchangé avec les LED	Spectre plus large des LED par rapport aux lampes à décharge (spectre de raies étroites) qui émettent de la lumière bleue de courtes longueurs d'onde	Inchangé avec les LED	**Pas d'évolution** Contribution importante de cette catégorie sur les écosystèmes et la biodiversité.

Catégorie	Flux et nombre de points lumineux	Directivité et débordement lumineux	Spectre	Contrôle de la durée et de puissance	Impact des LED sur les nuisances pour les écosystèmes et la biodiversité
ÉCLAIRAGE DE MISE EN VALEUR ARCHITECTURALE ET PAYSAGERE	Fort développement avec les LED	Meilleure directivité des LED	Spectres très variables, (utilisation de LED multicolores)	Contrôle électronique favorable aux luminaires LED	**Évolution défavorable** : fort développement du nombre de points lumineux LED notamment autour de zones naturelles (rivières, bords de mer, forêts, arbres, jardins).
ENSEIGNES, AFFICHES ET PUBLICITES LUMINEUSES	Fort développement avec les LED	Inchangé avec les LED	Spectres très variables : utilisation de LED multicolores	Inchangé avec les LED	**Évolution défavorable** : fort développement du nombre de points lumineux. Le respect de la réglementation française en encore très limité et ne semble pas compenser l'augmentation du nombre de dispositifs.
ÉCLAIRAGE INTERIEUR DES BATIMENTS TRANSMIS A L'EXTERIEUR	Inchangé avec les LED	Inchangé avec les LED	Inchangé avec les LED	Contrôle électronique très favorable aux luminaires LED	**Évolution favorable** : effet favorable du contrôle électronique. Effet positif de la réglementation thermique des bâtiments et de la réglementation sur les nuisances lumineuses.

6.5.2 Conclusions sur les impacts des LED sur les écosystemes et la biodiversité

Les catégories d'éclairage pour lesquelles les LED pourraient contribuer à réduire les impacts sur les écosystèmes et la biodiversité par rapport aux installations « non LED » sont les suivantes :

- l'éclairage public (éclairage des rues et des routes) ;
- l'éclairage intérieur des bâtiments s'échappant à l'extérieur.

Les catégories d'éclairage pour lesquelles les LED contribueraient à aggraver les impacts sur les écosystèmes et la biodiversité sont les suivantes :

- l'éclairage des zones commerciales, industrielles et agricoles, y compris les parkings (nombre de points lumineux LED ;
- l'éclairage de mise en valeur architecturale et paysagère. Sont concernées en particulier : les zones naturelles, les zones abritant de la végétation, les rivières, les rivages, les bords de mers, etc. ;
- les enseignes et affiches lumineuses LED (spectres très variés, luminances élevées des LED, nombre de points lumineux en hausse).

Comme pour le halo nocturne et les nuisances pour l'Homme, l'éclairage des installations sportives est une contribution très importante aux impacts sur les écosystèmes et la biodiversité, mais le passage aux LED ne modifierait pas cette contribution.

A priori, aucun impact sur les écosystèmes et la biodiversité n'est attendu avec le passage aux LED de l'éclairage automobile, par rapport aux technologies xénon déjà utilisées dans ce domaine.

6.6 Synthèse des conclusions sur les impacts du passage aux LED sur la pollution par catégorie

Les catégories les plus concernées par une évolution défavorable sont les enseignes, affiches et publicités lumineuses, ainsi que l'éclairage des zones commerciales, des zones agricoles (y compris les serres horticoles) et des zones industrielles. L'éclairage des parkings extérieurs de ces zones est également concerné.

7 Impact des LED sur l'environnement et la biodiversité

7.1 Introduction

La **Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité (FRB)**[fff] défini le terme biodiversité comme la contraction de biologique et de diversité. Elle représente la diversité des êtres vivants : uni- ou pluri-cellulaires, faune, flore, bactéries, champignons, dont l'espèce *Homo sapiens* n'est qu'un des maillons. Mais la biodiversité est un concept bien plus vaste qu'un simple catalogue d'espèces : c'est aussi la diversité de la vie à tous ses niveaux d'organisation - du gène aux espèces et aux écosystèmes - en intègrant les interactions existentes entre les différents organismes et entre ces organismes et leurs milieux de vie. C'est donc une notion dynamique en constante évolution, riche et complexe.

En quoi la biodiversité intéresse-t-elle la question de l'impact des LED sur l'homme ? La biodiversité, c'est une fourniture de biens au quotidien (oxygène, nourriture, médicaments, matières premières) et de services d'importance vitale (pollinisation, fertilisation des sols, épuration de l'eau, prévention des inondations). Qui dit biodiversité dit aussi interaction et interdépendance. En d'autres termes, la vie des différentes espèces d'un écosystème dépend d'un équilibre où les facteurs de l'environnement - lumière, température, pluies, disponibilité de la nourriture - jouent un rôle synchroniseur d'importance majeure. L'homme fait partie intégrante de l'écosystème. Troubler cette harmonie, c'est prendre le risque d'induire des perturbations majeures voire délétères.

Ainsi, une expertise évaluant l'effet des LED sur l'humain ne peut s'affranchir d'une étude de leurs effets sur le monde vivant et sur l'environnement en général, pour les raisons suivantes :

- une question vitale : si il y a impact sur l'homme, il y aura impact sur tout ou partie du monde vivant et inversement ;
- améliorer nos connaissances : la biodiversité résulte de millions d'années d'évolution à partir d'une matrice commune. Il y a donc des dénominateurs communs chez tous les êtres vivants et en conséquence des enseignements généraux à tirer à partir des données acquises sur tel ou tel représentant, modèle biologique conventionnel ou non ;
- une question d'éthique : s'imposer un environnement hors les lois de la nature, éclairage LED ou autres, autorise-t-il de l'imposer aux autres espèces en ignorant tout risque de l'impact possible sur leur bien-être voire leur survie ?

Les études portant sur l'impact des LED sur le monde vivant recoupent nécessairement celles relatives aux effets de la lumière et de la photopériode (alternance du jour et de la nuit, ou cycle de 24 h; par convention le cycle LD [L : light ; D : dark]) pour lesquelles les données abondent aujourd'hui (Cassonne, 2014 ; Falcón *et al.*, 2007, Falcón *et al.* 2010).. La lumière est un facteur majeur dans l'organisation du vivant. Elle est une source d'énergie, *via* la photosynthèse, et pour certains organismes (dits autotrophes) qui convertissent l'énergie lumineuse pour leurs besoins. Elle est aussi une source d'informations essentielle permettant la répartition et l'orientation spatiale des espèces selon qu'elles sont diurnes, crépusculaires

[fff]**FRB**: http://www.fondationbiodiversite.fr/fr/societe/avec-la-societe/diffusion-de-connaissances/en-savoir-plus/qu-est-ce-que-la-biodiversite.html

ou nocturnes, migratrices ou sédentaires. Ces réponses ont nécessité la mise en place de stratégies adaptatives afin de capter au mieux l'information lumineuse (cellules et organes de la photoréception) et fournir les réponses appropriées (recherche de nourriture ou du partenaire sexuel, évitement du prédateur...). Par ailleurs, l'alternance de phases lumineuses avec des phases obscures (cycle LD défini plus haut) permet la réparation de structures moléculaires et cellulaires impactées par les processus oxydatifs générés par la stimulation lumineuse (Gaston *et al.*, 2013). Enfin, cette même alternance régulière permet l'orientation temporelle. Ainsi, la quasi-totalité des espèces vivantes a mis en place, des horloges internes, dites horloges biologiques, qui permettent d'anticiper les variations journalières et annuelles de l'éclairage quotidien (Cassonne, 2014 ; Falcón *et al.*, 2007, 2010). Ce processus s'est mis en place au cours de centaines de milliers d'années d'évolution. Il est important de noter que les variations naturelles de luminosité nocturne induites par la lune et la couverture nuageuse affectent les orientations spatiales et, à un degré moindre, temporelle, des espèces (Gaston *et al.*, 2013; Foster *et al.*, 2018).

Dans ce contexte, on peut aisément supposer que toute modification de l'éclairage naturel en intensité, qualité, durée et alternance, est susceptible d'avoir des répercussions directes et indirectes sur les organismes, qu'il s'agisse de LED ou de toute autre source lumineuse. Les effets directs concernent les cellules et organes photorécepteurs spécialisés dans la capture et l'intégration du signal physique. Il s'agit des chloroplastes pour les plantes et des photorécepteurs rhabdomériques et ciliaires pour les animaux, localisés chez les pluricellulaires dans des organes spécialisés (yeux, pinéale, ocelles, cerveau, peau…). Les effets indirects concernent les tissus et organes assurant le transfert et/ou l'intégration des informations lumineuses reçues ainsi que les fonctions et comportements sous-jacents.

Ci-dessous sont passées en revue :

- les molécules, organelles, cellules et organes de la photodétection et de la vision chez les plantes et les animaux ;
- l'organisation des horloges biologiques et du système circadien et leur rôle dans les régulations métaboliques, physiologiques et comportementales ;
- les réponses des organismes à la lumière et à l'alternance LD : photosynthèse, répartition et migration, orientation spatiale et temporelle. Suivra une revue sur l'impact direct de l'éclairage artificiel, et en particulier celui des LED, sur ces différents compartiments d'organisation et les conséquences sur la biodiversité.

Ces questions n'ont pas été abordées dans le rapport publiée par l'Anses en octobre 2010 (Anses, 2010).

7.2 Modalités de la capture du signal lumineux chez les êtres vivants

Les fonctions essentielles du vivant, le phototropisme pour les animaux, la phototaxie pour les plantes et enfin les activités rythmiques liées aux horloges biologiques pour les deux, nécessitent la capture de l'information lumineuse. Ainsi, les êtres vivants ont mis en place à l'échelle moléculaire, cellulaire et tissulaire, des systèmes et mécanismes de capture de l'information lumineuse. Une variété de types cellulaires et d'organes photorécepteurs se rencontrent dans le règne vivant.

Du simple « organelle » photorécepteur à la structure la plus complexe telle que le chloroplaste des végétaux, l'œil à caméra des vertébrés, des insectes ou des céphalopodes, toutes les possibilités se rencontrent dans le règne vivant.

Chez les unicellulaires, l'organelle photorécepteur peut correspondre à un simple *spot* (cyanobactéries, euglène) jusqu'à la plus élaborée des structures ressemblant à un œil humain (dinoflagéllés), mais avec tous les éléments assemblés dans une seule cellule ;

celle-ci contient un pigment, une surface en forme de cornée, une lentille et une structure lamellaire (Gehring, 2005 ; Gehring, 2011; Gehring, 2014) . Ces organelles pourraient correspondre à des chloroplastes ayant perdu toute activité de photosynthèse (transmission horizontale) (Gehring, 2012).

La perception lumineuse remonte aux origines de la vie et a été reconnue chez les cyanobactéries ancestrales. Les cyanobactéries sont les premiers représentants connus de la vie sur terre (Gehring, 2012) ; elles sont apparues il y a environ 3,8 milliards d'années (**Figure 108**). Les représentants actuels (cyanophycées) sont comme leurs ancêtres capables de capter l'information lumineuse et d'assurer la photosynthèse. Elles peuvent donc fixer le dioxyde de carbone [CO_2] et libérer l'oxygène [O_2], mais elles ne possèdent pas de chloroplaste. Elles se présentent sous forme d'unités cellulaires simples ou associées en filaments. Phototaxie et synchronisation photopériodique des horloges circadiennes ont été mises en évidence chez les cyanobactéries (Gehring, 2012). C'est le cas de la cyanobactérie terrestre *Leptolyngbya* sp., qui montre 2 maxima d'absorption, aux longueurs d'onde 456 nm et 504 nm.

En bref : les populations de cyanobactéries sont croissantes en France et dans le monde, favorisées par des déséquilibres trophiques et/ou écologiques (dont l'eutrophisation des eaux), et posent des problèmes majeurs liés aux obstructions (baies, rivières, conduites) et à laproductions de toxines dangereuses voire mortelles (Svrcek *et al.*, 2004).

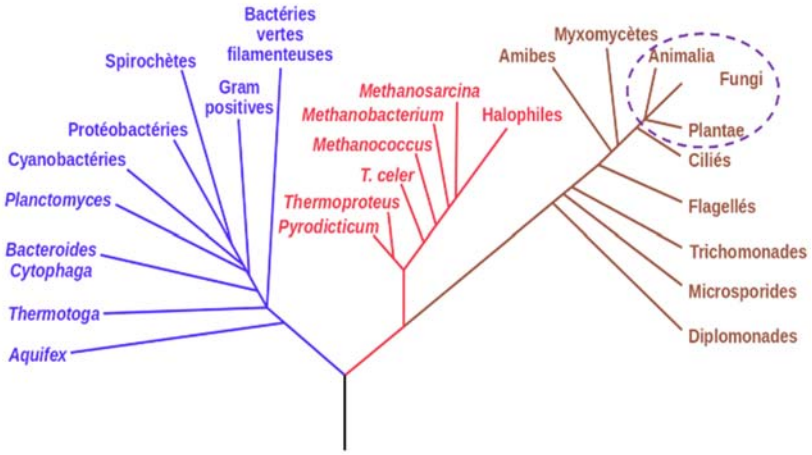
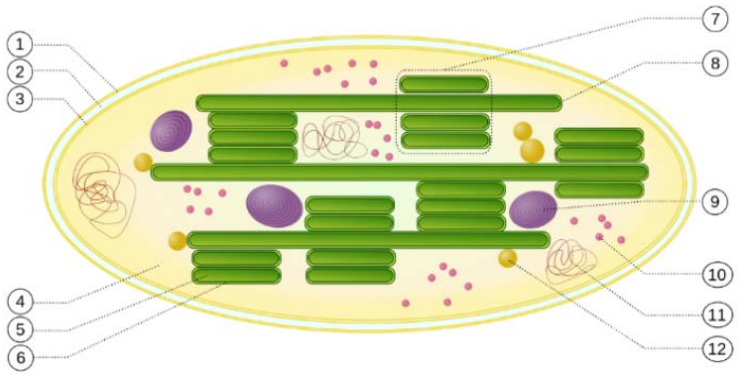


Figure 108 : arbre du vivant : bactéries (bleu), archées (rouge), eucaryotes (marron)

(Woese *et al.*, 1990)

7.2.1 Le chloroplaste des végétaux

L'ingestion de cyanobactéries par des cellules eucaryotes primitives, il y a 1,5 à 1,6 milliard d'années, a conduit à la formation des chloroplastes (*cf.* Figure 109) que l'on rencontre dans le cytoplasme des cellules eucaryotes photosynthétiques. Chez l'algue unicellulaire *Chlamydomonas*, il y a un chloroplaste par cellule. Chez les végétaux pluricellulaires, il y en a plusieurs dizaines par cellule et c'est dans les feuilles qu'on en observe le plus. Le chloroplaste assure la photosynthèse : il absorbe l'énergie lumineuse pour fixer le carbone inorganique (CO_2) et produit du glucose et de l'oxygène (les algues et le phytoplancton marin sont les plus gros producteurs suivis par les forêts).



1, membrane externe ; 2, espace intermembranaire ; 3, membrane interne ; 4, stroma ; 5, lumen du thylakoïde ; 6, membrane du thylakoïde ; 7, granum (empilement de thylakoïdes) ; 8, thylakoïde ; 9, amidon ; 10, ribosome ; 11, ADN chloroplastique ; 12, plastoglobule (gouttelette lipidique). C'est au niveau des membranes des thylakoïdes qu'a lieu la capture des photons. CC BY-SA 3.0

Figure 109 : structure du chloroplaste

7.2.2 Les cellules et organes photorécepteurs chez les animaux

Deux grands types de photorécepteurs se rencontrent chez les animaux : les rhabdomériques et les ciliaires. Ils montrent une organisation générale conservée dans les grandes lignes (*cf.* Figure 110) : ces cellules présentent une organisation segmentaire marquée avec corps cellulaire flanqué d'un pole apical formé de replis de la membrane plasmique et un pole basal neurotransmetteur. Les différences majeures concernent en particulier l'organisation des membranes du pole apical qui assurent la phototransduction, c'est-à-dire la capture de l'information lumineuse et sa transformation en un message chimique et électrique intracellulaire (Falcón, 1999). Les photorécepteurs rhabdomériques se rencontrent principalement chez les invertébrés, et les ciliaires proncipalement chez les vertébrés; cependant la coexistence n'est pas rare (en particulizer chez l'amphioxus, un ancêtre de tous les vertébrés).

Parallèlement à l'évolution des cellules photoréceptrices, s'est opérée une évolution des organes photorécepteurs. Il semble que les yeux et autres structures photoréceptrices aient une origine monophylétique à partir d'un prototype monocellulaire de départ (Gehring, 2012 ; Fain *et al.*,2010 ; Gavelis *et al.*, 2015 ; Lamb, 2013). Des mécanismes d'évolution divergente, parallèle et convergente ont conduit aux types oculaires des plus complexes (*cf.* Figure 111). C'est ainsi que l'on trouve, par exemple, des yeux de type « caméra » (structure fermée possédant une lentille qui concentre les rayons lumineux sur la rétine) aussi bien chez les méduses et les céphalopodes (photorécepteurs rhabdomériques) que chez les vertébrés (photorécepteurs ciliaires). La rétine des premiers vertébrés (myxines) est composée principalement de cellules photoréceptrices associées à des cellules ganglionnaires. Les premières sont de type ciliaire et les secondes dérivent de photorécepteurs rhabdomériques (Lamb, 2013 ; Lamb *et al.,* 2007 *;* Autrum *et al.* 2012*)*. Des poissons aux mammifères, la complexification de la rétine du vertébré a conduit à l'apparition des cellules bipolaires, horizontales et amacrines. Les données les plus récentes indiquent que les bipolaires sont dérivées de photorécepteurs de type ciliaire, alors que les autres sont dérivés de cellules rhabdomériques (Figure 111).

7.2.2.1 Œil composé et œil caméra

Les mécanismes de l'évolution divergente et convergente ont conduit à la spécialisation d'une multiplicité de structures photosensibles. Une dizaine a été identifiée (Shubin *et al.*, 2009), de l'assemblage de quelques cellules photosensibles, permettant le phototactisme, aux yeux de type « composés » ou « caméra », lesquels permettent des fonctions visuelles plus sophistiquées.

Chez les petits invertébrés, ou encore les larves d'insectes et de vers, plusieurs cellules photoréceptrices sont présentes, isolées ou en association, sur toute la surface du corps, protégées sur un côté par une cellule pigmentée. En général, ce sont de simples dosimètres

de la lumière environnante qui permettent les comportements de fuite ou de rapprochement. Chez les vers tubulaires, ces groupements de cellules forment des « puits » (*pit eyes*) ; dans ce petit creux les cellules sont différemment orientées, permettant ainsi une détection spatiale de la lumière (*cf.* Figure 110 A).

À partir de ces *pit eyes*, sont apparus les yeux sphériques avec pupille, mais sans cristallin, tels les yeux en miroir concave bordant le manteau des bivalves (palourdes, noix de St Jacques) et qui permettent la détection de variations d'intensité lumineuse (*cf*. Figure 110 B).

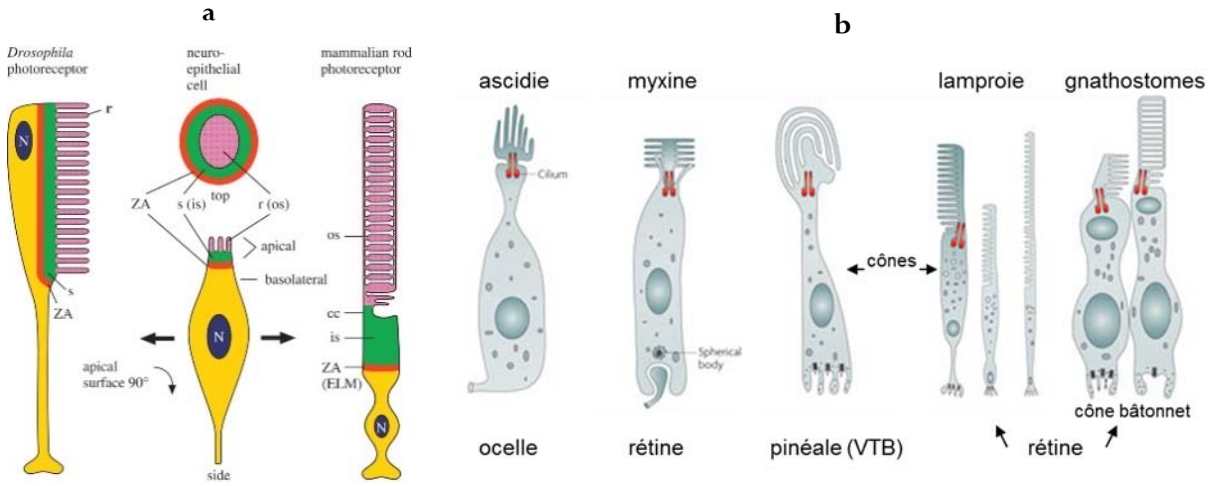
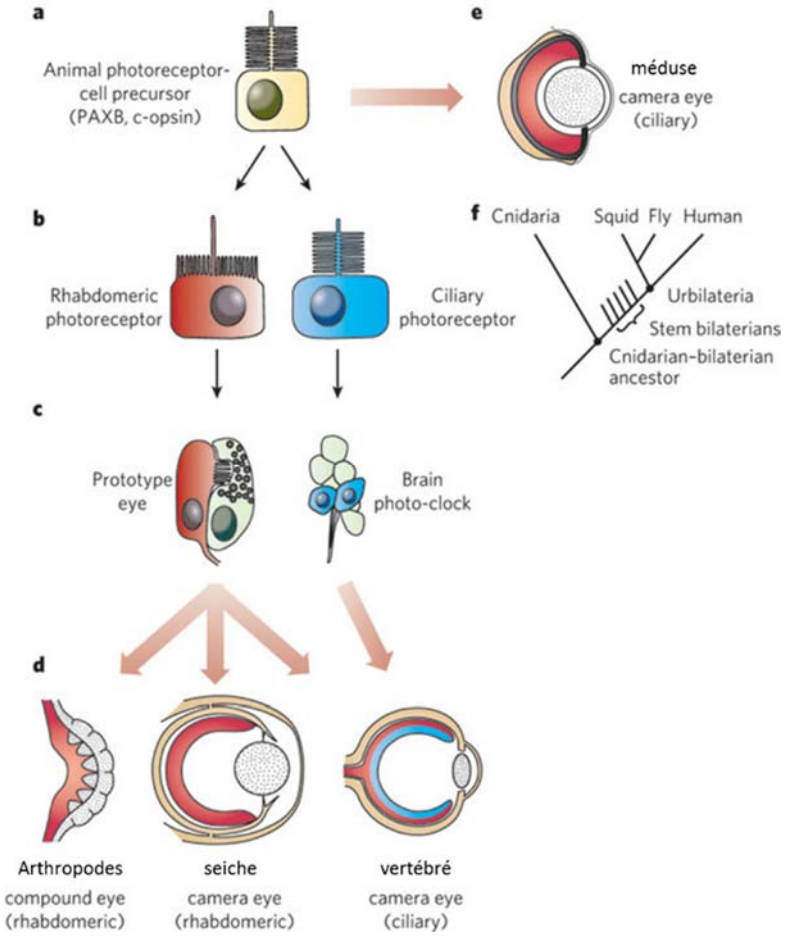


Figure 110 : les différents types de photorécepteurs dans le règne animal

a : Photorécepteur rhabdomériques et ciliaire sont distincts mais présentent une organisation similaire.

b : Évolution des photorécepteurs ciliaires chez les vertébrés des prochordés (ascidie) aux agnates (myxine, lamproies) et au gnathostomes (poissons, batraciens, sauropsidés, mammifères). Dans la rétine des gnathostomes apparaissent les bâtonnets. Dans la pinéale de tous les vertébrés, les photorécepteurs sont de type cône. D'après (Lamb, 2013 ; Lamb et al., 2007).



*L'évolution a conduit à une variété et complexité des types oculaires (**d, e**) à partir d'un œil prototypique (**c**) composé de deux cellules, un photorécepteur et une cellule pigmentaire. Les cellules photoréceptrices sont issues de la division d'une cellule photosensible (**a**) ayant donné les photorécepteurs rhabdomériques (en rouge) et ciliaires (en bleu) (**b**). Les premières se rencontrent principalement chez les invertébrés et les secondes principalement chez les vertébrés. Dessin et détails voir (Shubin et al., 2009).*

Figure 111 : évolution et types d'yeux chez les êtres vivants

Les yeux caméra (*cf*. Figure 111 c), plus élaborés, se rencontrent chez tous les vertébrés, les mollusques (seiche, pieuvre), les méduses, quelques annélides, des arthropodes (dont les araignées), des larves d'insectes et de copépodes. L'origine embryonnaire des différentes composantes n'est pas la même selon l'animal concerné.

Enfin, les yeux composés (*cf*. Figure 112 c,d) constituent le modèle le plus largement répandu, caractéristique des insectes (75 % des espèces animales existantes), de la plupart des crustacés, les myriapodes, quelques bivalves et polychètes. Les yeux composés sont formés d'unités identiques appelées ommatidies. Chacune est formée d'une cornée et d'un cristallin conique qui focalise la lumière vers les photorécepteurs rhabdomériques. Chez la majorité des individus diurnes, chaque ommatidie est isolée des voisines par une couche pigmentaire (*cf.* Figure 112 d) ; la communication entre ommatidies est impossible. Chez les animaux nocturnes, l'absence de pigment permet la diffusion de la lumière d'une ommatidie à ses voisines proches, ce qui permet de gagner en sensibilité (*cf*. Figure 112 e).

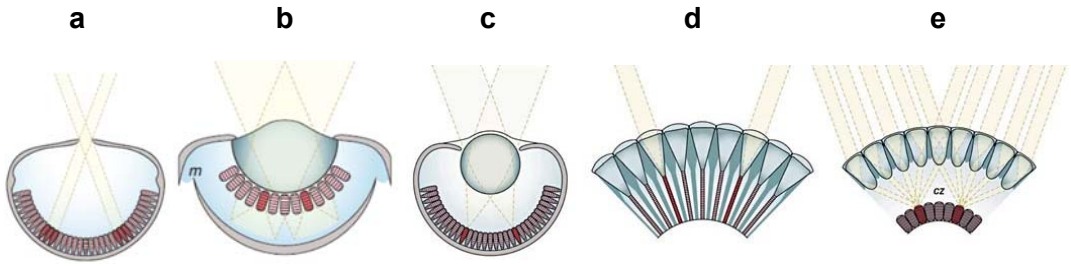


Figure 112 différents types d'yeux chez les invertébrés

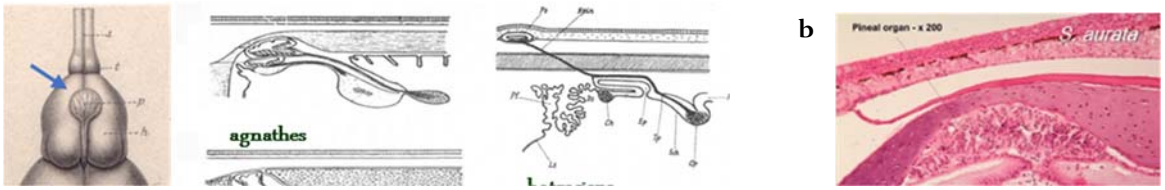
***a** : œil « en puits » ; la lumière passe par un puits et atteint les photorécepteurs situés en fond. **b** : Œil en « miroir concave » ; la lumière traverse une pupille large, puis les photorécepteurs et va enfin se réfléchir sur une sorte de miroir concave hémisphérique et atteint de nouveau les photorécepteurs. **c** : œil caméra (vertébrés, céphalopodes, mollusques, arachnides) ; la lumière est focalisée par un cristallin sphérique (céphalopodes, poissons) ou concave (mammifères) avant d'atteindre les photorécepteurs ; l'accommodation dépend de la forme du cristallin. **d** : Dans l'œil composé des insectes diurnes et crustacés, la lumière atteint chaque ommatidie individuellement via la sa cornée (lentille). e : Chez les insectes nocturnes et les invertébrés des eaux profondes, chaque ommatidie reçoit une lumière concentrée à partir de plusieurs unités de lentilles qui forment la cornée, concentrant ainsi la lumière. D'après (Warrant, 2010)*

Si l'œil avec sa rétine est l'organe de la vision par excellence, il n'est pas la seule structure photosensible chez les vertébrés comme chez les invertébrés.

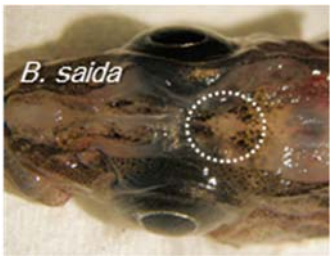
7.2.2.2 Photosensibilité extra rétinienne chez les vertébrés

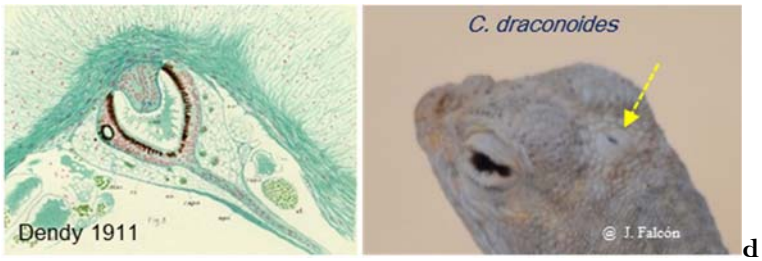
Les vertébrés aquatiques, les batraciens et les lézards possèdent un complexe pinéal formé par les organes pinéal d'une part et parapinéal ou pariétal (selon les espèces) d'autre part (Collin *et al.*, 1988 ; Falcón, 1999) (*cf.* Figure 113). Ils constituent des récepteurs directs de la lumière à la surface du crâne ou juste en dessous. Il s'agit de tissus rétiniens simplifiés, contenant uniquement des photorécepteurs de type cône connectés à des cellules ganglionnaires. Ces dernières envoient leurs axones (c'est à dire l'information perçue par les photorécepteurs) vers divers centres nerveux, dont beaucoup reçoivent également des projections rétiniennes (il y a donc souvent convergence d'information)(Falcón, 1999). La différence principale entre rétine et complexe pinéal réside dans le fait que seule la rétine permet la vision des formes et des couleurs ; le complexe pinéal est uniquement un dosimètre de la lumière environnante, d'une très grande sensibilité. De plus, les photorécepteurs de l'organe pinéal produisent de nuit la mélatonine, « une hormone donneuse de temps ». L'évolution a conduit, chez les mammifères et les serpents, à la perte de l'organe parapinéal ou pariétal et à celle de la photosensibilité directe. Les cellules de la pinéale, ou pinéalocytes, reçoivent l'information lumineuse *via* la rétine et une voie nerveuse complexe ; ils ne produisent plus de message nerveux (Collin *et al.*, 1988 ; Falcón, 1999 ; Klein *et al.*,1996). Seul persiste le message hormonal nocturne. Les oiseaux présentent une situation intermédiaire.

Outre ces organes photorécepteurs organisés, des photorécepteurs intra-cérébraux, dont l'existence avait été supposée dès le milieu du siècle dernier, ont été mis en évidence chez les poissons, les lézards et les oiseaux. Leur rôle reste énigmatique, certains pourraient contribuer au contrôle annuel de la reproduction comme l'ont montré des travaux déjà anciens (Benoit *et al.*, 1954).



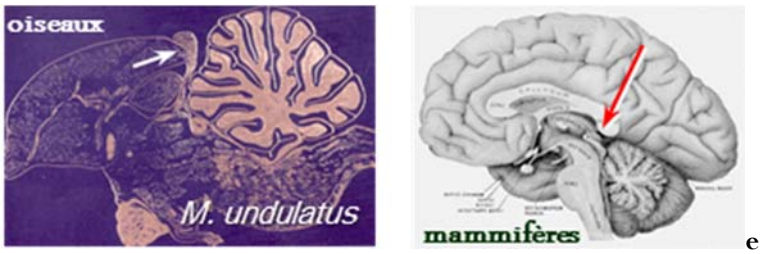
c





d

d. *Chez les batraciens et les lacertiens le complexe pinéal comprend aussi l'œil pariétal, situé entre le crâne et la peau (**a, d**) et qui montre une organisation rappelant celle de l'œil, ouvert en surface (à droite) avec cristallin et rétine (coupe histologique à gauche).*



e

e*. l'organe s'enfonce partiellement (oiseaux) ou complètement (mammifères) dans le cerveau, en relation avec la perte de la photosensibilité directe.*

Figure 113 : organe pinéal des vertébrés

*Chez les ectothermes il est localisé en surface du cerveau (**a** ; flèche bleue) et sous le crâne (**a, b**), lequel est moins épais (**b**) avec une peau dépigmentée en surface (**c**).*

Enfin, les vertébrés aquatiques, les batraciens et les lézards possèdent des cellules photosensibles en surface de la peau. Ces cellules participent au contrôle de la migration chez la lamproie (Friedrich, 2006), à l'agrégation et à la dispersion des pigments des dermatophores chez le poisson et le Xénope (Warrant *et al.*, 2010 ; Berry *et al,* 2011*)*, ou à la propension à lézarder des reptiles (Buschbeck *et al.,* 2008).

7.2.2.3 Photosensibilité extra rétinienne chez les invertébrés

Outre les yeux composés, les arthropodes possèdent des organes photorécepteurs extra-rétiniens, les ocelles, qui peuvent avoir des formes et localisations variées (*cf.* Figure 114). Œil composé et ocelle ont une origine ancestrale commune (Friedrich, 2006).

a **b** **e**

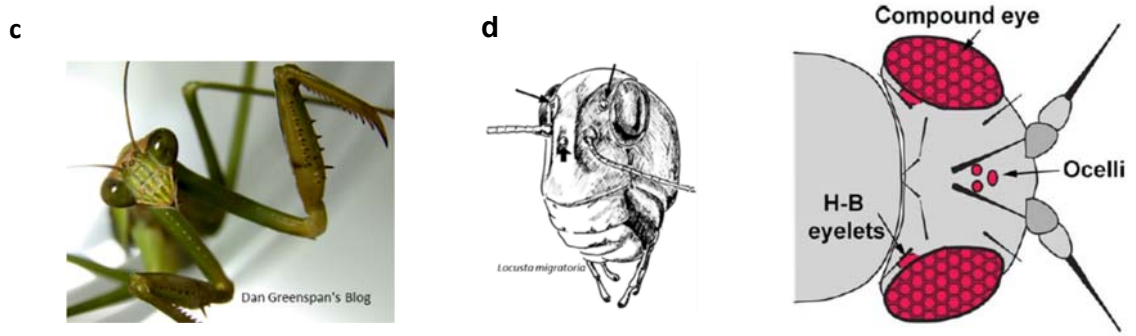


Figure 114 : la vision extra-oculaire des insectes.

La majorité des arthropodes possède des ocelles placés au-dessus de la tête formant souvent un triangle. ***a****, Megalopta genalis ;* ***b****, Ichneumon cryptine ;* ***c****, Mantis religiosa ;* ***d****, Locusta migratoria ;* ***e****, la drosophile possède, outre les yeux et les ocelles, 2 organes de Bolwig également photodétecteurs.*

(Warrant et al., 2006 ; Berry et al., 2011 ; Buschbeck et al., 2008)

En bref : le règne du vivant montre une variété de systèmes de capture de l'information lumineuse *:*

- *chez les végétaux* cela va de l'organelle au chloroplaste.
- *chez les animaux* ce sont les yeux caméras ou composés, pour la vision des formes et des couleurs, et des organes photo-détecteurs « *dosimètres de la lumière environnante* » pour le phototactisme, le phototropisme et la synchronisation des horloges biologiques. Les objectifs sont multiples.

7.3 Photopigments & perception visuelle

7.3.1 Les phytochromes

Les photopigments des plantes, champignons, bactéries, cyanobactéries, algues unicellulaires et diatomées, sont les phytochromes. Ces protéines sont associées de façon covalente à un chromophore, la biline, dont il existe trois types. La photoisomérisation des bilines induit une activité kinase (phosphorylation de protéines). La sensibilité maximale se situe dans le rouge (Huche-Thelier *et al.*, 2016). Une propriété particulière des phytochromes consiste en leur double sensibilité, rouge (R ; $580 < \lambda_{max} < 660$) et infrarouge (IR ; $690 < \lambda_{max} < 720$) selon la lumière environnante. Ainsi, la lumière active le passage de la forme R à IR et l'obscurité fait l'inverse, de sorte que la plante nécessite une phase d'obscurité pour régénérer la forme R (Demotes-Mainard *et al., 2016)*. Cette propriété est utilisée pour la synchronisation des cycles physiologiques de la plante sur les périodicités naturelles (*e.g.*, floraison).

Les champignons possèdent plusieurs chromophores : la biliversine, des flavines et le rétinal (Glukhova *et al.*, 2014) (*cf.* Figure 116).

7.3.1 Les phototropines

Chez les plantes, on rencontre les phototropines, des protéines sérine/thréonine kinases sensibles aux UV-A et dont le chromophore est la flavine mono nucléotide (FMN) (*cf.* Figure 115). Elles interviennent dans le phototropisme et le positionnement des feuilles, l'accumulation des chloroplastes et l'ouverture des stomates (responsables des échanges gazeux entre la plante et son milieux (Huche-Thelier *et al., 2016))*.

7.3.2 Zeitlupe (ZTL), Flavin-binding Kelch (FKF1) et LOV Kelch (LKP2/FKL1)

Ces protéines forment une famille spécifique aux plantes associées également à la FMN.

Elles sont sensibles aux UV-A et au bleu (*cf.* Figure 115).

7.3.3 Les cryptochromes

Les cryptochromes (Cry) se rencontrent dans tout le règne vivant, ils appartiennent à la famille des photolyases. Les photolyases et DASH-Cry sont impliqués dans la réparation de l'ADN, laquelle opère entre 350 et 530 nm (*cf.* Figure 116a,b).

Les cryptochromes de type Cry1 & Cry2 ont perdu la propriété de réparer l'ADN. Chez les plantes, ils sont photosensibles aux UV-A (λ_{max} 370 nm) et dans le bleu (λ_{max} 450 nm) (Huche-Thelier *et al., 2016)* (*cf*. Figure 115). Ils se lient au chromophore flavin adenine dinucleotide (FAD) et leur photoactivation résulte en un transfert d'électrons et la réduction du FAD (*cf*. Figure 116b).

Chez les animaux, ils sont une composante de l'horloge moléculaire circadienne, ils ne sont plus photosensibles chez les vertébrés (*cf*. Figure 117).

Les cryptochromes sont également impliqués dans les mécanismes d'orientation (insectes) et la magnétoréception (plantes, insectes, oiseaux) (Gehring, 2012 ; Chaves *et al*. 2011). Par exemple, des champs magnétiques élevés réduisent la croissance des plantes en lumière bleue mais pas en lumière rouge. Chez les Drosophiles (*D. melanogaster*) et les blattes (*P. americana*) déficientes en cry (cry$^{-/-}$) l'orientation en fonction du champ magnétique est perdue ; elle est restaurée chez les animaux transgéniques exprimant le gène humain (cry2$^{+/+}$), (Bazalova *et al.*, 2016). Chez les oiseaux migrateurs, en particulier les migrateurs nocturnes, l'implication des gènes Cry de la rétine dans l'orientation en fonction du champ magnétique a été démontrée ; de plus, en lumière de très faible intensité, l'orientation n'est correcte que pour des expositions à des lumières de longueur d'onde < 530 nm (Mouritsen *et al.* 2004 ; Solov'yov *et al.*, 2010 ; Niessner *et al.*, 2011 ; Fusani *et al.,* 2014).

En bref : les gènes de la famille Cry ont des fonctions multiples dans le règne vivant :

- capture de la lumière (sauf les vertébrés) dans les longueurs d'ondes du spectre UV et bleu ;
- entrainement (plantes & invertébrés) et fonctionnement des horloges circadiennes ;
- orientation en fonction du champ magnétique.

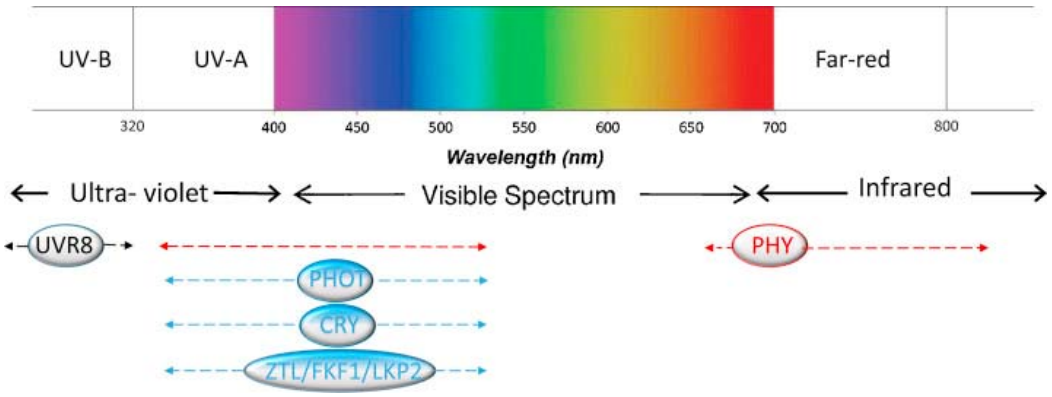
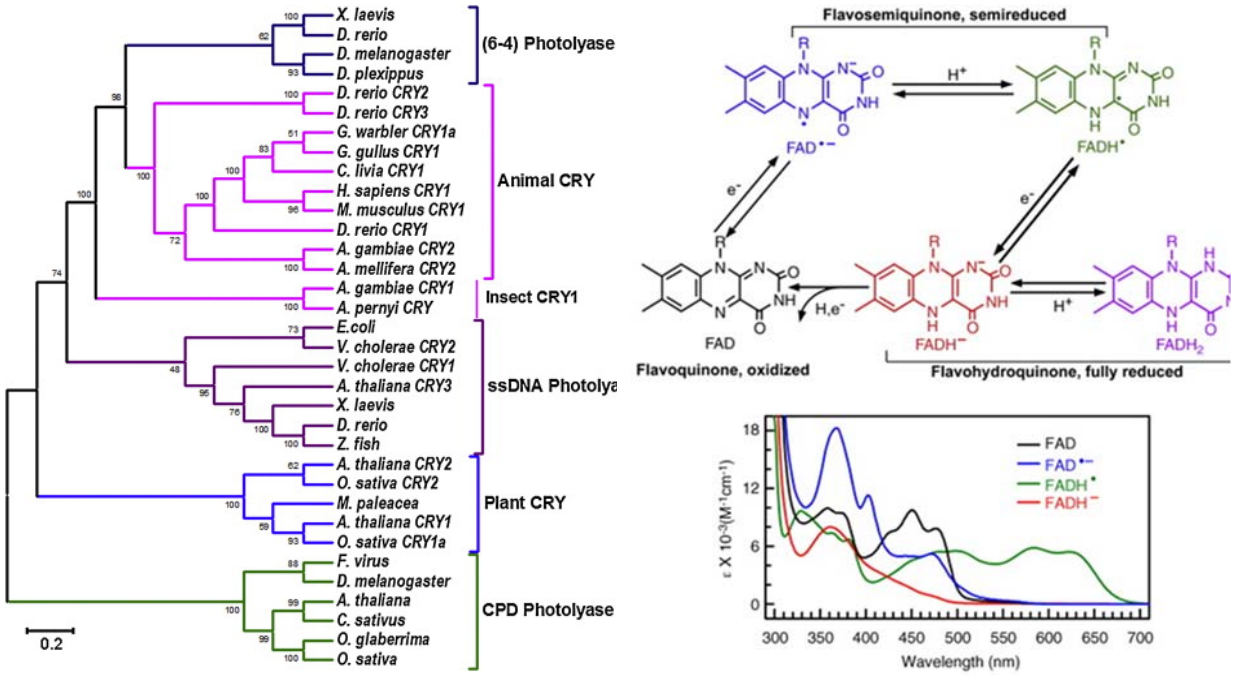


Figure 115 : sensibilité spectrale des plantes.

PHY, phytochromes ; PHOT, phototropines ; CRY, cryptochromes ; ZTL, Zeitlupe ; FKF1, Flavin-binding Kelch ; LKP2, LOV Kelch ; UVR8 : protéine activée dans les UV-B. Source : (Huche-Thelier et al., 2016)



a b

Figure 116 : la famille des cryptochromes et photolyases.

a : arbre phylogénétique, b : différents états du FAD et spectres d'absorbtions

Source : (Liu et al., 2010) et (Du et al., 2014)

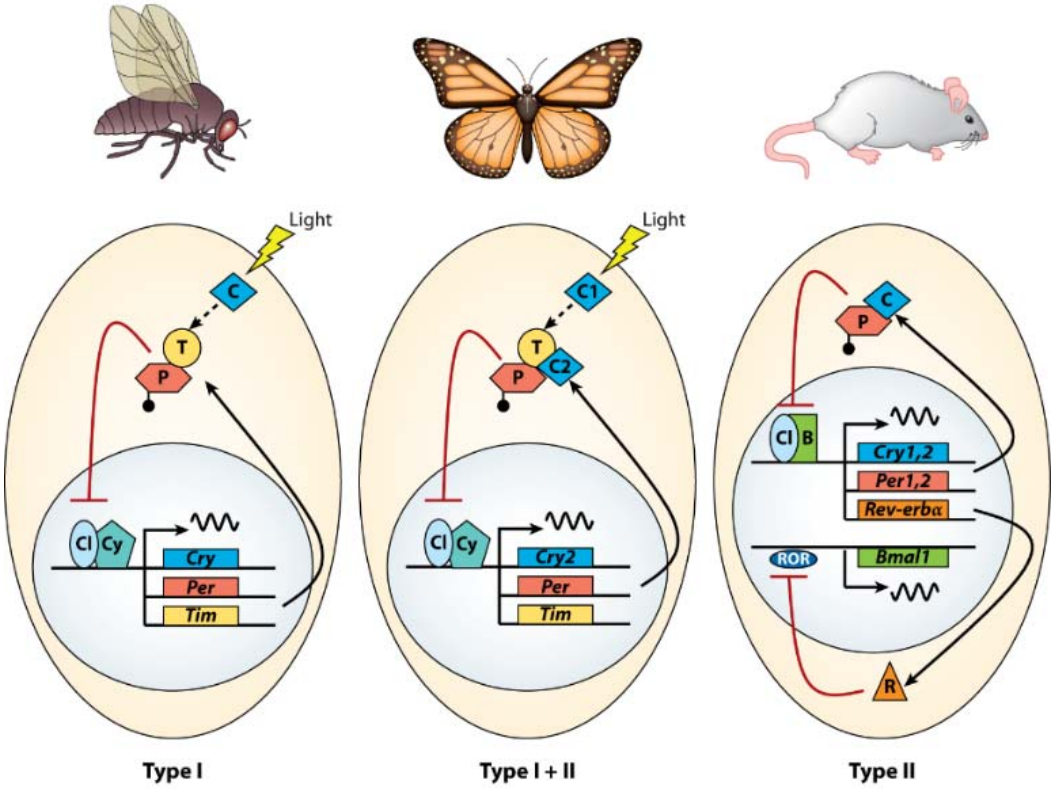


Figure 117 : représentation simplifiée de trois types d'oscillateurs moléculaires

En fonction de la nature des cryptochromes impliqués. Lignes rouges : inhibition ; flèches pointillées noires : dégradation de timeless *(T) induite par la lumière par interaction avec cry. C, cryptochrome ;*

P, période ; Cl, clock ; Bmal1 ; Cyp, cycle, selon (Chaves, 2011)

7.3.4 Les opsines

Les opsines (protéines capable de réagir à l'énergie lumineuse) sont membres de la superfamille des récepteurs à 7 domaines transmembranaires associés au chromophore rétinal (*cf.* Figure 118). Ceci les distingue fondamentalement des autres molécules mentionnées plus haut qui sont cytosoliques. L'isomérisation du rétinal de la forme 11-*cis* à all-*trans* (vertébrés) ou all-*trans* à 13-*cis* (bactério-rhodopsine) à l'illumination déclenche la réponse cellulaire à la lumière (Shichida *et al.,* 2009). Il existe deux grandes catégories d'opsines. Les opsines animales (opsines de type II) sont uniques aux animaux et apparemment sans rapport avec les opsines des bactéries et des algues (opsines type I). Les rhodopsines microbiennes forment un groupe hétérogène (Shichida *et al.,* 2009) qui comprend (1) les pompes ioniques activées par la lumière des archées, (2) les rhodopsines sensorielles et les halorhodopsines des bactéries, champignons, cyanobactéries et dinoflagellés, et (3) les rhodopsines canal des algues vertes. Les opsines ont évolué à partir d'une molécule ancestrale commune il y a environ 700 millions d'années. Elles montrent une grande diversité aussi bien dans leur structure que dans les tissus où elles sont exprimées ou encore dans les fonctions qu'elles assurent, dont beaucoup restent à élucider (Porter *et al.*, 2012). On distingue quatre grands types d'opsines, les « C-opsines », les opsines « Cnidops », les « R-opsines », et les « Opsines du groupe 4 » (Gr4). Dans chaque groupe il y a des opsines impliquées dans la capture de la lumière et d'autres dont les fonctions ne sont pas encore connues. Ces opsines se rencontrent dans des types cellulaires variés, dont les cellules photoréceptrices rabdomériques et ciliées. On note que de la première duplication de l'opsine ancestrale serait apparue la lignée des récepteurs de la mélatonine (Feuda, *et al*., 2012).

7.3.4.1 Les rhodopsines de type I ou rhodopsines microbiennes

Elles montrent une grande diversité et hétérogénéité (*cf*. Figure 118). Les rhodopsines de type I sont généralement des pompes à protons ou à chlore (Cl^-) avec des maxima d'absorption dans le vert ($560 < \lambda < 590$ nm) sauf chez certaines bactéries des profondeurs où l'absorption se situe dans le bleu (λ_{max} : 490 nm).

7.3.4.2 Les rhodopsines de type II ou rhodopsines animales

Il y a deux grandes catégories de rhodopsines de type II couplées à différentes cascades intracellulaires (*cf*. Figure 118 et Figure 119). L'une se rencontre dans les photorécepteurs ciliés (C-opsine, majoritaires chez les vertébrés), l'autre les photorécepteurs rhabdomériques (R-opsine, majoritaires chez les invertébrés) (Gehring, 2012 ; Arendt, 2003) (voir ci-dessous). On distingue 4 principaux types de couplages des opsines selon le type concerné et le tissu ou la cellule qui les exprime (Shichida *et al*., 2009 ; Oakley *et al*., 2015) (*cf.* Figure 119). Pour les C-opsines il s'agit principalement de la transducine (Gt) pour les vertébrés, la Go pour les pectens et la Gs pour les méduses, toutes associées au métabolisme des nucléotides cycliques. Pour les R-opsines il s'agit de la Gq des photorécepteurs d'insectes et céphalopodes, ainsi que les cellules à mélanopsine de la rétine ; elles sont couplées à la cascade des phosphoinositides.

On note que ces différentes opsines s'expriment en outre dans plusieurs régions du cerveau des vertébrés (Hang *et al.,* 2016), y compris pour la mélanopsine chez l'Homme (Nissila *et al.*, 2012). Une photosensibilité directe cérébrale, soupçonnée très tôt par Von Frisch (Von Frisch, 1911) pour les poissons et Benoit (Benoit, 1935) pour les oiseaux, a maintenant été clairement établie chez les poissons, batraciens et oiseaux (Hang *et al.* 2016 ; Hang *et al.* 2014 ; Nakane *et al.* 2010 ; Nakane *et al.,* 2013 ; Fernandes *et al.*, 2013 ; Curie *et al.,* 2016). Cette photoréception extra-rétinienne et extra-pinéale est impliquée dans de nombreuses fonctions dont le développement précoce, l'activité locomotrice ou le contrôle annuel du cycle de reproduction. La question de la fonctionnalité reste posée pour l'Homme.

Enfin, certaines cellules de la peau (dermatophores) des vertébrés et des invertébrés expriment également des photopigments (Baker *et al.*, 2015 ; Binder *et al.*, 2008 ; Chen *et al.*, 2014 ; Pankey *et al.*, 2010 ; Tosini *et al.* 1996). Ces dermatophores participent au contrôle de l'agrégation pigmentaire (poissons, batraciens), de la phototaxie positive (lézard) ou négative (gastéropodes), ou encore du cycle de migration (Lamproie).

Outre son implication dans la perception de la lumière, la rhodopsine est également impliquée dans la perception thermique *via* la voie de la phospholipase C et des canaux TRP (*transient receptor potential*) chez la drosophile et le spermatozoïde humain, (Perez-Cerezales *et al.*, 2015 ; Shen *et al.,* 2011).

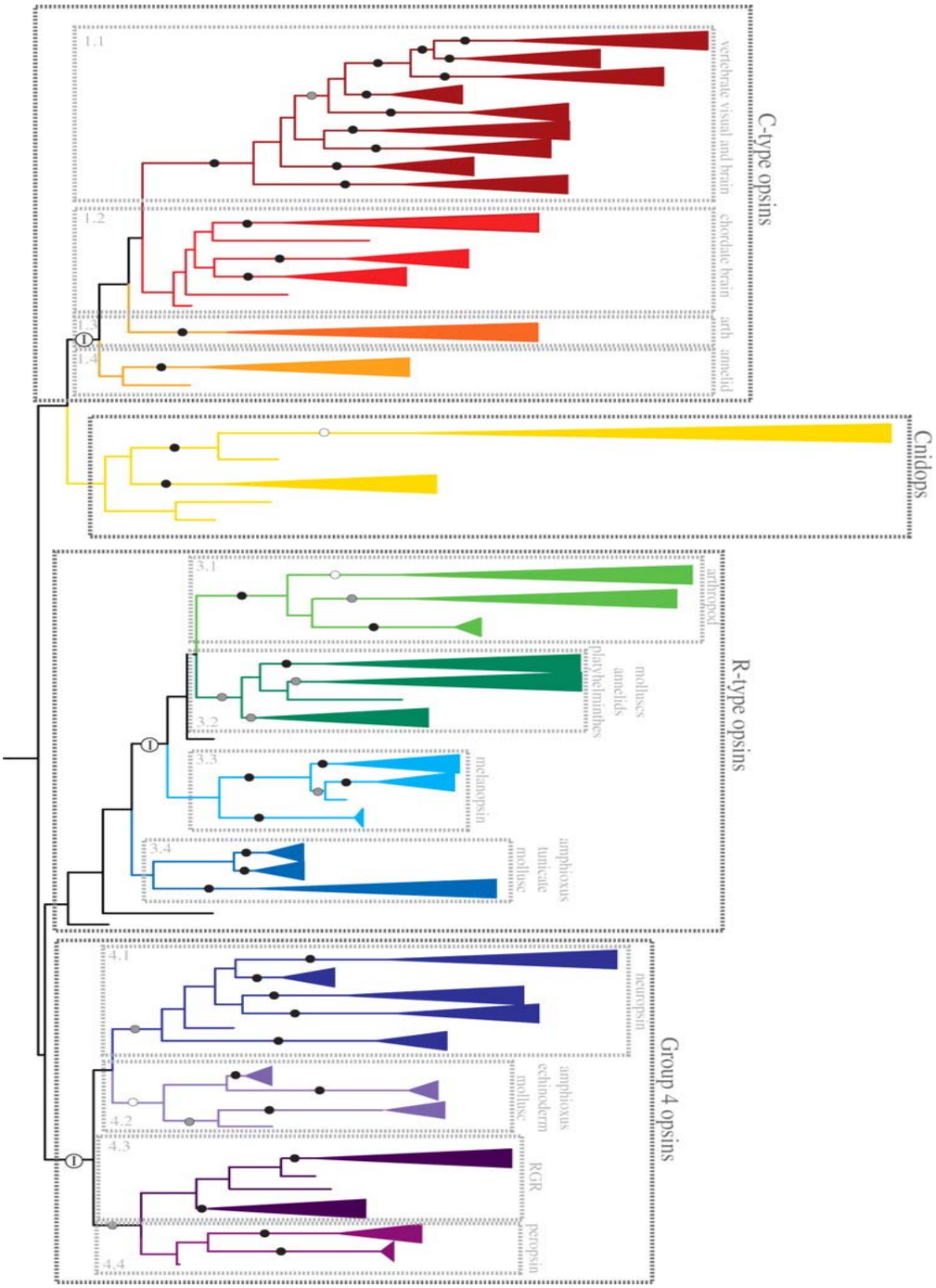
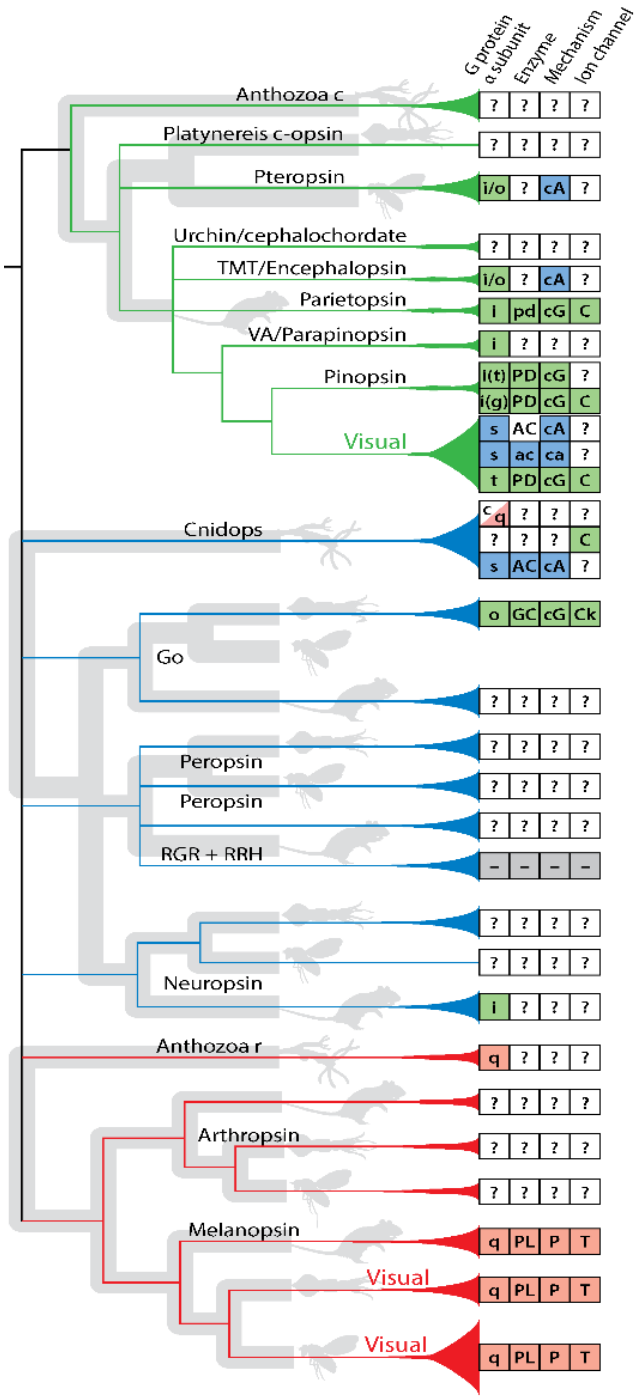


Figure 118 : évolution des opsines

1, C-opsines. Groupe 1.1 dont Rh1, Rh2, SWS1, SWS2, M/LWS, pinopsines, parapinopsines, les opsines vertebrate ancient et parietal ; groupe 1.2 : opsines de téléostéens multi-tissus (TMTs),

encephalopsines et opsines non caractérisées d'amphioxus et d'oursin ; groupe 1.3 : pteropsine de l'abeille ; groupe 1.4 : opsines non caractérisées de Platynereis et d'oursin. 2, Cnidops : rhodopsine de cténophore et cnidaires (hydrozoaires, anthozoaires, cubozoaires). 3, R-type opsins : groupe 3.1 : pigment visuel des arthropodes (M/LWS, SWS) ; groupe 3.2 : pigment visuel des annelides, platyhelminthes and mollusques ; groupe 3.3 : mélanopsine 1 & 2 ; groupe 3.4 : opsines non caractérisées de tuniqués, amphioxus & mollusques. 4, Group 4 Opsins. Inclue des neuropsines et opsines d'amphioxus, oursin, pecten et mollusques (Porter et al., 2012).



En grisé, phylogénie des espèces ; vert, C-opsines ; rouge, R-opsines ; bleue, opsine de type 4.

À droite est résumé le type de phototransduction (sous unité G□ impliquée, enzyme intermédiaire, mécanisme cellulaire et/ou canal ionique). Les couleurs dans les cases marquent le type de sous unité □ : vert, $G_{i/o}$; orange, G_q ; bleue, G_s. Les lettres o, t, g, i, s, q, et c se réfèrent aux différentes sous unités α de la protéine impliquée (t : transducine, …).

Autres abréviation : ac, adenylyl cyclase augmentée; AC, adenylyl cyclase diminuée ; C, canal activable par les nucléotides cycliques (CNG) ; ca, AMP cyclique diminué ; cA, AMP cyclique augmenté ; cG, GMP cyclique ; Ck, canal potassium ; GC, guanylyl cyclase ; P, phosphatidylinositol 4,5-bisphosphate ; pd, phosphodiesterase (PDE) du GMP cyclique ; PD, PDE qui augmente le GMP cyclique ; PL, phospholipase C.

RGR, « retinal G protein receptor » ; RRH, homologue de la rhodopsine dans l'épithélium pigmentaire ; T, transient receptor potential; TMT, opsines de téléostéens multi-tissus ; VA, Vertebrate ancient.

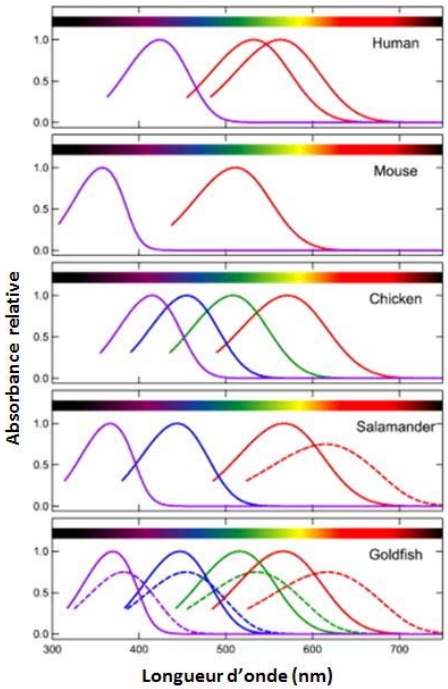
(Oakley et al., 2015).

Figure 119 : évolution des opsines et de la phototransduction et mécanismes de transduction associés

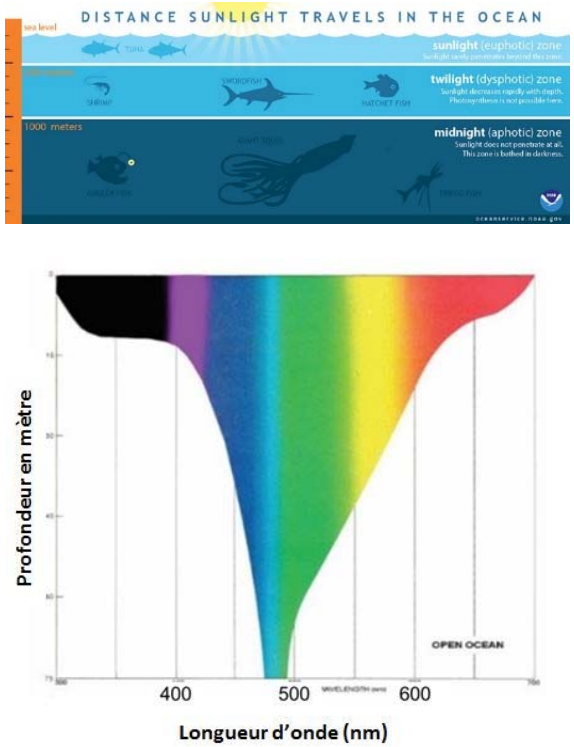
7.3.4.3 La vision des couleurs

Les vertébrés ont deux types de photorécepteurs : les bâtonnets et les cônes. Seuls les derniers permettent la vision des couleurs. Le spectre d'absorption des bâtonnets est centré autour de λ_{max} 500 nm. La détection des couleurs nécessite au moins 2 récepteurs de λ_{max} différentes (vision dichromatique). L'Homme a une vision trichromatique avec 3 types de cônes et des λ_{max} de, respectivement 420, 535 et 565 nm. Les autres vertébrés et les invertébrés ont souvent une perception beaucoup plus étendue encore, montrant jusqu'à 5 maxima d'absorption pour les premiers et plus encore pour les seconds, couvrant le spectre de l'ultraviolet à l'infrarouge (*cf.* Figure 120 et Figure 121 : vision chromatique chez les invertébrés).

a



b



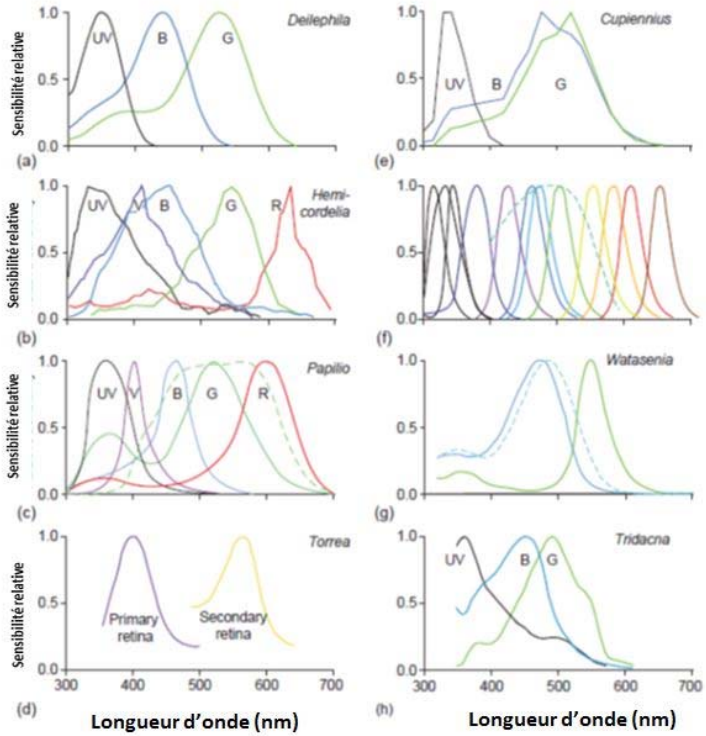


Figure 120 : vision chromatique chez les vertébrés

a *: Spectres d'absorptions chez l'homme H. sapiens, la souris M. musculus, le poulet, la salamandre et le poisson rouge ; selon (Imamoto et Shichida, 2010).*

b *: Pénétration de la lumière dans l'eau (Agency AsOC, 2017).*

Figure 121 : vision chromatique chez les invertébrés

a *: Delephila, Grand Sphynx de la vigne ;* ***b*** *: Hemicordelia, libellule ;* ***c*** *: Papilio, papillon ;* ***d*** *: Torrea, annélide ;* ***e*** *: Cupiennus, araignée ;* ***f*** *: stomatide, mante de mer ;* ***g*** *: Watasenia, calamar ;* ***h*** *: Tridacna, mollusque bivalve. Voir (Warrant, 2010) pour les détails.*

On observe généralement une adaptation à l'environnement de l'espèce. Ainsi, la lumière est filtrée par l'eau qui ne laisse passer que certaines longueurs d'onde en profondeur (*cf.* Figure 120). À 250 m seules les longueurs d'onde comprises entre 470 et 480 nm sont perceptibles, et les espèces vivant dans les profondeurs des océans perçoivent les seuls rayonnements que laisse passer l'eau, tel le cœlacanthe (λ_{max} 480 nm). Au-delà de 1 000 m, plus aucune lumière d'origine solaire ne passe.

À noter que longueur d'onde et couleur ne sont pas la même chose, une couleur pouvant être perçue par l'association de 2 longueurs d'ondes d'intensité donnée. Par exemple, si 580 nm est le λ_{max} du jaune, celui-ci peut être obtenu par un mélange approprié de vert (λ_{max} 540 nm) et de rouge (λ_{max} 620 nm).

En bref :

- la détection de la lumière par les végétaux est basée sur une large gamme de molécules permettant de couvrir le spectre allant des UV-B à l'infrarouge.
- chez les animaux, elle est basée sur les molécules de type cryptochrome et/ou opsine.
- la photoréception non-visuelle peut utiliser soit des cryptochromes, soit des opsines, alors que dans la vision seules les opsines sont impliquées.
- chez les vertébrés et invertébrés, les opsines se rencontrent dans les organes spécialisés et aussi dans certaines cellules du cerveau et de la peau où la photoréception est avérée, mais son rôle encore mal connu.

7.4 Horloges biologiques

7.4.1 Horloges et système circadien

Les horloges circadiennes sont au cœur du système circadien des êtres vivants unicellulaires (cyanobactéries, micro-algues vertes),des plantes, des champignons et des animaux (*cf.* Figure 122 et section 3.3). Elles fonctionnent de façon autonome et rythmique avec une période de 24 ± 4 h. L'alternance lumière/obscurité (LD) du cycle de 24 h est le principal signal d'entrée du système qui permet leur synchronisation et leur entraînement sur une période d'exactement 24 h. D'autres signaux, telle la prise alimentaire où des facteurs sociaux, sont susceptibles de contribuer à cette synchronisation chez les animaux. En retour, les horloges produisent un nombre limité de messages rythmiques, ce sont les signaux de sortie du système circadien qui gouvernent à leur tour une cascade de régulations métaboliques, physiologiques et comportementales (Falcón *et al.*, 2007,; 2010 ; Reiter, 1991 ; Bloch *et al.*, 2013) permettant aux organismes de synchroniser leurs activités sur les périodicités naturelles (*cf.* Figure 123).

Les horloges circadiennes sont apparues tôt dans l'évolution, on suppose au service d'une fonction adaptative, la réplication de l'ADN. En la dirigeant plutôt la nuit, les dommages infligés par les rayonnements UV le jour sont minimisés (Pegoraro et Tauber, 2011). En mettant en place un système rythmique endogène, l'organisme concerné est passé du statut de simple récepteur passif à celui de prédictif. Ainsi, l'horloge a conféré un avantage adaptatif essentiel en mettant en place des processus d'anticipation des changements prédictibles.

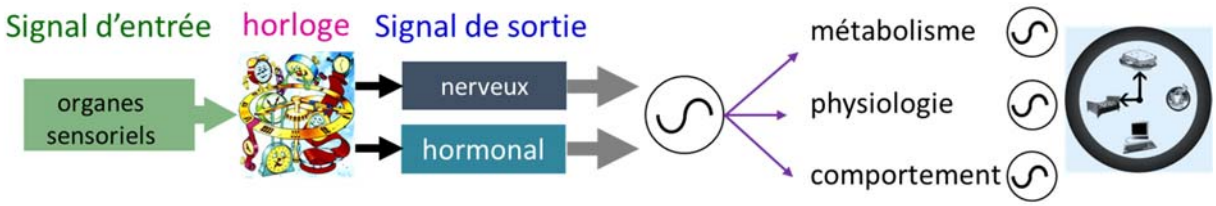
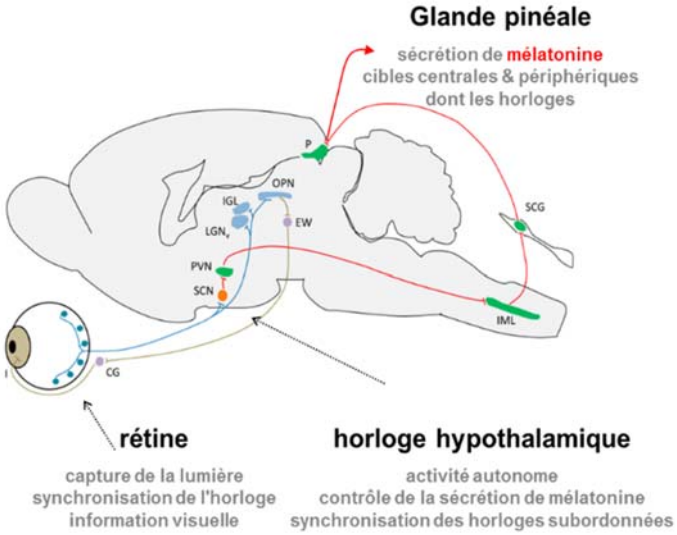


Figure 122 : organisation du système circadien

Il peut être comparé à celui d'une montre ou d'une pendule où les horloges biologiques constituent la mécanique centrale qui reçoit les informations du milieu extérieur via *les organes sensoriels. Ces derniers constituent le remontoir du système ; il permet de synchroniser l'activité cyclique de la mécanique sur les alternances naturelles (lumière, température, ...). Les aiguilles de la montre sont des signaux nerveux et/ou hormonaux qui donnent l'heure à l'ensemble de l'organisme par un enchainement en cascade ; l'ensemble fonctionne en harmonie (J.Falcón).*



Une voie nerveuse complexe conduit le signal lumineux de la rétine vers les noyaux suprachiasmatiques (NSC). Le signal est relayé par les noyaux paraventriculaires (PVN) de l'hypothalamaus, puis vers les cellules intermédiolaterales de la colonne vertébrale (IML) et de là vers les ganglions cervicaux supérieurs (SCG) et la glande pinéale. D'autres voies de sorties du NSC sont indiquées chez Dibner et al. (Dibner et al., 2010). Voir aussi 3.3.1 plus haut.

Figure 123 : le système circadien des mammifères et la sécrétion de mélatonine

Par leur rôle prédictifs, les horloges permettent de bien se préparer aux changements réguliers de l'environnement. Leur synchronisation par les alternances naturelles permet, par exemple, la préparation à la reproduction, de sorte que les naissances ont lieu au bon moment de l'année quand la nourriture est abondante, ou encore la migration des espèces à la recherche d'un environnement plus propice, ou encore la croissance et la floraison des plantes.

7.4.2 L'organisation du système circadien

Pratiquement toutes les cellules vivantes possèdent une horloge interne. Certaines constituent un système circadien à part entière, d'autres possèdent uniquement le signal d'entrée ou celui de sortie. Chez les êtres unicellulaires, signal d'entrée et horloge sont automatiquement présents. Chez les plantes (*Arabidopsis*), les horloges se rencontrent dans différentes parties de la feuille ou des racines (Endo, 2016). Chez les animaux (drosophile,

poisson, mammifère), elles se rencontrent dans différentes structures centrales et périphériques (Falcón *et al.*, 2007 ; Dibner *et al.* 2010 ; Vatine *et al.,* 2011 ; Ito *et al.*, 2016). Ces horloges multiples sont organisées en réseau hiérarchisé. L'ordre hiérarchique varie selon la classe considérée et l'espèce.

Chez les vertébrés non mammaliens, l'organe pinéal, la rétine, certaines régions du cerveau, de même que des tissus périphériques contiennent une horloge circadienne (Underwood, 1989 ; Whitmore *et al.*,1998). Dans ces tissus, les cellules photoréceptrices constituent des systèmes circadiens à part entière (Falcón, 1999 ; Falcón *et al.*, 2007). Chez les mammifères, le système est linéaire, l'horloge des noyaux suprachiasmatiques (NSC) de l'hypothalamus occupe la place centrale (*cf.* Figure 123). Le NSC reçoit les informations de la rétine, qui transmet un signal rythmique vers les noyaux paraventriculaires (PVN) ; ces derniers contrôlent ainsi l'activité rythmique d'un certain nombre de structures cibles dont la glande pinéale et la production nocturne de mélatonine (Dibner *et al.*, 2010). Que l'organisation soit linéaire ou en réseau, la mélatonine produite par l'organe pinéal semble jouer un rôle majeur dans la synchronisation de l'ensemble chez les vertébrés (Falcón *et al.*, 2007 ; Underwood, 1989).

7.4.3 Les mécanismes de l'horloge circadienne

Chez un certain nombre d'espèces représentatives, les mécanismes des horloges circadiennes ont été élucidés, de même que ceux de leur entrainement et synchronisation, par les alternances lumière/obscurité du cycle de 24 h moléculaires (*cf.* Figure 117). Ils sont basés sur un système de contrôle en boucle. Les acteurs sont en général peu nombreux. Cependant, ils sont différents chez les unicellulaires, champignons, végétaux et animaux même si, à l'échelle moléculaire, la base du fonctionnement reste la même. Ceci conduit à penser que les horloges sont apparues indépendamment plusieurs fois au cours de l'évolution.

Chez les plantes, le modèle *Arabidopsis* a fait l'objet d'études poussées (Nakamichi *et al.*, 2011). Ce sont les phytochromes (voir plus haut) sensibles dans le rouge et l'infrarouge (λ : 700-750 nm) qui synchronisent l'horloge d'*Arabidopsis*.

Chez les animaux, les mécanismes de l'horloge ont été particulièrement étudiés chez la drosophile (Peschel *et al.*, 2011 ;Tomioka *et al.*, 2010) pour les insectes, chez le poisson zèbre, le xénope, le poulet, la caille, la souris et l'Homme pour les vertébrés (Vatine *et al.*, 2011 ; Ukai et Ueda ; 2010 ; Ito et Tomioka, 2016). Une très grande conservation du mode de fonctionnement est observée entre insectes et mammifères y compris au niveau des acteurs moléculaires. Chez la drosophile, la molécule de type cryptochrome peut à la fois capter la lumière et contribuer au fonctionnement de l'horloge dans certains tissus. Chez les vertébrés, d'une façon générale, les longueurs d'ondes comprises entre 420 et 500 nm interviennent dans la synchronisation, la plus grande efficacité étant obtenue entre 450 et 470 nm (sensibilité de la mélanopsine) (Ramos *et al.*, 2014).

En bref :

- chez les champignons, les plantes et les animaux, ce sont des chromophores sensibles aux lumières bleues qui captent le signal lumineux synchronisateur des horloges circadiennes ;
- chez les champignons, le chromophore est un complexe impliquant la Flavine adénine dinucléotide (FAD). Pour les plantes et les invertébrés il s'agit de cryptochromes et chez les vertébrés de la mélanopsine.

7.4.4 Propriétés des horloges

Une horloge circadienne, présente les propriétés suivantes :

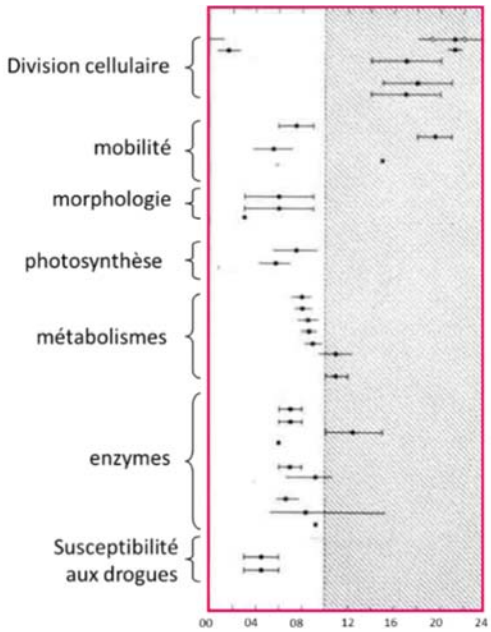
- elle maintient une activité rythmique endogène en absence de toute variation du milieu extérieur. Sa période est de 24 ± 4 h ;
- elle est ubiquitaire : elle se rencontre dans tout le vivant ;
- elle est génétiquement déterminée : la période de l'horloge est propre à chaque espèce mais des variations inter-individuelles sont observables au sein d'une même espèce ;
- elle est synchronisée et entrainée par les facteurs environnementaux, où l'alternance lumière obscurité joue un rôle prépondérant, mais aussi d'autres facteurs tels que la prise alimentaire ;
- elle montre une compensation thermique : la période n'est pas altérée par la température ;
- en lumière continue, la période peut varier en fonction de l'intensité lumineuse ;
- en obscurité constante, des séquences de lumière entrainent des avances ou des retards de phase selon l'heure à laquelle elles sont appliquées.

7.4.5 Photopériodisme et horloges circadiennes

Cette section traite de l'impact de la photopériode et des horloges circadiennes sur les régulations métaboliques, physiologiques et/ou comportementales. Seuls quelques exemples, loin d'être exhaustifs, sont donnés ci-dessous.

7.4.5.1 Algues unicellulaires, plantes et champignons

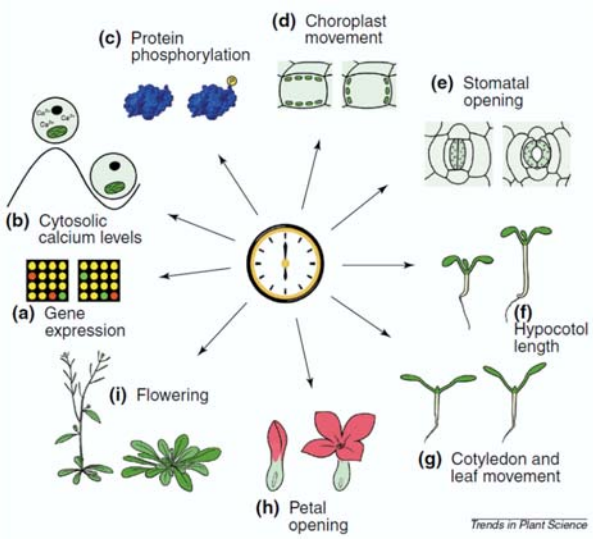
Les modèles les plus étudiés sont l'*Arabidopsis* pour les plantes et *Neurospora* pour les champignons pour lesquels il a été montré que les horloges contrôlent des processus fondamentaux variés tels que la croissance (chez les deux), l'orientation des feuilles, la prise d'eau, la floraison, la dormance des graines, les activités métaboliques et hormonales, ou encore la défense contre les pathogènes (chez les plantes) ; la liste n'est pas exhaustive (Nakamichi, 2011 ; Brunner et Schafmeier, 2006). La Figure 124 donne un aperçu d'un ensemble de processus à fluctuations nycthémérales et circadiennes chez la micro-algue unicellulaire *Euglena gracilis* (Euglène) (*cf*. Figure 124 a) et la plante *Arabidopsis thaliana* (*cf.* Figure 124 b).



a : processus rythmiques chez la micro-algue *Euglena gracilis*

En abscisse est donnée l'heure du jour ; le carré blanc correspond au jour et le noir à la nuit. Le cercle plein marque l'acrophase du rythme (c.-à-d. le point de valeur maximale) ± l'écart à la moyenne.

D'après Edmunds,1984



b : processus rythmiques chez les plantes

Chez Arabidopsis thaliana, l'expression de gènes (a), le calcium intracellulaire (b), la phosphorylation des proteins (c), les mouvements des chloroplastes (d), l'ouverture des stomates (e), la croissance de la tige (f), celle des feuilles et leurs mouvements (g), l'ouverture des pétales et la floraison (h, i) sont des processus controlés par l'horloge circadienne.

D'après (Barak et al., 2000)

Figure 124 : processus rythmiques chez les algues et les plantes

7.4.5.2 Animaux

7.4.5.2.1 Vertébrés

L'un des signaux de sortie du système circadien est la mélatonine sécrétée la nuit par la glande pinéale. L'importance de ce message rythmique est soulignée par sa haute conservation des poissons à l'homme, alors que les mécanismes de sa régulation par la photopériode et les horloges ont été profondément remaniés au cours de l'évolution (Collin *et al.*, 1988 ; Ekström *et al.*, 2003 ; Falcón *et al.*, 2007a). La mélatonine a été qualifiée d'hormone de la nuit ou « hormone donneuse de temps ».

Photopériode, horloges circadiennes et mélatonine sont des éléments essentiels du système circadien par où sont synchronisées une myriade de fonctions métaboliques, physiologiques

et comportementales sur les variations journalières et saisonnières de leur environnement (Boissin and Canguilhem, 1998) (*cf.* Figure 125).

Métabolisme : des poissons aux mammifères, les ions, les monoamines et dérivés (sérotonine, mélatonine, dopamine), les carbohydrates et les lipides de certains organes ou du sang montrent des oscillations gouvernées par les horloges circadiennes (Delahunty *et al.*, 1980 ; Olcese *et al.*, 1981 ; Takahashi, 1996 ; Tong *et al.*, 2013 ; Mendoza and Challet, 2014; Hernandez-Perez *et al.*, 2015 ; Vancura *et al.*, 2016 ; Song *et al.*, 2017). Il en va de même de l'expression ou de l'activité d'enzymes participant à ces contrôles (Falcón, 1999). À l'échelle cellulaire on note les variations circadiennes du cycle de division cellulaire (et en conséquence celles du développement) chez tous les vertébrés (Boissin and Canguilhem, 1998) y compris dans des organes comme la rétine (Kwan *et al.*, 1996 ; Song *et al.*, 2017). Il en est de même de certains mouvements cellulaires, tels ceux des photorécepteurs de la rétine de poisson et de batracien (mouvements rétinomoteurs) observés aux transitions de phases.

Physiologie : le système neuroendocrinien - impliqué dans la croissance, la reproduction, le stress, la prise alimentaire, l'immunité - montre, à tous les étages d'organisation (hypothalamus, hypophyse, organes périphériques) des fluctuations journalières et annuelles (Falcón *et al.*, 2010 ; Tonsfeldt *et al.*, 2012 ; Wood *et al.*, 2014 ; Challet, 2015 ; Kim *et al.*, 2015 ; Leliavski *et al.*, 2015). C'est le cas également du système cardiovasculaire avec ses variations journalières de pression artérielle et du rythme cardiaque (Boissin and Canguilhem, 1998; Wood and Loudon, 2014) ou encore celles de l'activité électrique neuronale qui se manifeste par les variations circadiennes de l'électrorétinogramme et de l'électroencéphalogramme (Peters and Cassone, 2005 ; Cameron and Lucas, 2009 ; Talathi *et al.*, 2009 ; Petsakou *et al.*, 2015 ; Cavey *et al.*, 2016 ; Paul *et al.*, 2016).

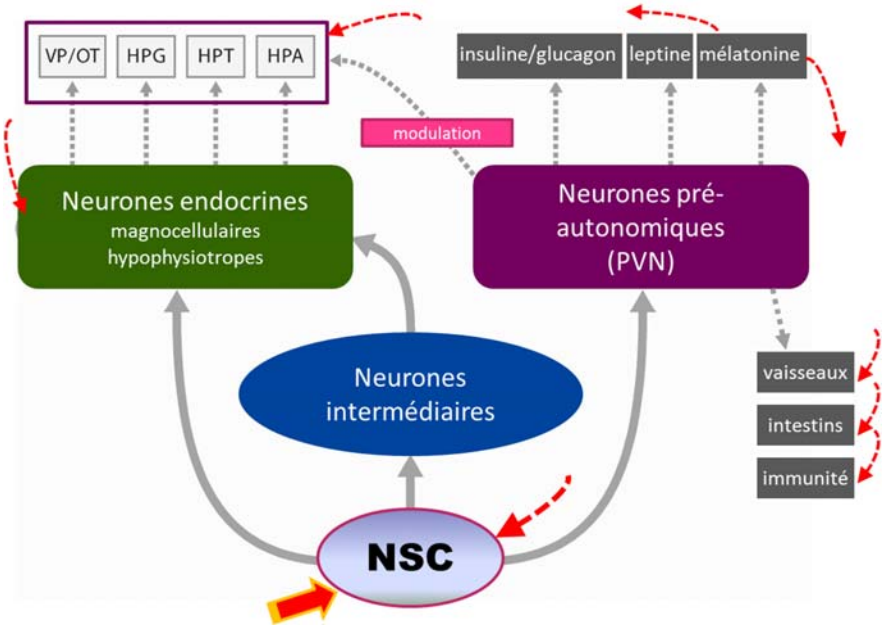


Figure 125 : contrôle circadien des grandes fonctions chez les mammifères

La photopériode (grosse flèche) synchronise l'activité de l'horloge circadienne du noyau suprachiasmatique (NSC) lequel en retour affecte directement ou indirectement (flèches grises ; neurones intermédiaires, endocrines, autonomes [PVN]), l'axe hypothalamo-hypophysaire (VP, vasopressine ; OT, ocytocine ; HPG, axe gonadique ; HPT, axe thyroïdien ; HPA, axe corticotrope).

Via les noyaux paraventriculaires (PVN) il contrôle également la production rythmique de mélatonine par la glande pinéale. En retour le rythme de sécrétion de la mélatonine renforce l'activité du NSC et agit sur des cibles centrales et périphériques (flèches rouges en pointillé).

Comportement : l'activité locomotrice et le sommeil, la formation des bancs (poissons), du renouvellement et de la coloration du tégument (ectothermes essentiellement), de la migration verticale (poissons) ou horizontale (ensemble des insectes et vertébrés), du son (poissons, oiseaux), de la prise alimentaire, de la croissance et de la reproduction (cour, naissances) constituent des exemples notables et non exhaustifs (Zachmann *et al.*, 1992 ; Kulczykowska *et al.*, 2010 ; Cassone, 2014 ; Ruf and Geiser, 2015).

Dans les régions tempérées et polaires, la photopériode change avec la saison. Il s'en suit des variations annuelles des fonctions régulées de façon circadienne (*cf.* Figure 126). Les plus notables sont la fonction de reproduction, la prise alimentaire et de masse corporelle, la croissance et parfois la migration verticale (poissons) et horizontale (ensemble des vertébrés), et les variations du plumage ou de la fourrure pour certains endothermes. Il a été montré que ces rythmes sont contrôlés par une horloge circannuelle (Lincoln *et al.*, 2006).

Bien que leur nature circannuelle ne soit pas démontrée, des rythmes annuels du sommeil (Kantermann *et al.*, 2007) et de la reproduction (Cancho-Candela *et al.*, 2007 ; Foster *et al.*, 2008), calqués sur les variations de photopériode, existent également chez l'Homme. Cependant, les modifications apportées à son environnement, dont celle de l'éclairage nocturne, ont altéré notablement cette propriété comme illustré entre autres dans la Figure 127.

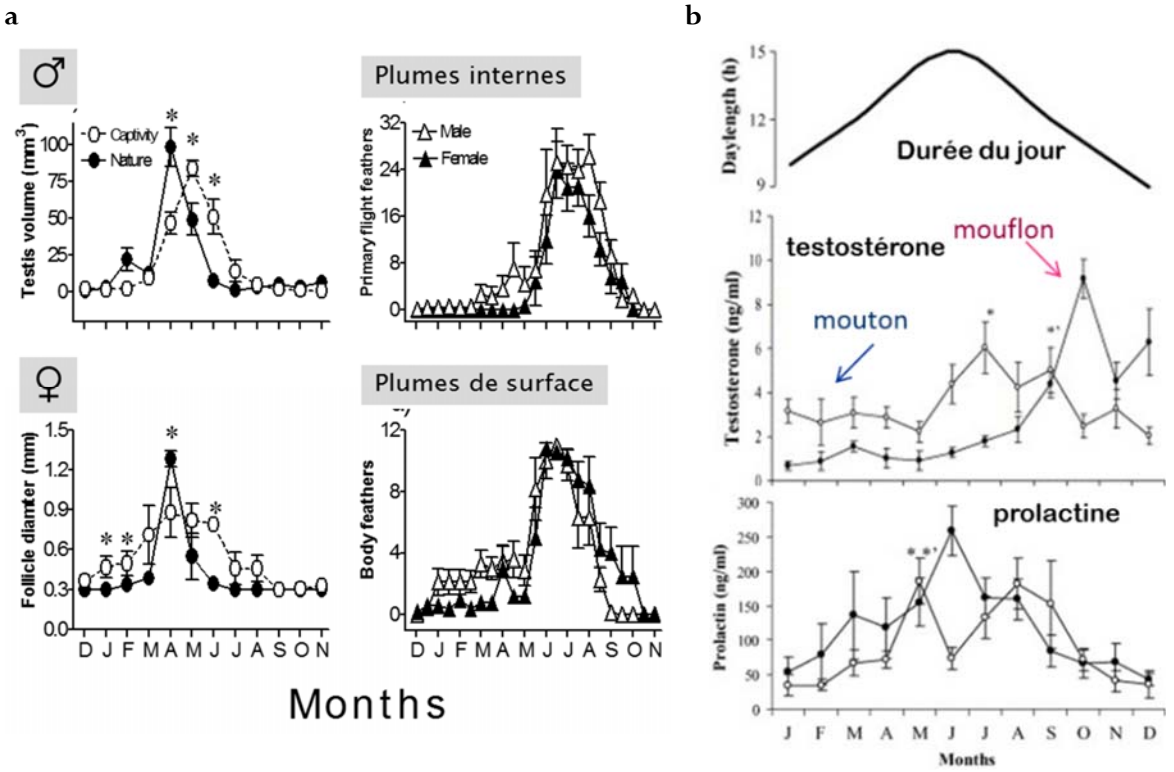


Figure 126 : variations annuelles de certains paramètres physiologiques

a, chez le moineau de la taille des testicules et des follicules, et du nombre de plumes (Trivedi et al., 2006). b, chez l'ovin de la testostérone et de la prolactine plasmatique (Santiago-Moreno et al., 2005)

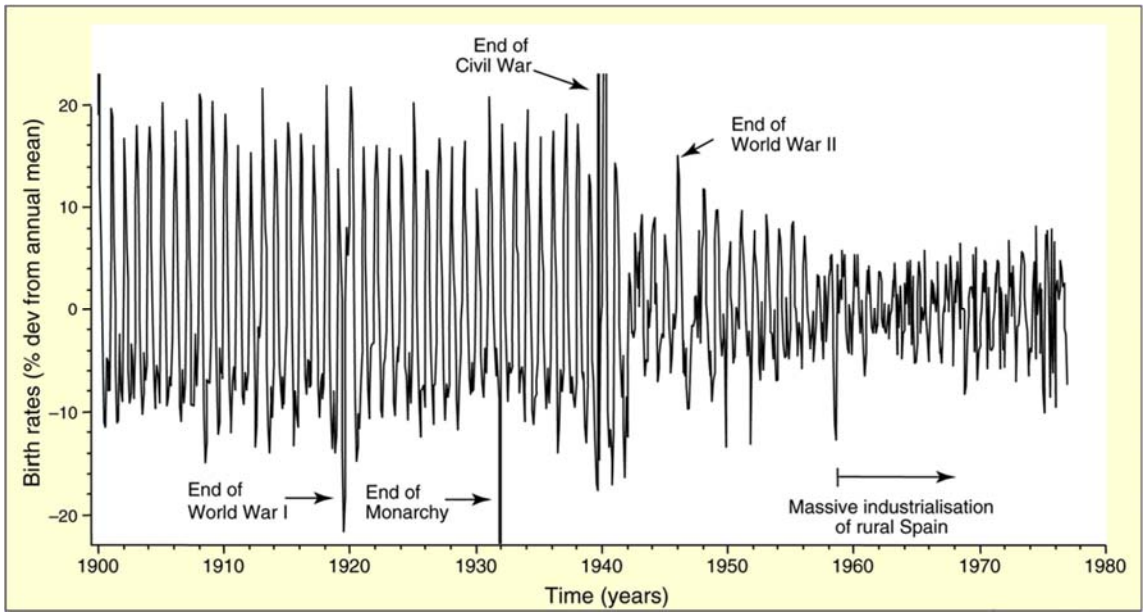


Figure 127 : variations annuelles des naissances dans la population espagnole

Les naissances varient de façon significative de 1900 à 1940. Seuls des épisodes sociétaux (1ère guerre mondiale ; fin de la monarchie) ont altéré temporairement ce rythme. Une atténuation notable et permanente apparait après la guerre civile et la 2ème guerre mondiale, mais c'est à partir des années 60 avec l'industrialisation massive et ses corollaires (dont l'augmentation de l'éclairage urbain) que ce rythme disparait totalement (Foster and Roenneberg, 2008)

7.4.5.2.2 Invertébrés

Les données concernant les invertébrés restent éparses et ne concernent qu'une infime proportion des espèces (insectes en particulier). Elles suggèrent cependant que le système circadien contrôle nombre de fonctions telles que l'activité locomotrice, le comportement de cour, l'accouplement, la ponte, le développement larvaire et adulte, la diapause, la longévité, autant d'évènement où photopériode et température interagissent et où les horloges jouent un rôle essentiel (Bloch *et al.*, 2013 ; Rougvie *et al.*, 2013). Comme pour les vertébrés, ces régulations passent par un contrôle circadien de l'axe endocrinien (Bloch *et al.*, 2013) :

- l'hormone juvénile et les ecdystéroides (dont l'ecdysone) montrent des fluctuations circadiennes dans l'hémolymphe. Les deux sont impliquées dans les régulations physiologiques et comportementales de la reproduction. L'hormone juvénile participe à la répartition des tâches selon l'âge dans les sociétés organisées d'hyménoptères ; les ecdystéroïdes interviennent dans la régulation de la mue ;
- les monoamines - octopamine, sérotonine et dopamine - influencent ou sont influencées par le système circadien. Ces hormones et neurotransmetteurs jouent un rôle important dans la synthèse des phéromones (attraction sexuelle) et peut-être dans le contrôle de l'activité locomotrice ;

- des peptides aux fonctions neuromodulatrices ou hormonales sont aussi impliqués dans les régulations circadiennes tels le « facteur de dispersion des pigments », l'hormone de l'éclosion, l'adiponectine produite par le tissu adipeux et impliquée dans la régulation du métabolisme des lipides et du glucose ou encore la PBAN (*Pheromone biosynthesis activating neuropeptide*) impliquée dans la synthèse de phérormones.

En bref :

- les mécanismes de l'horloge ont été élucidés chez quelques représentants de vertébrés. Chez les invertébrés, il concerne un nombre assez limité d'espèces ;
- les horloges sont impliquées dans le contrôle d'une myriade de réactions métaboliques et de régulations physiologiques et comportementales, liées à des fonctions essentielles à la survie et à la reproduction des espèces.

7.5 Phototropisme, phototaxie

La phototaxie est, chez les animaux, le mouvement locomoteur d'un organisme à une stimulation lumineuse ; elle est positive (vers la lumière) ou négative (vers l'obscurité). Pour les plantes et les champignons on parlera de phototropisme (*e.g.*, l'orientation de la croissance est déterminée par l'orientation de la lumière). Chez les plantes et les champignons, c'est la lumière bleue qui guide le phototropisme. Chez des procaryotes, la capture de la lumière *via* la rhodopsine oriente les déplacements sur le plan horizontal. Chez les eucaryotes, les déplacements s'effectuent en 3D grâce à une structure rudimentaire (« spot ») ou un *œil* prototypique qui préfigure et précède, sur le plan évolutif, les yeux plus élaborés (Gehring, 2012). Les mécanismes, et en particulier la nature des longueurs d'ondes impliquées dans le contrôle de la phototaxie sont complexes et variés. Les spectres d'adsorption couvrent parfois tout le visible (*Cyanobactéries* et *archéobactéries*).

Les sensibilités dans les UV et le bleu sont majoritairement impliquées dans la phototaxie et le phototropisme (cyanobactéries et archéobactéries, plantes, champignons, éponges).

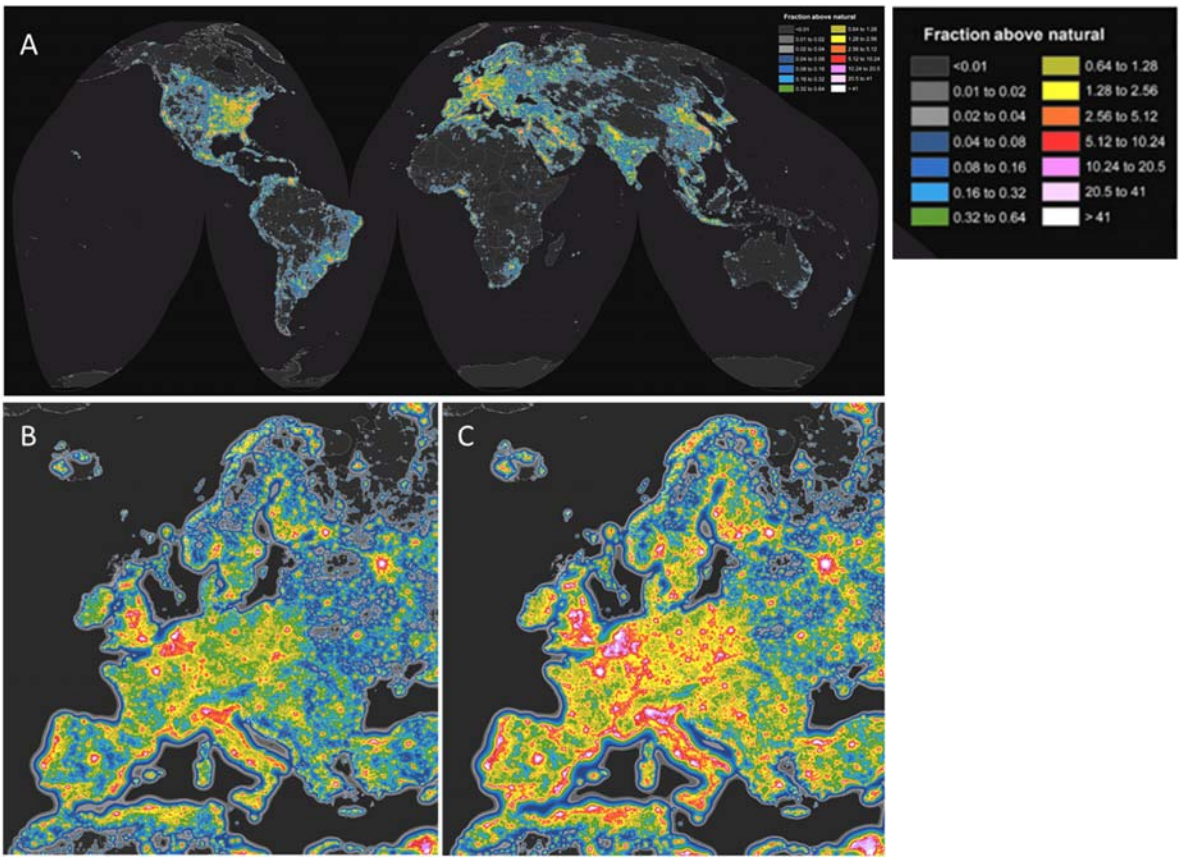
7.6 Impact des LED sur le vivant

7.6.1 Avant-propos - L'éclairage artificiel nocturne ou *ALAN*

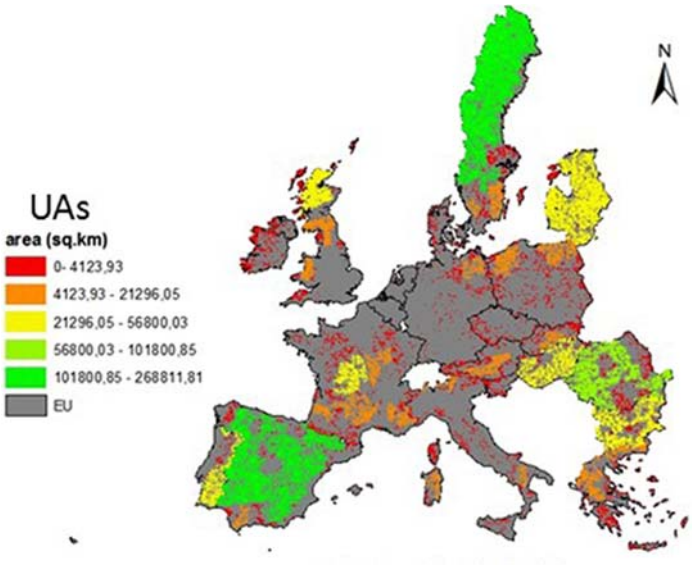
Les activités humaines sont presque exclusivement associées à des environnements fortement éclairés et le siècle dernier a vu une augmentation sans précédent de l'éclairage artificiel nocturne (ou *ALAN* pour *Artificial Light At Night*) de l'environnement comme des espaces naturels. Avec l'extension des zones urbaines et industrielles, terrestres et maritimes[59], l'augmentation des zones éclairées est de l'ordre de 6 % par an (Holker *et al.*, 2010) (*cf.* Figure 128). Les régions méditerranéennes et tempérées, les mangroves, les zones forestières près des zones agricoles sont particulièrement impactées (Bennie *et al.*, 2015b; Votsi *et al.*, 2017). Aujourd'hui, plus de 80 % de la population mondiale - et jusqu'à 99 % en Europe et Amérique du Nord - vit sous un « ciel éclairé » de nuit (Falchi *et al.*, 2016) et le phénomène est en expansion dans les pays du Moyen Orient (Tamir *et al.*, 2017) et asiatiques (Jiang *et al.*, 2017).

Les zones éclairées de nuit le sont directement et indirectement par diffusion (il s'agit du halo nocturne produit par des flux lumineux orientés directement vers le ciel ou par réflexion sur les surfaces éclairées, puis diffusés par différentes couches de l'atmosphère ; voir aussi chapitre 6). Au niveau du sol, l'éclairement produit peut atteindre celui de la pleine lune, compris entre 0,01 et 1 lux (Bennie *et al.*, 2015a; Bennie *et al.*, 2016) et peut même être amplifié selon le plafond nuageux (*cf.* Figure 129). Le premier objectif visé par l'*ALAN* était la détection des obstacles au cours des déplacements urbains et péri-urbains et la sécurisation des zones « dangereuses ». Par la suite, il s'est agi d'étendre les phases d'activité - à toute heure du jour et de la nuit - pour les besoins industriels autant que touristiques ou commerciaux. Si l'éclairage fonctionnel est généralement dimensionné sur la base des exigences minimales pour d'évidentes raisons économiques, les niveaux d'éclairement vont parfois très au-delà des simples exigences fonctionnelles. Certains domaines accordent plus d'importance aux aspects esthétiques (mises en lumière de monuments) ou publicitaires (éclairage des zones commerciales, vitrines, enseignes et affiches lumineuses). Il s'en suit que les surfaces non artificiellement éclairées et dédiées aux espaces naturels - essentiels au développement de la vie sauvage - ne cessent de diminuer. Les conséquences sur le biotope et ses occupants (dont l'Homme) sont multiples. Les effets sur les individus et les populations sont maintenant directement mesurables. Car pendant des millénaires, l'Homme, à l'instar des autres êtres vivants de la planète, a vécu en harmonie avec son milieu naturel, tout particulièrement avec les alternances journalières et saisonnières de l'éclairage aujourd'hui remises en question par l'*ALAN*.

[59] (https://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=55167)



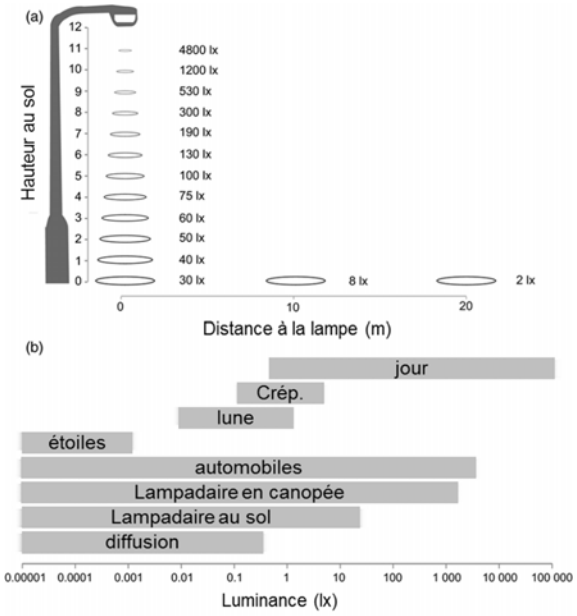
A, B : clarté du ciel nocturne dans le monde*. Cartographie obtenue par mesures et simulations numériques.* ***A****. Clarté (étendue visible) donnée par l'éclairage nocturne traditionnel dans le monde ; la gamme de couleur indique la luminance du ciel par fractions au-dessus du seuil nocturne naturel (174 µcd/m²).* ***B****. Détail sur la zone Europe.* ***C****. Prédiction de la clarté si les lampes à décharge sont remplacées par des sources éclairage LED (blanche, 4 000 K) de même flux et de même distribution angulaire d'intensité (Falchi et al., 2016).*



***D : estimation du pourcentage de surfaces non éclairées de manière artificielle en Europe**. Les surfaces non éclairées (en km²) vont du rouge pour les plus faibles, aux vertes pour les plus fortes. Il ressort que l'ouest de l'Europe est fortement impacté (avec seulement 12 à 16 % de zones obscures en France, Espagne, et Allemagne et plus de 80 % dans les Pays Baltes et scandinaves) (Votsi et al., 2017)*

Figure 128 : clarté du ciel nocturne en A et B, puis prédictions pour un passage en éclairage à LED en C. En D : estimation des surfaces non éclairées artificiellement en Europe

Figure 129 : éclairage de rue urbain



*(**a**) éclairement produit par un luminaire public muni d'une lampe à décharge de type halogénure métallique ;*

*(**b**) comparaison des éclairements produits par les éclairages naturels et artificiels. L'échelle horizontale est l'éclairement vertical au sol en lux (lx).*

Crép. :: crépuscule.

D'après (Bennie et al., 2016)

Les données actuelles indiquent que les réponses de tout type, liées aussi bien à la phototaxie, au phototropisme ou à la chronobiologie, sont affectées par l'*ALAN*. Ces réponses sont le résultat de millions d'années d'adaptation ayant conduit à la mise en place de stratégies qui permettent aux organismes d'adapter leurs fonctions vitales à la nature et aux variations de l'éclairage naturel. Ceci est particulièrement vrai pour les aspects liés au décodage de l'information temporelle (rythmes journaliers, lunaires, saisonniers). Car à de

très rares exceptions près (voir chapitres 7.4 et 7.5 plus haut), il n'est pas de fonction, métabolique, physiologique ou comportementale qui ne soit sous contrôle d'horloges biologiques circadiennes (± 24 h) et circannuelles dans l'ensemble du règne vivant,. Si l'on considère le rôle prépondérant que la lumière joue dans l'organisation rythmique journalière et saisonnière des êtres vivants, on comprend aisément que toute perturbation des cycles photopériodiques naturels (alternance du jour et de la nuit) par l'*ALAN* est de nature à entrainer des perturbations d'envergure de la synchronisation des horloges et donc de tous les processus rythmiques qui en dépendent. Les répercutions observées à ce jour résultent d'effets directs et/ou indirects :

- les effets directs résultent de la désorganisation du système circadien et de tous les rythmes endogènes qui en découlent en tête desquels celui de la sécrétion de mélatonine, l'hormone « donneuse de temps » (Dominoni *et al.*, 2013b). La mélatonine synchronise nombre de fonctions dont les rythmes du sommeil, le métabolisme énergétique, la prise de poids, la synchronisation de sécrétions hormonales et davantage ; elle est de plus un antioxydant (Reiter *et al.*, 1997). Chez l'Homme, une corrélation a été établie entre l'*ALAN* d'une part et l'obésité ou la sensibilité à certains cancers hormonaux dépendants (sein, prostate) d'autre part (Gaston *et al.*, 2013 ; Dominoni *et al.*, 2016). Une première étude chez le poisson rapporte l'induction de tumeurs ovariennes par l'ALAN, liée à une perturbation de l'horloge circadienne et de rythmes hormonaux (dont celui de la mélatonine) (Khan *et al.*, 2018).
- les effets indirects concernent l'immunité et la perturbation des cycles du sommeil et des régulations endocriniennes et cardiovasculaires.

La diversité des réponses reflète la diversité du vivant et ce qui peut être un avantage pour une espèce donnée, animale ou végétale, peut s'avérer un inconvénient pour une autre. Les altérations s'observent directement à plusieurs niveaux d'organisation dont les rythmes biologiques (journaliers et annuels), l'activité, la répartition, l'orientation et la migration. Il y existe également des effets indirects, observables à moyen et à long terme seulement, sur les populations dans leurs écosystèmes. Les approches doivent donc considérer aujourd'hui chaque espèce indépendamment mais aussi la place qu'elle occupe dans l'écosystème, dont l'Homme est partie intégrante. La Fondation pour la recherche sur la biodiversité[60] souligne la nécessité de « *Mieux comprendre les effets des changements […] sur la biodiversité, les écosystèmes et les services écosystémiques* » afin « *de mieux anticiper le devenir conjoint des systèmes naturels et des sociétés humaines pour faire face et s'adapter* [à ces] *changements* » afin de mieux aider à la prise de décision et à la gestion. Car qui dit changement dit survie seulement s'il y a adaptation, dans le cas contraire, c'est la disparition programmée. Et, dans tout écosystème - par définition un système d'interdépendances - la disparition, voire simplement l'adaptation partielle d'une ou de plusieurs de ses composantes, est en mesure d'affecter le système dans son ensemble dont le dysfonctionnement peut provoquer l'effondrement.

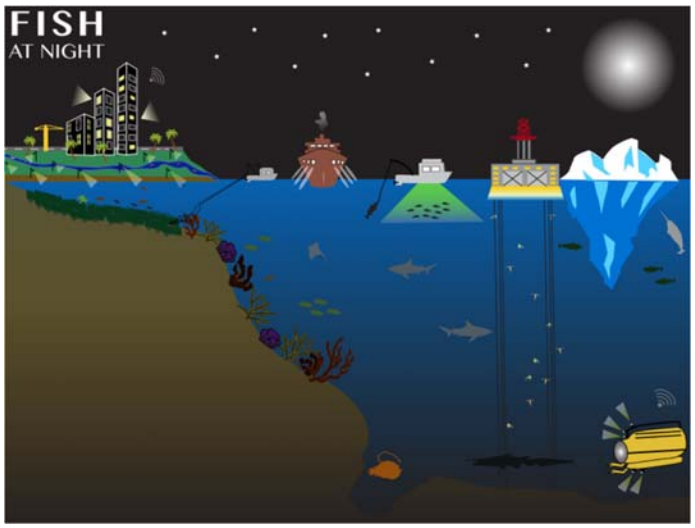
7.6.2 Conséquences de la généralisation des LED dans l'environnement extérieur

La problématique de l'utilisation des LED en milieu naturel ne peut être dissociée de celle de

[60] (http://www.fondationbiodiversite.fr/fr/)

l'impact de l'*ALAN (Artificial Light at Nigth)*. S'ajoutent à cela les spécificités liées à la technologie LED. L'utilisation des éclairages LED est croissante et leur omniprésence évidente dans un nombre de plus en plus large de champs d'applications technologiques, socio-économiques et commerciaux. Une variété de sources contribue à l'éclairage extérieur : les bureaux et domiciles dont les lumières diffusent par les parties vitrées, les lampadaires, véhicules de transports, panneaux de circulation, enseignes et affichages dans les zones commerciales (publicité) et touristiques (mise en valeur architecturale et paysagère), les zones industrielles (usines, serres de culture), ou de loisir (installations sportives d'extérieur et d'intérieur). Les milieux aquatiques ne sont pas épargnés, qu'il s'agisse des berges et côtes en milieux urbain et suburbain, des plateformes marines, routes commerciales ou zones de pêche (en particulier la pêche nocturne) hauturière (*cf*. Figure 130). Outre l'éclairage dirigé vers les surfaces (tel que montré aux Figure 129 et Figure 130), les divers types d'éclairages mentionnés plus haut contribuent également à la formation d'un halo lumineux nocturne résultant de la diffusion, dans l'atmosphère, de la lumière émise après avoir traversé eau et particules en suspension. Ces différents types d'éclairages constituent un ensemble en forte évolution avec l'arrivée de l'éclairage LED et l'extension des zones urbaines. Il est globalement défavorable à la préservation du ciel nocturne, même si pour certaines catégories (lampadaires par exemple) il permet *a priori* une réduction des zones éclairées et du halo lumineux, et une meilleure gestion temporelle de cet éclairage (*cf.* chapitre 6).

L'éclairage artificiel en général, et les LED en particulier, viennent allonger la liste des nombreuses pressions anthropiques qui, décennie après décennie, bouleversent des équilibres résultant de millions d'années d'évolution. Elles concernent l'arbre du monde vivant, dont l'Homme n'est qu'une branche parmi des milliers d'autres. Pourtant, dans la très grande majorité des cas, les études portant sur les impacts de tel ou tel facteur ne prennent en considération que les effets sur la santé humaine. Dans une vision très égocentrée, les impacts sur le règne animal et végétal sont considérés essentiellement dans le cadre d'une productivité visant à satisfaire les besoins humains. C'est le cas actuellement de la majorité des recherches portant sur les LED, initialement motivées par le souci de procurer des sources lumineuses plus efficaces et moins consommatrices d'énergie pour l'éclairage public (Nair and Dhoble, 2015). Les études actuelles mettent en avant les impacts et/ou avantages liés à leur utilisation en milieu contrôlé aux fins d'améliorer les productions animales et végétales et produits dérivés. Toutefois, les impacts sur les espèces non domestiquées et leurs interdépendances dans le milieu naturel, c'est à dire dans l'écosystème, sont rarement et insuffisamment pris en compte.



Berges, espaces côtiers, ponts, zones portuaires, plateformes, navires de pêche ou de transport contribuent à l'éclairage nocturne.

D'après (Hammerschlag et al., 2017)

Figure 130 : éclairages dans l'environnement aquatique

Les homologies entre la rétine humaine et celle des vertébrés en général autorisent à penser que certains effets des LED (positifs, négatifs ou neutres) sur l'humain (*cf.* chapitre 3.3) s'appliqueront à la rétine des autres vertébrés. Mais les comparaisons s'arrêtent là. En effet, les modalités de la capture de l'information lumineuse, les spectres de sensibilités ainsi que les impacts sur les horloges biologiques et donc sur les rythmes, diffèrent notablement d'un embranchement de vertébré à un autre ; et ces différences s'accentuent très significativement entre vertébrés et invertébrés, entre animaux, plantes et champignons, et enfin entre unicellulaires et pluricellulaires (voir plus haut).

En bref :

- les généralisations à partir d'observations réalisées chez l'homme sont réductionnistes et ne peuvent refléter la complexité du vivant ;
- les études ne peuvent se restreindre à la santé humaine ;
- les approches doivent considérer les effets sur les différentes composantes d'un écosystème ainsi que sur leurs interrelations ;
- les investigations portant sur l'impact des LED en milieu naturel, doivent s'intégrer dans celles, plus générales, portant sur l'impact de l'éclairage artificiel ;
- l'adaption de l'Homme aux modifications qu'il engendre soulève par ailleurs des questions d'éthique vis-à-vis des autres composantes de l'environnement vivant.

7.6.3 LED et microalgues, plantes, champignons

Les effets de l'éclairage (LED ou autre) sur les champignons et les végétaux dépendent de leur capacité à percevoir la gamme des fréquences lumineuses (*cf.* Figure **130**). Le Tableau 29 résume les effets des différentes fréquences sur le métabolisme et la physiologie des plantes.

7.6.3.1 Utilisation en milieu fermé à des fins industrielles

Nombres d'études font ressortir l'intérêt à utiliser des LED en milieu fermé pour la culture des plantes d'intérêt agronomique, ornemental ou médical (Yeh *et al.*, 2014 ; Nair *et al.*, 2015 ; Singh *et al.*, 2015 ; Dueck *et al.*, 2016 ; Urrestarazu *et al.*, 2016), des champignons (Wu *et al.*, 2013 ; Kim *et al.*, 2014) et des microalgues unicellulaires (Schulze *et al.*, 2014). Les lumières dans le bleu profond et l'UV s'avèrent utiles afin d'éliminer les infections bactériennes et virales (Yeh *et al.*, 2014 ; Kumar et *al.*, 2016 ; Kim *et al.*, 2017). Une combinaison proportionnée de lumière bleue et rouge/infrarouge permet d'obtenir les effets optimaux désirés, en matière de métabolisme (photosynthèse, synthèse de lipides, de production énergétique), germination, division cellulaire, bourgeonnement, croissance, floraison, valeur nutritive et gustative, ou encore production industrielle de composés à haute valeur ajoutée (ergostérol, carotène…). L'impact des lumières vertes a été peu étudié. Toutefois, les effets de la longueur d'onde ou du cocktail de longueurs d'ondes utilisé dépendent de l'espèce et, au sein d'une même espèce, de la variété et du stade de développement. De plus, ces effets varient avec l'intensité, le positionnement, la périodicité ou les fréquences d'exposition *(*Dueck *et al., 2016 ;* Hernandez *et al.*, 2016). Par exemple, les cyanobactéries croissent de façon préférentielle sous des lumières vertes jaunes et rouges, alors que les microalgues croissent préférentiellement en lumière bleue ($420 < \lambda < 470$ nm) ou rouge (autour de 660 nm).

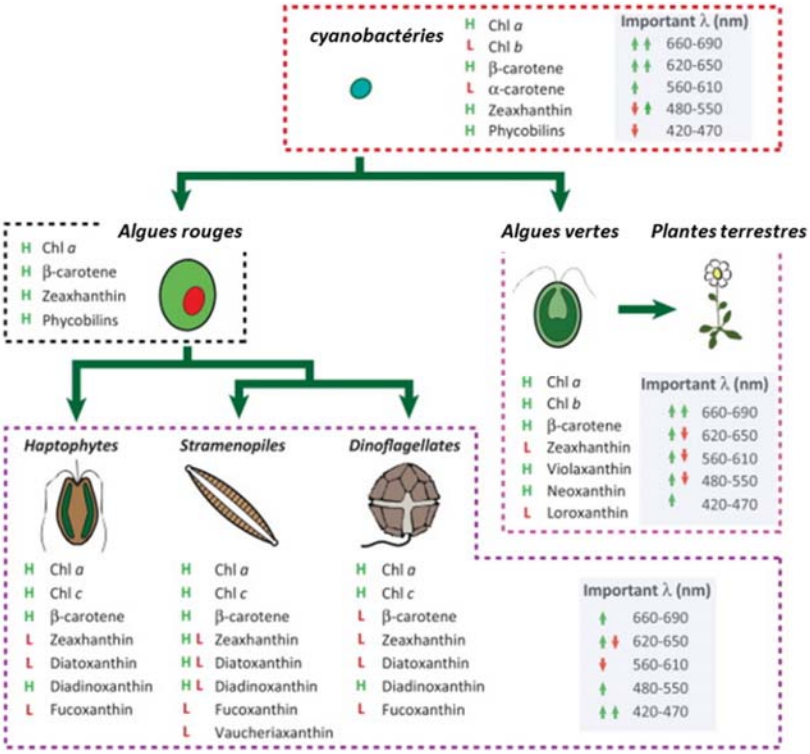
Tableau 29 : effets de la longueur d'onde sur les plantes

Longueur d'onde (nm)	**Impact**
280 - 315	Impact minimal sur la morphologie et la physiologie
315 - 400	Absorption par la chlorophylle faible, effets sur l'activité cyclique & la croissance (tissus & tige)
400 - 520	Absorption par la chlorophylle & les caroténoïdes maximale ; photosynthèse maximale
520 - 610	Absorption par les pigments diminuée
610 - 720	Absorption par les pigments faible : impact sur la photosynthèse et l'activité cyclique
720 - 1 000	Absorption minimale, effets sur la photosynthèse, la floraison et la germination
> 1 000	Conversion en chaleur

Source : (Xu et al., 2016)

Si l'utilisation des LED dans l'industrie agroalimentaire présente des avantages prometteurs, elle n'en est encore qu'au stade expérimental. Et, toute étude doit se faire au cas par cas car une meilleure connaissance des processus physiologiques (incomplètement élucidés) participant aux réponses de l'organisme concerné est nécessaire (une recommandation qui s'applique aussi au règne animal (Delabbio, 2015)). En effet, des dangers pourraient exister comme suggéré par deux études sur la mâche (*Valerianella locusta*) indiquant que les plantes peuvent accumuler des composés bénéfiques tels des polyphénols (Dlugosz-Grochowska *et al.*, 2016 ; Wojciechowska *et al.*, 2016) et aussi non désirés comme les

nitrates (Wojciechowska *et al.*, 2016) selon les proportions de lumière rouge et bleue utilisées.



Photopigments et longueur d'onde photosensible des unicellulaires et plantes terrestres.

Chl, chlorophylle; H, pigment abondant; L, pigment peu abondant; H L, Pour plus de détails voir aussi le tableau 1 dans (Schulze et al., 2014).

Figure 131 : photopigments et longueur d'onde photosensible des unicellulaires et plantes terrestres

En résumé, il apparait que des études supplémentaires au cas par cas sont nécessaires : « *For practice, more research is needed to optimize plant distances, light strategies and light intensities to make the technology more profitable and durable* » (Nair *et al.*, 2015 ; Moerkens *et al.*, 2016).[61]

7.6.3.2 Utilisation en milieu naturel

7.6.3.2.1 Les unicellulaires

En dehors de l'utilisation de LED à UV pour la désinfection, les études de populations en milieu naturel restent rares même si le milieu aquatique n'est pas épargné par l'*ALAN*. Il a été montré que des LED blanches (6 300 K, *Barthelme GmbH*, Nüremberg, Allemagne) affectent de façon variable les populations de microorganismes, en particulier les photoautotrophes (ceux qui utilisent la lumière comme source d'énergie et le CO_2 comme source de carbone) (Holker *et al.*, 2010). Ainsi, dans les populations de diatomées et de cyanobactéries sédimentaires affectées par l'*ALAN*, on observe (1) des modifications

[61] « Pour l'application pratique, plus de recherche est nécessaire pour optimiser les distances des plantes, les modalités d'application et les intensités de la lumière afin de rendre la technologie plus rentable et plus durable ».

quantitatives de différents représentants, (2) une perte des variations annuelles de ces populations, (3) une diminution de leur activité respiratoire et (4) une redistribution des populations microbiennes sédimentaires (*cf.* Figure 132). Les auteurs concluent que ces variations sont de nature à modifier le cycle du CO_2 et à induire une accumulation de carbone dans les sédiments (Holker *et al.*, 2010). Ces données confortent celles observées en milieu fermé.

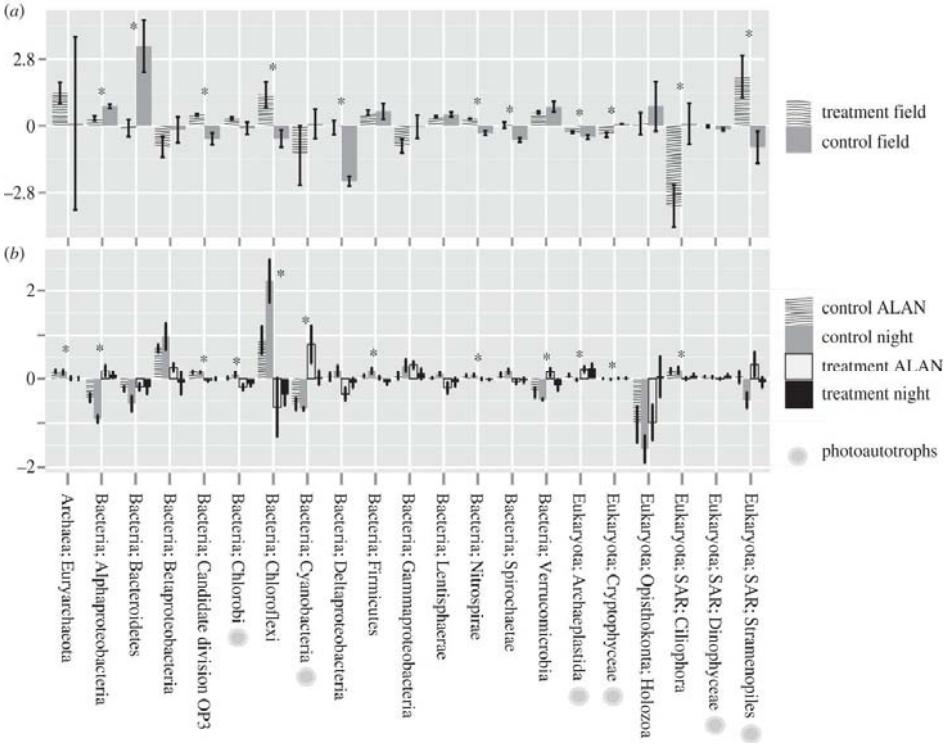


Figure 132 : modification de représentants des populations microbiennes dans les sédiments induites par l'*ALAN* en milieu aquatique naturel (a) ou en laboratoire (b)

L'expérimentation a été menée entre juillet et décembre 2012, les données ont été acquises en décembre. Les positives indiquent un accroissement et les négatives une diminution des populations. ALAN *(LED) = 71 lux, ~1,3 mmol/m2/s. field, terrain ; treatment, éclairés ; night, nuit.*

7.6.3.2.2 Les plantes

Comme indiqué plus haut, la lumière joue un rôle central dans la physiologie et l'écologie des plantes. Ces dernières utilisent la lumière à la fois comme source d'énergie, *via* la photosynthèse, et comme source d'information. Ainsi, les cycles naturels de lumière - qui varient selon le moment de l'année, en durée, intensité et composition spectrale - permettent la synchronisation des horloges circadiennes et fonctions sous-jacentes ; ils contrôlent le phénotype, la croissance et le métabolisme énergétique. Il a été montré que l'intensité de l'éclairage utilisé en milieu urbain, suburbain aussi bien que sur les axes routiers, est suffisante pour affecter la physiologie des plantes (Bennie *et al.*, 2016). Les effets décrits de l'éclairage nocturne (LED y compris) portent sur la coloration des feuilles des arbres, leur rétention/abscission (sur les arbres à feuilles caduques), le bourgeonnement, la floraison, la croissance ou encore la défense par rapport aux pathogènes.

7.6.4 LED et Animaux

7.6.4.1 Utilisation à des fins industrielles

Dans le règne animal, la qualité (λ), la quantité (intensité) et la durée (photopériode) de l'exposition à la lumière jouent un rôle majeur dans la régulation du métabolisme, de la physiologie et du comportement (Maisse *et al.*, 1996 ; Malpaux *et al.*, 1996 ; Falcón *et al.*, 2007b ; Falcón *et al.*, 2010 ; Rocha *et al.*, 2013 ; Espigares *et al.*, 2017). Depuis plusieurs décennies, les manipulations de la lumière environnante font partie des techniques utilisées dans les élevages afin de contrôler la prise alimentaire, le développement précoce, la croissance et la reproduction (Delabbio, 2015). Les résultats font ressortir l'existence de particularités selon l'espèce et même au sein d'une même espèce, selon l'âge, le sexe ou la localisation géographique et selon les caractéristiques de l'éclairage utilisé (Pan *et al.*, 2015).

L'utilisation des LED en remplacement des éclairages conventionnels dans les élevages aquacoles, avicoles et mammaliens fait l'objet d'une campagne intensive de promotion particulièrement visible sur le *web* (Delabbio, 2015). On y souligne l'avantage apporté par les LED qui permettent de mieux cibler le stimulus lumineux pour un coût moindre. Les applications sur le terrain visent à comparer les effets des éclairages LED et conventionnels sur la croissance, la prise alimentaire et le coefficient de conversion, la prise de poids, la production d'œufs ou encore le comportement (agressivité, exploration) (Huber-Eicher *et al.*, 2013 ; Pan *et al.*, 2015 ; Yang *et al.*, 2016).

Ces dernières années ont vu une augmentation notable du nombre de travaux rapportant l'impact des LED sur la biologie d'espèces aquatiques et terrestres. Les données restent cependant encore éparses et insuffisantes et ne permettent pas de tirer de concluisions définitives. Quelques exemples sont rapportés ci-dessous :

Chez les insectes, les LED ont été mises à profit pour sélectionner les longueurs d'ondes favorisant la capture ou la reproduction (Miyatake *et al.*, 2016 ; Oonincx *et al.*, 2016).

Chez les coraux, un impact positif des LED comparativement à d'autre sources lumineuses est rapporté sur la croissance de *Stylophora pistillata*, mais pas sur celle d'*Acropora formosa*, des espèces ornementales (Rocha *et al.*, 2013). Chez *Galaxea fascicularis,* les effets dépendent de l'irradiance (Wijgerde *et al.*, 2012).

Chez le mollusque (*Haliotis discuss* H.) une étude exhaustive souligne les effets différentiels (positifs et négatifs) de LED monochromatiques (rouge, orange, vert, bleu, violet) sur les réponses liées au métabolisme de base (protéique et glucidique), la consommation d'oxygène et la production d'ammoniaque (Xiaolong *et al.*, 2016).

Chez les poissons, plusieurs études (la majorité émane cependant du même groupe) rapportent l'impact de différentes longueurs d'ondes sur la croissance, le contrôle hormonal de la reproduction, le stress et la pigmentation, les rythmes biologiques (expression de gènes horloge, sécrétion de mélatonine), l'activité thyroïdienne (T3, T4) et l'expression de gènes de la perception lumineuse (rhodopsine, mélanopsine) (Jung *et al.*, 2016b ; Takahashi *et al.*, 2016). D'une façon générale, toutes ces études soulignent l'intérêt et l'application potentielle des LED de lumière blanche, mono- ou dichromatiques, en élevage ouvert ou fermé, mais soulignent la nécessité d'expérimentations supplémentaires et approfondies. Dans le domaine de la pêche, quelques données indiquent que les LED sont déjà utilisées par les pêcheurs afin d'attirer les espèces d'intérêt (Park *et al.*, 2015a ; Kehayias *et al.*, 2016).

Chez les oiseaux, les LED sont de plus en plus utilisées dans les élevages aviaires, en

particulier ceux de poulet (*Gallus domesticus*), en remplacement des éclairages conventionnels (Huber-Eicher *et al.*, 2013 ; Parvin *et al.*, 2014b,a). Les objectifs visent à réduire le stress tout en améliorant la croissance et la ponte. Les études disponibles utilisent des protocoles variés (qualité, intensité, périodicité et durée des expositions, âge des animaux) de sorte qu'une vision homogène n'est pas encore disponible. Ainsi, l'éclairage LED rouge avance la maturation sexuelle tout en diminuant l'agressivité comparativement à l'éclairage LED vert ou blanc (Gongruttananun, 2011 ; Huber-Eicher *et al.*, 2013). Ces effets sont dus à la qualité et non à la quantité de lumière fournie. Les LED vertes favorisent quant à elles la croissance et la taille des œufs (Parvin *et al.*, 2014a). De même, les LED bleues, vertes ou jaunes, utilisées seules ou en combinaison, favorisent les défenses immunitaires et la qualité de la chair (Parvin *et al.*, 2014b). Les dernières revues dans le domaine soulignent la nécessité de poursuivre les recherches sur ces aspects aux fins de normalisation des intensités, durées et longueur d'onde d'exposition (Parvin *et al.*, 2014a).

7.6.4.2 Utilisation en milieu naturel

7.6.4.2.1 Insectes

Un des problèmes majeurs posé par les éclairages nocturnes est l'attraction qu'ils exercent sur les communautés d'insectes. Les lampes LED (froides ou chaudes) attirent un nombre important d'insectes, toutes espèces confondues comme le montre une étude réalisée dans l'Ohio (États-Unis) (Knop *et al.*, 2017) ; cependant l'effet est deux fois moindre que les lampes à incandescence à énergie équivalente (Justice and Justice, 2016). D'une façon générale, les quelques études se rapportant au pouvoir d'attraction des LED sur les insectes montrent que l'effet observé dépend de la qualité de la lumière et de l'espèce (Longcore *et al.*, 2015 ; Park *et al.*, 2015b ; Silva *et al.*, 2015 ; Wakefield *et al.*, 2015 ; Acharya *et al.*, 2016). Par exemple, aux Pays-Bas le nombre de phalènes brumeuses (*Operophtera brumata,* papillons) capturées en extérieur est plus important dans les zones directement éclairées par les LED que dans les zones d'ombre et l'effet est plus important dans le vert, puis dans le blanc et enfin dans le rouge (Geffen *et al.*, 2015).

La prise alimentaire est également inhibée, et ce quelle que soit la qualité de la lumière (en mWatt/m$^{2:}$ 36,5 [vert], 42,3 [blanc] et 76,3 [rouge]). Là encore, les effets varient selon l'espèce (Van Langevelde *et al.*, 2017).

Enfin, l'activité sexuelle est perturbée par l'éclairage nocturne. Différentes longueurs d'onde inhibent l'activité sexuelle des femelles et l'attraction des mâles pour ces femelles (qui produisent moins de phéromone spécifique) (Geffen *et al.*, 2015). Ici, l'effet des différentes longueurs d'ondes est inverse de celui observé sur l'attraction (c'est à dire rouge > blanc > vert). Enfin, la prise alimentaire est considérablement réduite chez les papillons nocturnes

7.6.4.2.2 Vertébrés

Il existe peu de données rapportant l'impact des LED en milieu naturel chez les vertébrés. Il convient dans l'état de s'appuyer sur les données relatives à l'*ALAN* et, quand cela est possible, les comparer à celles où les LED ont été expérimentées en laboratoire ou en extérieur. Dans l'état, il n'y a plus de doute sur le fait que l'*ALAN* affecte la phototaxie ; la migration et le système circadien (et donc les fonctions et comportements qui en découlent) et l'idée selon laquelle il en est de même avec les LED émerge, appuyée par les toutes premières données obtenues ces 5 dernières années.

Poissons

L'éclairage nocturne faible (0,1, 1, 10 ou 100 lux) induit une inhibition de la production de mélatonine chez la perche, *Perca fluviatilis*, quelle que soit la longueur d'onde LED utilisée (Brüning *et al.*, 2016).

L'éclairage LED de nuit affecte la fonction de reproduction des poissons à plusieurs niveaux. Les LED blanches (1 lux) induisent une inhibition de l'expression des gonadotropines (FSH et LH) chez la femelle, alors que les longueurs d'ondes monochromatiques (bleue, verte ou rouge) n'ont pas d'effet (Brüning *et al.*, 2016). Chez les poissons demoiselle, *Chrysiptera parasema* et *Chrysiptera cyanea*, l'exposition nocturne à la lumière LED monochromatique favorise la maturation des gonades contrairement à la LED blanche (Shin *et al.*, 2013 ; Yeh *et al.*, 2014). Toutefois, chez le premier, ce sont les longueurs d'onde verte et bleu de faible intensité qui sont les plus efficaces, alors que chez le second c'est le rouge. La production d'estradiol est également stimulée chez *C. parasema* (Shin *et al.*, 2013). Ces données s'accordent avec celles obtenues chez le carassin (*Carassius auratus*) éclairé de jour par des LED monochromatiques (Song *et al.*, 2015). La lumière verte induit des taux plus élevés de gonadotrophines lesquelles en sus augmentent l'expression de la VAL-opsine.

Certains comportements sont également affectés chez les poissons côtiers. Ainsi, le *Black Bass*, *Micropterus dolomieu* qui nidifie et protège sa progéniture, voit son activité locomotrice - et donc sa dépense énergétique -, anormalement élevée en présence d'un éclairage nocturne continu ou intermittent (mimant la circulation automobile) (Foster *et al.*, 2008). L'éclairage intermittent est le plus « agressif ». De plus, la protection de la progéniture est également désynchronisée, rendant plus aléatoire la survie des alevins. Les poissons de rivière sont également affectés.

Chez la perche truitée, *Micropterus salmoides*, les lumières LED de toute longueur d'onde induisent un comportement de fuite lorsqu'elles sont appliquées de jour en remplacement de la lumière naturelle (Sullivan *et al.*, 2016).

Chez le saumon atlantique, un poisson migrateur qui nait en rivière, se nourrit en mer et revient se reproduire dans sa rivière de naissance, l'heure de l'émergence des alevins, leur dispersion et appropriation du territoire sont retardées et désynchronisées dès 1 lux et au-delà d'une illumination nocturne (Riley *et al.*, 2015). Dans ces conditions, des répercussions sur la survie sont attendues (concurrence pour les ressources du milieu, exposition aux prédateurs).

Batraciens

Il a été montré en laboratoire (en utilisant une lumière équivalente à celle produite par un éclairage de rue, soit 14 700 fois l'éclairage de la pleine lune) que l'éclairage par des LED blanches affecte la distribution nocturne des individus ainsi que le choix du substrat naturel préféré (plus ou moins opaque et plus ou moins nutritif) des salamandres (*Ambystoma laterale* et *A. jeffersonianum*) ; ce n'est pas le cas des grenouilles (*Rana sylvaticus*) (Feuka *et al.*, 2017). Les auteurs concluent que ces choix sont de nature à affecter la survie des deux espèces ; les salamandres doivent choisir un substrat de moindre qualité nutritive et les grenouilles, qui ne migrent pas, sont davantage exposées aux prédateurs nocturnes.

Reptiles

Il est bien établi que la lumière côtière représente un danger majeur pouvant conduire à l'extinction, pour les différentes espèces de tortues marines de par le monde (Pendoley *et al.*, 2015 ; Brei *et al.*, 2016 ; Truscott *et al.*, 2017). La lumière côtière de nuit altère le choix du lieu de nidification ou l'abandon du nid en cours de nidification, ou encore provoque la ponte en mer. L'émergence des jeunes, qui s'effectue essentiellement de nuit, est également altérée (Brei *et al.*, 2016) et celles ayant atteint la mer rebroussent chemin s'il y a éclairage

(Truscott *et al.*, 2017). Ces phénomènes sont aggravés par le fait que les tortues reviennent souvent sur le même lieu de ponte.

L'impact des LED sur le comportement des tortues marines a été peu investigué. Robertson *et al.* (Robertson *et al.*, 2016) ont étudié l'impact de LED émettant dans le rouge (bande étroite, 600-670 nm, λ_{max} = 640 nm) ou le jaune (bande large, 600-750 nm, λ_{max} = 620 nm) chez la caouanne (*Caretta caretta*) sur plusieurs sites de la côte est australienne. À intensité égale, les 2 longueurs d'ondes induisent une désorientation totale des jeunes juste éclos dans leur course vers la mer. L'effet maximal est obtenu avec la couleur ambre, et en absence de lune. Ils dépendent du nombre de spots d'éclairage. Selon les auteurs, l'éclairage côtier est de nature à mettre en jeu la survie de cette tortue que l'on retrouve dans les océans du monde entier.

Oiseaux

Les données relatives à l'impact de l'*ALAN* sur les oiseaux sont abondantes. Ils sont particulièrement touchés par la lumière de nuit, laquelle affecte la phototaxie, l'orientation et la migration et altère les rythmes endogènes journaliers et annuels *(Dominoni et al., 2013b ; Zhao et al., 2014 ; Ronconi et al., 2015 ; de Jong et al., 2016b ; Dominoni et al., 2016 ; Krüger et al., 2017; Foster et al*., 2018). On note plus d'une soixantaine de publications sur les trois dernières années. De l'ensemble, il ressort que l'*ALAN* exerce un pouvoir d'attraction et une désorganisation du système circadien chez les oiseaux sédentaires et migrateurs. Ces effets sont observés autant sur terre que sur mer où la lumière émise par les plateformes de forage et d'extraction, et navires associés, ont des effets notables. Les oiseaux sont attirés par la lumière et désorientés. La collision sur les structures solides (ou le contact avec les flammes des cheminées de rejet) ont des effets dramatiques, entrainant la mort de centaines, voire de milliers d'individus (Ronconi *et al.*, 2015 ; Krüger *et al.*, 2017 ; Rodriguez *et al.*, 2017). Ces effets peuvent varier en fonction de la qualité et de l'intensité de l'éclairage utilisé: les plus toxiques étant les lampes aux halogénures métalliqueset les moins toxiques celles à Sodium, les LED occupant une position intermédiaire (Ronconi *et al.*, 2015). De plus, lorsque la collision est évitée, les oiseaux migrateurs tournent en cercles autours des plateformes, peut être en relation avec le fait que certains nécessitent un ciel étoilé pour s'orienter (Foster *et al.*, 2018). Ceci a des conséquences sur la trajectoire et le temps de migration, la dépense énergétique et finalement, là encore, sur la survie.

En dehors de ces effets directs létaux, l'*ALAN* induit des effets indirects à travers la désorganisation du système circadien (*cf.* ci-dessous).

Chez plusieurs espèces d'oiseaux, dont la mésange charbonnière *Parus major* (Ouyang *et al.*, 2015 ; Raap *et al.*, 2015 ; de Jong *et al.*, 2016a ; Raap *et al.*, 2016a ; Raap *et al.*, 2016c ; de Jong *et al.*, 2017), le merle *Turdus merula* (Dominoni *et al.*, 2013a) et le tisserin *Ploceus philippinus* (Singh *et al.*, 2012), les lumières LED couvrant un spectre large (450 à 700 nm) affectent le rythme journalier d'activité (locomotrice et chant), la qualité du sommeil et son rythme, ainsi que la production nocturne de mélatonine. En laboratoire, les effets sont dépendants de la dose (0,05 à 5 lux) et de la composition spectrale (de Jong *et al.*, 2016a ; de Jong *et al.*, 2017). En milieu urbain (éclairage conventionnel), la mésange évite, quand cela est possible, l'illumination nocturne (de Jong *et al.*, 2016b). Si l'*ALAN* n'affecte pas les marqueurs de stress oxydatif (Casasole *et al.*, 2017), on note qu'en milieu urbain les taux de corticostérone sont plus élevés chez les mésanges éclairées par des LED blanches, rouges, bleues ou vertes (8,2 ± 0,3 lux) (Ouyang *et al.*, 2015). Les effets dépendent de la longueur d'onde et de la distance du nid à la source de lumière. Le nombre d'oisillons est également diminué dans les nids éclairés et une corrélation négative ressort entre le nombre d'oisillons et les taux de corticostérone d'une part (Ouyang *et al.*, 2015), et la distance à la source de

lumière d'autre part (de Jong *et al.*, 2015). Dans des conditions similaires, aucun n'effet ne fut observé sur le gobemouche noir (*Ficedula hypoleuca*). En laboratoire, un éclairage nocturne de 3 lux à l'aide de LED à spectre large diminue les niveaux de mélatonine tout en augmentant des marqueurs du stress oxydatif à court terme chez l'oisillon de mésange de 13 jours (Raap *et al.*, 2016b).

L'*ALAN* a un effet sur le rythme annuel de reproduction des oiseaux (Le Tallec, 2014 ; Longcore *et al.*, 2015). Ainsi, chez le merle (*T. merula*), une lumière blanche de 0,3 lux induit une avance de phase d'un mois sur le système reproducteur (taille et fonctionnalité des testicules ; taux de stéroïdes) et sur la mue (Dominoni *et al.*, 2013a). De façon intéressante, ces paramètres varient différemment selon que les merles étaient capturés en ville ou en forêt, ce qui suggère que l'habitat induit des modifications adaptatives chez l'espèce. Des données similaires ont été obtenues chez le geai de Californie, *Aphelocoma californica*, où les taux de mélatonine, de testostérone et d'œstradiol ainsi que ceux de l'hormone lutéinisante (LH), sont altérés par l'éclairage nocturne faible (3,2 ± 0,2 lux), correspondant à celui mesuré dans les zones suburbaines de la ville de Davis (Californie, États-Unis (Schoech *et al.*, 2013)). L'effet induit une inhibition de la fonction de reproduction de façon différentielle selon le sexe. Chez l'oiseau moqueur (*Mimus polyglottos*) et le merle américain (*Turdus migratorius*), l'*ALAN* induit des modifications de l'heure de chant et du comportement de cour (effet dépendant de l'intensité de l'éclairage de nuit) ainsi qu'un démarrage avancé de la saison de reproduction (Longcore, 2010).

Enfin, l'impact de l'illumination nocturne continue ou ponctuelle sur les horloges est probablement à l'origine de retards de développement observés au niveau de l'œil chez les jeunes oiseaux (de même que chez les primates) et à l'origine d'amétropie (Nickla *and* Totonelly, 2016).

On soulignera ici que, d'une façon générale, ces données s'accordent avec celles obtenues sur sites avec les éclairages conventionnels urbains (Raap *et al.*, 2016b) et que, là encore, les effets diffèrent selon l'espèce (par exemple entre les migrateurs terrestres et marins), le sexe et la zone géographique et l'éclairage considéré.

Mammifères

Les données chez les mammifères sont encore rares et concernent un nombre limité d'espèces. Pour les espèces de laboratoire telles que le rat, elles concernent essentiellement l'impact de la lumière sur la structure et la fonction de la rétine (Dauchy *et al.*, 2016). L'influence potentielle des LED sur la santé et le bien-être animal n'a été que très peu explorée. Dauchy et ses collègues ont comparé l'impact de l'éclairage diurne à base de lampes fluorescentes à celui de LED blanches à intensité égale, mais avec une plus forte composante bleue, sur les rats *Rattus norvegicus* (Dauchy *et al.*, 2016). Il ressort que les taux de mélatonine nocturne sont 7 fois plus élevés chez les rats éclairés en LED comparativement aux autres. De plus, la prise alimentaire, la boisson, la croissance et les taux lipidiques de différents tissus sont significativement réduits chez les premiers comparativement aux seconds, alors que c'est l'inverse pour les taux de protéines. Dans le sang, le rythme de la concentration d'O_2 artériel n'est pas altéré, celui de la concentration en CO_2 reste en phase, mais montre des taux plus élevés chez les éclairés LED. Les niveaux de glucose, leptine, lactate, corticostérone sont diminués. Cependant, le rythme de leptine plasmatique montre un retard de phase, alors que ceux de glucose et lactate montrent plutôt une avance de phase chez les animaux éclairés avec des LED, comparativement aux témoins. Chez les chevaux, 1 h d'éclairage LED à une longueur d'onde de 458 nm induit une inhibition de la sécrétion nocturne de mélatonine à partir de 3 à 10 lux d'éclairement (Walsh *et al.*, 2013).

Chez le hamster (*Phodopus sungorus*), les gonades, la masse corporelle, le nombre de spermatogonies sont réduits en hiver, le pelage blanchit et s'épaissit. L'éclairage nocturne (lumière blanche de qualité non définie) de 5 lux abolit toutes ces manifestations et l'animal présente une activité de type estival (Ikeno *et al.*, 2014). De plus, l'expression d'un certain nombre de gènes est altérée, dont le gène horloge Per1, celui du récepteur à la mélatonine Mel1a, ou les gènes impliqués dans le développement (eye3) ou la reproduction (TSH, GnIH, GnRH). Enfin, l'activité locomotrice et la réponse immunitaire sont altérées. De la même façon, chez la souris (*Mus musculus*) exposée aux mêmes conditions, l'activité locomotrice, la température corporelle et la réponse immunitaire sont altérées (Fonken *et al.*, 2014).

Chez le microcèbe (*Microcebus murinus*), les effets de l'exposition à un éclairage nocturne par des LED blanches (0,3 lux) mimant l'éclairage lunaire ont été comparés à ceux de l'exposition à la lumière de la pleine lune (Le Tallec *et al.*, 2016). Après 5 semaines, on note des modifications des rythmes (phase et amplitude) de température corporelle et d'activité locomotrice chez les deux sexes, été comme hiver (*cf.* Figure 133). Dans le groupe exposés aux LED, la fréquence et la durée des phases de torpeur sont diminuées, l'œstradiol urinaire est plus élevé chez les femelles en œstrus et en pré ou post-œstrus, l'activité locomotrice est réduite, et les taux de testostérone et la taille des testicules augmentent avec le temps d'exposition chez les males (*cf.* Figure 133).

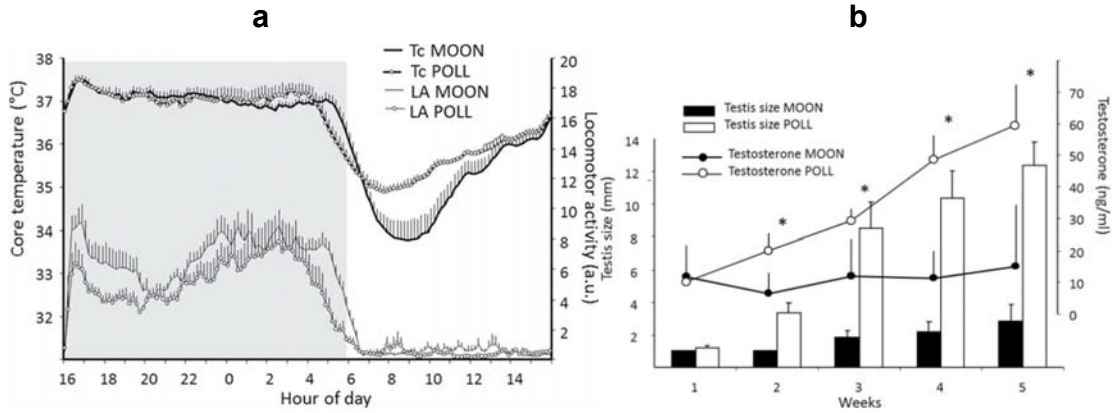


Figure 133 : évaluation de l'impact de l'exposition aux LED sur la température corporelle, la taille des testicules et les taux sanguins chez le microcèbe

a : chez le microcèbe mâle ou femelle, la température corporelle (Tc) et l'activité locomotrice (LA) sont altérées chez les animaux éclairés de nuit par une lumière LED blanche de 0,3 lux (POLL), comparativement à ceux soumis à la lumière lunaire (MOON). b : la taille des testicules (testis) et les taux sanguins de testostérone sont accrus (Le Tallec et al.*, 2016).*

La documentation la plus abondante concernant les mammifères se rapporte à la famille des chauves-souris (Azam, 2016). Les études de terrain indiquent que la lumière nocturne a un impact plus important sur la distribution de différentes espèces de chauves-souris (*Pipistrellus pipistrellus ; Eptesicus serotinus ; Pipistrellus kuhlii ; P. nathusius ; Nyctalus leisleri*) que la colonisation des terres par les espaces urbains et agricoles (Azam, 2016). Une étude portant sur une quinzaine d'espèces indique deux grands types de comportements selon que les chauves-souris sont tolérantes ou intolérantes (et donc désavantagées) à l'éclairage nocturne (Lacoeuilhe *et al.*, 2014).

En résumé :

- les études d'impact des LED et de l'*ALAN* sur le vivant ne peuvent être dissociées. Les recherches sur les premières s'appuient encore beaucoup sur celles menées sur l'*ALAN*.
- elles concernent un nombre très limité d'espèces. Les généralisations restent difficiles.
- tous les organismes vivants sont concernés. Les effets varient considérablement selon l'espèce et, au sein d'une même espèce, selon le sexe, l'âge ou la répartition géographique et les caractéristiques de l'éclairage (dose, spectre, etc.).
- les études en milieu contrôlé visent essentiellement à améliorer les productions agro-alimentaires. Celles en milieu ouvert, moins abondantes, concernent l'adaptation des espèces aux conditions imposées.
- phototaxie, phototropisme et horloges biologiques sont à la base des réponses des organismes aux stimuli LED et ALAN. L'impact sur les horloges laisse supposer des effets multiples en cascade dont tous sont loin encore d'être élucidés.

S'il est de plus en plus évident que LED et *ALAN* sont de nature à impacter les êtres vivants, deux aspects sont encore insuffisamment explorés. Le premier concerne les répercussions sur l'écosystème : si un facteur anthropique - tel que LED ou *ALAN* - a des effets sur les espèces, il est logique de supposer qu'il affectera également, de manière indirecte, les communautés liées par une chaine trophique ou symbiotique (Bennie *et al.*, 2015a ; Bennie *et al.*, 2015b ; Sanders *et al.*, 2015 ; Bennie *et al.*, 2016). Le second concerne la multiplicité des facteurs anthropiques : *ALAN*, pollution chimique, échauffement climatique, réduction des espaces naturels et obstacles physiques, etc. forment un ensemble dont la somme peut résulter en des effets plus qu'additifs ; sans exclure les effets masquant que peuvent avoir certains facteurs sur d'autres. Ce dernier aspect, d'importance capitale, est toutefois le plus mal connu car le plus difficile à étudier. Ces questions sont abordées ci-dessous.

7.6.5 LED et écosystèmes

Un écosystème englobe une association d'organismes vivants et leurs interactions entre eux et avec leur environnement abiotique (physique et chimique). Les écosystèmes terrestres incluent les forêts, prairies, déserts, zones humides et grottes. Les écosystèmes aquatiques incluent les cours d'eau, lacs, estuaires, mers et océans. Ils permettent différents processus d'importance vitale telles que le maintien à l'équilibre des populations, la pollinisation, la dispersion des graines, la purification de l'eau et de l'air, la stabilisation des sols, la décomposition et le recyclage des déchets, etc. La Figure 134 souligne l'interdépendance des composantes d'un écosystème donné quelle que soit sa nature.

Les écosystèmes sont mis à mal par les activités humaines (anthropisation) comme l'urbanisation, les exploitations minières, la déforestation, les pollutions physiques (telles que la lumière et la température) et chimiques (insecticides, pesticides, métaux lourds, nanoparticules, plastiques, etc.) et induisent des déséquilibres,(Kunz *et al.*, 2011). Le dérèglement climatique, avec en particulier la hausse des températures et l'acidification des mers et océans, est également un facteur perturbateur qui ne peut être négligé.

Il est important de souligner que toute perturbation d'une ou de plusieurs composantes d'un écosystème entraine nécessairement des répercussions sur l'ensemble, pouvant aller jusqu'à sa destruction, comme détaillé ci-dessous.

7.6.5.1 Forces descendantes, ascendantes et non-trophiques

Les effets directs d'une pression anthropique telle que l'*ALAN* sur une seule espèce peuvent entraîner des effets indirects en cascade et de grande envergure sur l'ensemble de l'écosystème dans lequel elle vit, qu'il soit marin, d'eau douce ou terrestre (Bennie *et al.*, 2015a ; Bennie *et al.*, 2016). Ces effets en cascade peuvent être descendants, ascendants ou de nature non-trophiques.

Dans l'effet descendant, l'impact initial porte sur un prédateur ou un parasite ou un herbivore dont la distribution et/ou l'abondance changent suite à l'attraction ou à la répulsion exercée par l'*ALAN*. Ces modifications sont de nature à provoquer des changements dans les populations sur lesquelles ils vivent (hôtes, proies ou plantes (Bennie *et al.*, 2015a)).

Dans l'effet ascendant, l'impact porte en premier sur une ressource alimentaire. Les prédateurs, les parasites ou ceux qui vivent des détritus seront alors impactés, à différents niveaux de la chaine alimentaire.

Les interactions dites non-trophiques,se réfèrent à l'impact provoqué par l'ALAN sur les espèces pollinisatrices ou celles responsables de la dispersion des semences (plus de 75 % des cultures mondiales dépendent, à des degrés divers, de la pollinisation animale)[62]. Il pourra s'agir aussi de la compétition pour une ressource entre espèces à activité diurne, nocturne ou crépusculaire dont les rythmes d'activité sont décalés dans la nature, mais altérés par les modifications de photopériode. Ces différents effets (1) peuvent être déclenchés par des changements au niveau du comportement, de la physiologie, de la densité d'une population ; (2) ont le potentiel de restructurer les communautés d'un écosystème, voire d'en affecter la biodiversité ; (3) se produisent dans une multitude de systèmes ; (4) dépendent de la saison, de la zone géographique ou encore de la nature de l'écosystème considéré (Bennie *et al.*, 2015a).

[62]https://www.iucn.org/fr/news/secretariat/201612/publication-des-rapports-d%E2%80%99%C3%A9valuation-de-la-biodiversit%C3%A9-sur-la-pollinisation-et-sur-les-sc%C3%A9narios-et-la-mod%C3%A9lisation

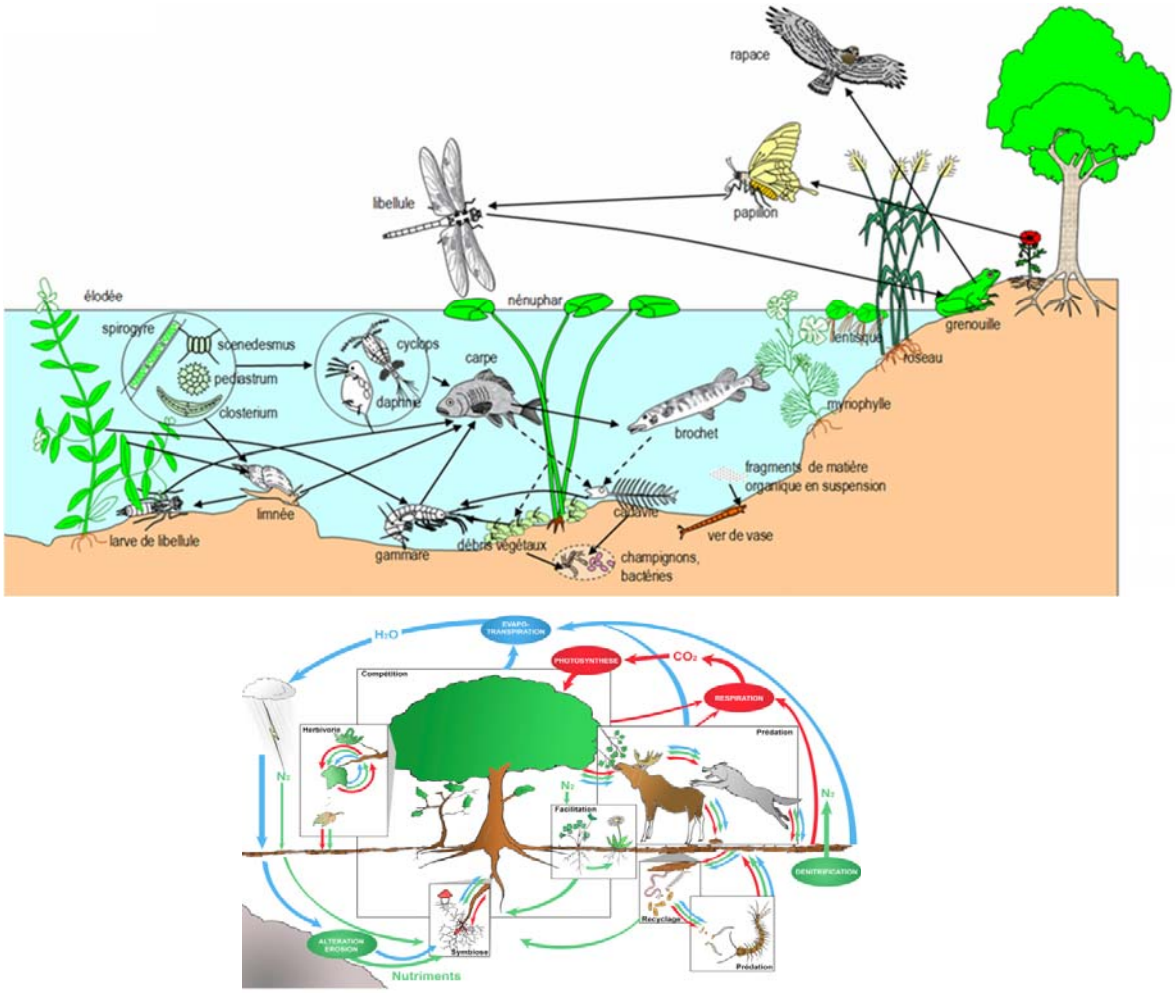


Figure 134 : écosystèmes et exemples d'interdépendances dans un écosystème aquatique (étang) en haut et terrestre en bas. L'Homme se situe au sommet des chaines alimentaires dans tous les cas

Source : http://svt.ac-dijon.fr/schemassvt/IMG/eco_etang.gif (image du haut), https://www.sfecologie.org/regard/regards-3-mouquet/ (image du bas)

Les études portant sur cet aspect de l'impact de l'*ALAN,* et *a fortiori* des LED, restent rares, quelques exemples sont rapportés ci-dessous.

7.6.5.2 Écosystème côtier : poissons brouteurs et invertébrés sessiles

Soixante pourcent des villes les plus grandes sont situées à moins de 100 km des côtes et plus de 20 % des zones côtières subissent l'*ALAN* (Bolton *et al.*, 2017). Une étude menée dans le port de Sydney (Australie) a montré que l'abondance des poissons, toutes espèces confondues, varie au cours du cycle de 24 h (*cf.* Figure 135). Certains de ces poissons se nourrissent d'invertébrés sessiles (coraux, éponges, oursins) lesquels adaptent leur activité (alimentation, reproduction *via* la libération des gamètes) au rythme imprimé par les prédateurs/brouteurs. L'éclairage LED nocturne (mimant l'éclairage urbain) modifie la distribution et l'alimentation des poissons dans le bassin ; en conséquence, la quantité d'invertébrés sessiles consommés au cours du cycle de 24 h est également modifiée. Celle-

ci devient anormalement élevée de nuit. L'effet sur les poissons prédateurs s'est répercuté sur les assemblages d'invertébrés sessiles à court terme (Bolton *et al.*, 2017). Sur le long terme, on peut raisonnablement supposer que la population d'invertébrés sessiles diminuera non seulement à la suite d'une consommation accrue, mais également en conséquence d'une altération de la fonction de reproduction, laquelle a lieu essentiellement de nuit. De plus, les éclairages LED (blancs froids) modifient les assemblages d'invertébrés sessiles et mobiles en diminuant certaines populations et en augmentant d'autres (Davies *et al.*, 2012).

Ainsi, les LED modifient les assemblages à plusieurs niveaux d'un écosystème, individuellement et de façon indépendante.

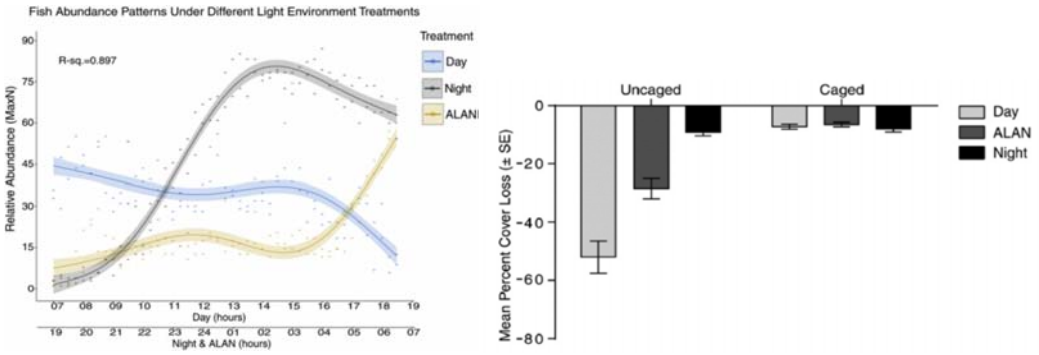


Figure 135 : impact des LED sur l'abondance des poissons et invertébrés sessiles dans le port de Sydney au cours du cycle de 24 h

*À gauche : le nombre de poissons et leur activité varie entre le jour (*Day *; tracé gris) et la nuit (*Night *; tracé bleu). Un éclairage LED nocturne (*ALAN *; tracé jaune) à des niveaux correspondant à ceux de l'éclairage urbain (4 050 lm, lumière chaude), induit une modification du* pattern *nocturne. À droite : Comparativement à la nuit, la perte d'invertébrés sessiles par broutage est plus élevée de jour ; en augmentant l'activité des poissons prédateurs l'*ALAN *accentue la perte nocturne. L'effet est observé sur les assemblages non protégés (*uncaged*), pas sur ceux sous abris (*caged*) (Bolton et al., 2017).*

7.6.5.3 Écosystème terrestre : redistribution des populations d'insectes

L'*ALAN* utilisant (ou non) des LED induit des redistributions dans les populations d'insectes (Meyer *et al.*, 2013 ; Davies *et al.*, 2017). On observe que lorsque certaines espèces augmentent, d'autres diminuent ; globalement le nombre d'espèces représentées (ou richesse spécifique) est significativement altéré. La taille et le poids des individus peuvent également être affectés. Ainsi, dans les rivières de l'Ohio (États-Unis), l'éclairage des berges à des niveaux de 10-12 lux induit une diminution de 44 % du nombre d'araignées *tetragnathidae*, de 16 % de la biodiversité et de 76 % de la taille corporelle moyenne des espèces. À l'inverse, la taille des arthropodes terrestres voisines est multipliée par 3 (Meyer *et al.*, 2013). Les auteurs concluent que l'*ALAN* altère la structure des communautés dans les systèmes humides ou qu'un échange a lieu entre milieux aquatique et terrestre.

L'éclairage de rue induit une redistribution des communautés d'insectes terrestres de surface près des sources de lumière, quelle que soit l'heure du jour ou de la nuit (Davies *et al.*, 2012 ; Bennie *et al.*, 2015a ; Davies *et al.*, 2017). Dans une expérimentation s'étalant sur 3 ans, l'équipe de Davies (Davies *et al.*, 2017) a montré que les éclairages nocturnes par des LED de différente nature et intensité modifient la distribution des espèces d'arachnides et de coléoptères au sol (*cf.* Figure 136). Les effets sont atténués sans être abolis, avec des éclairements d'intensité ou de durée réduites. Les espèces de prédateurs et de charognards sont les plus représentées près des zones éclairées, suggérant une altération de l'écosystème local.

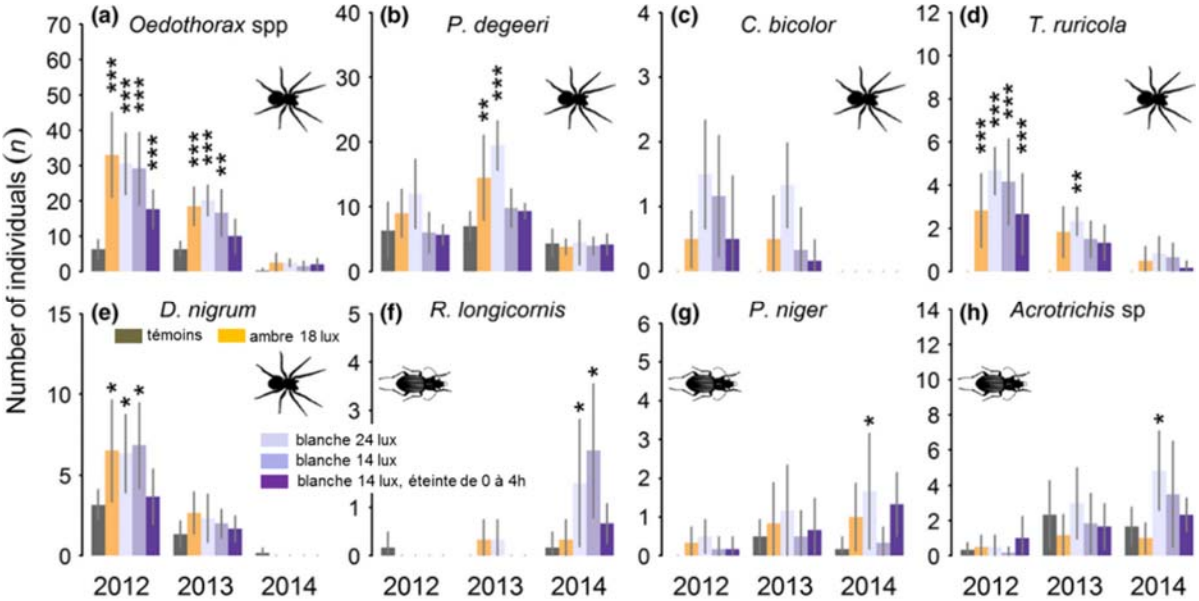


Figure 136 : impact de l'éclairage nocturne par des LED sur la distribution de populations d'araignées et de coléoptères

Tous les éclairages sont appliqués en continu sauf un, où la lumière est éteinte de 0 à 4 h du matin comme indiqué. L'éclairement de 24 lux correspond à celui obtenu au sol par les éclairages conventionnels (Bennie et al., 2016 ; Davies et al., 2017).

Les insectes volants sont également attirés par la lumière de nuit. Pawson & Bader (Pawson *et al.*, 2014) ont montré que le nombre d'insectes volants capturés était plus important de 48 % avec les lampes LED (4 000 K, Luxeon M, LXR7-SW40 ; Koninklijke Philips) qu'avec les lampes au sodium (Sunlux ACE, NH-360 FLX ; EYE Lighting). De plus, les effets LED sont optimaux quelle que soit la température de couleur de la lampe (de 2 700 à 6 500 K). Les auteurs suggèrent que le remplacement des lampes au sodium par les LED est de nature à aggraver les effets de l'*ALAN*. Ils suggèrent des conséquences aggravantes non prédictibles, relatives au fait que les LED attirent des espèces ravageuses au dépend d'espèces endémiques, telles le Bombyx disparate (*Lymantria dispar*) auxquels les chenilles s'attaquent. D'autres études (Macgregor *et al.*, 2015b ; Macgregor *et al.*, 2017) montrent que les papillons de nuit sont, dans leur grande majorité, attirés par les lampes de rue, délaissant les champs et les zones près du sol où leur population se réduit de près de 50 %. Près des lampes, la biodiversité est également réduite de 25 %. Si leur activité est augmentée, ils transportent moins de pollen que ceux des régions non éclairées. Ceci suggère un impact possible sur les plantes dont la pollinisation dépend de ces espèces.

Une étude sur divers sites a été réalisée en milieu naturel comportant une variété de plantes (*Cirsium oleraceum ; Eupatorium cannabinum, Valeriana officinalis, Epilobium angustifolium et Silene vulgaris*) qui n'avaient jamais subi l'*ALAN* au préalable (Knop *et al.*, 2017). La moitié des sites (7) furent éclairés de nuit en utilisant des lampadaires équipés de LED (Schréder GmbH, type: Ampera Midi 48 LED, blanches [4 000 K ; 6 800 lm]) ; l'autre moitié est restée dans l'obscurité (Knop *et al.*, 2017). Il ressort que l'*ALAN* réduit de 62 % les visites d'insectes nocturnes pollinisateurs avec des effets négatifs sur la production des plantes concernées. De plus, un impact indirect affecte également les espèces pollinisatrices diurnes, avec au final une réduction générale des plantes ainsi que des insectes qui en dépendent (*cf.* Figure 137).

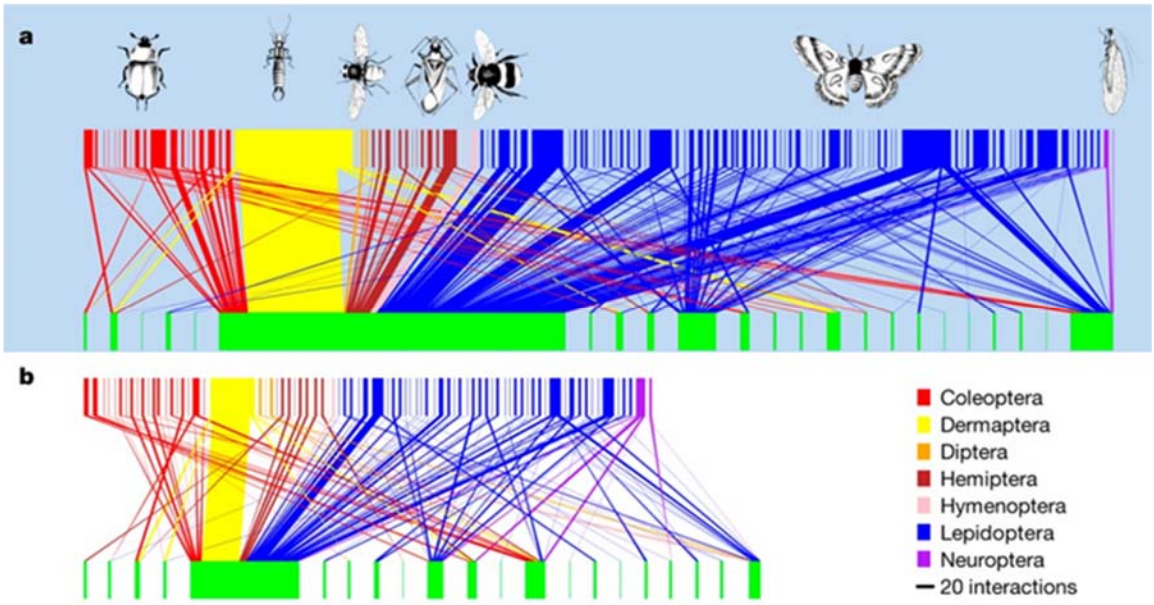


Figure 137 : effet de l'éclairage LED sur les populations d'insectes pollinisateurs et les plantes concernées

Les 7 sites sombres sont en (a) et les 7 sites éclairés en (b). Les rectangles en haut représentent les espèces d'insectes, ceux en bas les espèces de plantes. L'épaisseur est proportionnelle à la quantité. Les lignes de liaison représentent les interactions entre les espèces. On note une réduction importante de l'ensemble des composantes de l'écosystème ; pour les espèces animales cette diminution est indépendante de leur mode diurne (exemple : abeilles) ou nocturnes (exemple : certains papillons) (Knopp et al.,2017).

Une augmentation de l'activité nocturne due à l'*ALAN* affecte également les mammifères terrestres. La majorité d'entre eux (69 %) sont des espèces nocturnes. Une corrélation inverse très nette existe entre les surfaces du globe soumises à l'*ALAN* et la richesse en espèces de mammifères (Duffy *et al.*, 2015). Les souris (Rotics *et al.*, 2011a ; Rotics *et al.*, 2011b) et les petits mammifères des forêts tropicales (Bengsen *et al.*, 2010) sont moins actifs dans leur recherche de nourriture, afin de minimiser les risques de prédation. À l'inverse, les espèces diurnes et crépusculaires étendent sous *ALAN* le temps d'activité et de prédation, en particulier les insectivores qui se nourrissent d'insectes attirés par la lumière des lampadaires (Lacoeuilhe *et al.*, 2014 ; Minnaar *et al.*, 2015 ; Russ *et al.*, 2015). À cet égard, les chauves-souris offrent un cas d'étude exemplaire (*cf.* ci-dessous).

7.6.5.4 Écosystème terrestre : chauves-souris insectivores et végétariennes

Les chauves-souris représentent 30 % des mammifères. Dix sept pourcent des 1232 espèces répertoriées sont en danger d'extinction. Ce sont les seuls mammifères volants. Leur activité nocturne est de loin la plus importante de tous les mammifères nocturnes connus. Elles effectuent des déplacements à courte et à longue distance. À courte distance, il s'agit de recherche de nourriture et, lors de naissances, de nombreux allers/retours pour nourrir la progéniture. Les déplacements à longues distances sont observés en particulier aux intersaisons (recherche de sites d'hibernations) ou aux transitions entre les phases d'activité ou de repos sexuel. Les chauves-souris montrent une grande richesse et diversité d'habitats (grottes, caves, arbres, etc.) et d'habitudes alimentaires, avec des espèces carnivores (insectivores pour la majorité, mais pas seulement) et végétivores (fruits, fleurs ou nectar). Elles occupent tous les étages de la chaine alimentaire, primaire, secondaire et tertiaire et jouent un rôle particulièrement important dans la régulation des populations

d'insectes (dont les nuisibles), la pollinisation ou la dispersion des graines (Boyles *et al.*, 2011 ; Kunz *et al.*, 2011). La durée, le commencement et la fin de l'activité nocturne sont spécifiques à chaque espèce, adaptés à leur différents modes de vie. Ainsi, les femelles allaitantes démarrent précocement au crépuscule par rapport aux autres individus. À l'inverse, les femelles gestantes et les espèces à vol lent commencent plus tard dans la nuit. Les insectivores (*Pipistrellus* spp. et *Nyctalus* spp.) ont des pics d'activité crépusculaires, c'est la présence des proies plutôt que les niveaux lumineux qui règle le mode d'activité, bien qu'en laboratoire les *Pipistrellus* montrent une certaine réticence à voler en environnement lumineux (Mathews *et al.*, 2015). En revanche, les chauves-souris glaneuses ou mangeuses de papillons nocturnes (*e.g.*, *Barbastella barbastellus*, *Myotis nattereri*, *M. bechsteinii*) sont davantage sensibles à l'éclairage et préfèrent l'obscurité complète.

Les observations réalisées en milieux naturel et urbain (utilisant des lampes à vapeur de sodium sous basse pression (LPS) ou des LED blanches) indiquent que l'*ALAN* affecte le comportement des chauves-souris (Polak *et al.*, 2011 ; Stone *et al.*, 2012 ; Lewanzik *et al.*, 2014 ; Leliavski *et al.*, 2015 ; Mathews *et al.*, 2015 ; Minnaar *et al.*, 2015 ; Azam, 2016 ; Rowse *et al.*, 2016 ; Lewanzik *et al.*, 2017b). Parmi les effets les plus notables, on observe un retard de la sortie des nichoirs et une diminution des capacités à se reproduire, une modification des vitesses et des itinéraires de vol (trajectoire, hauteur) ainsi que des collisions importantes (~25 %) avec l'obstacle éclairé (indiquant que l'écholocalisation n'est pas le seul moyen de repérage pour certaines espèces).

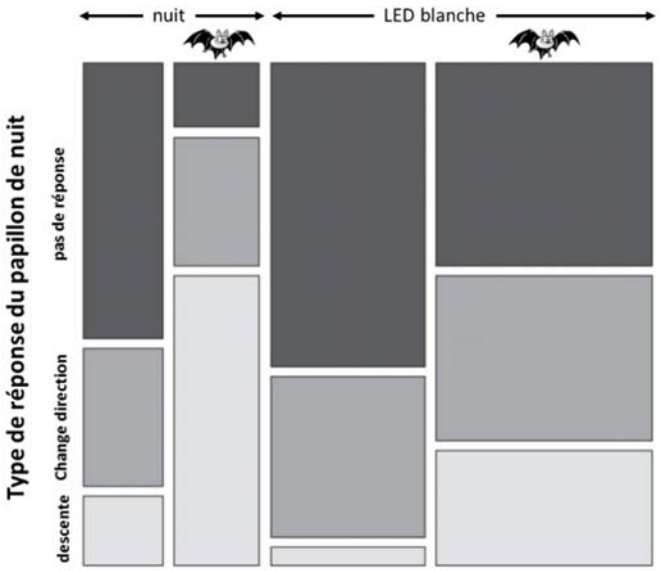
Les effets dépendent de l'espèce. Les chauves-souris glaneuses (à vol généralement lent), ou se repérant uniquement aux ultra-sons (*Rhinolophus* spp., *Plecotus* spp., *Myotis* spp.), sortent plus rarement et modifient leurs itinéraires en milieu éclairé de nuit. À l'inverse, certaines espèces insectivores à grande envergure et à vol rapide (*Lasiurus* spp., *Eptesicus* spp., *Nyctalus* spp., *Pipistrellus* spp.) sont attirées par l'*ALAN* (Lewanzik *et al.*, 2014 ; Mathews *et al.*, 2015 ; Azam, 2016 ; Lewanzik *et al.*, 2017a). Toutefois, ce comportement n'est pas une généralité : *Eptesicus bottae* accélère sa vitesse de vol et ne chasse plus les insectes (Polak *et al.*, 2011).

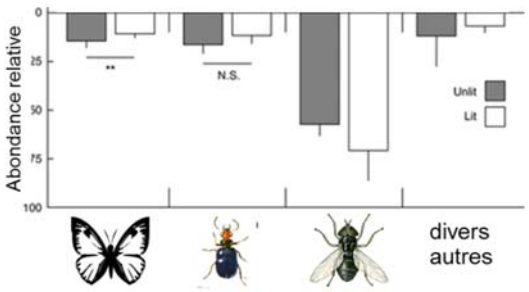
Selon Rowse, le remplacement des LPS par des LED (blanches) ne modifie pas la réponse des chauves-souris (Rowse *et al.*, 2016). Cependant, les expériences de terrain réalisées en Grande Bretagne à l'aide de LED blanches de différentes intensités confortent partiellement ces conclusions : les activités des espèces *Rhinolophus hipposideros* et de *Myotis* spp., à vol lent, étaient réduites y compris à des éclairements faibles de 3,6 lux, mais celles des espèces à vol rapide (*Pipistrellus pipistrellus, P. pygmaeus*, *Nyctalus* SPP., *Eptesicus* spp.) n'étaient pas affectées y compris à l'éclairement le plus fort (49,8 lux) (Stone *et al.*, 2012). Les auteurs concluent que les éclairages LED produisent des réponses complexes et spécifiques à l'espèce chez les chauves-souris ; ils insistent sur la nécessité d'étendre les recherches à d'autres groupes taxonomiques.

a. *Les papillons de nuit (Geometridae, Noctuidae ou Notodontidae) possèdent un système de détection des ultrasons émis par les chauves-souris (Nyctalus noctula) qui active la fuite par descente vers le sol. Ce comportement de fuite est mesuré de nuit ou sous éclairage de rue LED et en présence ou en absence de N. noctula.*

pas de modification ; déplacement en zigzag ; descente vers le sol. Le mouvement de descente est réduit en présence de lumière LED. Il est activé de nuit en présence du prédateur, mais de façon moins importante sous LED. La largeur des colonnes est proportionnelle à l'échantillonnage.

Modifié d'après [Wakefied et al., 2015]





b. *Les environnements éclairés de nuit attirent la chauve-souris du cap Neoromicia capensis. Les populations de papillons sont significativement réduites ; celles des coléoptères et des diptères est également affectée, mais de façon non significative.*

non éclairé (unlit) ; éclairé (lit)

Modifié d'après *[Minnaar et al., 2015]*

Figure 138 : interaction proie / prédateur

Quoiqu'il en soit, ces remaniements de populations ont un impact sur les populations d'insectes dont se nourrissent les chauves-souris, et plus particulièrement les papillons nocturnes (*cf.* Figure 138) (Minnaar *et al.*, 2015 ; Wakefield *et al.*, 2015). Ces derniers sont puissamment attirés par la lumière de nuit et c'est l'une des raisons pour lesquelles la population mondiale de papillons nocturnes est en constante diminution (Macgregor *et al.*, 2015a). Cette attraction entraine chez ces insectes nocturnes une perturbation du comportement (vol, recherche de nourriture ou de partenaire sexuel) et de la fonction de reproduction. De plus, la lumière de nuit altère également le système de détection des ultrasons dont certains de ces papillons sont pourvus, une stratégie adaptative qui permet de repérer le prédateur (*cf*. Figure 138). L'attraction vers la lumière attire la présence du prédateur et une consommation accrue du papillon devenu plus vulnérable. Une conséquence majeure est la réduction généralisée de la population de papillons de nuit et une redistribution des populations d'insectes du milieu (*cf.* Figure 138). Ce remodelage est susceptible d'avoir des conséquences sur l'ensemble de l'écosystème (Macgregor *et al.*, 2015a) :

- sur les plante, car les lépidoptères nocturnes sont parmi les plus grands pollinisateurs. La conservation de certaines plantes est donc susceptible d'être mise en question ;
- sur les autres prédateurs (araignées et petits vertébrés) qui se nourrissent de ces papillons.

En conséquence, si sur le court terme l'*ALAN* est un avantage pour les prédateurs volants, sur le moyen et le long terme apparaissent des désavantages, avec des risques de mortalité accrue par collision pour les chauves-souris et la raréfaction des proies conduisant à une dynamique populationnelle négative (Altringham *and* Kerth, 2015 ; Azam, 2016).

La survie de certaines plantes est susceptible d'être questionnée également par la diminution des populations de chauves-souris mangeuses de fruit et de nectar (Lewanzik *and* Voigt, 2014). *Carollia sowelli*, une espèce tropicale américaine, est repoussée par la lumière. En présence d'un éclairage de 4,5 lux (Lampe Sodium à Haute Pression, HPS) son activité est réduite de 50 %, sa consommation de fruits de 20 % et l'heure de cette consommation est repoussée de plus de 100 %. Compte tenu du rôle important joué par cette espèce dans la dispersion des graines de plantes de *Piperaceae* (poivrier) et *Solanaceae* (pomme de terre, tomate, aubergine, piment), les auteurs soulignent les potentielles conséquences néfastes que l'*ALAN* peut avoir sur la dispersion des graines et donc leur production (Macgregor *et al.*, 2015a). Ils concluent que les études d'impact de l'*ALAN* sur les chauves-souris et les plantes qui en dépendent (dont certaines d'importance économique et agroalimentaire (karité)) pour la dispersion de leurs graines et la pollinisation, nécessitent d'être étendues.

7.6.6 LED et autres facteurs biotiques et abiotiques

L'éclairage diurne ou nocturne (quelle que soit sa nature) n'est pas la seule pression anthropique exercée sur la nature. L'extension continue des activités humaines, industrielles et de loisir, conduit à une réorganisation permanente des espaces. L'extension des zones urbaines et périurbaines ainsi que des axes routiers, ferroviaires et maritimes, ou encore de certaines zones agricoles ou de loisir, entraine une diminution et une fragmentation des habitats naturels. À cela viennent s'ajouter les nuisances associées : obstacles, polluants physiques (lumière, bruit) et chimiques (perturbateurs endocrines, (polychloro-biphényles (PCB), stéroïdes de synthèses, pesticides organochlorés, détergents, etc.), métaux lourds,

etc.) auxquels viennent s'ajouter les effets du changement climatique (hausse des températures, acidification des océans). Dans l'organisme, nombre de ces facteurs ciblent les mêmes organes ou des organes associés et connectés, et la question a été posée de savoir quel effets peuvent avoir ces différents facteurs agissant simultanément et/ou successivement sur les individus et les écosystèmes (Mora *et al.*, 2007 ; Darling *et al.*, 2008 ; Côté *et al.*, 2016). Il apparait que l'action simultanée de plusieurs facteurs perturbants a des effets synergiques[63] ou coopératifs[64] dans plus de la moitié des cas. Par exemple, la population des rotifères décline lorsqu'il y a surexploitation, ou élévation de la température ou encore fragmentation de l'habitat et la vitesse de ce déclin est multipliée par cinquante lorsque ces facteurs agissent simultanément (Mora *et al.*, 2007). Dans d'autres cas, les effets sont additifs ou antagonistes (Mora *et al.*, 2007 ; Darling *et al.*, 2008 ; Côté *et al.*, 2016).

Il s'en suit que certaines populations animales seront vraisemblablement incapables de faire face à de multiples facteurs de stress, ce qui entrainera une accélération de la perte de la biodiversité (Novacek *et al.*, 2001 ; Folke *et al.*, 2004 ; Mora *et al.*, 2007).

Les données impliquant l'action combinée de multiples facteurs perturbants dont l'*ALAN* sont encore rarissimes.

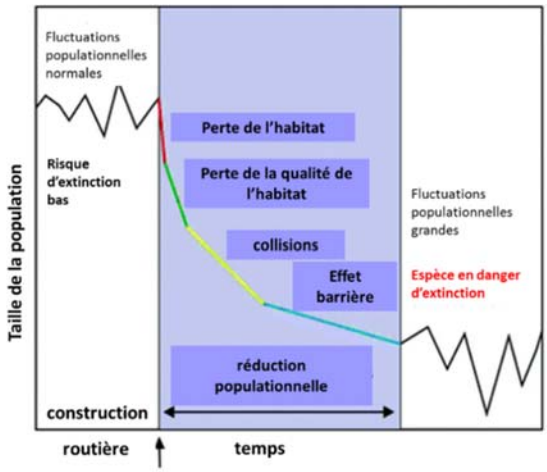
7.6.6.1 Quelques exemples impliquant l'*ALAN*

En zones urbaines, le bruit, la température et l'éclairage affectent le comportement de chant de la grenouille *Engystomops pustulosus*. Un parasite du batracien, la mouche Corethrella spp., est attirée par l'hôte lorsqu'il chante. L'action combinée de la lumière et du bruit diminue le chant de la grenouille, destiné à attirer les femelles (McMahon *et al.*, 2017). Il s'en suit aussi une diminution de l'attraction du parasite. Ainsi, l'action conjuguée de deux facteurs affecte le comportement de cour d'une espèce et son parasitage par une autre. La nécessité de considérer la multiplicité des facteurs anthropiques urbains dans les études d'impact sur les communautés s'impose.

La fragmentation de l'habitat, suite à la construction de voies de circulation, provoque une réduction substantielle des populations de chauves-souris mettant les espèces en danger. La décroissance de la population est due à une chaine de réactions en cascade (*cf.* Figure 139) : (1) la perte de l'habitat, (2) la perte en qualité de l'habitat, incluant, le bruit, l'*ALAN* et la pollution chimique (échappements), (3) les collisions avec les véhicules et structures solides, (4) la fragmentation de l'habitat (Altringham *et al.*, 2015). Aujourd'hui, les politiques publiques anglaises prennent en compte ces phénomènes dans des études préparatoires (Altringham *et al.*, 2015).

[63] L'effet final est distinct de tout ce qui aurait pu se produire si les facteurs responsables avaient opéré isolément.

[64] Les effets sont plus qu'additifs ; ils sont multipliés.



La construction d'une route (flèche verticale) a entrainé une fragmentation (effet barrière) et une diminution de l'habitat, une perte de qualité (lumière nocturne, bruit et pollution dues aux échappements des automobiles) et des collisions. Les effets cumulés, étalés dans le temps, entrainent une réduction de la population, mettant les espèces concernées en danger. L'ampleur des effets dépend des espèces.

(Altringham and Kerth, 2015)

Figure 139 : effets cumulatifs des facteurs de stress sur les populations de chauves-souris

Compte tenu de la rareté des exemples disponibles, il convient dans l'état de s'appuyer sur les connaissances acquises, lesquelles doivent permettre de modéliser l'action simultanée ou successive de multiples facteurs dont l'*ALAN*.

7.6.6.2 Exemple d'une cible probable d'impacts multiples : le système neuroendocrinien des vertébrés

Le système neuroendocrinien des vertébrés assure le contrôle de fonctions vitales telles que la croissance, la reproduction, le stress, l'immunité, la pigmentation ou le renouvellement du pelage, la prise alimentaire ou encore l'équilibre hydrominéral (*cf.* Figure 140). Ces fonctions sont dans leur grande majorité rythmiques. L'harmonisation des cycles journaliers et annuels passe par la capture des informations du milieu environnant *via* les organes sensoriels. Chez tous les vertébrés, la capture de la lumière par les yeux permet la vision et la synchronisation des horloges circadiennes (*cf.* flèches violettes à la Figure 140) (voir également les sections 3.3 et 7.5). Chez les vertébrés ectothermes (poissons, batraciens, reptiles) la glande pinéale permet en outre le phototactisme (voir précédemment la section 7.2). Dans tous les cas, la synchronisation des horloges fait intervenir la mélatonine d'origine pinéale (Falcón *et al.*, 2007a ; Falcón *et al.*, 2010). Les ectothermes doivent également intégrer l'information thermique captée au niveau de la glande pinéale et du cerveau : la température extérieure agit de façon indépendante et différentielle sur le métabolisme de base (selon des modalités dépendantes de l'espèce) et sur l'amplitude du pic nocturne de mélatonine (en rouge à la Figure 140). Ainsi, photopériode et température contrôlent, respectivement, la durée et l'amplitude du pic hormonal. Ce profil variable selon la saison permet à l'organisme de se repérer dans le temps. Les cibles de la mélatonine sont situées dans le cerveau et les organes périphériques, dont l'axe hypothalamo-hypophysaire et les glandes endocrines (flèches rouges à la Figure 140). L'interaction de deux facteurs de l'environnement assure donc le contrôle des rythmes journaliers et saisonniers des régulations neuroendocrines qui contribuent au maintien harmonieux des fonctions vitales. En réponse, les organes cibles (foie, gonades, surrénales, thyroïde, ...) produisent des hormones qui, en retour, exercent un rétrocontrôle positif ou négatif en amont (flèches vertes à la Figure 140).

Il ressort que dans ce système en boucle de contrôles et de rétrocontrôles, toute entrée

extérieure non naturelle est une source potentielle de déséquilibre. Dans le cas pris ici en exemple, l'*ALAN*, le changement climatique (*via* l'élévation de température pour les ectothermes), les perturbateurs endocriniens et métaboliques (*cf.* étoiles à la Figure 140), sont des sources multiples de déséquilibres affectant les métabolismes, la physiologie (dont le développement et le déterminisme sexuel, la croissance et la reproduction) et les comportements (voir précédemment (Scholz *et al.*, 2008 ; Casals-Casas *et al.* 2011 ; Lambert *et al.*, 2015 ; Bedrosian *et al.*, 2016)). À cela viennent s'ajouter les pressions résultant de la fragmentation et de la réduction des surfaces habitables, d'autres aléas du changement climatique (sécheresse ou montées des eaux, acidification des océans), les obstructions physiques et la prédation (y compris la chasse et la pêche de loisir ou industrielle et le braconnage). Il est donc raisonnable de supposer qu'une addition de perturbations est de nature à affecter les espèces et les écosystèmes, à l'image de l'exemple donné plus haut concernant les chauves-souris, celui du saumon atlantique, *Salmo salar*, offre un cas d'école.

.

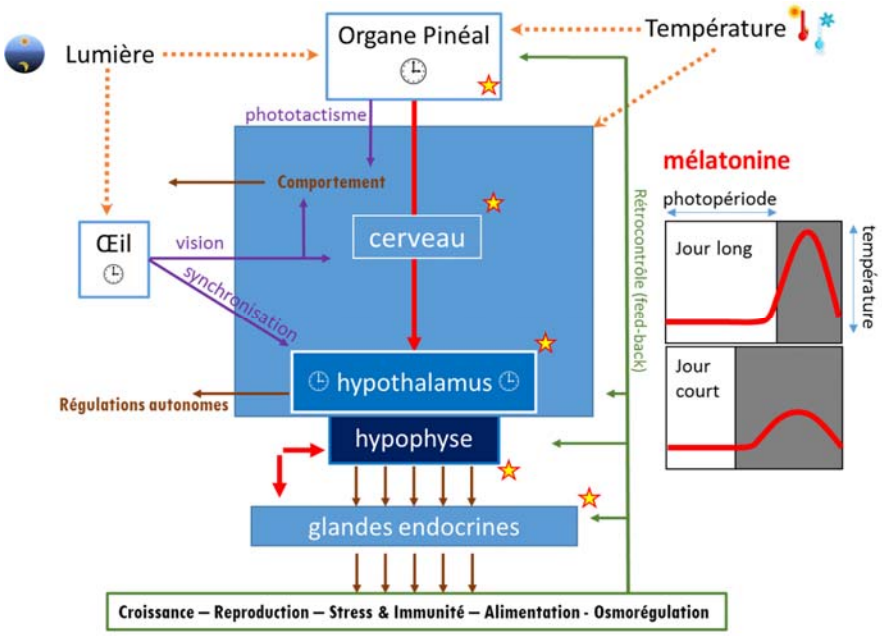


Figure 140 : contrôle multifactoriel des régulations neuroendocriniennes chez les vertébrés

Le scénario présenté ci-dessous concernant le saumon du bassin Loire/Allier (*cf.* Figure 141) est en en passe de se vérifier (expériences en cours). Le jeune poisson parcourt 800 km depuis son lieu de naissance pour gagner la mer où il part se nourrir (dévalaison) et où il reviendra se reproduire. Tout au long du parcours il est confronté à une série d'obstacles et de pressions d'origine anthropique : (1) une succession de barrages ; (2) l'*ALAN* en traversant villes et agglomérations, zones industrielles et portuaires ; la traversée sous les ponts est particulièrement agressive ; (3) la température trop élevée, en particulier près des centrales nucléaires (cylindres) qui rejettent de l'eau chaude (une température au-delà de 18/20 °C devient délétère pour le saumon) ; (4) les rejets polluants des villes et des campagnes ; (5) la pêche et le braconnage. À cela s'ajoutent les perturbations liées au changement climatique dont une élévation générale de la température et une acidification des océans. De plus, tous ces obstacles ralentissent le saumon dans son périple vers la

mer. S'il arrive hors délai, il ne survivra pas. En un siècle, la population de saumons du bassin est passée de dizaines de milliers d'individus à quelques centaines. Si les barrages physiques sont à l'origine des premières réductions de populations, les obstacles additionnels de toute sorte suite à l'urbanisation (*ALAN*, bruit, réchauffement, de l'eau, modification des débits, pollutions chimiques des villes et des campagnes) constituent une somme de facteurs aggravants. Des interactions de ce type ont été montrées en laboratoire en particulier pour les associations LED/perturbateurs endocriniens ou LED/température. Chez le perciforme *Oplegnathus fasciatus,* le bisphénol A (BPA) active, à différentes doses, les marqueurs hépatiques et plasmatiques du stress oxydatif et lipidique, la dégradation de l'ADN et l'apoptose cellulaire et diminuent la mélatonine et des immunoglobulines circulantes. Ces effets sont renversés si les poissons sont éclairés de nuit par une lumière LED verte (530 nm) mais pas rouge (620 nm) de 0,3 et 0,5 W/m^2 (Choi *et al.*, 2016). Des résultats similaires ont été obtenus chez le poisson rouge *C. auratus* (Jung *et al.*, 2016a). De plus, chez ce dernier, une élévation de température de 22 à 30 °C induit (1) une élévation du glucose, du cortisol et des hormones thyroïdienne (T3, T4) dans le sang et (2) des récepteurs T3 et T4 dans le cerveau, mais (3) une diminution des immunoglobulines hépatiques et plasmatiques (Jung *et al.*, 2016b). Là encore, un éclairage LED vert comme ci-dessus, ou l'administration de mélatonine, renversent ces effets.

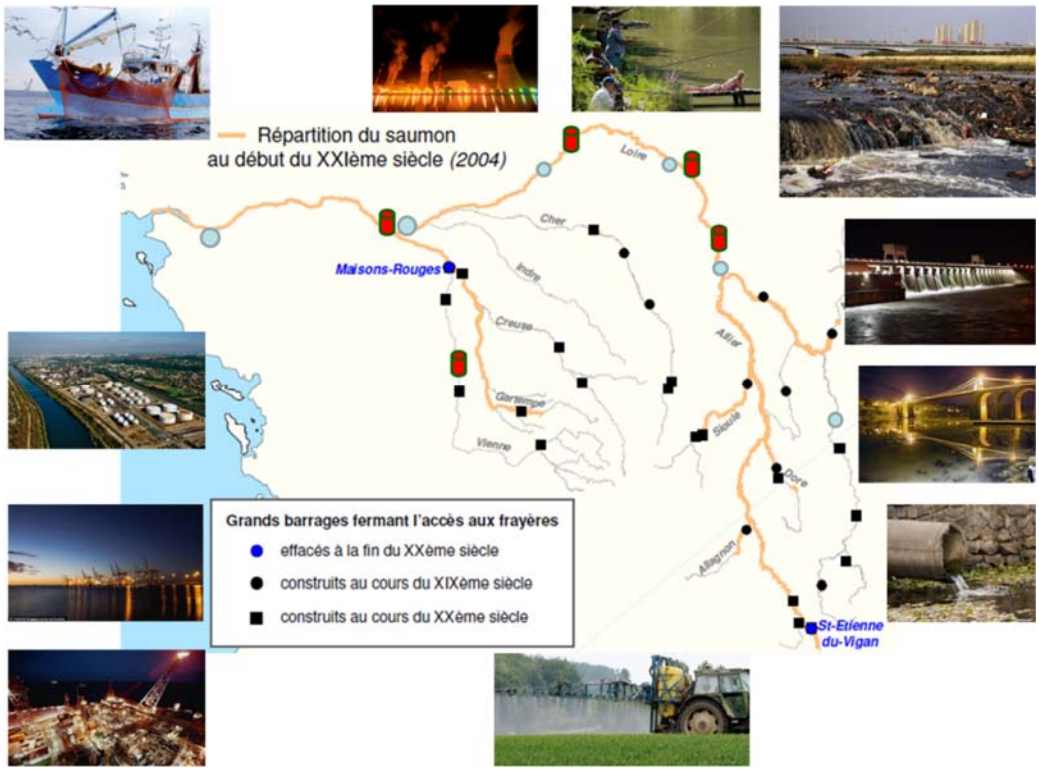


Figure 141 : la situation du saumon Atlantique *Salmo salar* - un cas d'école

Les cylindres en rouge marques la position des centrales nucléaires, les carrés et ronds celle des barrages. Les photos autour illustrent l'ensemble des types de dangers auxquels le saumon doit faire face

7.7 Résumé - conclusions - recommandations

7.7.1 Description du contexte

Les informations du milieu extérieur sont intégrées par les organismes vivant. Une bonne intégration des informations perçues est capitale car elle permet, d'une part de s'orienter dans l'espace et dans le temps et donc de favoriser la recherche des sources d'énergie (soleil, nourriture) et/ou du partenaire sexuel et, d'autre part, d'anticiper les variations prédictibles de l'environnement et donc de mieux s'y préparer. Il en résulte une nécessaire synchronisation de la myriade de fonctions rythmiques qui gouvernent les processus biologiques des individus, de la molécule à la cellule, de l'organe à l'organisme et jusqu'aux populations et écosystèmes.

Cette harmonisation est rendue possible par les horloges biologiques et le système circadien de mesure interne du temps.

La lumière et la photopériode sont des facteurs essentiels de la synchronisation des horloges biologiques.

À tous les niveaux d'organisation, les stratégies adaptatives mises en place par les organismes pour vivre en harmonie avec et leur environnement présentent une immense variété et complexité non seulement entre règnes (bactéries/archées, plantes, champignons, animaux), mais aussi entre familles, genres ou espèces et, au sein d'une même espèce, en fonction du sexe parfois, et de l'âge souvent. Variété et complexité se retrouvent également au niveau de nombreux facteurs (Bennie *et al.*, 2016) :

- les modes de capture de l'information visuelle et lumineuse dont la qualité, l'intensité et la fréquence d'application auront des effets aussi diversifiés qu'il y aura de modes de perception et d'intégration de l'information ;
- la très large variété des capacités spectrales (de l'UV à l'infrarouge) et des modes de conversion des informations captées en messages nerveux et/ou hormonaux ;
- les mécanismes des horloges biologiques ;
- la diversité et la complexité des réponses individuelles et populationnelles (écosystèmes) ;
- l'interaction avec d'autres facteurs anthropiques, physiques ou chimiques.

La multiplicité de facteurs à prendre en compte, lorsqu'il s'agit d'étudier les organismes et leurs interrelations, complique substantiellement la compréhension de la nature et de l'étendue des impacts de l'*ALAN* en général et des LED en particulier (Bennie *et al.*, 2015a ; Bennie *et al.*, 2015b ; Sanders *et al.*, 2015).

Les stratégies mises en place chez l'Homme ne sont qu'une infime composante de cette variabilité ; la généralisation est donc *quasi* impossible et la comparaison s'applique aux seules espèces les plus proches (structure de la rétine, mécanismes de l'horloge biologique ou certaines régulations hormonales chez les vertébrés) sans qu'il soit pour autant possible d'effectuer des comparaisons poussées, l'évolution ayant entrainé de profondes divergences à partir du point de départ commun.

Depuis quelques décennies, le résultat de millions d'années d'évolution est mis à mal par les pressions anthropiques croissantes : démographie, surexploitation des ressources, extension de l'urbanisation, obstacles physiques, pollutions chimiques, changement climatique, *etc*. La grande majorité des organismes ne pouvant mettre en place de nouvelles stratégies adaptatives en si peu de temps, les espèces et écosystèmes sont en danger.

« *Ce que nous conservons définit ce que nous sommes ou ce que nous prétendons être. Nous devons établir et promouvoir des dialogues approfondis entre les acteurs sociaux, écologistes et biologistes évolutionnistes pour explorer les racines biologiques et culturelles de nos interactions avec les non-humains et comprendre les origines de notre inertie face à l'urgence de l'érosion de la biodiversité. S'attaquer à ce défi majeur pour l'humanité peut également améliorer notre capacité à nous respecter les uns les autres dans nos sociétés* » (Sarrazin and Lecomte, 2016).

7.7.2 Description de l'effet

L'éclairage artificiel est l'une des multiples pressions anthropiques exercées sur le vivant, longtemps sous-estimée et toujours insuffisamment explorée. Elle doit être réévaluée aujourd'hui suite à l'émergence de la technologie LED.

Les études d'impact des LED ne peuvent être dissociées de celles des effets de l'éclairage artificiel, nocturne (*ALAN*) en particulier. Si le nombre d'études est croissant, celles-ci concernent toutefois un nombre très limité d'espèces et d'écosystèmes ; de plus, elles ciblent souvent des paramètres disparates[65], un handicap lorsqu'il s'agit de faire émerger une vision d'ensemble cohérente. On distinguera cependant les effets observés en milieux clos de ceux en milieux ouverts.

En milieu clos et contrôlé, les propriétés spécifiques des LED offrent des avantages dans les domaines de la recherche fondamentale et appliquée. Elles sont déjà mises en application afin d'améliorer certaines productions animales et végétales à des fins alimentaires, thérapeutiques ou industrielles, en favorisant la croissance ou l'élimination d'agents pathogènes, ou encore la production de substances ciblées. Cependant, cette démarche nécessite une analyse poussée, car la production de substances non désirées susceptibles d'impacter le consommateur a pu être observée (telle la concentration de nitrates dans les salades, laquelle varie de très faible à trop élevée, selon le type d'éclairage LED utilisé (Chang and Chang, 2014 ; Bian *et al.*, 2016 ; Liu *et al.*, 2016 ; Chen *et al.*, 2017)). L'impact de la manipulation des paramètres utilisés (longueur d'onde, intensité, périodicité, phase) sur le bien-être animal n'a jamais été abordé. La recherche fondamentale doit donc être poussée afin de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu tout en permettant également des études difficiles à mettre en place en milieu naturel.

Enfin, les exploitations industrielles de cultures ou élevages impliquent l'intervention de personnel. Des retombées sur la santé des travailleurs en milieux fermés sont possibles (Yang *et al.*, 2016), ce qui ramène à la problématique des impacts sur la santé humaine abordée ailleurs dans ce rapport.

En milieux naturel, urbain et semi-urbain, les difficultés concernent la multiplicité de facteurs à prendre en compte (Bennie *et al.*, 2016). L'évaluation de l'impact de l'*ALAN* et des LED la nuit peut conduire à observer des effets positifs sur telle espèce (favorisant la croissance des individus ou celles des populations, par exemple) et, plus fréquemment, négatifs sur telle autre (mortalité accrue). Prises globalement, les observations révèlent qu'un éclairage LED, utilisé à des intensités de l'ordre de celles des éclairages conventionnels, induit un remodelage des espèces et un appauvrissement général de la biodiversité présente. L'effet

[65] Ciblant des composantes métaboliques ou physiologiques ou comportementales sans relations directes évidentes.

affecte-donc l'ensemble du biotope ; il est direct sur certains organismes et indirect sur d'autres (réaction en cascade) :

- effets directs : la mortalité de certaines espèces est accrue soit par attraction et désorientation (insectes nocturnes, oiseaux, tortues sorties du nid) soit par exposition prolongée aux prédateurs (jeunes tortues, insectes attirés près des sources de lumière, gastéropodes côtiers (Underwood *et al.*, 2017)). Parfois, une diminution du nombre de descendants a été rapportée (vertébrés), dont les effets sur le long terme restent encore inconnus. De même des effets ont pu être rapportés sur certains indicateurs métaboliques et physiologiques impliqués dans les régulations circadiennes (production de mélatonine chez les vertébrés) avec des altérations de certains rythmes (veille/sommeil, activité locomotrice, chant et recherche de nourriture chez les oiseaux, température corporelle chez les mammifères), du stress (augmenté), de l'immunité (diminuée). Là encore les répercussions de ces effets à plus ou moins long terme ne sont pas connues.
- effets indirects : la diminution ou la disparition d'une ou de plusieurs espèces d'un milieu donné a un effet généralement négatif sur l'ensemble des populations, même si toutes ne sont pas nécessairement impactées. C'est une conséquence des interrelations qui lient les espèces d'un biotope donné. Par exemple, l'impact de l'*ALAN* sur les espèces pollinisatrices affecte la pollinisation et la dissémination des graines de certaines plantes, ce qui impacte, d'une part la reproduction et la dissémination des plantes et, d'autre part, les espèces diurnes ou nocturnes qui s'en nourrissent, même si elles ne sont pas concernées par l'éclairage de nuit. Les activités humaines s'en ressentent déjà[66,67].

La question des LED (et plus généralement de l'*ALAN*) doit donc obligatoirement prendre en compte chaque biotope concerné.

Mais la pression anthropique exercée par l'*ALAN*, à LED ou non, ne concerne pas seulement l'aspect de l'éclairage artificiel. L'addition de plusieurs facteurs anthropiques (physiques ou chimiques) entraine des effets négatifs en cascade (*cf.* Figure 139, Figure 140 et Figure 141) et souvent synergiques[68] (Mora *et al.*, 2007). Et, bien qu'aucune étude n'ait été faite à ce jour, on peut raisonnablement penser que l'effet des LED sur la chute des populations d'abeilles (*cf.* Figure 137) (Knop *et al.*, 2017), ne fait que s'ajouter à celle provoquée par les herbicides, insecticides ou encore par l'introduction accidentelle de frelons tueurs d'abeilles.

7.7.3 Conclusions et recommandations

Le groupe de travail conclut à l'impact négatif de l'éclairage artificiel nocturne, dont celui des LED sur les composantes de l'écosystème

[66] http://www.inra.fr/Grand-public/Ressources-et-milieux-naturels/Tous-les-dossiers/Abeilles-pollinisation-biodiversite-pesticides/Abeilles-pollinisation-et-biodiversite.

[67] L'utilisation de mini-drones pollinisateurs est déjà à l'étude dans certains pays afin de faire face à la chute des populations d'insectes.

[68] C'est-à-dire dont l'effet global dépasse la simple addition des effets pris individuellement.

8 Analyse du cycle de vie des LED

8.1 Introduction

Il a été estimé que le domaine de l'éclairage consomme approximativement 19 % de l'énergie électrique mondiale (Waide *et al*., 2006). Ainsi, l'éclairage est un enjeu important de la réduction de la consommation d'énergie, tout comme les questions d'émissions de gaz à effet de serre et les autres émissions associées à la production de l'énergie. Suite aux changements et développements technologiques récent dans le domaine de l'éclairage, il convient d'analyser les impacts environnementaux et énergétiques des nouveaux produits d'éclairage déployés. Comme précisé auparavent, la transformation des technologies utilisées dans le domaine de l'éclairage est encouragée par la législation européenne sur l'éco-conception (« *écodesign* » qui vise au remplacement des lampes à incandescence ou des lampes à mercure à haute pression par des technologies plus efficaces, comme les lampes et luminaires à diodes électroluminescentes).

Cependant, la consommation d'énergie n'est pas le seul enjeu des impacts environnementaux de l'éclairage. En plus de leur consommation énergétique lorsqu'ils sont utilisés, les lampes et les luminaires sont fabriqués, transportés, emballés, mis en stock, et finalement les déchets traités. Un exemple de la division des étapes du cycle de vie des systèmes d'éclairage est présenté sur la Figure 142. Pendant toutes les étapes du cycle de vie, les processus causent des impacts environnementaux en raison de flux (entrants, sortants) de matière et/ou d'énergie.

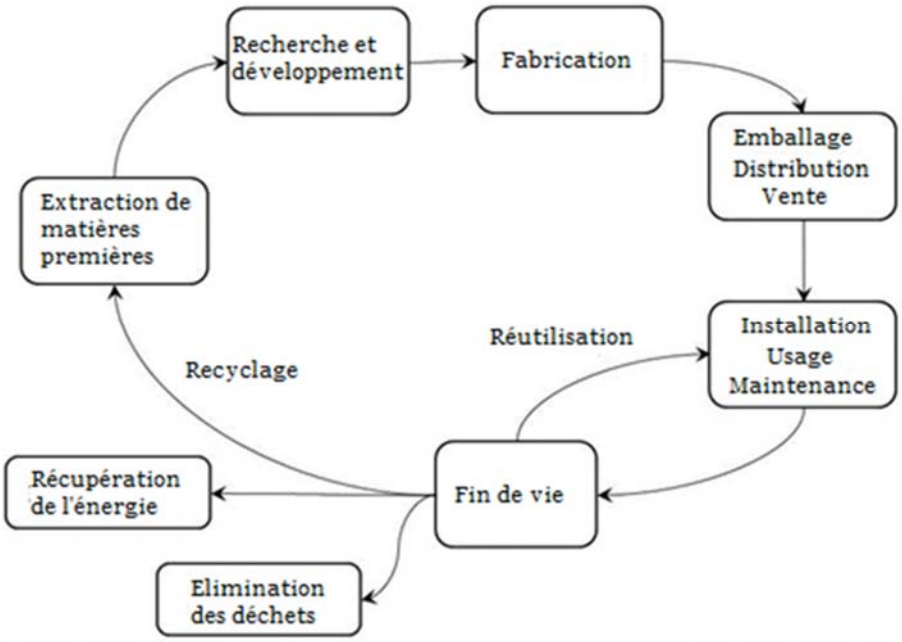


Figure 142 : les étapes du cycle de vie des LED (Tähkämö, 2013)

L'analyse de cycle de vie (ACV) est un outil d'évaluation des impacts potentiels sur l'environnement d'un produit, d'un processus, ou d'un service tout au long de son cycle de vie. Elle compile les entrants et les sortants du système analysé et estime les impacts environnementaux potentiels de ces flux de matière et d'énergie. L'ACV donne une

information sur les impacts environnementaux qui permet de guider les choix de conception d'un produit (en phase R&D) et qui permet au consommateur de choisir des produits ou des services dont l'empreinte environnementale est la plus faible.

La méthode générale pour effectuer une ACV est définie dans les normes ISO 14040 et 14044 (2006). La méthode d'ACV est présentée dans le rapport publié en 2010 par l'Anses sur les effets sanitaires des LED (voir Annexes B et M (Anses, 2010)). L'ACV évalue le cycle de vie depuis l'acquisition des matières premières jusqu'à la fin de vie. Les étapes peuvent être divisées conformément aux objectifs de l'ACV en particulier. Habituellement, les ACV de sources lumineuses comportent la fabrication, l'utilisation et la fin de vie. Les autres étapes du cycle de vie peuvent être prises en compte séparément ou en les intégrant dans les trois grandes étapes précédentes. Le présent rapport utilise cette division en trois étapes du cycle de vie pour plus de clarté, même si quelques ACV divisent les étapes différemment.

L'objectif de la partie qui suit est de compiler et étudier les ACV existantes concernant les lampes et luminaires à LED. Les analyses comparatives et autonomes ont été inclues. Les analyses de coût du cycle de vie (ACCV ou LCCA, *life-cycle cost assessment*) sont exclues, même si elles constituent une partie importante dans l'analyse de durabilité totale (LCSA, *life-cycle sustainability assessment*). Le chapitre qui suit se concentre sur les ACV complètes qui évaluent les impacts environnementaux des lampes et luminaires à LED sur l'ensemble des étapes de vie, et les études relative à une étape unique (fin-de vie, écoconception) sont discutées dans d'autres chapitres.

8.2 Analyses du cycle de vie des sources lumineuses à LED

Plusieurs ACV sur les lampes et luminaires ont été effectuées au cours des deux dernières décennies. La plupart des ACV précédentes ont été réalisées en comparant les lampes à incandescence avec les fluocompactes. Plus tard, vers les années 2010, les autres sources lumineuses ont été analysées, en particulier les lampes et luminaires à LED. Le Tableau 30 liste les ACV des lampes et luminaires à LED identifiées dans la littérature scientifique. Un total de 16 ACV de produits à LED est listé.

Il y a de nombreuses différences parmi les ACV de sources lumineuses à LED. En particulier, les analyses sont différentes vis-à-vis des étapes du cycle de vie incluses, des catégories d'impact environnementaux considérées, des unités fonctionnelles choisies et des caractéristiques de produits analysés. Les différences sont présentées plus particulièrement aux chapitres suivants.

Tableau 30 : recensement d'ACV de sources lumineuses à LED

*(Abréviations de produits (basées sur la langue anglaise en général) : CFL = lampe fluocompacte, CMH = lampe aux halogénures métalliques en céramique, FL = lampe à fluorescence, IL = lampe à incandescence, IND = luminaire à induction, LED = diode électroluminescente, MH = lampe aux halogénures métalliques, SHP = lampe à sodium haute pression. Catégories : ADP = épuisement de ressources, AP = acidification, CED = demande d'énergie cumulée, EP = eutrophisation, FAETP = écotoxicité aquatique d'eau douce, FEP = eutrophisation d'eau douce, FSETP = écotoxicité des sédiments d'eau douce, GWP = réchauffement planétaire, HTP = toxicité humaine, HTPce = toxicité humaine - effets carcinogènes, HTPnce = toxicité humaine - effets non-carcinogènes, LUP = utilisation des terres, MAETP = écotoxicité marine aquatique, MEP = eutrophisation marine, MSETP = écotoxicité marine des sédiments, ODP = destruction de la couche d'ozone stratosphérique, POCP = formation d'ozone photochimique, TEP = eutrophisation terrestre, TETP = écotoxicité terrestre). *) de l'avenir, **) hypothétique.*

Type et puissance de produit		Unité fonctionnelle[69]	Catégories d'impact environnemental	Référence	Année
luminaire SHP 176 W	luminaire LED 117 W	1 km d'une route illuminée ; lmh[70] ; 1 luminaire (3 unités)	AP, GWP, EP, FAETP, HTP, MAETP, POCP, ADP, ODP, TETP, Eco-indicator 99	Tähkämö et Halonen	2015
IL 60 W CFL 15 W	lampe LED 12,5 W	1 pièce du produit ; 20 Mlmh ; 251 507 Mlmh (3 unités)	Empreinte C (carbone), empreinte SPI (sustainable process index)	Shahzad *et al.*	2015
luminaire CFL 62 W	luminaire LED 23,2 W	1 lumen pour 50 000 h ; 1 lux pour 50 000 h (2 unités)	GWP, ODP, HTPce, HTPnce; POCP, AP, TEP, FEP, MEP, FAETP, LUP, CED	Principi et Fioretti	2014
IL 60 W FL 36 W	CFL 35 W lampe LED 5 W	36,375000 Mlmh (36 375 000 lmh)	AP, ADP, GWP, EP, FAETP, FSETP, HTP, LUP, MAETP, MSETP, ODP, TETP, rayonnement ionisant, air malodorant, POCP	Sangwan *et al.*	2014
LED		1 pièce du produit	GWP, ReCiPe H/A (catégorie imprécise)	Camañes *et al.*	2014
luminaire CMH 250 W luminaire LED 180 W		60 000 h	Énergie, carcinogènes, effets respiratoires organiques et inorganiques, GWP, radiation, ODP, écotoxicité, AP/EP, LUP, minéraux, combustibles fossiles, consommation d'eau	Abdul Hadi *et al.*	2013

[69] L'unité fonctionnelle est une notion mesurable et clairement définie grâce à laquelle sont précisées les fonctions du produit et ses performances. Le rôle principal de l'unité fonctionnelle est donc de fournir une référence par rapport à laquelle les intrants et les extrants sont définis et normalisés afin d'assurer la comparabilité des résultats d'une ACV sur une base commune.

[70] Le lumen heure (lmh) est un flux d'un lumen émis pendant une heure, c'est une quantité de lumière (on peut faire l'analogie avec le kWh qui est une quantité d'électricité).

Type et puissance de produit		Unité fonctionnelle[69]	Catégories d'impact environnemental	Référence	Année
luminaire LED 19 W		50 000 h et 1 140 lm (57 Mlmh)	Énergie primaire, renouvelable, et non-renouvelable; ADP; consommation d'eau; déchets dangereux, non-dangereux, inertes et radioactifs; GWP; AP; pollution de l'air; pollution de l'eau; ODP; POCP; EP	Tähkämö *et al.*	2013
IL 60 W CFL 15 W	lampe LED 12,5 W lampe LED 6,1 W (*)	20 Mlmh	GWP; AP; POCP, ODP; HTP; FAETP; MAETP; TETP; EP; dégradation des écosystèmes; ADP; LUP; déchets dangereux, non-dangereux et radioactifs	US DOE	2012
SHP 150 W MH 163 W	IND 109 W luminaire LED 105 W	100 000 h	GWP, effets respiratoires, écotoxicité	Dale *et al.*	2011
luminaire LED A	luminaire LED B	lm/h	*Endpoints* de Eco-indicator 99 : ressources, qualité d'écosystèmes, santé humaine	Casamayor et Su	2011
CFL FL	lampe LED (3 000 K) lampe LED (5 000 K) lampe LED (**)	800 lm pour 40 000 h ; 100 lx à distance de 1 m pour 40 000 h (2 unités)	Consommation d'énergie	Yabumoto *et al.*	2010
IL 100 W CFL 23 W FL 2x28 W	CMH 20 W lampe LED 10 W luminaire LED 16 W	1 Mlmh	GWP; AP; POCP, ODP; HTP; FAETP, MAETP, TETP; EP; dégradation des écosystèmes; ADP; LUP; déchets dangereux, non-dangereux et radioactifs	DEFRA	2009
IL 40 W CFL 8 W	8 W LED lampe	345 - 420 lm pour 25 000 h	GWP, AP, POCP, HTP, EP, ADP, consommation d'énergie	Osram	2009
IL 60 W CFL 13 W	lampe LED 6 W lampe LED 6 W (*)	1 Mlmh	Consommation d'énergie primaire, GWP	Quirk	2009
LED lampe		-	Consommation d'énergie	Eckelman	2009
IL 60 W CFL 15 W	lampe LED 7,5 W (**)	1 Mlmh	Consommation d'énergie	Slocum	2005

8.2.1 Évaluation de la qualité

Les normes ISO 14040 et 14044 définissent la structure de base et les exigences pour la réalisation d'une ACV. Les normes pour la réalisation d'ACV permettent une certaine liberté dans l'exécution d'une étude de l'ACV, car elles sont suffisamment génériques pour être utilisées pour l'évaluation des impacts environnementaux de tous les produits, processus et services. Par conséquent, il y a en pratique beaucoup de liberté dans la réalisation d'une ACV. Les normes d'ACV décrivent quelques exigences,, comme l'unité fonctionnelle, qui, selon les normes, doit être cohérente avec les objectifs et le champ de l'étude, clairement définie et mesurable. En plus des exigences décrites par les normes d'ACV, les exigences de niveau minimal de qualité peuvent être définies pour les ACV des produits d'éclairage à LED en particulier. Un étude d'ACV de bonne qualité présente les caractéristiques suivantes :

- l'unité fonctionnelle est clairement définie et exprimée en lumen-heures ;
- en cas d'un luminaire à LED, toutes les pièces du luminaire sont incluses (la source lumineuse, le *driver* et le boîtier) ;
- en cas de lampe à LED, l'électronique du *driver* dans la lampe doit être inclus ;
- la qualité des données d'inventaire est suffisante, et le champ d'étude et les présomptions définis ;
- au moins 3 étapes d'ACV sont évaluées : fabrication, usage et fin-de-vie. D'autres étapes peuvent être incluses, et la division des étapes peut varier ;
- plusieurs catégories d'impact environnementaux sont considérées de préférence ;
- l'étude est publiée préférablement dans un journal scientifique révisé par des pairs D'autres types de publications sont acceptables, comme celles réalisées par une institution publique ;
- l'étude a préférablement moins de 5 ans.

Sur la base de ces exigences en matière de qualité, un total de 7 études a été retenu pour analyse. Les ACV qui ne sont pas révisées par des pairs (US DOE 2012 ; DEFRA 2009) ont été incluses, car la qualité de ces analyses est acceptable en général. L'analyse réalisée prend en compte l'absence de révision par les pairs pour celles-ci. Les détails d'évaluation de la qualité sont présentés à l'Annexe 5.

8.2.2 Etapes du cycle de vie inclues

Dans les 7 études de cas d'ACV retenues (Tähkämö et Halonen, 2015 ; Principi et Fioretti, 2014 ; Sangwan *et al.* 2014 ; Abdul Hadi *et al.,* 2013 ; Tähkämö *et al.,* 2013 ; US DOE, 2012 ; DEFRA / Navigant, 2010), les étapes suivantes ont été incluses :

- La fabrication (l'acquisition des matières premières est souvent incluse) ;
- l'utilisation ;
- la fin-de-vie.

De plus, quelques-unes de ces études ont considéré l'installation, la maintenance, la distribution ou le transport séparément (Tähkämö *et al.*, 2013 ; US DOE 2012 ; DEFRA 2009 ; Principi & Fioretti 2014).

8.2.2.1 Fabrication

La fabrication peut inclure l'extraction et l'acquisition des matières premières et les processus de fabrication (consommation d'énergie, matériaux auxiliaires). Il est relativement simple de fabriquer les lampes à incandescence et le processus de leur fabrication n'a pas changé depuis longtemps. Au contraire, la fabrication des lampes et luminaires basées sur des composants électroniques est plus difficile et énergivore. La fabrication des produits à LED est plus complexe, surtout à cause des composants à semi-conducteur et

électroniques. En plus, il existe plusieurs compositions de produits à LED. La structure de produit LED peut en effet énormément varier et les coffrets peuvent être très différents. Pour le boitier, des matériaux plastiques, des métaux ou du verre peuvent être utilisés. En raison de cette diversité, il n'est pas possible de créer un modèle moyen pour les matériaux ou la fabrication des sources à LED.

Les ACV mettent souvent en avant qu'il est difficile de récupérer les données de la phase de fabrication des lampes et luminaires à LED, parce que les fabricants hésitent à donner des informations sur leurs produits, et les données dans la littérature peuvent être obsolètes. Les données sur les matériaux inclus dans les lampes et luminaires à LED peuvent être parfois obtenues par un démontage du produit.

8.2.2.2 Utilisation

L'étape de l'utilisation peut être modélisée en incluant seulement la consommation de l'énergie pendant le fonctionnement du produit. Elle peut aussi prendre en compte la maintenance, c'est-à-dire la fabrication des produits remplacés durant la vie opérationnelle. Cela dépend de la division et de la définition des étapes du cycle de vie considéré.

À cause de l'importance de l'étape d'utilisation, quelques ACV contenaient plusieurs scénarios pour effectuer l'analyse de sensibilité. Par exemple, les analyses de sensibilité faisaient varier le moyen de production d'électricité (lors de l'étape d'utilisation) et la durée de vie de la lampe ou du luminaire. Le moyen de production d'électricité est en effet très impactant sur le résultat de l'ACV des sources lumineuses en général (voir chapitre sur les résultats).

8.2.2.3 Fin de vie

La fin de vie inclut les processus qui surviennent après la vie opérationnelle du produit. Elle peut inclure le transport, les traitements de déchets, le recyclage et l'élimination des déchets (décharge). Les matériaux usagés peuvent être réutilisés, recyclés comme matière première, ou incinérés pour en récupérer l'énergie.

Les produits à LED sont souvent complexes, et contiennent plusieurs matériaux et composants électroniques. Quant à la fin de vie des produits à LED, elle est aussi complexe à modéliser que la fabrication. Le recyclage des produits à LED est plus difficile à décrire que celui des lampes à incandescence. Les lampes et luminaires à LED contiennent un dissipateur thermique en métal, par exemple en aluminium. Il est très utile et écologique de recycler un composant en aluminium parce que la production de l'aluminium vierge consomme énormément d'énergie. Par ailleurs, les produits à LED ne contiennent pas de mercure, un élément nécessaire pour le fonctionnement des lampes à fluorescence et une partie des lampes à décharge à haute intensité.

Quelques ACV de lampes ou luminaires à LED contenaient plusieurs scénarios (recyclage, décharge, incinération) pour effectuer l'analyse de sensibilité du scénario de fin de vie (Principi et Fioretti, 2014 ; Tähkämö *et al.* 2013 ; DEFRA 2009). Les analyses de sensibilité faisaient varier les traitements de déchets : recyclage, incinération ou mise en décharge. La mise en décharge est la pire des alternatives pour l'environnement, en gaspillant le contenu des matériaux et l'énergie. Pourtant, le poids des impacts causés par la fin de vie reste assez bas.

8.2.2.4 Unités fonctionnelles

L'unité fonctionnelle fournit une référence par rapport à laquelle l'ACV est quantifiée et normalisée. Grâce à l'unité fonctionnelle, on peut comparer les impacts environnementaux des systèmes divers. La description de l'unité fonctionnelle est un paramètre clé de l'ACV, il faut qu'elle soit clairement définie et mesurable (ISO 14044).

Dans les ACV des lampes et luminaires, plusieurs unités fonctionnelles sont utilisées, ce qui rend les ACV difficilement comparable. Le plus souvent, l'unité fonctionnelle choisie est le lumen-heure (lmh) ou le flux lumineux (lm) pendant quelques heures (h). L'utilisation d'un

flux lumineux comme unité fonctionnelle n'est pas un choix optimal pour comparer objectivement deux solutions d'éclairage qui n'ont pas les mêmes cadences d'utilisation.Pour éviter un calcul trop complexe, la dégradation de flux lumineux n'est pas pris en compte dans les ACV.

Un des critères pour juger de la bonne qualité d'une ACV de produits à LED était le fait que l'unité fonctionnelle soit exprimée en lumen-heures car cela permet d'avoir des résultats valables quels que soient les niveaux lumineux et quelles que soient les durées d'utilisation.Tähkämö (Tähkämö, 2013) propose d'utiliser les lumen-heures comme l'unité fonctionnelle pour les ACV simplifiées et, dans le cas de l'ACV à modèle étendu, il est proposé de choisir une unité spécifique. L'unité spécifique peut être, par exemple pour les applications d'éclairage intérieur, l'éclairement à une distance sur une surface par heure, et, pour les applications d'éclairage extérieur public, un kilomètre d'une route illuminée,

La plupart des ACV définissent l'unité fonctionnelle très clairement. Quelques ACV étudient même l'impact de plusieurs unités fonctionnelles (Tähkämö et Halonen, 2015 ; Principi et Fioretti, 2014). Abdul Hadi *et al.* (Hadi *et al.*, 2013) définissent l'unité fonctionnelle comme 60 000 h de temps opérationnel. Mais ils donnent les flux lumineux des sources (approximativement), et il est donc possible de calculer l'unité fonctionnelle en lumen-heures.

8.2.3 Catégories d'impact environnementaux

Pour garantir la réalisation d'une ACV approfondie, il est recommandé d'utiliser plusieurs catégories d'impact environnemental (Tähkämö, 2013). Les sept analyses retenues sont effectuées au regard de catégories diverses (Tähkämö et Halonen, 2015 ; Principi et Fioretti 2014 ; Sangwan *et al.*, 2014 ; Abdul Hadi *et al.* 2013 ; Tähkämö *et al.*, 2013 ; US DOE, 2012 ; DEFRA, 2009). Le Tableau 31 : méthodologies d'évaluation des impacts du cycle de vie et catégories d'impact environnemental utilisées en ACV de LED. Le Tableau 31 liste les méthodologies d'évaluation des impacts et les catégories en détail. L'Annexe 5 fournit des informations sur les catégories d'impact utilisés dans chacune des ACV.

Il existe deux types de méthodes de calcul d'impacts : des méthodes dites *mid-point* (orientées problèmes, l'impact apparaît au milieu de la chaîne de causalité) qui quantifient les effets globaux des substances émises ou consommées et des méthodes dites *end-point* (ou "dommages", l'impact se trouve à la fin de la chaîne de causalité) qui estiment les dommages potentiels qui pourraient en résulter. Deux méthodologies sont le plus souvent utilisées : la méthode CML (CML-IA) qui est uné méthode *midpoint* et la méthode Eco-indicator99 qui est une méthode *end-point* (les impacts finaux considérés sont par exemple les impacts sur l'environnement, la santé humaine ou encore la qualité de l'écosystème).

Les impacts environnementaux au sein d'une même catégorie ne sont pas toujours calculés dans les mêmes unités. Par exemple, la formation d'ozone photochimique peut être exprimée en kg d'équivalent d'éthylène (C2H4) comme en CML, mais aussi en kg d'équivalent de O_3 et kg d'équivalent de composés organiques volatils non méthaniques (COVNM). L'Annexe 5 liste les unités utilisées dans les ACV et résume les unités le plus souvent utilisées. Les impacts totaux de cycle de vie sont collectés (par méga lumen-heure) pour 14 catégories d'impact dont 3 ou plus de ACV donnent les résultats. Cependant, cette analyse numérique approfondie n'est pas insérée ici à cause des différences de résultats. Il semble que les présomptions et les champ d'études diffèrent trop pour qu'il soit pas possible de donner les résultats globaux ou les tendances pour les produits à LED (voir Annexe 5).

Tableau 31 : méthodologies d'évaluation des impacts du cycle de vie et catégories d'impact environnemental utilisées en ACV de LED.

Méthodologie	Catégories d'impact environnemental	Référence	Année
CML ; Eco-indicator99 (single-scale)	AP, GWP, EP, FAETP, HTP, MAETP, POCP, ADP, ODP, TETP, Eco-indicator 99	Tähkämö et Halonen	2015

Méthodologie	Catégories d'impact environnemental	Référence	Année
ILCD ; CED	GWP, ODP, HTPce, HTPnce; POCP, AP, TEP, FEP, MEP, FAETP, LUP, CED	Principi et Fioretti	2014
CML (midpoint) ; Eco-indicator99 (endpoint)	AP, ADP, GWP, EP, FAETP, FSETP, HTP, LUP, MAETP, MSETP, ODP, TETP, rayonnement ionisant, air malodorant, POCP	Sangwan *et al.*	2014
Eco-indicator99	Énergie, carcinogènes, effets respiratoires organiques et inorganiques, GWP, radiation, ODP, écotoxicité, AP/EP, LUP, minéraux, combustibles fossiles, consommation d'eau	Abdul Hadi *et al.*	2013
MatFrance (fondé sur CML)	Énergie primaire, renouvelable, et non-renouvelable; ADP; consommation d'eau; déchets dangereux, non-dangereux, inertes et radioactifs; GWP; AP; pollution de l'air; pollution de l'eau; ODP; POCP; EP	Tähkämö *et al.*	2013
CML ; EDP ; EDIP	GWP; AP; POCP, ODP; HTP; FAETP; MAETP; TETP; EP; dégradation des écosystèmes; ADP; LUP; déchets dangereux, non-dangereux et radioactifs	US DOE	2012
CML ; EDP ; EDIP	GWP; AP; POCP, ODP; HTP; FAETP, MAETP, TETP; EP; dégradation des écosystèmes; ADP; LUP; déchets dangereux, non-dangereux et radioactifs	DEFRA	2009

Considérant que le présent rapport se concentre sur la santé humaine, les deux catégories d'impact associés à la santé humaine sont expliquées ici en détail : la catégorie *Human Toxicity Potential* (*midpoint*) et la catégorie santé humaine (*end-point*). La catégorie *Human Toxicity Potential* représente la somme des quantités (pondérées par un facteur de population) de toutes les substances toxiques émises qui ont été identifiées dans l'inventaire du cycle de vie. Cette catégorie n'inclut que les effets de certains éléments chimiques. La phototoxicité de la lumière n'est pas considéré dans cette catégorie à cause de l'absence de facteurs de caractérisation. L'*endpoint* de la catégorie santé humaine prend en compte plusieurs catégories d'impact (*midpoint*), mais les impacts sur la santé de la lumière ne sont pas pris en compte. L'indicateur endpoint de santé humaine (human health) utilise les données de quantités de substances toxiques. Il consiste à évaluer les effets sur l'homme en termes de réduction de l'espérance de vie, morbidité, morbidité sévère, *etc*.

Les catégories d'impact portant sur la santé humaine existantes et prises en compte sont donc limitées.

8.2.4 Résultats

Généralement, c'est la consommation d'énergie durant l'utilisation qui prédomine clairement parmi tous les impacts environnementaux liés aux lampes et luminaires, y compris celles à LED. Cela a été retrouvé dans toutes les ACV qui comportent la phase d'utilisation, même si les méthodes de calcul variaient (l'unité fonctionnelle, les étapes du cycle de vie incluses, les produits analysés). La phase d'utilisation a été associée à environ 70-99 % des impacts environnementaux totaux moyens des lampes et luminaires à LED.

En comparant les lampes et luminaire à LED avec les autres technologies d'éclairage, il est très fréquent de constater que ce sont les sources à LED qui ont les impacts environnementaux les plus bas ceci en raison de la plus haute efficacité lumineuse de la technologie à LED.

La consommation d'énergie durant la phase d'utilisation dépend de l'efficacité lumineuse de la source, mais aussi du moyen de production d'électricité utilisé. Par exemple, l'utilisation couvrait environ 93 % et la fabrication 7 % des impacts environnementaux moyens quand le luminaire encastré à LED utilisait l'électricité européenne (Tähkämö *et al.,* 2013). En utilisant l'électricité française, les impacts environnementaux moyens du même luminaire étaient répartis entre l'utilisation et la fabrication différemment, 23 % et 76 %, respectivement[71].

Dans la plupart des cas, les autres étapes du cycle de vie (la fabrication, le transport, l'installation et la fin de vie) ont des impacts environnementaux moins significatifs. Pourtant, il faut noter que le poids de ces étapes, en matière d'impact environnemental, peut être important lorsqu'elles sont considérées isolément. Par exemple, dans l'ACV d'un luminaire à LED, la fabrication causait environ 78 % de déchets non-dangereux, 40 % d'eutrophisation, et 39 % de formation d'ozone photochimique, et la fin de vie causait 28 % de déchets dangereux, quand la phase d'utilisation était modélisée utilisant de l'électricité française (Tähkämö *et al.,* 2013).

Quant à la fabrication des sources à LED, les impacts environnementaux moyens sont principalement causés par la fabrication des pièces suivantes : le *driver* (pièce permettant de fournir un courant régulé) et le porte LED (donc les composants électroniques) et les pièces en métal, surtout en aluminium.

Le développement de la technologie LED quant à l'efficacité lumineuse est pris en compte dans quelques ACV. Quelques analyses étudient aussi les produits à LED en cours de développement ou à venir (US DOE, 2012 ; Quirk, 2009 ; Slocum, 2005). De telles analyses concluaient que les lampes et luminaires à LED de l'avenir seront les plus écologiques grâce à leur haute efficacité. Il existerait un potentiel pour la technologie LED à être la technologie la plus écologique.

Analyse des résultats numériques

Deux catégories d'impacts environnementaux sont analysées ci-dessous en détail. Un focus a été fait sur la santé humaine, et c'est la catégorie *Potential Human Toxicity* (HTP) qui a été choisie pour cette analyse, elle est exprimée en équivalent kg de dichlorobenzene. Le réchauffement planétaire potentiel (GWP) a également été choisi comme autre catégorie d'impact, en raison de sa pertinence, de l'urgence qu'il représente et de son importance dans le niveau global. Il est exprimé en équivalent de kg de CO_2 et est souvent un bon indicateur des impacts environnementaux en général. Le Tableau 32 présente les résultats de HTP et GWP pour les 7 ACV retenues dans l'analyse.

Il montre que les impacts de GWP varient de 2 kg CO2-èq. par Mlmh à 16 kg CO2-èq. par Mlmh, et les impacts de HTP de 1,1 kg 1,4-DCB-éq. par Mlmh à 4.9 kg 1,4-DCB-éq par Mlmh.

[71] Pour comprendre cela, il est nécessaire de rappeler les différences entre le mix éléctrique français (la répartition des différentes sources d'énergies primaires consommées pour la production d'électricité) et le mix énergétique européen. En général, le mix électrique français est moins impactant (sauf sur les impacts liés aux déchets radioactifs). En utilisant le mix électrique français, la phase d'utilisation pendant laquelle l'électricité est consommée devient beaucoup moins impactante par rapport à la phase de fabrication des luminaires. Comme le mix électrique européen intègre la production d'électricité allemande qui est très impactante en raison de l'utilisation massive de la lignite (charbon), les produits électriques ont un impact plus importants en moyenne européenne, en comparaison avec la France dont l'électricité est très nucléaire.

Tableau 32 : résultats chiffrés pour les indices GWP et HTP dans les 7 ACV analysées exprimées en Mlmh (Méga lumen heure)

Catégorie d'impact	Réchauffement planétaire, kg CO2 éq	Toxicité humaine, kg 1,4-DCB éq
Étude		
US DOE : LED lamp 2017	6,14	1,52
DEFRA : LED lamp	10,4	1,41
DEFRA : LED luminaire	9,21	1,1
Tähkämö & Halonen	6,62	4,87
Principi & Fioretti	6,4	
Sangwan .*et al.*	15,8	1,36
Tähkämö *et al.*	1,96	
US DOE : LED lamp 2012	12,6	3,02

8.3 Discussion

Les ACV de lampes et luminaires à LED rencontrent plusieurs difficultés. La technologie à LED est assez nouvelle et, pour cette raison notamment, il est parfois difficile de récupérer l'ensemble des données nécessaires pour mener à bien une ACV. Les données dans la littérature peuvent être obsolètes car la technologie évolue rapidement, et l'information sur les produits à LED est assez peu accessible auprès des fabricants. Cela renforce le niveau d'incertitude dans l'ACV. Pourtant, quelques ACV affirment que les incertitudes sur les données n'impactent pas les résultats des analyses (DEFRA, 2009 ; Osram, 2009 ; Quirk, 2009). C'est très souvent la consommation d'énergie durant la phase d'utilisation qui cause la majorité des impacts environnementaux. La qualité des ACV devrait cependant s'améliorer avec l'obtention de données complémentaires sur la phase de fabrication des LED, et le développement de la technologie au fil du temps. En plus de données manquantes, les incertitudes sont causées par les règles de l'exclusion. En effet, il existe une régle de coupure (cut-off) quand l'inventaire du cycle de vie est fait : si une substance represente moins de x% de la masse du systéme étudié, alors cette substance est éliminé. Il est pratiquement nécessaire de définir les règles de l'exclusion pour l'ACV parce qu'il n'est pas souvent possible de récupérer toutes les données en détail.

Plusieurs limitations peuvent être identifiées dans les ACV de produits à LED. La comparaison entre analyses est difficile en raison des différences dans les méthodologies déployées. Même si la santé humaine est une des catégories considérée, cette catégorie n'englobe pas tous les impacts possibles sur la santé humaine parce qu'il n'existe pas de méthode clairement dédiée pour cela. Il n'y a pas de *midpoint* pour évaluer les catégories d'impacts associées à la santé.

La méthode pour évaluer les impacts de la lumière artificielle ou bien de la pollution lumineuse n'existe pas. Les impacts environnementaux liés à la santé humaine dans les ACV des produits d'éclairage ne sont basés que sur les flux matériaux et énergétiques des produits, et non sur le flux lumineux. La méthodologie courante d'ACV exclu la lumière comme une forme d'énergie. Ces impacts environnementaux pour les produits d'éclairage n'incluent pas les impacts visuels.

Au delà des ACV, quelques publications ont étudié les impacts environnementaux des sources à LED. Par exemple, l'étude de la fin de vie des lampes à LED mettait en avant qu'il est possible de réduire les impacts environnementaux de la fin de vie en concevant des produits démontables en fin de vie afin de pouvoir récupérer facilement certains composants

(Hendrickson *et al.,* 2010). De plus, les études récentes montrent qu'il est possible d'améliorer l'efficacité de récupération par développement des processus de recyclage dessinés spécialement pour les déchets des produits à LED (Swain *et al*., 2015 ; Swain *et al.,* 2016 ; Zhan *et al.,* 2015). Lim *et al.* (Lim *et al.,* 2011) et US DOE (US DOE, 2013), en outre, trouvaient que la composition des matériaux des lampes à LED n'est pas toujours exempte de substances dangereuses, même si elles sont exemptes de mercure. Ils ont trouvé, par exemple, du plomb et de l'antimoine dans les lampes à LED.

La recherche de solutions plus écologiques pour les sources lumineuses à LED mériterait quelques études complémentaires. Dans un premier temps, les études actuelles pourraient être mises à jour en prenant en compte la constante augmentation de l'éfficacité lumineuse des LED, des processus de fabrication, la fin de vie, la durée de vie, les poids et autres caractéristiques physiques et lumineuses. Dans un second temps, il faut améliorer la qualité des données utilisées, surtout concernant les composants LED. Par ailleurs, la méthode de calcul pour évaluer les impacts du prélèvement de matières premières sensibles, comme l'indium, et des matières rares, comme l'yttrium et le cérium utilisés pour les luminophores, mérite d'être développée. Ces substances sont souvent éléminés de l'ACV en raison de la règle de l'exclusion alors que ce sont des matériaux sensibles au niveau environnemental. Finalement, il n'est à ce jour pas possible de calculer les impacts de la lumière sur l'environnement. Les sources lumineuses produisent une lumière qui a des effets divers sur l'Homme, la faune, la flore, et les écosystèmes. Il faut développer une méthode pour être capable de mieux comparer les sources lumineuses artificielles diverses et analyser les impacts environnementaux de la lumière artificielle.

8.4 Conclusion

Les résultats des ACV des sources lumineuses montrent que ce sont les lampes et luminaires à LED qui causent les impacts environnementaux les plus bas parmi l'ensemble des sources lumineuses. Ceci s'explique par leur efficacité lumineuse et leur longue durée de vie. Les ACV de divers produits à LED ont montré que c'est la consommation d'énergie durant la phase d'utilisation qui cause la majorité des impacts environnementaux.

Le paramètre écologique des lampes et luminaires le plus important est l'efficacité lumineuse (lm/W). Il détermine la performance environnementale à cause de la dominance de l'étape de l'utilisation. En effet, c'est l'électricité consommée par les LED qui constitue l'impact environnemental le plus élevé, par rapport à la fabrication et à la fin de vie. Comme la consommation électrique domine, c'est l'efficacité lumineuse (lm/W) qui est le paramètre le plus important, toutes choses égales par ailleurs. Par conséquent, les sources lumineuses les plus efficaces sont les plus favorables à l'environnement. Ainsi, il est recommandé de remplacer les sources lumineuses de faible efficacité énergétique par des sources plus efficaces, telles que les lampes et luminaires à LED. En plus, pour réduire les émissions liées à la consommation d'énergie pour l'éclairage, une mesure effective est de passer à l'électricité à faible taux d'émission (par exemple kg CO_2-eq./kWh), comme les sources renouvelables.

Les ACV des lampes et luminaires varient d'une analyse à l'autre. Les différences sont, en particulier, dans les produits analysés et les méthodes choisies (l'unité fonctionnelle, les catégories d'impact, les étapes du cycle de vie incluses). Malgré les différences notables dans les méthodes d'ACV, les analyses ont généralement abouti à des résultats très similaires : l'utilisation est majoritairement (70 % - 99 %) responsable des impacts environnementaux en raison de la consommation d'énergie. La fabrication cause la plupart du reste des impacts. La fin de vie et les autres étapes du cycle de vie ne causent que des impacts mineurs. Par contre ,à l'avenir, il est probable que le poids de la fabrication et de la fin de vie s'accroisse, étant donné que l'utilisation des sources à LED devient plus efficace en diminuant les impacts environnementaux de l'utilisation, cette conclusion n'est valable que si le mix électrique est de plus en plus propre.

Cependant, les ACV doivent être améliorées et plusieurs domaines doivent encore être ciblés pour poursuivre les recherches. Le développement d'ACV sur les nouveaux produits est recommandé. Enfin, une méthodologie adaptée pour évaluer les impacts de la lumière sur l'environnement devra être développée. Elle devra prendre compte les impacts de la lumière sur la santé humaine et les impacts sur l'environnement. Enfin, à plus long terme, une analyse mondiale pour évaluer les impacts environnementaux de l'adoption et de la généralisation des LED devrait être menée. Cette analyse démontrera l'importance du domaine de l'éclairage dans l'atténuation des changements climatiques et la diminution des autres impacts environnementaux.

9 Conclusions du groupe de travail

Le groupe de travail a synthétisé les éléments importants mis en évidence par l'expertise sous forme de questions-réponses.

Quelles sont les évolutions de la technologie des LED depuis 2010 en France ?

Le premier rapport de l'Anses sur les effets potentiels de l'exposition aux LED sur la santé, publié en 2010, avait permis d'attirer l'attention sur les dangers potentiels induits par les éclairages à LED. L'offre, en matière d'éclairage domestique, s'est *a priori* améliorée, avec une évolution des caractéristiques techniques des LED : des lumières plus « chaudes », des groupes de risque photobiologique *a priori* inférieurs à 2, et des lumières parfois moins éblouissantes qu'auparavant. En parallèle, les domaines d'application des LED se sont beaucoup élargis. De plus, on a vu apparaître sur le marché des sources LED blanches de nouvelles technologies à base de LED émettant partiellement dans le domaine ultraviolet et proposant des meilleurs rendus de couleur, mais dont le spectre de rayonnement exposerait la rétine à des risques accrus de phototoxicité.

À quels types de LED s'intéresse ce rapport d'expertise ?

La présente expertise s'intéresse non seulement à l'éclairage général et à l'éclairage automobile, mais aussi aux objets intégrant des LED (jouets**,** signalisation, objets de décoration, *etc..*) et aux écrans à LED (téléphones mobiles, y comris *smartphones*, écrans d'ordinateurs, tablettes, téléviseurs).

Quelles sont les spécificités du rayonnement émis par les LED ?

Les spécificités des LED résident d'une part dans le type de rayonnement émis et d'autre part dans les caractéristiques physiques des lampes utilisant cette technologie.

D'une part, le spectre des LED peut plus riche en lumière bleue (il existe des lumières avec des températures de couleur très élevées fournissant une lumière très froide, supérieur à 6 000 K) mais aussi plus pauvre en lumière rouge que la plupart des autres sources lumineuses, naturelles et artificielles. On parle ici de déséquilibre spectral. L'excès de lumière bleue dans le spectre des LED par rapport aux autres sources lumineuses pose la question des effets de la lumière des lampes à LED sur la rétine (effets phototoxiques) mais aussi sur les rythmes circadiens et le sommeil (effets mélanopiques). Le déficit en lumière rouge des LED pourrait par ailleurs priver des effets photoprotecteurs potentiels du rayonnement situé dans cette bande spectrale, notament lors du processus physiologique d'émétropisation qui se produit dans l'enfance.

D'autre part, les lumières à LED peuvent être plus éblouissantes que les lumières émises par d'autres technologies (incandescence, fluo-compactes, halogènes, etc.). Cela peut être le cas notamment des matrices de LED, des spots à LED, des feux automobiles et des lampes torches.

Enfin, les LED sont très réactives aux fluctuations de leur courant d'alimentation. De ce fait, selon la qualité du courant injecté, des variations de lumière peuvent apparaître, suivant la fréquence et le niveau de ces variations.Ces phénomènes sont regroupés sous la terminologie de « modulation temporelle de la lumière ».L'Homme peut subir des effets néfastes de ces variations, qu'elles soient ou non visuellement perceptibles. Actuellement, sur le marché, il existe des sources de lumière à LED ne présentant aucune modulation temporelle de l'intensité lumineuse, et d'autres qui présentent des taux de modulation à 100 Hz très importants (> 30 %), comparables et même supérieurs aux anciennes

générations de tubes fluorescents à ballast magnétique, désormais bannis par la réglementation européenne

Quelles sont les spécificités de ces travaux d'expertise ?

Cette expertise recense de manière exhaustive les effets de la lumière émise par les LED sur l'Homme, la faune et la flore.

De part la caractéristique particulière des LED à produire une lumière riche en courtes longueurs d'onde, c'est à dire dans le bleu, et un déséquilibre spectral par rapport aux autres sources de lumière et par rapport à la lumière naturelle, les effets sanitaires qui pourraient être liés à cette lumière froide (phototoxicité, perturbation des rythmes circadiens notamment) ont été évalués. Les effets liés aux autres caractéristiques de cet éclairage, comme leur aspect ponctuel (éblouissement) ou la modulation temporelle ont également été investigués. La question du déséquilibre spectral (rapport des intensités lumineuses entre le bleu et le rouge) a aussi été abordée.

Parallèlement à l'évaluation des effets de ces caractéristiques, plusieurs campagnes de mesures ont été menées pour décrire la nature de la lumière émise par des systèmes à LED du quotidien (lampes pour l'éclairage, objets intégrant des LED, projecteurs automobiles et écrans) et la quantifier. Les expositions induites par ces systèmes à LED ont été évaluées, dans le cadre de scénarios de vie, grâce à des mesures réalisées *in situ* dans des environnements spécifiques.

Au regard de l'évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires étudiés et des données d'exposition obtenues, l'expertise a identifié si des effets spécifiques aux LED existent et si l'exposition à ces systèmes peuvent induire un risque pour la santé de l'Homme et de son environnement. L'influence du passage à la technologie LED dans différentes catégories d'éclairage et d'affichage sur la pollution lumineuse a également été évaluée.

Enfin, en parallèle de la diffusion de la technologie LED sur le marché et en raison des effets suspectés de la lumière bleue sur la santé, de nombreux moyens de protection se sont développés, l'évaluation de leur capacité à filtrer le bleu a également été déterminée.

Quels effets sanitaires ont été étudiés ?

Pour étayer son argumentaire scientifique, le groupe de travail a effectué une revue de la littérature (2010 - 2017) sur les effets suspectés de la lumière bleue afin d'en évaluer les niveaux de preuve associés. Les effets sanitaires abordés dans le cadre de la présente expertise sont les suivants :

- les effets de la lumière bleue sur les rythmes circadiens (perturbation de l'horloge circadienne) ;
- les effets de la lumière bleue sur le sommeil et sur la vigilance (retard de sommeil et altération de la quantité et qualité du sommeil) ;
- les effets de la lumière bleue et des différents types de LED sur l'œil (phototoxicité, sécheresse oculaire, myopisation) ;
- les effets de la lumière bleue sur la peau ;
- les effets de la modulation temporelle de la lumière sur la santé ;
- les effets liés à l'éblouissement.

Quels sont les effets de la lumière bleue et des LED sur les rythmes circadiens et quel est le risque associé ?

Compte tenu des éléments de preuve suffisants chez l'Homme, la perturbation des rythmes circadiens par l'exposition à une lumière riche en lumière bleue en soirée ou la nuit est avérée.

Les lumières à LED, particulièrement si elles sont froides (écrans de téléviseurs, d'ordinateurs, de *smartphones*, de tablettes, éclairages domestique blanc froid) sont susceptibles de perturber les rythmes circadiens compte tenu de leur déséquilibre spectral (rayonnement riche en bleu).

Compte tenu de l'exposition croissante (choisie ou subie) de la population aux systèmes à LED en soirée ou la nuit, et du déséquilibre spectral des LED, le groupe de travail estime que l'exposition aux LED en soirée ou la nuit peut induire un risque élevé de perturbation circadienne. La perturbation des rythmes circadiens est impliquée, avec d'autres facteurs, dans la survenue de nombreux effets sanitaires : perturbation de la qualité et de la durée du sommeil, troubles métaboliques, cancer, obésité, pathologies cardiovasculaires, effets sur la santé psychique, ... Cependant, le lien direct entre l'exposition à la lumière riche en bleu la nuit et ces effets sanitaires, bien que fortement suspecté, n'est pas établi à ce jour chez l'Homme.

Quels sont les effets de la lumière bleue et des LED sur le sommeil et la vigilance ?

La plupart des travaux scientifiques disponibles montrent que la lumière bleue altère la régulation du sommeil par le biais des perturbations circadiennes. Les éléments de preuve chez l'Homme sont suffisants pour conclure à un effet avéré de l'exposition à une lumière riche en bleu en soirée sur la latence à l'endormissement, la durée et la qualité du sommeil. De ce fait, les technologies à LED, enrichies en lumière bleue sont susceptibles de nuire à la durée et à la qualité de sommeil.

Quels sont les effets de la lumière bleue et des LED sur l'œil ?

En ce qui concerne les effets d'une lumière riche en bleu sur la toxicité rétinienne, le groupe de travail conclut que :

- l'effet de l'exposition à court terme à la lumière riche en bleu sur la toxicitié rétinienne est avéré ;
- l'effet de l'exposition à long terme à la lumière riche en bleu sur la contribution à la survenue de DMLA est avéré ; cependant, les effets à long terme des éclairages artificiels ne sont à ce jour pas étudiés ;
- l'effet de la lumière riche en bleu sur la survenue du syndrome de l'œil sec est possible ;
- l'effet de la lumière riche en bleu sur le développement de la myopie est possible.

Les résultats obtenus en matière d'exposition montrent que la dose de lumière reçue dans la bande de longueurs d'ondes phototoxiques peut être importante avec les éclairages artificiels, et en particulier avec les LED, tout particulièrement les LED blanc froid.

Avec des LED à usage domestique blanc chaud, le groupe de travail conclue qu'il n'y a pas de risque toxicité aigüe.

Par contre, certains objets et jouets sont équipés de LED de groupe de risque 2 et exposent donc à un rique phototoxique aigu.

Les phares automobiles à LED exposent aussi à un risque phototoxique aigu, en particulier pour les enfants.

Les effets cités ci-dessus sont corrélés à la quantité de rayonnement bleu émis par les systèmes de lumière artificielle, et notamment les systèmes à LED. Les systèmes à LED peuvent émettre une lumière riche en bleu et une moindre quantité relative de rayonnement rouge, induisant ainsi un important déséquilibre spectral majorant les effets toxiques.

Les valeurs limites d'exposion (VLE) relatives à la toxicité rétienne de la lumière pour les effets court terme et long terme sont elles suffisamment protectrices ?

De nombreuses études montrent que les VLE pour la toxicité rétinienne de la lumière ne sont pas suffisamment protectrices. Hunter et ses collaborateurs (Hunter *et al.*, 2012) ont estimé que ces VLE étaient sous-estimées d'un facteur 20 par rapport à une VLE vraiment protectrice. Le groupe de travail souligne, de plus, que ces VLE ne sont proposées que pour une exposition court terme et éludent la question d'une exposition au long terme. Le groupe de travail attire l'attention sur les nouveaux systèmes UV-LED qui pourraient échapper à la réglementation mais présenter des risques phototoxiques.

Quels sont les effets des LED sur l'éblouissement et le confort visuel ?

Les LED présentent des niveaux de luminance assez disparates selon les sources de lumière testées, certaines applications vont donc pouvoir conduire à un risque plus important d'éblouissement (lampes torches, phares automobiles, spots à LED, …). Les effets à long terme de la répétition de ces éblouissements ne sont pas connus à ce jour.

En ce qui concerne le confort visuel, l'inconfort apporté par des matrices de LED est établi. La technologie à LED est capable de produire des lumières ayant un meilleur rendu de couleur aujourd'hui qu'il y a quelques années, mais qui reste encore perfectible.

Compte tenu des niveaux d'exposition associés à un usage des éclairages à LED dans l'espace domestique et résidentiel, dans les transports et dans l'espace public, ainsi que des évolutions dans la fabrication des LED commerciales, le groupe de travail estime le niveau de risque d'éblouissement et d'inconfort modéré.

Quels sont effets de la modulation temporelle de la lumière émise par les LED ?

Selon la fréquence de la modulation temporelle de la lumière, plus ou moins élevée, les effets associés sont différents. Par exemple, pour des fréquences de modulation inférieures à 70 Hz, la modulation peut être perceptible par l'œil selon le taux de modulation (phénomène de papillotement), et pour certaines fréquences particlulières, des crises d'épilepsie peuvent survenir chez des populations sensibles. À des fréquences plus élevées (> 80 Hz), des phénomènes comme l'effet stroboscopique (lorsqu'un objet est en mouvement) ou l'effet de réseau fantôme (lors d'une saccade visuelle) peuvent se produire. Dans tous ces cas, la modulation temporelle de la lumière est associée à un inconfort visuel et à une diminution de l'ergonomie visuelle des postes de travail dans le cadre professionnel.

Les fréquences de modulation des lampes et luminaires à LED sont en général trop élevées pour que le papillotement apparaisse.

Il subsiste néanmoins une probabilité élevée de papillotement lors d'une exposition à des lampes et luminaires à LED présentant une modulation temporelle anormale (lampe à LED défectueuse, incompatibilité entre un variateur et une lampe à LED, etc.). Dans un contexte industriel ou domestique, il est vraisemblable que la perception de l'effet stroboscopique impacte la sécurité de l'Homme lors de l'usage de machines ou d'outils. L'effet stroboscopique est particulièrement visible avec des lampes et luminaires à LED ayant une forte modulation temporelle à 100 Hz en particulier lors de mouvements corporels dans le champ de vision de l'observateur.

Lors d'une saccade visuelle, il est possible, sous certaines conditions, de percevoir un effet de « réseau fantôme ». Certaines lampes et luminaires à LED possèdent des niveaux de modulation suffisamment élevés pour que l'effet de réseau fantôme soit perceptible, spécialement en situation de conduite automobile. Le risque d'inconfort visuel associé à l'effet de réseau fantôme est élevé.

L'effet de la lumière modulée sur le déclenchement de crises d'épilepsie est avéré. La possibilité de déclenchement de crises résultant de l'exposition des sujets épileptiques aux lampes et luminaires à LED est faible, car les fréquences de modulation sont trop élevées pour être déclenchantes. Il subsiste néanmoins une possibilité plus élevée de déclenchement de crises d'épilepsie dans la population des sujets épileptiques lors d'une exposition à des lampes et luminaires à LED présentant une modulation temporelle

anormale (produits défectueux ou incompatibilité avec le variateur). Un point de vigilance est à apporter en ce qui concerne les feux à LED des vélos. En effet, ces éclairages sont modulés en tout ou rien (pourcentage de modulation de 100 %) selon la vitesse de rotation des roues. À certaines vitesses, les modulations temporelles se situent dans la bande la plus critique pour le déclenchement de crises d'épilepsie, autour de 15 Hz.

La littérature scientifique rapporte l'existence d'effets comme les maux de tête, la migraine, la fatigue visuelle associés à des fréquences de modulation temporelle comprises entre 80 et 120 Hz, les éléments de preuve associés sont limités chez l'Homme. Le risque associé à ces effets pour une exposition aux LED est indéterminé.

Quels sont les effets des LED sur la peau ?

La lumière bleue pourrait avoir un effet négatif sur la peau, majorant le vieillissement et retardant la cicatrisation de la peau alors que l'exposition à des longueurs d'onde comprise entre 590 et 630nm (lumière rouge) auraient des effets inverses. La lumière bleue peut avoir des effets bactéricides sur la peau et est utilisée dans cette indication. Compte tenu des niveaux d'exposition associés à un usage domestique des éclairages à LED et de la faible profondeur de pénétration des rayonnements optiques bleus dans la peau, les risques de toxicité pour la peau liés à une exposition à la lumière bleue des LED sont faibles.

Le groupe de travail attire l'attention sur l'effet cancérogène (induction de mélanome) retardé induit par une luminothérapie à LED bleues sur l'icter néonatal.

Existe-t-il des populations sensibles dans la population générale ? Dans la population professionnelle ?

Le groupe de travail a identifié différentes populations sensibles :

- dans la population générale :
  - pour les effets liés à la lumière bleue
    - phototoxicité,
      - nourrissons, enfants, adolescents, jeunes adultes (cristallin clair);
      - personnes aphakes (absence de cristallin) et pseudo-phakes (cristallin artificiel) ;
      - personnes souffrant de pathologies oculaires (œil sec, DMLA, glaucome, rétinopathies..) ;
      - personnes souffrant de troubles moteurs ou cognitifs qui réduisent les capacités d'évitement ou de prise de décision.
      - personnes prenant des médicaments photosensibilisants ;
    - dérégulation des rythmes circadiens dans le cas d'une exposition en soirée
      - nourrissons, enfants, adolescents, jeunes adultes (cristallin clair);
      - personnes aphakes (absence de cristallin) et pseudo-phakes (cristallin artificiel)
      - femmes enceintes (potentiels effets sanitaires sur l'enfant à naître) ;
      - personnes âgées (cristallin opaque) ;
      - personnes souffrant de troubles du sommeil ;
  - pour les effets liés à la modulation temporelle de la lumière :
    - personnes souffrant de migraines ;

        - personnes souffrant d'épilepsie ;
        - adolescents et jeunes adultes, plus sensibles aux contrastes spatio-temporels ;
- dans les populations professionnelles :
    - pour les effets liés à la lumière bleue (phototoxicité, dérégulation des rythmes circadiens) :
        - les travailleurs de nuit ;
        - toute profession exposée de manière importantes aux éclairages à LED (les chirurgiens, les dentistes, les éclairagistes, les revendeurs d'éclairages, les professions de la scène, les personnes travaillant dans les installations sportives, les personnes travaillant dans l'agroalimentaire utilisant des LED (serres, aquaculture), …).
    - pour les effets liés à la modulation temporelle de la lumière :
        - opérateurs de machines et d'outils
        - les conducteurs de véhicules

Quelles sont les spécificités de l'exposition aux LED ?

L'addition d'un éclairage artificiel à l'éclairage naturel est de nature à modifier les doses oculaires reçues par la cornée et par la rétine dans les bandes phototoxique et mélanopique (jusqu'à 50% d'augmentation) :

- les éclairages à LED augmentent le ratio entre la lumière bleue (dans les bandes phototoxique et mélanopique) et la lumière rouge par rapport à d'autres éclairages à température de couleur égale ;
- l'exposition dans la bande phototoxique est d'autant plus importante que la température de couleur est élevée que l'éclairage soit un éclairage LED ou non LED ;
- l'exposition dans la bande mélanopique est plus importante avec des éclairages à LED froides ;
- l'exposition à des écrans à LED augmente l'exposition dans la bande mélanopique.

La technologie à LED peut exposer à une modulation temporelle potentiellement importante et non visuellement perceptibles.

Les sources lumineuses à LED dans l'environnement domestique présentent-elles plus de risques pour la santé que les autres types de sources ?

Les dangers intrinsèques des éclairages artificiels reposent sur différentes caractéristiques physiques qui sont : la distribution spectrale (d'où découlent la température de couleur et le ratio entre la lumière bleu et la lumière rouge), la luminance, le pourcentage et les fréquences de modulation temporelle. Certaines de ces caractéristiques sont réglementées, d'autres non. Le risque associé dépend de l'exposition. Certaines LED de part leurs caractéristiques intrinsèques ou de part un usage inadapté peuvent exposer à des risques sanitaires supérieurs aux autres types de sources lumineuses (exposition augmentée dans la bande phototoxique, exposition augmentée dans la bande mélanopique en soirée, risques liés à la modulation temporelle de la lumière).

Cependant, la technologie des éclairages à LED permettrait de produire une lumière dont les caractéristiques sont optimales et supérieures aux autres sources sous condition qu'ils soient bien conçus et bien utilisés.

L'usage des dispositifs ou objets à LED présente-t-il des risques pour la santé ?

Alors que, dans l'éclairage général, la réglementation impose une limitation au niveau 1 du groupe de risque photobiologique, les mesures physiques effectuées dans le cadre de cette expertise montrent que certains dispositifs appartiennent à des groupes de risques photobiologiques de niveau 2 : des projecteurs automobiles « *full* LED » (notamment les feux de croisement), des jouets, des lampes torches, des lampes frontales, phares automobiles ….On note par ailleurs l'apparition sur le marché de LED bleues décoratives et l'utilisation des LED dans un nombre croissant d'applications. Le risque photobiologique est d'autant plus important pour les enfants qui sont exposés à courtes distances (jouets, phares automobiles) et ont un cristallin transparent.

L'existence sur le marché de produits à LED appartenant à un groupe de risque 2, non seulement expose à un risque phototoxique aigu, mais pose la question des effets à long terme associés à des expositions répétées de courtes durées à ce type de lampes, notamment pour les enfants.

Le passage aux LED va-t-il avoir des effets sur la pollution lumineuse ?

Le rapport propose une évaluation des effets du passage aux LED de l'ensemble des sources d'éclairage et d'affichage extérieur sur la pollution lumineuse. Différents aspects ont été considérés, liés au halo nocturne, aux nuisances pour l'Homme (lumière intrusive, débordements lumineux, éblouissement, rythmes circadiens) et aux écosystèmes et à la biodiversité. Selon les différentes catégories d'éclairage, le passage aux LED peut être favorable ou non.

Les catégories responsables des plus grandes augmentations de la pollution lumineuse dues aux LED sont : les enseignes, affiches et publicités lumineuses, ainsi que l'éclairage des zones commerciales, des zones agricoles (y compris les serres horticoles) et des zones industrielles. L'éclairage des parkings extérieurs de ces zones est également concerné. Dans ces catégories, la tendance est à l'augmentation du nombre et de l'intensité des points lumineux.

Le passage aux LED de l'éclairage public (éclairage des rue et des routes) et l'éclairage intérieur des bâtiments, pourraient peut être réduire la pollution car la lumière est plus circonscrite et les flux lumineux peuvent être abaissés. Ceci n'est vrai que si le nombre de points lumineux reste constant.

Il est difficile actuellement de juger de l'évolution globale, toutes catégories confondues, de l'impact sur la pollution lumineuse résultant du passage aux LED.

Les éclairages à LED peuvent-ils avoir des effets spécifiques sur l'environnement ?

La diversité des réponses métaboliques, physiologiques et comportementales à la lumière reflète la diversité du vivant et ce qui peut être un avantage pour une espèce donnée, animale ou végétale, peut s'avérer un inconvénient pour une autre. Des modifications de ces réponses s'observent directement à plusieurs niveaux d'organisation, dont les rythmes biologiques (journaliers et annuels), l'activité, la répartition, l'orientation et la migration. Il existe également des effets indirects, observables à moyen et à long terme, sur les populations dans leurs écosystèmes. Les approches doivent donc considérer aujourd'hui chaque espèce indépendamment mais aussi la place qu'elle occupe dans l'écosystème, dont l'Homme est partie intégrante.

Les études d'impact des LED et de la lumière la nuit sur le vivant ne peuvent être dissociées. Les recherches sur les premières s'appuient encore beaucoup sur celles menées sur la lumière la nuit et elles concernent encore un nombre très limité d'éspèces. La tendance générale, quel que soit l'écosystème étudié, montre (à long terme) une augmentation de la mortalité et un appauvrissement des espèces animales et végétales étudiées dans les milieux éclairés la nuit, notamment par éclairages à LED.

Les effets de la lumière la nuit, notamment issues d'éclairage à LED sur la faune et la flore et les écosystèmes sont donc avérés. Ces effets correspondent globalement à ceux de

l'éclairage nocturne, parmi lesquels il faut distinguer les spécificités apportées par les LED (intensité, composition spectrale). Ces effets viennent s'ajouter aux autres pressions anthropiques subies par les espèces animales et végétales (pollution chimique, barrières géographiques, réduction de l'espace vital, surexploitation…). Le nombre limité d'études comparativement à l'immense variété des systèmes biologiques de capture et traitement de l'information visuelle existants, laisse supposer un impact majeur et variable selon les régions concernées.

Enfin, l'éclairage diurne ou nocturne (quelle que soit sa nature) n'est pas la seule pression anthropique exercée sur la nature. L'extension continue des activités humaines, industrielles, les nuisances physiques et chimiques auxquelles viennent s'ajouter les effets du changement climatique constituent autant de facteurs auxquels certaines populations animales seront vraisemblablement incapables de faire face, ce qui entrainera une accélération de la perte de la biodiversité. Les données impliquant l'action combinée de ces multiples facteurs perturbants sont encore rarissimes.

10 Recommandations du groupe de travail

Le groupe de travail formule différentes recommandations visant à protéger la population des effets sanitaires liés à une exposition aux LED.

Recommandations liées à la perturbation des rythmes circadiens

Considérant les risques liés à la perturbation des rythmes circadiens, le groupe de travail recommande :

- de limiter l'exposition à des lumières froides (> 4 000 K) et à fort déséquilibre spectral bleu/ rouge pendant la nuit et surtout avant le coucher (particulièrement pour certaines populations : enfants, adolescents, femmes enceintes..) ; en particulier, le groupe de travail recommande de ne pas utiliser de veilleuse à lumière froide pour les nourrissons et les enfants ;
- de renforcer le contraste lumineux entre le jour et la nuit en augmentant l' exposition à la lumière naturelle en journée et en limitant l' exposition à la lumière artificielle en soirée ou la nuit ;
- d'augmenter l'exposition à la lumière bleue des personnes âgées en journée afin de stimuler la synchronisation de leurs rythmes circadiens ;
- limiter l'exposition des femmes enceintes à la lumière la nuit et les informer des potentielles conséquences sur l'enfant porté (impact sur l'horloge biologique et potentiels effets associés) d'une exposition excessive à la lumière la nuit pendant la grossesse ;
- d'informer les parents sur la nécessité de limiter l'exposition des enfants et adolescents à la lumière froide notamment avant le coucher.

Recommandations liées à la phototoxicité de la lumière et à la sécheresse oculaire

Considérant les risques liés à la phototoxicité et à la sécheresse oculaire, le groupe de travail recommande :

- d'augmenter la connaissance sur l'exposition de la population générale, de la population professionnelle et des populations sensibles (enfants, adolescents, populations souffrant de pathologies oculaires, personnes aphakes, …) à la lumière artificielle ;
- de mener des études prospectives à long terme de relation entre l'exposition aux lumières artificielles (relativement à leur spectre et à leur niveau de modulation temporelle) et la survenue de pathologies oculaires (DMLA, myopie, …) ;
- de mener des recherches permettant de redéfinir les valeurs limites d'exposition à la lumière bleue lors d'une exposition chronique ;
- de mener des recherches visant à définir les VLE en utilisant des indicateurs de toxicité infra cliniques ;
- de mener des recherches pour définir les effets de la lumière bleue sur la survenue ou l'aggravation d'un syndrome d'oeil sec ou d'une dysfonction des glandes de Meibomius ;
- de limiter l'exposition de la population aux lumières froides et aux lumière bleues utilisées pour la décoration et notamment la nuit ;
- d'alerter la population sur le possible risque phototoxique des objets à LED ;

- d'imposer le marquage du groupe de risque photobiologique (selon la norme NF EN 62471) pour les éclairages domestiques mais aussi pour les objets à LED et interdire la commercialisation d'objet à LED en groupe de risque >1 ;
- de sensibiliser la population sur le risque d'une exposition à certains phares automobiles notamment pour les populations les plus sensibles, de recommander aux parents de veiller à ce que les enfants ne fixent pas du regard les phares automobiles ;
- de demander aux constructeurs de véhicules d'utiliser des phares de groupe de risque inférieur ou égal à 1, notamment pour les feux de croisement.

Recommandations liées au confort visuel et à l'éblouissement

Concernant la caractérisation du confort visuel et de l'éblouissement des LED, le groupe de travail recommande :

- d'exclure les sources à barrettes ou à matrices de LED nues du champ de vision ;
- d'effectuer des mesures fines de la distribution des luminances, par exemple à l'aide de vidéoluminancemètres, pour pouvoir mesurer les luminances maximales des sources ;
- d'utiliser des spectroradiomètres pour obtenir et rendre accessible au consommateur la répartition spectrale d'énergie des sources ;
- d'augmenter la connaissance sur la sensibilité des sujets migraineux au contenu spectral de la lumière.

Recommandations liées à la modulation temporelle de la lumière

Concernant la prise en compte de la modulation temporelle dans la conception des équipements d'éclairage à LED le groupe de travail recommande :

- de concevoir des produits exempts de modulation temporelle ou bien possédant des modulations temporelles à haute fréquence (au-delà de 1 ou 2 kHz) ;
- de poursuivre les efforts de normalisation des équipements de contrôle-commande, comme les dispositifs de gradation de lumière, pour en garantir la compatibilité avec les lampes et les luminaires à LED.

Concernant la normalisation relative à la modulation temporelle de la lumière, le groupe de travail recommande :

- d'inclure des limites dans les normes de sécurité au niveau européen. Celles-ci étant harmonisées avec la réglementation européenne (directive Basse Tension), les limites normatives devront acquérir un caractère obligatoire ;
- d'introduire des limites de modulation temporelle dans les normes d'éclairagisme au niveau européen. Les normes particulièrement importantes sont les suivantes : normes d'éclairage des lieux de travail intérieurs et extérieurs, la norme d'éclairage des installations sportives, les normes d'éclairage public ;
- d'élaborer une norme métrologique précisant les conditions de mesures de la modulation temporelle et de calcul des indices associés au niveau européen.

Concernant la réglementation européenne relative aux lampes et luminaires à LED, le groupe de travail recommande :

- que des limites soient fixées de manière réglementaire au niveau européen pour limiter les effets biologiques et sanitaires avérés provoqués par la modulation temporelle de la lumière émise par les lampes et luminaires à LED ;

- que les futures limites réglementaires intègrent l'ensemble des effets biologiques et sanitaires connus, susceptibles de se manifester lors de l'exposition aux modulations temporelles des lampes et luminaires à LED ;
- que les limites à intégrer dans la réglementation européenne soient au moins équivalentes au niveau de risque faible de la norme américaine IEEE 1789 (inférieur à 8 % à 100 Hz) ;
- d'introduire dans la réglementation UNECE des feux automobiles (feux avant et feux arrière) une fréquence minimale de modulation de l'ordre de 2 kHz lorsque les feux sont utilisés en mode PWM. Cette recommandation permet de limiter la visibilité de l'effet de réseau fantôme, source de perturbations visuelles avérées.

Concernant les connaissances à approfondir sur les effets visuels liés à la modulation temporelle de la lumière, le groupe de travail recommande :

- que des études soient effectuées pour mieux cerner les variations de la sensibilité aux contrastes temporels parmi la population générale ;
- d'étudier la validité de l'indice SVM (*stroboscopic visibility measure,* indice de visibilité de l'effet stroboscopique) dans des contextes autres que l'éclairage de bureau dans lequel il a été construit ;
- que des études permettant de quantifier les risques de l'effet stroboscopique vis-à-vis des accidents lors d'utilisation de machines et d'outils spécifiques (métallurgie, l'automobile et la construction, etc) soient menées.
- d'approfondir la connaissance et les conséquences de l'effet de réseau fantôme.

Concernant les connaissances à approfondir sur les effets biologiques et sanitaires de la modulation temporelle, le groupe de travail recommande :

- de mieux comprendre les mécanismes neurophysiologiques des effets biologiques et sanitaires de la lumière modulée. Il faudrait notamment explorer les relations entre les doses (durée d'exposition, éclairements, fréquences et pourcentage de modulation, etc.) et les effets associés (migraines et maux de tête) ;
- de mener des études épidémiologiques et des études de provocation pour mieux comprendre les mécanismes de ces effets et connaître leur prévalence et leur incidence dans la population.

Concernant les connaissances sur l'exposition de la population à la modulation temporelle de l'éclairage le groupe de travail recommande :

- d'étudier l'exposition à la lumière modulée dans des environnements réalistes en considérant différentes sources de lumières, pouvant être mobiles (véhicules par exemple), des durées d'expositions plus longues (heures, jours, semaines) et des spectres lumineux variables.

Recommandations liées à la pollution lumineuse

Concernant les actions à mener pour limiter le halo nocturne, le groupe de travail recommande :

- pour l'éclairage public : de promouvoir une gestion intelligente (détection, programmation, gradation, abaissement nocturne), le contrôle précis de la directivité (pas de lumière vers le ciel), l'abaissement des températures de couleur, rendus possibles par la technologie LED ;
- pour l'éclairage de mise en valeur architecturale et paysagère : de limiter le nombre d'installations lumineuses, diminuer les niveaux de luminance, utiliser moins de lumière bleue, éteindre ces installations pendant la nuit (programmation horaire), rendue possible par la technologie LED ;

- pour l'éclairage de mise en valeur architecturale et paysagère : de limiter le nombre d'installations lumineuses, diminuer les niveaux de luminance, utiliser moins de lumière bleue, éteindre ces installations pendant la nuit, (programmation horaire), rendue possible par la technologie LED ;

- pour les enseignes et affiches lumineuses : de limiter le nombre d'installations lumineuses, diminuer les niveaux de luminance, utiliser moins de lumière bleue, éteindre ces installations pendant la nuit (en respectant le décret de juillet 2012 sur l'extinction des enseignes lumineuses entre 1h et 6h du matin), limiter la lumière émise vers le ciel ;
- pour l'éclairage des zones commerciales, industrielles et agricoles, y compris les parkings : de limiter les flux lumineux (puissance lumineuse des sources) et/ou le nombre de points lumineux (et limiter la lumière émise vers le ciel).

Concernant les actions à mener pour limiter les lumières intrusives, le groupe de travail recommande :

- pour l'éclairage public : de continuer à promouvoir d'une gestion intelligente (détection, programmation, gradation, abaissement nocturne) et le contrôle de la lumière intrusive, rendu possible par la technologie LED ;
- pour l'éclairage de mise en valeur architecturale et paysagère : de diminuer les niveaux de luminance et contrôler les flux pour éviter la lumière indésirable. Eteindre ces installations pendant la nuit ;
- pour les enseignes et affiches lumineuses : de limiter le nombre d'installations lumineuses, diminuer les niveaux de luminance, éteindre ces installations pendant la nuit ;
- pour l'éclairage automobile : de faire évoluer les normes et réglementations sur l'éclairage automobile pour tenir compte de la phototoxicité des LED et des éblouissements des piétons, en particulier des enfants et de développer des technologies LED moins éblouissantes ;
- pour l'éclairage des zones commerciales, industrielles et agricoles, y compris les parkings : de limiter les flux lumineux et/ou le nombre de points lumineux ;
- d'appliquer la réglementation existante d'extinction de l'éclairage intérieur des bâtiments non résidentiels en-dehors des heures d'occupation.

Concernant les recommandations pour limiter les impacts sur les écosystèmes et la biodiversité, le groupe de travail recommande :

- pour l'éclairage public : promouvoir une gestion intelligente (détection, programmation, gradation, abaissement nocturne), le contrôle de la lumière incidente sur les zones naturelles proches des luminaires est à faire car il est techniquement possible avec les luminaires LED ;
- pour l'éclairage de mise en valeur architecturale et paysagère : de ne pas éclairer les monuments et ouvrages d'art proches de zones naturelles sensibles (rivières, rivages, réserves naturelles), de ne pas éclairer les arbres ou les jardins, diminuer les niveaux de luminance, contrôler les flux pour éviter la lumière indésirable sur les zones de végétation proches des zones à éclairer et d'éteindre ces installations en milieu de nuit ;
- pour les enseignes et affiches lumineuses : de ne pas utiliser d'enseignes ou d'affiches lumineuses dans les zones naturelles sensibles, de limiter le nombre d'installations lumineuses, diminuer les niveaux de luminance, d'éteindre ces installations en milieu de nuit, de limiter la lumière émise vers le ciel ;

- pour l'éclairage des zones commerciales, industrielles et agricoles, y compris les parkings : de limiter les flux lumineux et/ou le nombre de points lumineux ;
- d'appliquer la réglementation existante d'extinction de l'éclairage intérieur des bâtiments non résidentiels en-dehors des heures d'occupation.

Recommandations liées aux effets sur l'environnement

Concernant, les effets de l'éclairage à LED sur l'environnement :

- le groupe de travail recommande de réduire l'impact de l'éclairement par tous les moyens à sa disposition. À cette fin il convient de :
  - réduire les surfaces des zones éclairées au strict nécessaire ;
  - gérer l'intensité et le temps d'éclairement public (éteindre aux périodes les plus creuses de la nuit) ;
  - faire respecter la réglementation sur l'extinction des éclairages intérieurs et extérieurs des édifices publics et professionnels ;
  - orienter des lampes vers le sol en évitant la diffusion lumineuse ;
  - créer des espaces protégés en particulier dans les zones naturelles et périurbaines ;
  - effectuer, là où l'éclairage s'impose, un inventaire local des espèces du biotope afin d'adapter au mieux cet éclairage (durée, périodicité, qualité, intensité) aux nécessités vitales des espèces locales ;
- le groupe de travail conclut, pour ce qui est de l'utilisation des lampes LED en milieux fermés à des fins de recherches fondamentales et appliquées, de productions agroalimentaires, médicales ou industrielles, qu'il convient de s'assurer :
  - de la protection adéquate du personnel susceptible d'être affecté ;
  - que ces utilisations ne génèrent pas de produits non désirés (toxiques), d'où la nécessité d'études au cas par cas ;
  - du bon confinement, quand cela est possible, n'entrainant pas une pollution lumineuse supplémentaire vers l'extérieur.

Par ailleurs, le groupe de travail souligne la nécessité de sensibiliser les décideurs et la population sur les impacts négatifs de la lumière artificielle sur tout le vivant (afin d'en limiter l'usage) et sur les avantages économiques qu'ils peuvent tirer d'une gestion adaptée. Ce n'est qu'avec une compréhension claire et globale de ces problèmes que des stratégies de gestion efficaces pourront être développées.

Concernant l'analyse du cycle de vie, le groupe de travail recommande :

- de développer une méthodologie dans l'analyse du cycle de vie pour évaluer les impacts des sources à LED sur l'environnement et la santé humaine ;
- d'accéder aux données détaillées sur les produits entrant dans la fabrication des LED (matières premières, process) et les produits rejetés dans l'air, l'eau et les sols lors de la fabrication des LED ;
- travailler sur la fin de vie des LED : récupération et tri des produits usagers, récupération des matières premières, recyclage de certains composants des LED, traitement des déchets finaux ;
- d'effectuer une analyse à l'échelle mondiale pour évaluer les impacts environnementaux de l'adoption de la technologie à LED.

11 Bibliographie

AASM. 2018. « AASM Scoring Manual - American Academy of Sleep Medicine ». *American Academy of Sleep Medicine – Association for Sleep Clinicians and Researchers* (blog). 2018. https://aasm.org/clinical-resources/scoring-manual/.

Abdel-Rahman, F., B. Okeremgbo, F. Alhamadah, S. Jamadar, K. Anthony, et M. A. Saleh. 2017. « Caenorhabditis elegans as a model to study the impact of exposure to light emitting diode (LED) domestic lighting ». *Journal of Environmental Science and Health Part a-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering* 52 (5): 433-39. https://doi.org/10.1080/10934529.2016.1270676.

Abdul Hadi, Sabina, Muna R. Al Kaabi, Meshayel O. Al Ali, et Hassan A. Arafat. 2013. « Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of streetlight technologies for minor roads in United Arab Emirates ». *Energy for Sustainable Development* 17 (5): 438-50. https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.05.001.

Ach et al. 2015. « Lipofuscin redistribution and loss accompanied by cytoskeletal stress in retinal pigment epithelium of eyes with age-related macular degeneration. » *Invest Ophthalmol Vis Sci. 2015 May;56(5):3242-52. doi: 10.1167/iovs.14-16274.*, 2015. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25758814.

Acharya, J., O. Rechner, S. Neugart, M. Schreiner, et H. M. Poehling. 2016. « Effects of light-emitting diode treatments on Brevicoryne brassicae performance mediated by secondary metabolites in Brussels sprouts ». *Journal of Plant Diseases and Protection* 123 (6): 321-30. https://doi.org/10.1007/s41348-016-0029-9.

Adamskaya, Natalia, Peter Dungel, Rainer Mittermayr, Joachim Hartinger, Georg Feichtinger, Klemens Wassermann, Heinz Redl, et Martijn van Griensven. 2011. « Light therapy by blue LED improves wound healing in an excision model in rats ». *Injury* 42 (9): 917-21.

Addi, Mitra Mohd, Siti Asmah Daud, Nurul Atiqah Abdul Ghani, et Fauzan Khairi Che Harun. 2006. « AUTOMATIC PHOTOTHERAPY GARMENT (APG) USING BLUE LED FOR JAUNDICE TREATMENT-A PRELIMINARY DESIGN ».

Agency, Amarica's Ocean Coastal. 2017. « How far does light travel in the ocean? » 2017.

Akacem, Lameese D., Kenneth P. Wright, et Monique K. LeBourgeois. 2016. « Bedtime and Evening Light Exposure Influence Circadian Timing in Preschool-Age Children: A Field Study ». *Neurobiology of Sleep and Circadian Rhythms* 1 (2): 27-31. https://doi.org/10.1016/j.nbscr.2016.11.002.

Akashi. s. d. « Ageing effects on discomfort glare sensation and their mechanisms (OP13, 94-99) ». Consulté le 29 juin 2018. https://www.techstreet.com/standards/ageing-effects-on-discomfort-glare-sensation-and-their-mechanisms-op13-94-99?product_id=2009530.

Aksoy, V., et Y. Camlitepe. 2012. « Behavioural analysis of chromatic and achromatic vision in the ant Formica cunicularia (Hymenoptera: Formicidae) ». *Vision Research* 67 (août): 28-36. https://doi.org/10.1016/j.visres.2012.06.013.

Aladov, Andrei V., Alexander L. Zakgeim, Mikhail N. Mizerov, et Anton E. Chemyakov. 2012. « CONCERNING BIOLOGICAL EQUIVALENT OF RADIATION OF LIGHT-EMITTING DIODE AND LAMP LIGHT SOURCES WITH CORRELATED COLOUR TEMPERATURE FROM 1800 K UP TO 10000 K ». *Light & Engineering* 20 (3): 9-14.

Algvere, Peep V., John Marshall, et Stefan Seregard. 2006. « Age-Related Maculopathy and the Impact of Blue Light Hazard ». *Acta Ophthalmologica Scandinavica* 84 (1): 4-15. https://doi.org/10.1111/j.1600-0420.2005.00627.x.

Almeida, P. S., F. J. Nogueira, L. F. A. Guedes, et H. A. C. Braga. 2011. « An experimental study on the photometrical impacts of several current waveforms on power white LEDs ». In *XI Brazilian Power Electronics Conference*, 728-33. https://doi.org/10.1109/COBEP.2011.6085242.

Almutawa, Fahad, Lukman Thalib, Daniel Hekman, Qing Sun, Iltefat Hamzavi, et Henry W Lim. 2015. « Efficacy of localized phototherapy and photodynamic therapy for psoriasis: a systematic review and meta-analysis ». *Photodermatology, photoimmunology & photomedicine* 31 (1): 5-14.

Altringham, J., et G. Kerth. 2015. « Bats in the Anthropocene: Conservation of Bats in a Changing World ». Springer International Publishing AG. Part of Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25220-9_3.

AMA, Américan Medical Association. 2016. « Human and Environmental Effects of Light Emitting Diode (LED) Community Lighting », 2016.

Amasawa, Eri, Tomohiko Ihara, Takashi Ohta, et Keisuke Hanaki. 2016. « Life Cycle Assessment of Organic Light Emitting Diode Display as Emerging Materials and Technology ». *Journal of Cleaner Production* C (135): 1340-50. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.025.

Amoozgar, A., A. Mohammadi, et M. R. Sabzalian. 2017. « Impact of light-emitting diode irradiation on photosynthesis, phytochemical composition and mineral element content of lettuce cv. Grizzly ». *Photosynthetica* 55 (1): 85-95. https://doi.org/10.1007/s11099-016-0216-8.

Anderson, T. R., et T. A. Slotkin. 1975. « Maturation of the Adrenal Medulla--IV. Effects of Morphine ». *Biochemical Pharmacology* 24 (16): 1469-74.

Andretic, Rozi, Paul Franken, et Mehdi Tafti. 2008. « Genetics of Sleep ». *Annual Review of Genetics* 42: 361-88. https://doi.org/10.1146/annurev.genet.42.110807.091541.

ANPCEN. 2015. « Potential risks to human health of Light Emitting Diodes 10 (LEDs) », 2015.

Anses. 2010. « Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED) ». *Rapport d'expertise collective*, 2010.

———. 2016. « Évaluation des risques sanitaires liés au travail de nuit ». *Rapport d'expertise collective*, 2016.

Apalla, Zoe, Dorothée Nashan, Richard B Weller, et Xavier Castellsagué. 2017. « Skin cancer: Epidemiology, disease burden, pathophysiology, diagnosis, and therapeutic approaches ». *Dermatology and Therapy* 7 (1): 5-19.

Appleton, W. S. 1976. « Third Psychoactive Drug Usage Guide ». *Diseases of the Nervous System* 37 (1): 39-51.

Archer, Simon N., et Henrik Oster. 2015. « How Sleep and Wakefulness Influence Circadian Rhythmicity: Effects of Insufficient and Mistimed Sleep on the Animal and Human Transcriptome ». *Journal of Sleep Research* 24 (5): 476-93. https://doi.org/10.1111/jsr.12307.

Arendt, D. 2003. « Evolution of eyes and photoreceptor cell types ». *International Journal of Developmental Biology* 47 (7-8): 563-71.

Artigas, Jose M., Adelina Felipe, Amparo Navea, Adriana Fandiño, et Cristina Artigas. 2012. « Spectral Transmission of the Human Crystalline Lens in Adult and Elderly Persons: Color and Total Transmission of Visible Light ». *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 53 (7): 4076-84. https://doi.org/10.1167/iovs.12-9471.

Autrum, Hansjochem, MF Bennet, B Diehn, K Hamdorf, M Heisenberg, M Järviletho, P Kunze, R Menzel, WH Miller, et AW Snyder. 2012. *Comparative physiology and evolution of vision in invertebrates: A: Invertebrate photoreceptors*. Springer Science & Business Media.

Azam, C. 2016. « Impacts of light pollution on bat spatiotemporal dynamics in France: Implications for sustainable outdoor lighting planning ». Paris: Muséum National d'Histoire Naturelle.

Bachmeier, I., H. Helbig, et R. Greslechner. 2017. « [Eclipse retinopathy : A case series after the partial solar eclipse on 20 March 2015] ». *Der Ophthalmologe: Zeitschrift Der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft* 114 (1): 44-48. https://doi.org/10.1007/s00347-016-0286-9.

Baker, G. E., W. J. de Grip, M. Turton, H. J. Wagner, R. G. Foster, et R. H. Douglas. 2015. « Light sensitivity in a vertebrate mechanoreceptor? » *Journal of Experimental Biology* 218 (18): 2826-29. https://doi.org/10.1242/jeb.125203.

Balasubramanian, D. 2000. « Ultraviolet Radiation and Cataract ». *Journal of Ocular Pharmacology and Therapeutics: The Official Journal of the Association for Ocular Pharmacology and Therapeutics* 16 (3): 285-97. https://doi.org/10.1089/jop.2000.16.285.

Barak, S., E. M. Tobin, C. Andronis, S. Sugano, et R. M. Green. 2000. « All in good time: the Arabidopsis circadian clock ». *Trends in Plant Science* 5 (12): 517-22. https://doi.org/10.1016/s1360-1385(00)01785-4.

Barrionuevo, Pablo A., et Dingcai Cao. 2016. « Luminance and Chromatic Signals Interact Differently with Melanopsin Activation to Control the Pupil Light Response ». *Journal of Vision* 16 (11): 29. https://doi.org/10.1167/16.11.29.

Basha, A. Ahamed, D. C. Mathangi, R. Shyamala, et K. Ramesh Rao. 2014. « Protective effect of light emitting diode phototherapy on fluorescent light induced retinal damage in Wistar strain albino rats ». *Annals of Anatomy-Anatomischer Anzeiger* 196 (5): 312-16. https://doi.org/10.1016/j.aanat.2014.04.004.

Bassi, C. J., et M. K. Powers. 1987. « Circadian Rhythm in Goldfish Visual Sensitivity ». *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 28 (11): 1811-15.

Bazalova, O., M. Kvicalova, T. Valkova, P. Slaby, P. Bartos, R. Netusil, K. Tomanova, et al. 2016. « Cryptochrome 2 mediates directional magnetoreception in cockroaches ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 113 (6): 1660-65. https://doi.org/10.1073/pnas.1518622113.

Beck et al. 2012. « Prévalence et facteurs sociodémographiques associés à l'insomnie et au temps de sommeil en France (15-85 ans). Enquête Baromètre santé 2010 de l'Inpes, France. » *BEH 44-45, 2012 : 497-499.*, 2012.

Beck, M. L., B. Freihaut, R. Henry, S. Pierce, et W. L. Bayer. 1975. « A Serum Haemagglutinating Property Dependent upon Polycarboxyl Groups ». *British Journal of Haematology* 29 (1): 149-56.

Bedrosian, T. A., L. K. Fonken, et R. J. Nelson. 2016. « Endocrine effects of circadian disruption ». In *Annual Review of Physiology, Vol 78*, édité par D. Julius, 78:109-31. Annual Review of Physiology. https://doi.org/10.1146/annurev-physiol-021115-105102.

Bedrosian, Tracy A., Laura K. Fonken, James C. Walton, Abraham Haim, et Randy J. Nelson. 2011. « Dim Light at Night Provokes Depression-like Behaviors and Reduces CA1 Dendritic Spine Density in Female Hamsters ». *Psychoneuroendocrinology* 36 (7): 1062-69. https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2011.01.004.

Begaj, Tedi, et Shlomit Schaal. 2018. « Sunlight and Ultraviolet Radiation-Pertinent Retinal Implications and Current Management ». *Survey of Ophthalmology* 63 (2): 174-92. https://doi.org/10.1016/j.survophthal.2017.09.002.

Behar-Cohen, F., C. Martinsons, F. Viénot, G. Zissis, A. Barlier-Salsi, J. P. Cesarini, O. Enouf, M. Garcia, S. Picaud, et D. Attia. 2011. « Light-Emitting Diodes (LED) for Domestic Lighting: Any Risks for the Eye? » *Progress in Retinal and Eye Research* 30 (4): 239-57. https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2011.04.002.

Beirne, Kathy, Malgorzata Rozanowska, et Marcela Votruba. 2016. « Red Light Treatment in an Axotomy Model of Neurodegeneration ». *Photochemistry and Photobiology* 92 (4): 624-31. https://doi.org/10.1111/php.12606.

Bellingham, James, Shyam S. Chaurasia, Zara Melyan, Cuimei Liu, Morven A. Cameron, Emma E. Tarttelin, P. Michael Iuvone, Mark W. Hankins, Gianluca Tosini, et Robert J. Lucas. 2006. « Evolution of Melanopsin Photoreceptors: Discovery and Characterization of a New Melanopsin in Nonmammalian Vertebrates ». *PLoS Biology* 4 (8): e254. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040254.

Bengsen, Andrew J, Luke K-P Leung, Steven J Lapidge, et Iain J Gordon. 2010. « Artificial illumination reduces bait-take by small rainforest mammals ». *Applied Animal Behaviour Science* 127 (1): 66-72.

Bennie, J., T. W. Davies, D. Cruse, et K. J. Gaston. 2016. « Ecological Effects of Artificial Light at Night on Wild Plants ». *Journal of Ecology* 104 (3): 611-20. https://doi.org/10.1111/1365-2745.12551.

Bennie, J., T. W. Davies, D. Cruse, R. Inger, et K. J. Gaston. 2015. « Cascading effects of artificial light at night: resource-mediated control of herbivores in a grassland ecosystem ». *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 370 (1667). https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0131.

Bennie, J., J. P. Duffy, T. W. Davies, M. E. Correa-Cano, et K. J. Gaston. 2015. « Global Trends in Exposure to Light Pollution in Natural Terrestrial Ecosystems ». *Remote Sensing* 7 (3): 2715-30. https://doi.org/10.3390/rs70302715.

Benoit, J., et I. Assenmacher. 1954. « Sensibilité comparée des récepteurs superficiels et profonds dans le réflexe photo-sexuel chez le canard ». *Comptes Rendus Hebdomadaires Des Séances de l'Academie des Sciences* 239 (1): 105-7.

Benoit, Jacques. 1935. « Stimulation par la lumiere artificielle du developpement testiculaire chez des canards aveugles par section du nerf optique ». *CR Société de Biologie (Paris)* 120: 133-36.

Berg, Thomas J.T.P. van den, Luuk Franssen, Bastiaan Kruijt, et Joris E. Coppens. 2013. « History of Ocular Straylight Measurement: A Review ». *Zeitschrift Für Medizinische Physik* 23 (1): 6-20. https://doi.org/10.1016/j.zemedi.2012.10.009.

Bergman, Reuven. 2008. « Dermatopathology and molecular genetics ». *Journal of the American Academy of Dermatology* 58 (3): 452-57.

Berman, S. M., D. S. Greenhouse, I. L. Bailey, R. D. Clear, et T. W. Raasch. 1991. « Human Electroretinogram Responses to Video Displays, Fluorescent Lighting, and Other High Frequency Sources ». *Optometry and Vision Science: Official Publication of the American Academy of Optometry* 68 (8): 645-62.

Berry, Richard P., William T. Wcislo, et Eric J. Warrant. 2011. « Ocellar adaptations for dim light vision in a nocturnal bee ». *Journal of Experimental Biology* 214 (8): 1283-93. https://doi.org/10.1242/jeb.050427.

Berson, David M. 2003. « Strange Vision: Ganglion Cells as Circadian Photoreceptors ». *Trends in Neurosciences* 26 (6): 314-20. https://doi.org/10.1016/S0166-2236(03)00130-9.

Bian, Z. H., R. F. Cheng, Q. C. Yang, J. Wang, et C. G. Lu. 2016. « Continuous light from red, blue, and green light-emitting diodes reduces nitrate content and enhances phytochemical concentrations and antioxidant capacity in lettuce ». *Journal of the American Society for Horticultural Science* 141 (2): 186-U216.

Binder, T. R., et D. G. McDonald. 2008. « The role of dermal photoreceptors during the sea lamprey (Petromyzon marinus) spawning migration ». *Journal of Comparative Physiology A-Neuroethology Sensory Neural and Behavioral Physiology* 194 (11): 921-28. https://doi.org/10.1007/s00359-008-0364-9.

Bloch, G., E. Hazan, et A. Rafaeli. 2013. « Circadian Rhythms and Endocrine Functions in Adult Insects ». *Journal of Insect Physiology* 59 (1): 56-69. https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2012.10.012.

Bobu, Corina, et David Hicks. 2009. « Regulation of Retinal Photoreceptor Phagocytosis in a Diurnal Mammal by Circadian Clocks and Ambient Lighting ». *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 50 (7): 3495-3502. https://doi.org/10.1167/iovs.08-3145.

Bobu, Corina, Cristina Sandu, Virginie Laurent, Marie-Paule Felder-Schmittbuhl, et David Hicks. 2013. « Prolonged Light Exposure Induces Widespread Phase Shifting in the Circadian Clock and Visual Pigment Gene Expression of the Arvicanthis Ansorgei Retina ». *Molecular Vision* 19: 1060-73.

Bodington, D, A Bierman, et N Narendran. 2016. « A Flicker Perception Metric ». *Lighting Research & Technology* 48 (5): 624-41. https://doi.org/10.1177/1477153515581006.

Boff, Kenneth R., Lloyd Kaufman, et James P. Thomas, éd. 1986. *Handbook of perception and human performance*. New York: Wiley.

Boissin, J, et B Canguilhem. 1998. « Les rythmes du vivant ». *Origine et contrôle des rythmes biologiques. Éditions CNRS/Nathan*, 320.

Boivin, D. B., J. F. Duffy, R. E. Kronauer, et C. A. Czeisler. 1996. « Dose-Response Relationships for Resetting of Human Circadian Clock by Light ». *Nature* 379 (6565): 540-42. https://doi.org/10.1038/379540a0.

Boivin, Diane B., et Francine O. James. 2005. « Light Treatment and Circadian Adaptation to Shift Work ». *Industrial Health* 43 (1): 34-48.

Bolton, D, M Mayer-Pinto, GF Clark, KA Dafforn, WA Brassil, A Becker, et EL Johnston. 2017. « Coastal urban lighting has ecological consequences for multiple trophic levels under the sea ». *Science of The Total Environment* 576: 1-9.

Bonmati-Carrion, M. A., B. Bano-Otalora, J. A. Madrid, et M. A. Rol. 2017. « Light color importance for circadian entrainment in a diurnal (Octodon degus) and a nocturnal (Rattus norvegicus) rodent ». *Scientific Reports* 7 (août). https://doi.org/10.1038/s41598-017-08691-7.

Bonmati-Carrion, Maria Angeles, Raquel Arguelles-Prieto, Maria Jose Martinez-Madrid, Russel Reiter, Ruediger Hardeland, Maria Angeles Rol, et Juan Antonio Madrid. 2014. « Protecting the Melatonin Rhythm through Circadian Healthy Light Exposure ». *International Journal of Molecular Sciences* 15 (12): 23448-500. https://doi.org/10.3390/ijms151223448.

Borbély, Alexander A., Serge Daan, Anna Wirz-Justice, et Tom Deboer. 2016. « The Two-Process Model of Sleep Regulation: A Reappraisal ». *Journal of Sleep Research* 25 (2): 131-43. https://doi.org/10.1111/jsr.12371.

Borragán, Guillermo, Gaétane Deliens, Philippe Peigneux, et Rachel Leproult. 2017. « Bright light exposure does not prevent the deterioration of alertness induced by sustained high cognitive load demands ». *Journal of Environmental Psychology* 51 (août): 95-103. https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2017.03.008.

Botha, L. M., T. M. Jones, et G. R. Hopkins. 2017. « Effects of lifetime exposure to artificial light at night on cricket (Teleogryllus commodus) courtship and mating behaviour ». *Animal Behaviour* 129 (juillet): 181-88. https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2017.05.020.

Bouaziz, Mehdi, Safa Bejaoui, Imen Rabeh, Raouf Besbes, M. 'Hamed El Cafsi, et Jack Falcón. 6. « Impact of temperature on sea bass, Dicentrarchus labrax, retina: Fatty acid composition, expression of rhodopsin and enzymes of lipid and melatonin metabolism ». *Experimental Eye Research* 159: 87-97. https://doi.org/10.1016/j.exer.2017.03.010.

Bouma, H. 1962. « Size of the Static Pupil as a Function of Wave-Length and Luminosity of the Light Incident on the Human Eye ». *Nature* 193 (4816): 690-91. https://doi.org/10.1038/193690a0.

Bousquet, Elodie, Myriam Dhundass, Mathieu Lehmann, Pierre-Raphaël Rothschild, Virginie Bayon, Damien Leger, Ciara Bergin, Ali Dirani, Talal Beydoun, et Francine Behar-Cohen. 2016. « Shift Work: A Risk Factor for Central Serous Chorioretinopathy ». *American Journal of Ophthalmology* 165 (mai): 23-28. https://doi.org/10.1016/j.ajo.2016.02.012.

Bowmaker, J. K., et H. J. Dartnall. 1980. « Visual Pigments of Rods and Cones in a Human Retina ». *The Journal of Physiology* 298 (janvier): 501-11.

Bowmaker, J. K., et H. J. Wagner. 2004. « Pineal organs of deep-sea fish: photopigments and structure ». *Journal of Experimental Biology* 207 (14): 2379-87. https://doi.org/10.1242/jeb.01033.

Boyce, P. R. 2014. *Human factors in lighting*. Third edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.

Boyles, J. G., P. M. Cryan, G. F. McCracken, et T. H. Kunz. 2011. « Economic importance of bats in agriculture ». *Science* 332 (6025): 41-42. https://doi.org/10.1126/science.1201366.

Brabyn, J., M. Schneck, G. Haegerstrom-Portnoy, et L. Lott. 2001. « The Smith-Kettlewell Institute (SKI) Longitudinal Study of Vision Function and Its Impact among the Elderly: An Overview ». *Optometry and Vision Science: Official Publication of the American Academy of Optometry* 78 (5): 264-69.

Brainard, G. C., J. P. Hanifin, J. M. Greeson, B. Byrne, G. Glickman, E. Gerner, et M. D. Rollag. 2001. « Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor ». *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience* 21 (16): 6405-12.

Brainard, G.C., W. Coyle, M. Ayers, J. Kemp, B. Warfield, J. Maida, C. Bowen, C. Bernecker, S.W. Lockley, et J.P. Hanifin. 2013. « Solid-state lighting for the International Space Station: Tests of visual performance and melatonin regulation ». *Acta Astronautica* 92 (1): 21-28. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.04.019.

Brandstetter, Carolina, Frank G. Holz, et Tim U. Krohne. 2015. « Complement Component C5a Primes Retinal Pigment Epithelial Cells for Inflammasome Activation by Lipofuscin-mediated Photooxidative Damage ». *The Journal of Biological Chemistry* 290 (52): 31189-98. https://doi.org/10.1074/jbc.M115.671180.

Braun, R. J., P. E. King-Smith, C. G. Begley, Longfei Li, et N. R. Gewecke. 2015. « Dynamics and Function of the Tear Film in Relation to the Blink Cycle ». *Progress in Retinal and Eye Research* 45 (mars): 132-64. https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2014.11.001.

Brei, M., A. Perez-Barahona, et E. Strobl. 2016. « Environmental pollution and biodiversity: Light pollution and sea turtles in the Caribbean ». *Journal of Environmental Economics and Management* 77 (mai): 95-116. https://doi.org/10.1016/j.jeem.2016.02.003.

Brna, P. M., et K. G. Gordon. 2017. « "Selfie-Epilepsy": A Novel Photosensitivity ». *Seizure* 47 (avril): 5-8. https://doi.org/10.1016/j.seizure.2017.02.009.

Brown, Jay C. 2017. « Herpes Simplex Virus Latency: The DNA Repair-Centered Pathway ». *Advances in virology* 2017.

Brown, Timothy M. 2016. « Using Light to Tell the Time of Day: Sensory Coding in the Mammalian Circadian Visual Network ». *The Journal of Experimental Biology* 219 (Pt 12): 1779-92. https://doi.org/10.1242/jeb.132167.

Bruening, Anika, Franz Hölker, Steffen Franke, Torsten Preuer, et Werner Kloas. 2015. « Spotlight on fish: light pollution affects circadian rhythms of European perch but does not cause stress ». *Science of the Total Environment* 511: 516-22.

Brüning, Anika, Franz Hölker, Steffen Franke, Wibke Kleiner, et Werner Kloas. 2016. « Impact of different colours of artificial light at night on melatonin rhythm and gene expression of gonadotropins in European perch ». *Science of the Total Environment* 543: 214-22.

Brunner, M., et T. Schafmeier. 2006. « Transcriptional and post-transcriptional regulation of the circadian clock of cyanobacteria and Neurospora ». *Genes & Development* 20 (9): 1061-74. https://doi.org/10.1101/gad.1410406.

Buch, H., T. Vinding, et N. V. Nielsen. 2001. « Prevalence and Causes of Visual Impairment According to World Health Organization and United States Criteria in an Aged, Urban Scandinavian Population: The Copenhagen City Eye Study ». *Ophthalmology* 108 (12): 2347-57.

Buckhurst, P.J., S.A. Naroo, L.N. Davies, S. Shah, H. Buckhurst, A. Kingsnorth, T. Drew, et J.S. Wolffsohn. 2015. « Tablet App halometer for the assessment of dysphotopsia ». *Journal of Cataract and Refractive Surgery* 41 (11): 2424-29. https://doi.org/10.1016/j.jcrs.2015.05.041.

Bues, Matthias, Achim Pross, Oliver Stefani, Silvia Frey, Doreen Anders, Jakub Spaeti, Anna Wirz-Justice, Ralph Mager, et Christian Cajochen. 2012. « LED-backlit computer screens influence our biological clock and keep us more awake ». *Journal of the Society for Information Display* 20 (5): 266-72. https://doi.org/10.1889/jsid20.5.266.

Buhr, Ethan D., Wendy W. S. Yue, Xiaozhi Ren, Zheng Jiang, Hsi-Wen Rock Liao, Xue Mei, Shruti Vemaraju, et al. 2015. « Neuropsin (OPN5)-Mediated Photoentrainment of Local Circadian Oscillators in Mammalian Retina and Cornea ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112 (42): 13093-98. https://doi.org/10.1073/pnas.1516259112.

Bullough, JD, K Sweater Hickcox, TR Klein, A Lok, et N Narendran. 2012. « Detection and Acceptability of Stroboscopic Effects from Flicker ». *Lighting Research & Technology* 44 (4): 477-83. https://doi.org/10.1177/1477153511414838.

Bullough, JD, et D Marcus. 2016. « Influence of Flicker Characteristics on Stroboscopic Effects ». *Lighting Research & Technology* 48 (7): 857-70. https://doi.org/10.1177/1477153515599566.

Bullough, JD, K. Sweater Hickcox, TR Klein, et N. Narendran. 2011. « Effects of Flicker Characteristics from Solid-State Lighting on Detection, Acceptability and Comfort ». *Lighting Research & Technology* 43 (3): 337-48. https://doi.org/10.1177/1477153511401983.

Burght, Barbro W. van der, Morten Hansen, Jørgen Olsen, Jilin Zhou, Yalin Wu, Mogens H. Nissen, et Janet R. Sparrow. 2013. « Early Changes in Gene Expression Induced by Blue Light Irradiation of A2E-Laden Retinal Pigment Epithelial Cells ». *Acta Ophthalmologica* 91 (7): e537-545. https://doi.org/10.1111/aos.12146.

Buschbeck, Elke K., et Markus Friedrich. 2008. « Evolution of insect eyes: Tales of ancient heritage, deconstruction, reconstruction, remodeling, and recycling ». *Evolution: Education and Outreach* 1 (4): 448-62. https://doi.org/10.1007/s12052-008-0086-z.

Cajochen, Christian, Sarah Chellappa, et Christina Schmidt. 2010. « What Keeps Us Awake? The Role of Clocks and Hourglasses, Light, and Melatonin ». *International Review of Neurobiology* 93: 57-90. https://doi.org/10.1016/S0074-7742(10)93003-1.

Cajochen, Christian, Sylvia Frey, Doreen Anders, Jakub Spaeti, Matthias Bues, Achim Pross, Ralph Mager, Anna Wirz-Justice, et Oliver Stefani. 2011. « Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance ». *Journal of Applied Physiology* 110 (5): 1432-38. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00165.2011.

Cajochen, Christian, Mirjam Münch, Szymon Kobialka, Kurt Kräuchi, Roland Steiner, Peter Oelhafen, Selim Orgül, et Anna Wirz-Justice. 2005. « High Sensitivity of Human Melatonin, Alertness, Thermoregulation, and Heart Rate to Short Wavelength Light ». *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism* 90 (3): 1311-16. https://doi.org/10.1210/jc.2004-0957.

Calaza, Karin C., Jaimie Hoh Kam, Chris Hogg, et Glen Jeffery. 2015. « Mitochondrial Decline Precedes Phenotype Development in the Complement Factor H Mouse Model of Retinal Degeneration but Can

Be Corrected by near Infrared Light ». *Neurobiology of Aging* 36 (10): 2869-76. https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2015.06.010.

Camañes, Víctor, Daniel Elduque, Carlos Javierre, et Ángel Fernández. 2014. « The Influence of Different Recycling Scenarios on the Mechanical Design of an LED Weatherproof Light Fitting ». *Materials (Basel, Switzerland)* 7 (8): 5769-88. https://doi.org/10.3390/ma7085769.

Cameron, M. A., et R. J. Lucas. 2009. « Influence of the rod photoresponse on light adaptation and circadian rhythmicity in the cone ERG ». *Molecular Vision* 15 (238): 2209-16.

Cancho-Candela, R., J. M. Andres-de Llano, et J. Ardura-Fernandez. 2007. « Decline and loss of birth seasonality in Spain: analysis of 33 421 731 births over 60 years ». *Journal of Epidemiology and Community Health* 61 (8): 713-18. https://doi.org/10.1136/jech.2006.050211.

Cao, Dingcai, et Pablo A. Barrionuevo. 2015a. « Estimating Photoreceptor Excitations from Spectral Outputs of a Personal Light Exposure Measurement Device ». *Chronobiology International* 32 (2): 270-80. https://doi.org/10.3109/07420528.2014.966269.

———. 2015b. « The Importance of Intrinsically Photosensitive Retinal Ganglion Cells and Implications for Lighting Design ». *Journal of Solid State Lighting* 2 (1). https://doi.org/10.1186/s40539-015-0030-0.

Casals-Casas, C., et B. Desvergne. 2011. « Endocrine disruptors: From endocrine to metabolic disruption ». In *Annual Review of Physiology, Vol 73*, édité par D. Julius et D. E. Clapham, 73:135-62. Annual Review of Physiology. https://doi.org/10.1146/annurev-physiol-012110-142200.

Casasole, G., T. Raap, D. Costantini, H. AbdElgawad, H. Asard, R. Pinxten, et M. Eens. 2017. « Neither artificial light at night, anthropogenic noise nor distance from roads are associated with oxidative status of nestlings in an urban population of songbirds ». *Comparative Biochemistry and Physiology a-Molecular & Integrative Physiology* 210 (août): 14-21. https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2017.05.003.

Casson, E. J., C. A. Johnson, et J. M. Nelson-Quigg. 1993. « Temporal Modulation Perimetry: The Effects of Aging and Eccentricity on Sensitivity in Normals ». *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 34 (11): 3096-3102.

Cassone, Vincent M. 2014. « Avian circadian organization: A chorus of clocks ». *Frontiers in Neuroendocrinology* 35 (1): 76-88. https://doi.org/10.1016/j.yfrne.2013.10.002.

Cavey, M., B. Collins, C. Bertet, et J. Blau. 2016. « Circadian rhythms in neuronal activity propagate through output circuits ». *Nature Neuroscience* 19 (4): 587-+. https://doi.org/10.1038/nn.4263.

Challet, E. 2015. « Keeping circadian time with hormones ». *Diabetes Obesity & Metabolism* 17 (septembre): 76-83. https://doi.org/10.1111/dom.12516.

Chamorro, Eva, Cristina Bonnin-Arias, María Jesús Pérez-Carrasco, Javier Muñoz de Luna, Daniel Vázquez, et Celia Sánchez-Ramos. 2013. « Effects of Light-Emitting Diode Radiations on Human Retinal Pigment Epithelial Cells in Vitro ». *Photochemistry and Photobiology* 89 (2): 468-73. https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2012.01237.x.

Chang, Anne-Marie, Daniel Aeschbach, Jeanne F. Duffy, et Charles A. Czeisler. 2015. « Evening Use of Light-Emitting EReaders Negatively Affects Sleep, Circadian Timing, and next-Morning Alertness ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112 (4): 1232-37. https://doi.org/10.1073/pnas.1418490112.

Chang, Anne-Marie, Nayantara Santhi, Melissa St Hilaire, Claude Gronfier, Dayna S. Bradstreet, Jeanne F. Duffy, Steven W. Lockley, Richard E. Kronauer, et Charles A. Czeisler. 2012. « Human Responses to Bright Light of Different Durations ». *The Journal of Physiology* 590 (13): 3103-12. https://doi.org/10.1113/jphysiol.2011.226555.

Chang, Anne-Marie, Frank A. J. L. Scheer, et Charles A. Czeisler. 2011. « The Human Circadian System Adapts to Prior Photic History ». *The Journal of Physiology* 589 (Pt 5): 1095-1102. https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.201194.

Chang, Anne-Marie, Frank A. J. L. Scheer, Charles A. Czeisler, et Daniel Aeschbach. 2013. « Direct Effects of Light on Alertness, Vigilance, and the Waking Electroencephalogram in Humans Depend on Prior Light History ». *Sleep* 36 (8): 1239-46. https://doi.org/10.5665/sleep.2894.

Chang, C. L., et K. P. Chang. 2014. « The growth response of leaf lettuce at different stages to multiple wavelength-band light-emitting diode lighting ». *Scientia Horticulturae* 179 (novembre): 78-84. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.09.013.

Chang, P-C, L-Y Chien, Y Ye, et M-J Kao. 2013. « Irradiation by light-emitting diode light as an adjunct to facilitate healing of experimental periodontitis in vivo ». *Journal of periodontal research* 48 (2): 135-43.

Chang, Y., S. A. Burns, et M. R. Kreitz. 1993. « Red–green Flicker Photometry and Nonlinearities in the Flicker Electroretinogram ». *JOSA A* 10 (6): 1413-22. https://doi.org/10.1364/JOSAA.10.001413.

Chaves, I., R. Pokorny, M. Byrdin, N. Hoang, T. Ritz, K. Brettel, L. O. Essen, G. T. J. van der Horst, A. Batschauer, et M. Ahmad. 2011. « The cryptochromes: Blue light photoreceptors in plants and animals ». In *Annual Review of Plant Biology, Vol 62*, édité par S. S. Merchant, W. R. Briggs, et D. Ort, 62:335-64. Annual Review of Plant Biology. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103759.

Chellappa, Sarah Laxhmi, Roland Steiner, Peter Blattner, Peter Oelhafen, Thomas Götz, et Christian Cajochen. 2011. « Non-Visual Effects of Light on Melatonin, Alertness and Cognitive Performance: Can Blue-Enriched Light Keep Us Alert? » *PLOS ONE* 6 (1): e16429. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016429.

Chen, S. C., R. M. Robertson, et C. W. Hawryshyn. 2014. « Ontogeny of melanophore photosensitivity in rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) ». *Biology Open* 3 (11): 1032-36. https://doi.org/10.1242/bio.201410058.

Chen, Si, Zhina Zhi, Qingqing Ruan, Qingxia Liu, Fen Li, Fen Wan, Peter S. Reinach, Jiangfan Chen, Jia Qu, et Xiangtian Zhou. 2017. « Bright Light Suppresses Form-Deprivation Myopia Development With Activation of Dopamine D1 Receptor Signaling in the ON Pathway in Retina ». *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 58 (4): 2306-16. https://doi.org/10.1167/iovs.16-20402.

Chen, X. L., Q. C. Yang, W. P. Song, L. C. Wang, W. Z. Guo, et X. Z. Xue. 2017. « Growth and nutritional properties of lettuce affected by different alternating intervals of red and blue LED irradiation ». *Scientia Horticulturae* 223 (septembre): 44-52. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.04.037.

Chen, Y., S. Peng, X. Tang, I. Heynderickx, et Cie. 2013. « COMPARISON BETWEEN FLUORESCENT AND LED LIGHTING ON VISIBILITY AND VISUAL COMFORT IN SCHOOL CLASSROOMS ». *Proceedings of the Cie Centenary Conference Towards a New Century of Light*, 727-32.

Chia, Yuan-Yi, Chien-Cheng Liu, Guan-Ming Feng, Chia-Chih Alex Tseng, Kuo-Chuan Hung, Chih-Chieh Chen, et Ping-Heng Tan. 2017. « The Antinociceptive Effect of Light-Emitting Diode Irradiation on Incised Wounds Is Correlated with Changes in Cyclooxygenase 2 Activity, Prostaglandin E2, and Proinflammatory Cytokines ». *Pain Research and Management* 2017.

Cho, YongMin, Seung-Hun Ryu, Byeo Ri Lee, Kyung Hee Kim, Eunil Lee, et Jaewook Choi. 2015. « Effects of Artificial Light at Night on Human Health: A Literature Review of Observational and Experimental Studies Applied to Exposure Assessment ». *Chronobiology International* 32 (9): 1294-1310. https://doi.org/10.3109/07420528.2015.1073158.

Choi, Cheol Young, Hyun Suk Shin, Young Jae Choi, Na Na Kim, Jehee Lee, et Gyung-Suk Kil. 2012. « Effect of LED light spectra on starvation-induced oxidative stress in the cinnamon clownfish Amphiprion melanopus ». *Comparative Biochemistry and Physiology a-Molecular & Integrative Physiology* 163 (3-4): 357-63. https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2012.07.005.

Choi, Cheol Young, Hyun Suk Shin, Na Na Kim, Sang-Geun Yang, Bong-Seok Kim, et Young Moon Yu. 2015. « Time-related effects of various LED light spectra on reproductive hormones in the brain of the goldfish Carassius auratus ». *Biological Rhythm Research* 46 (5): 671-82. https://doi.org/10.1080/09291016.2015.1046247.

Choi, Cheol Young, Hyun Suk Shin, Jehee Lee, et Gyung-Suk Kil. 2014. « Effects of retinal light input on circadian rhythm genes in the yellowtail clownfish (Amphiprion clarkii) as determined using LED light spectra ». *Biological Rhythm Research* 45 (5): 671-83. https://doi.org/10.1080/09291016.2014.884737.

Choi, J. Y., T. H. Kim, Y. J. Choi, N. N. Kim, S. Y. Oh, et C. Y. Choi. 2016. « Effects of various LED light spectra on antioxidant and immune response in juvenile rock bream, Oplegnathus fasciatus exposed to bisphenol A ». *Environmental Toxicology and Pharmacology* 45 (juillet): 140-49. https://doi.org/10.1016/j.etap.2016.05.026.

Choi, Ji Yong, Jin Ah Song, Hyun Suk Shin, Young Jae Choi, Bong-Seok Kim, Sung Gyu Yun, et Cheol Young Choi. 2014. « Effect of LED light spectra on circadian rhythms in goldfish Carassius auratus: expression profiles following thermal stress ». *Biological Rhythm Research* 45 (6): 895-908. https://doi.org/10.1080/09291016.2014.929854.

Christiansen, Anne L, Lise Aagaard, Aleksander Krag, Lars M Rasmussen, et Anette Bygum. 2016. « Cutaneous Porphyrias: Causes, Symptoms, Treatments and the Danish Incidence 1989–2013 ». *Acta dermato-venereologica* 96 (7): 868-72.

Chu, Christina A., Mark Rosenfield, et Joan K. Portello. 2014. « Blink Patterns: Reading from a Computer Screen versus Hard Copy ». *Optometry and Vision Science: Official Publication of the American Academy of Optometry* 91 (3): 297-302. https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000000157.

Ciach, M., et A. Frohlich. 2017. « Habitat type, food resources, noise and light pollution explain the species composition, abundance and stability of a winter bird assemblage in an urban environment ». *Urban Ecosystems* 20 (3): 547-59. https://doi.org/10.1007/s11252-016-0613-6.

CIBSE. 2017. « CIBSE - Building Services Knowledge », 2017. https://www.cibse.org/knowledge/knowledge-items/detail?id=a0q20000008I6z6AAC.

Cidral-Filho, F. J., D. F. Martins, A. O. More, L. Mazzardo-Martins, M. D. Silva, E. Cargnin-Ferreira, et A. R. Santos. 2013. « Light-Emitting Diode Therapy Induces Analgesia and Decreases Spinal Cord and Sciatic Nerve Tumour Necrosis Factor-Alpha Levels after Sciatic Nerve Crush in Mice ». *Eur J Pain* 17 (8): 1193-1204. https://doi.org/10.1002/j.1532-2149.2012.00280.x.

CIE. 2016. « Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems – Definitions and Measurement Models ». *CIE TN 006:2016*, 2016.

CIE 146:2002. 2002. « CIE 146:2002 CIE Equations for Disability Glare ». *Color Research & Application* 27 (6): 457-58. https://doi.org/10.1002/col.10102.

Cisse, Y. M., K. L. G. Russart, et R. J. Nelson. 2017. « Parental exposure to dim light at night prior to mating alters offspring adaptive immunity ». *Scientific Reports* 7 (mars): 1-10. https://doi.org/10.1038/srep45497.

Collin, J. P., J. Arendt, et W. A. Gern. 1988. « The third eye ». *La Recherche* 19 (203): 1154-65.

Collin, Shaun P., Wayne L. Davies, Nathan S. Hart, et David M. Hunt. 2009. « The evolution of early vertebrate photoreceptors ». *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 364 (1531): 2925-40. https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0099.

Collins, J. B. et R. G. Hopkifishernson. 1954. « Flicker Discomfort in the Lighting of Buildings," Transactions of the Illuminating Engineering Society, London ». *Transactions of the Illuminating Engineering Society, London, vol. 19, pp. 135–158*, 1954.

Colman et al. 1976. « The effects of fluorescent and incandescent illumination upon repetitive behaviors in autistic children ». *J Autism Child Schizophr*, 1976.

Colón, Diana C Valentín, Nicole M Rochet, Sheila M Valentín Nogueras, et Puerto Rico. s. d. « Photosensitivity Disorders ».

Connaughton, Victoria P., Bradley Wetzell, Lynne S. Arneson, Vittoria DeLucia, et Anthony L. Riley. 2015. « Elevated Dopamine Concentration in Light-Adapted Zebrafish Retinas Is Correlated with Increased Dopamine Synthesis and Metabolism ». *Journal of Neurochemistry* 135 (1): 101-8. https://doi.org/10.1111/jnc.13264.

Côté, Isabelle M, Emily S Darling, et Christopher J Brown. 2016. « Interactions among ecosystem stressors and their importance in conservation ». In , 283:20152592. The Royal Society.

Craver, J. K., J. R. Gerovac, R. G. Lopez, et D. A. Kopsell. 2017. « Light intensity and light quality from sole-source light-emitting diodes impact phytochemical concentrations within Brassica microgreens ». *Journal of the American Society for Horticultural Science* 142 (1): 3-12. https://doi.org/10.21273/jashs03830-16.

Crowley, Stephanie J., Sean W. Cain, Angus C. Burns, Christine Acebo, et Mary A. Carskadon. 2015. « Increased Sensitivity of the Circadian System to Light in Early/Mid-Puberty ». *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism* 100 (11): 4067-73. https://doi.org/10.1210/jc.2015-2775.

Crowley, Stephanie J., Eliza Van Reen, Monique K. LeBourgeois, Christine Acebo, Leila Tarokh, Ronald Seifer, David H. Barker, et Mary A. Carskadon. 2014. « A Longitudinal Assessment of Sleep Timing, Circadian Phase, and Phase Angle of Entrainment across Human Adolescence ». *PloS One* 9 (11): e112199. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112199.

CSTB. 2016. « Caractérisation de lampes à usage domestique Rapport final du contrat 2015-CEC-046 », 2016.

Culpepper, Larry. 2010. « The Social and Economic Burden of Shift-Work Disorder ». *The Journal of Family Practice* 59 (1 Suppl): S3-11.

Currie, Stephen P, Gayle H Doherty, et Keith T Sillar. 2016. « Deep-brain photoreception links luminance detection to motor output in Xenopus frog tadpoles ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113 (21): 6053-58.

Czeisler, Charles A. 2013. « Perspective: Casting Light on Sleep Deficiency ». *Nature* 497 (7450): S13. https://doi.org/10.1038/497S13a.

Da Silva, A., D. Diez-Mendez, et B. Kempenaers. 2017. « Effects of experimental night lighting on the daily timing of winter foraging in common European songbirds ». *Journal of Avian Biology* 48 (6): 862-71. https://doi.org/10.1111/jav.01232.

Da Silva, Arnaud, Mihai Valcu, et Bart Kempenaers. 2015. « Light Pollution Alters the Phenology of Dawn and Dusk Singing in Common European Songbirds ». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 370 (1667). https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0126.

Dacey, Dennis M., Hsi-Wen Liao, Beth B. Peterson, Farrel R. Robinson, Vivianne C. Smith, Joel Pokorny, King-Wai Yau, et Paul D. Gamlin. 2005. « Melanopsin-Expressing Ganglion Cells in Primate Retina Signal Colour and Irradiance and Project to the LGN ». *Nature* 433 (7027): 749-54. https://doi.org/10.1038/nature03387.

Dale, A. 2011. « Preliminary Comparative Life-Cycle Impacts of Streetlight Technology | Journal of Infrastructure Systems | Vol 17, No 4 ». 2011. https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29IS.1943-555X.0000064.

Darling, Emily S, et Isabelle M Côté. 2008. « Quantifying the evidence for ecological synergies ». *Ecology letters* 11 (12): 1278-86.

Dauchy, Robert T, Melissa A Wren-Dail, Aaron E Hoffman, John P Hanifin, Benjamin Warfield, George C Brainard, Steven M Hill, Victoria P Belancio, Erin M Dauchy, et David E Blask. 2016. « Effects of daytime exposure to light from blue-enriched light-emitting diodes on the nighttime melatonin amplitude and circadian regulation of rodent metabolism and physiology ». *Comparative medicine* 66 (5): 373-83.

Davies, Thomas W, Jonathan Bennie, Dave Cruse, Dan Blumgart, Richard Inger, et Kevin J Gaston. 2017. « Multiple night-time light-emitting diode lighting strategies impact grassland invertebrate assemblages ». *Global Change Biology*.

Davies, Wayne I. L., Shaun P. Collin, et David M. Hunt. 2012. « Molecular ecology and adaptation of visual photopigments in craniates ». *Molecular Ecology* 21 (13): 3121-58. https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2012.05617.x.

Davis, James, Yi-Hsuan Hsieh, et Hung-Chi Lee. 2015. « Humans Perceive Flicker Artifacts at 500 Hz ». *Scientific Reports* 5 (février): 7861. https://doi.org/10.1038/srep07861.

Del Olmo-Aguado, Susana, Claudia Núñez-Álvarez, et Neville N. Osborne. 2016. « Red Light of the Visual Spectrum Attenuates Cell Death in Culture and Retinal Ganglion Cell Death in Situ ». *Acta Ophthalmologica* 94 (6): e481-491. https://doi.org/10.1111/aos.12996.

Delabbio, J. 2015. « The importance of environmental light to the culture of marine fish larvae ». 2015. http://www.onceinnovations.com/the-science/aquaculture.

Delahunty, G., J. Olcese, et V. Devlaming. 1980. « Photoperiod effects on carbohydrate metabolites in the goldfish, carassius-auratus - Role of the pineal and retinal pathways ». *Revue Canadienne De Biologie* 39 (3): 173-80.

Delcourt, Cécile, Audrey Cougnard-Grégoire, Mathieu Boniol, Isabelle Carrière, Jean-François Doré, Marie-Noëlle Delyfer, Marie-Bénédicte Rougier, et al. 2014. « Lifetime Exposure to Ambient Ultraviolet Radiation and the Risk for Cataract Extraction and Age-Related Macular Degeneration: The Alienor Study ». *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 55 (11): 7619-27. https://doi.org/10.1167/iovs.14-14471.

Demotes-Mainard, S., T. Peron, A. Corot, J. Bertheloot, J. Le Gourrierec, S. Pelleschi-Travier, L. Crespel, et al. 2016. « Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture ». *Environmental and Experimental Botany* 121 (janvier): 4-21. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.05.010.

Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA). 2009. « Life cycle assessment of ultra-efficient lamps. », 2009.

Desan, Paul H., Andrea J. Weinstein, Erin E. Michalak, Edwin M. Tam, Ybe Meesters, Martine J. Ruiter, Edward Horn, et al. 2007. « A controlled trial of the Litebook light-emitting diode (LED) light therapy device for treatment of Seasonal Affective Disorder (SAD) ». *Bmc Psychiatry* 7 (août). https://doi.org/10.1186/1471-244x-7-38.

Di Cara, F., et K. King-Jones. 2013. « How Clocks and Hormones Act in Concert to Control the Timing of Insect Development ». In *Developmental Timing*, édité par A. E. Rougvie et M. B. Oconnor, 105:1-36.

Current Topics in Developmental Biology. Amsterdam: Elsevier Science Bv. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-396968-2.00001-4.

Dibner, Charna, Ueli Schibler, et Urs Albrecht. 2010. « The Mammalian Circadian Timing System: Organization and Coordination of Central and Peripheral Clocks ». *Annual Review of Physiology* 72: 517-49. https://doi.org/10.1146/annurev-physiol-021909-135821.

Dijk, Derk-Jan, et Simon N. Archer. 2009. « Light, Sleep, and Circadian Rhythms: Together Again ». *PLOS Biology* 7 (6): e1000145. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1000145.

Dirani, M., L. Tong, G. Gazzard, X. Zhang, A. Chia, T. L. Young, K. A. Rose, P. Mitchell, et S.-M. Saw. 2009. « Outdoor Activity and Myopia in Singapore Teenage Children ». *The British Journal of Ophthalmology* 93 (8): 997-1000. https://doi.org/10.1136/bjo.2008.150979.

Dlugosz-Grochowska, O., A. Oton, et R. Wojciechowska. 2016. « Modifying folate and polyphenol concentrations in Lamb's lettuce by the use of LED supplemental lighting during cultivation in greenhouses ». *Journal of Functional Foods* 26 (octobre): 228-37. https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.07.020.

Dobb, Rachel, Franck Martial, Daniel Elijah, Riccardo Storchi, Timothy M. Brown, et Robert J. Lucas. 2017. « The Impact of Temporal Modulations in Irradiance under Light Adapted Conditions on the Mouse Suprachiasmatic Nuclei (SCN) ». *Scientific Reports* 7 (1): 10582. https://doi.org/10.1038/s41598-017-11184-2.

Dominoni, D. M., J. C. Borniger, et R. J. Nelson. 2016. « Light at night, clocks and health: from humans to wild organisms ». *Biology Letters* 12 (2). https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0015.

Dominoni, D. M., E. O. Carmona-Wagner, M. Hofmann, B. Kranstauber, et J. Partecke. 2014. « Individual-based measurements of light intensity provide new insights into the effects of artificial light at night on daily rhythms of urban-dwelling songbirds ». *Journal of Animal Ecology* 83 (3): 681-92. https://doi.org/10.1111/1365-2656.12150.

Dominoni, D. M., W. Goymann, B. Helm, et J. Partecke. 2013. « Urban-like night illumination reduces melatonin release in European blackbirds (Turdus merula): implications of city life for biological time-keeping of songbirds ». *Frontiers in Zoology* 10 (octobre). https://doi.org/10.1186/1742-9994-10-60.

Dominoni, D. M., B. Helm, M. Lehmann, H. B. Dowse, et J. Partecke. 2013. « Clocks for the city: circadian differences between forest and city songbirds ». *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* 280 (1763). https://doi.org/10.1098/rspb.2013.0593.

Dominoni, D. M., et J. Partecke. 2015. « Does light pollution alter daylength? A test using light loggers on free-ranging European blackbirds (Turdus merula) ». *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 370 (1667). https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0118.

Dominoni, D. M., M. Quetting, et J. Partecke. 2013. « Long-Term Effects of Chronic Light Pollution on Seasonal Functions of European Blackbirds (Turdus merula) ». *Plos One* 8 (12). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085069.

Dominoni, D. M., T. J. Van't Hof, et J. Partecke. 2015. « Social cues are unlikely to be the single cause for early reproduction in urban European blackbirds (Turdus merula) ». *Physiology & Behavior* 142 (avril): 14-19. https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2015.01.026.

Dominoni, D., M. Quetting, et J. Partecke. 2013. « Artificial light at night advances avian reproductive physiology ». *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* 280 (1756). https://doi.org/10.1098/rspb.2012.3017.

Du, X. L., J. Wang, W. S. Pan, Q. J. Liu, X. J. Wang, et W. J. Wu. 2014. « Observation of magnetic field effects on transient fluorescence spectra of cryptochrome 1 from homing pigeons ». *Photochemistry and Photobiology* 90 (5): 989-96. https://doi.org/10.1111/php.12276.

Dubertret, Louis. 2000. « Peau et environnement ». *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie* 323 (7): 629-32. https://doi.org/10.1016/S0764-4469(00)90146-X.

Dueck, Tom, Wim van Ieperen, et Kari Taulavuori. 2016. « Light perception, signalling and plant responses to spectral quality and photoperiod in natural and horticultural environments ». *Environmental and Experimental Botany* 121 (janvier): 1-3. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.06.012.

Duffy, James P, Jonathan Bennie, América P Durán, et Kevin J Gaston. 2015. « Mammalian ranges are experiencing erosion of natural darkness ». *Scientific reports* 5: 12042.

Duffy, Jeanne F., Jamie M. Zeitzer, et Charles A. Czeisler. 2007. « Decreased Sensitivity to Phase-Delaying Effects of Moderate Intensity Light in Older Subjects ». *Neurobiology of Aging* 28 (5): 799-807. https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2006.03.005.

Dumortier, Dominique, Nozomu Yoshizawa, et Jeremy Derlande. 2018. « COMPARISON BETWEEN OLED AND LED LIGHTING: USER PREFERENCES AND INFLUENCE ON WELL-BEING, IN FRANCE AND JAPAN ». In , 422-26. https://doi.org/10.25039/x44.2017.OP57.

Dyble et al. 2005. « Impact of dimming white LEDs: chromaticity shifts due to different dimming methods ». *Proc. of SPIE 5th International Conference on Solid State Lighting, pp.291-299, 2005*, 2005. http://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.625924.

Dziasko, Marc A., Stephen J. Tuft, et Julie T. Daniels. 2015. « Limbal Melanocytes Support Limbal Epithelial Stem Cells in 2D and 3D Microenvironments ». *Experimental Eye Research* 138 (septembre): 70-79. https://doi.org/10.1016/j.exer.2015.06.026.

Dzn, H. de Lange. 1954. « Relationship between Critical Flicker-Frequency and a Set of Low-Frequency Characteristics of the Eye ». *JOSA* 44 (5): 380-89. https://doi.org/10.1364/JOSA.44.000380.

———. 1958. « Research into the Dynamic Nature of the Human Fovea→Cortex Systems with Intermittent and Modulated Light. I. Attenuation Characteristics with White and Colored Light ». *JOSA* 48 (11): 777-84. https://doi.org/10.1364/JOSA.48.000777.

Edmunds, L. N., et K. J. Adams. 1981. « Clocked cell-cycle clocks ». *Science* 211 (4486): 1002-13. https://doi.org/10.1126/science.7008196.

Edmunds, Leland N. 1984. *Cell cycle clocks*. M. Dekker.

Eells, Janis T., Sandeep Gopalakrishnan, et Krisztina Valter. 2016. « Near-Infrared Photobiomodulation in Retinal Injury and Disease ». *Advances in Experimental Medicine and Biology* 854: 437-41. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17121-0_58.

Ekstrom, P., et H. Meissl. 2003. « Evolution of photosensory pineal organs in new light: the fate of neurodocrine photoreceptors ». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 358 (1438): 1679-1700. https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1303.

El Ghissassi, Fatiha, Robert Baan, Kurt Straif, Yann Grosse, Béatrice Secretan, Véronique Bouvard, Lamia Benbrahim-Tallaa, Neela Guha, Crystal Freeman, et Laurent Galichet. 2009. « A review of human carcinogens—part D: radiation ». *The lancet oncology* 10 (8): 751-52.

Elbaz. 2016. « Apport des nouvelles technologies du sommeil en réanimation médicale, dans l'exploration de la maladie d'Alzheimer, du syndrome d'apnée du sommeil et en conditions extrêmes. Thèse de Doctorat ». *Université Paris- Descartes*, 2016.

Endo, M. 2016. « Tissue-specific circadian clocks in plants ». *Current Opinion in Plant Biology* 29 (février): 44-49.

Espigares, F, A Rocha, A Gómez, M Carrillo, et S Zanuy. 2017. « Photoperiod modulates the reproductive axis of European sea bass through regulation of kiss1 and gnrh2 neuronal expression ». *General and comparative endocrinology* 240: 35-45.

F. Vienot et L. David. 2002. « An algorithm to assess the detectability of achromatic spatio-temporal patterns at any illumination ». *Proc. CIE Symposium '02 Temporal and Spatial Aspects of Light and Colour Perception and Measurement, Veszprem, Hungary*, 2002.

Fain, Gordon L., Roger Hardie, et Simon B. Laughlin. 2010. « Phototransduction and the evolution of photoreceptors ». *Current Biology* 20 (3): R114-24. https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.12.006.

Falchi, F., P. Cinzano, D. Duriscoe, C. C. M. Kyba, C. D. Elvidge, K. Baugh, B. A. Portnov, N. A. Rybnikova, et R. Furgoni. 2016. « The new world atlas of artificial night sky brightness ». *Science Advances* 2 (6). https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377.

Falchi, Fabio, Pierantonio Cinzano, Dan Duriscoe, Christopher C. M. Kyba, Christopher D. Elvidge, Kimberly Baugh, Boris A. Portnov, Nataliya A. Rybnikova, et Riccardo Furgoni. 2016. « The New World Atlas of Artificial Night Sky Brightness ». *Science Advances* 2 (6): e1600377. https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377.

Falchi, Fabio, Pierantonio Cinzano, Christopher D. Elvidge, David M. Keith, et Abraham Haim. 2011. « Limiting the Impact of Light Pollution on Human Health, Environment and Stellar Visibility ». *Journal of Environmental Management* 92 (10): 2714-22. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.029.

Falcón, J. 1999. « Cellular circadian clocks in the pineal ». *Progress in Neurobiology* 58 (2): 121-62. https://doi.org/10.1016/s0301-0082(98)00078-1.

Falcón, J., L. Besseau, et G. Boeuf. 2007. « Molecular and cellular regulation of pineal organ responses ». In *Sensory systems neuroscience - Fish physiology*, édité par T. Hara et B. Zielinski, 25:243-306. AP Elsevier.

Falcón, J., L. Besseau, S. Sauzet, et G. Boeuf. 2007. « Melatonin effects on the hypothalamo-pituitary axis in fish ». *Trends in Endocrinology and Metabolism* 18 (2): 81-88.

Falcón, J., H. Migaud, J. A. Muñoz-Cueto, et M. Carrillo. 2010. « Current knowledge on the melatonin system in teleost fish ». *General and Comparative Endocrinology* 165: 469-82.

Fan, Xiaofei, Leonard Hearne, Bo Lei, Judith H. Miles, Nicole Takahashi, et Gang Yao. 2009. « Weak Gender Effects on Transient Pupillary Light Reflex ». *Autonomic Neuroscience: Basic & Clinical* 147 (1-2): 9-13. https://doi.org/10.1016/j.autneu.2008.12.010.

Félix Garza, ZC, J Liebmann, M Born, PAJ Hilbers, et NAW van Riel. 2017. « A dynamic model for prediction of psoriasis management by blue light irradiation ».

Fenton, D. M., et R. Penney. 1985. « The Effects of Fluorescent and Incandescent Lighting on the Repetitive Behaviours of Autistic and Intellectually Handicapped Children ». *Australia and New Zealand Journal of Developmental Disabilities* 11 (3): 137-41. https://doi.org/10.3109/13668258508998632.

Fernandes, António M, Kandice Fero, Aristides B Arrenberg, Sadie A Bergeron, Wolfgang Driever, et Harold A Burgess. 2012. « Deep brain photoreceptors control light-seeking behavior in zebrafish larvae ». *Current Biology* 22 (21): 2042-47.

Ferreira-Neves, Helena, Rute Macedo-de-Araújo, Laura Rico-Del-Viejo, Ana C. da-Silva, António Queirós, et José M. González-Méijome. 2015. « Validation of a Method to Measure Light Distortion Surrounding a Source of Glare ». *Journal of Biomedical Optics* 20 (7): 75002. https://doi.org/10.1117/1.JBO.20.7.075002.

Feuda, R., S. C. Hamilton, J. O. McInerney, et D. Pisani. 2012. « Metazoan opsin evolution reveals a simple route to animal vision ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 109 (46): 18868-72. https://doi.org/10.1073/pnas.1204609109.

Feuka, A. B., K. E. Hoffmann, M. L. Hunter, et A. J. K. Calhoun. 2017. « Effects of light pollution on habitat selection in post-metamorphic wood frogs (Rana sylvaticus) and unisexual blue-spotted salamanders (Ambystoma laterale x jeffersonianum) ». *Herpetological Conservation and Biology* 12 (2): 470-76.

Fife, D., D. J. Rayhan, S. Behnam, A. Ortiz, L. Elkeeb, L. Aquino, D. Eduardo Roa, et al. 2010. « A Randomized, Controlled, Double-Blind Study of Light Emitting Diode Photomodulation for the Prevention of Radiation Dermatitis in Patients with Breast Cancer ». *Dermatol Surg* 36 (12): 1921-27. https://doi.org/10.1111/j.1524-4725.2010.01801.x.

Figueiro, Mariana G. 2017a. « Light, Sleep and Circadian Rhythms in Older Adults with Alzheimer's Disease and Related Dementias ». *Neurodegenerative Disease Management* 7 (2): 119-45. https://doi.org/10.2217/nmt-2016-0060.

———. 2017b. « Disruption of Circadian Rhythms by Light During Day and Night ». *Current Sleep Medicine Reports* 3 (2): 76-84. https://doi.org/10.1007/s40675-017-0069-0.

Figueiro, Mariana G., Andrew Bierman, Barbara Plitnick, et Mark S. Rea. 2009. « Preliminary Evidence That Both Blue and Red Light Can Induce Alertness at Night ». *BMC Neuroscience* 10 (août): 105. https://doi.org/10.1186/1471-2202-10-105.

Figueiro, Mariana G., Claudia M. Hunter, Patricia Higgins, Thomas Hornick, Geoffrey E. Jones, Barbara Plitnick, Jennifer Brons, et Mark S. Rea. 2015. « Tailored Lighting Intervention for Persons with Dementia and Caregivers Living at Home ». *Sleep Health* 1 (4): 322-30. https://doi.org/10.1016/j.sleh.2015.09.003.

Figueiro, Mariana G., Barbara Plitnick, et Mark S. Rea. 2014. « Pulsing Blue Light through Closed Eyelids: Effects on Acute Melatonin Suppression and Phase Shifting of Dim Light Melatonin Onset ». *Nature and Science of Sleep* 6: 149-56. https://doi.org/10.2147/NSS.S73856.

Figueiro, Mariana G., et Mark S. Rea. 2010. « The Effects of Red and Blue Lights on Circadian Variations in Cortisol, Alpha Amylase, and Melatonin ». *International Journal of Endocrinology* 2010: 829351. https://doi.org/10.1155/2010/829351.

Figueiro, Mariana G., Levent Sahin, Brittany Wood, et Barbara Plitnick. 2016. « Light at Night and Measures of Alertness and Performance: Implications for Shift Workers ». *Biological Research for Nursing* 18 (1): 90-100. https://doi.org/10.1177/1099800415572873.

Figueiro, Mariana G., Bryan Steverson, Judith Heerwagen, Kevin Kampschroer, Claudia M. Hunter, Kassandra Gonzales, Barbara Plitnick, et Mark S. Rea. 2017. « The Impact of Daytime Light Exposures on Sleep and Mood in Office Workers ». *Sleep Health* 3 (3): 204-15. https://doi.org/10.1016/j.sleh.2017.03.005.

Figueiro, Mariana G., Brittany Wood, Barbara Plitnick, et Mark S. Rea. 2011. « The Impact of Light from Computer Monitors on Melatonin Levels in College Students ». *Neuro Endocrinology Letters* 32 (2): 158-63.

Figueiro, Mg, Ja Brons, B. Plitnick, B. Donlan, Rp Leslie, et Ms Rea. 2011. « Measuring Circadian Light and Its Impact on Adolescents ». *Lighting Research & Technology (London, England: 2001)* 43 (2): 201-15. https://doi.org/10.1177/1477153510382853.

Fisher, M. L., L. G. Higley, et J. E. Foster. 2015. « The Influence of Photoperiod on Development Rates of Three Species of Forensically Important Blow Flies ». *Journal of Insect Science* 15 (octobre). https://doi.org/10.1093/jisesa/iev133.

Fisher, Robert S., Graham Harding, Giuseppe Erba, Gregory L. Barkley, Arnold Wilkins, et Epilepsy Foundation of America Working Group. 2005. « Photic- and Pattern-Induced Seizures: A Review for the Epilepsy Foundation of America Working Group ». *Epilepsia* 46 (9): 1426-41. https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2005.31405.x.

Flannagan, M., M. Uchida, J.M. Sullivan, et M.L. Buonarosa. 2014. « Subjective and Objective Effects of Driving with LED Headlamps ». *SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems* 7 (2): 583-95. https://doi.org/10.4271/2014-01-1985.

Fletcher, A. E., G. C. Bentham, M. Agnew, Ian Young, C. Augood, Usha Chakravarthy, P. T. V. M. De Jong, et al. 2008. « Sunlight Exposure, Antioxidants, and Age-Related Macular Degeneration ». *Archives of Ophthalmology* 126 (10): 1396-1403. https://doi.org/10.1001/archopht.126.10.1396.

Foda, M. S., et H. J. Phaff. 1978. « Properties and Kinetics of Glucan Phosphorylase of the Amylose-Forming Yeast Cryptococcus Laurentii ». *Zeitschrift Fur Allgemeine Mikrobiologie* 18 (2): 95-106.

Folke, Carl, Steve Carpenter, Brian Walker, Marten Scheffer, Thomas Elmqvist, Lance Gunderson, et Crawford Stanley Holling. 2004. « Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management ». *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 35.

Fonken, Laura K., Emily Kitsmiller, Laura Smale, et Randy J. Nelson. 2012. « Dim Nighttime Light Impairs Cognition and Provokes Depressive-like Responses in a Diurnal Rodent ». *Journal of Biological Rhythms* 27 (4): 319-27. https://doi.org/10.1177/0748730412448324.

Fonken, Laura K., et Randy J. Nelson. 2013. « Dim Light at Night Increases Depressive-like Responses in Male C3H/HeNHsd Mice ». *Behavioural Brain Research* 243 (avril): 74-78. https://doi.org/10.1016/j.bbr.2012.12.046.

Fonken, Laura K, et Randy J Nelson. 2014. « The effects of light at night on circadian clocks and metabolism ». *Endocrine reviews* 35 (4): 648-70.

Fonken, Laura K., Joanna L. Workman, James C. Walton, Zachary M. Weil, John S. Morris, Abraham Haim, et Randy J. Nelson. 2010. « Light at Night Increases Body Mass by Shifting the Time of Food Intake ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107 (43): 18664-69. https://doi.org/10.1073/pnas.1008734107.

Foster, James J., Jochen Smolka, Dan-Eric Nilsson, et Marie Dacke. 2018. « How animals follow the stars ». *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 285 (1871). https://doi.org/10.1098/rspb.2017.2322.

Foster, Jordann G, Dirk A Algera, Jacob W Brownscombe, Aaron J Zolderdo, et Steven J Cooke. 2016. « Consequences of different types of littoral zone light pollution on the parental care behaviour of a freshwater teleost fish ». *Water, Air, & Soil Pollution* 227 (11): 404.

Foster, R. G., et T. Roenneberg. 2008. « Human responses to the geophysical daily, annual and lunar cycles ». *Current Biology* 18 (17): R784-94. https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.07.003.

Franke, L., D. Suelflow, K. Stark, et R. Uebelhack. 2007. « Melatonin suppression by blue narrow-band light emitting diodes in healthy subjects - comparison with bright white light ». *Pharmacopsychiatry* 40 (5): 243-243.

Freitas, Lucas Freitas de, et Michael R. Hamblin. 2016. « Proposed Mechanisms of Photobiomodulation or Low-Level Light Therapy ». *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics: A Publication of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society* 22 (3). https://doi.org/10.1109/JSTQE.2016.2561201.

Friedrich, M. 2006. « Ancient mechanisms of visual sense organ development based on comparison of the gene networks controlling larval eye, ocellus, and compound eye specification in Drosophila ». *Arthropod Structure & Development* 35 (4): 357-78. https://doi.org/10.1016/j.asd.2006.08.010.

F.R.S, Lord Rayleigh. 1899. « XXXIV. On the transmission of light through an atmosphere containing small particles in suspension, and on the origin of the blue of the sky ». *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 47 (287): 375-84. https://doi.org/10.1080/14786449908621276.

Fu, Yingbin, Hsi-Wen Liao, Michael Tri H. Do, et King-Wai Yau. 2005. « Non-Image-Forming Ocular Photoreception in Vertebrates ». *Current Opinion in Neurobiology* 15 (4): 415-22. https://doi.org/10.1016/j.conb.2005.06.011.

Fusani, L., C. Bertolucci, E. Frigato, et A. Foa. 2014. « Cryptochrome expression in the eye of migratory birds depends on their migratory status ». *Journal of Experimental Biology* 217 (6): 918-23. https://doi.org/10.1242/jeb.096479.

Fushimi, T., S. Inui, T. Nakajima, M. Ogasawara, K. Hosokawa, et S. Itami. 2012. « Green Light Emitting Diodes Accelerate Wound Healing: Characterization of the Effect and Its Molecular Basis in Vitro and in Vivo ». *Wound Repair Regen* 20 (2): 226-35. https://doi.org/10.1111/j.1524-475X.2012.00771.x.

Gabel, Virginie, Micheline Maire, Carolin F. Reichert, Sarah L. Chellappa, Christina Schmidt, Vanja Hommes, Christian Cajochen, et Antoine U. Viola. 2015. « Dawn Simulation Light Impacts on Different Cognitive Domains under Sleep Restriction ». *Behavioural Brain Research* 281 (mars): 258-66. https://doi.org/10.1016/j.bbr.2014.12.043.

Gabel, Virginie, Micheline Maire, Carolin F. Reichert, Sarah L. Chellappa, Christina Schmidt, Vanja Hommes, Antoine U. Viola, et Christian Cajochen. 2013. « Effects of Artificial Dawn and Morning Blue Light on Daytime Cognitive Performance, Well-Being, Cortisol and Melatonin Levels ». *Chronobiology International* 30 (8): 988-97. https://doi.org/10.3109/07420528.2013.793196.

Gabel, Virginie, Carolin F. Reichert, Micheline Maire, Christina Schmidt, Luc J. M. Schlangen, Vitaliy Kolodyazhniy, Corrado Garbazza, Christian Cajochen, et Antoine U. Viola. 2017. « Differential Impact in Young and Older Individuals of Blue-Enriched White Light on Circadian Physiology and Alertness during Sustained Wakefulness ». *Scientific Reports* 7 (1): 7620. https://doi.org/10.1038/s41598-017-07060-8.

Galichanin, Konstantin, Stefan Löfgren, et Per Söderberg. 2014. « Cataract after Repeated Daily in Vivo Exposure to Ultraviolet Radiation ». *Health Physics* 107 (6): 523-29. https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000152.

Gamlin, Paul D., David H. McDougal, Joel Pokorny, Vivianne C. Smith, King-Wai Yau, et Dennis M. Dacey. 2007. « Human and Macaque Pupil Responses Driven by Melanopsin-Containing Retinal Ganglion Cells ». *Vision research* 47 (7): 946-54. https://doi.org/10.1016/j.visres.2006.12.015.

Garfias, Yonathan, Jessica Nieves-Hernandez, Mariana Garcia-Mejia, Carlos Estrada-Reyes, et Maria Carmen Jimenez-Martinez. 2012. « Stem cells isolated from the human stromal limbus possess immunosuppressant properties ». 25 juillet 2012. http://www.molvis.org/molvis/v18/a219/.

Gaston, K. J., J. Bennie, T. W. Davies, et J. Hopkins. 2013. « The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal ». *Biological Reviews* 88 (4): 912-27. https://doi.org/10.1111/brv.12036.

Gavelis, G. S., S. Hayakawa, R. A. White, T. Gojobori, C. A. Suttle, P. J. Keeling, et B. S. Leander. 2015. « Eye-like ocelloids are built from different endosymbiotically acquired components ». *Nature* 523 (7559): 204-7. https://doi.org/10.1038/nature14593.

Gawne, Timothy J., John T. Siegwart, Alexander H. Ward, et Thomas T. Norton. 2017. « The Wavelength Composition and Temporal Modulation of Ambient Lighting Strongly Affect Refractive Development in Young Tree Shrews ». *Experimental Eye Research* 155: 75-84. https://doi.org/10.1016/j.exer.2016.12.004.

Geerdinck, Funke, Vissenberg, et Schierz. 2016. « DISCOMFORT GLARE OF NON-UNIFORM LUMINAIRES - A LITERATURE REVIEW (PO09, Pages 247-256) ». 2016. https://www.techstreet.com/standards/discomfort-glare-of-non-uniform-luminaires-a-literature-review-po09-pages-247-256?product_id=1941840.

Geffen, Koert G, Emiel Eck, Rens A Boer, Roy HA Grunsven, Lucia Salis, Frank Berendse, et Elmar M Veenendaal. 2015. « Artificial light at night inhibits mating in a Geometrid moth ». *Insect Conservation and Diversity* 8 (3): 282-87.

Gehring, W. J. 2005a. « New perspectives on eye development and the evolution of eyes and photoreceptors ». *Journal of Heredity* 96 (3): 171-84. https://doi.org/10.1093/jhered/esi027.

———. 2005b. « Decyphering the eye developmental program and its evolutionary implications ». *Mechanisms of Development* 122 (septembre): S9-S9.

———. 2011. « Chance and Necessity in Eye Evolution ». *Genome Biology and Evolution* 3: 1053-66. https://doi.org/10.1093/gbe/evr061.

———. 2012. « The animal body plan, the prototypic body segment, and eye evolution ». *Evolution & Development* 14 (1): 34-46. https://doi.org/10.1111/j.1525-142X.2011.00528.x.

———. 2014. « The evolution of vision ». *Wiley Interdisciplinary Reviews-Developmental Biology* 3 (1): 1-40. https://doi.org/10.1002/wdev.96.

Gilbert, H. F., et M. H. O'Leary. 1975. « Modification of Arginine and Lysine in Proteins with 2,4-Pentanedione ». *Biochemistry* 14 (23): 5194-99.

Gil-de-Castro, Aurora, Sarah K. Rönnberg, et Math H. J. Bollen. 2017. « Light intensity variation (flicker) and harmonic emission related to LED lamps ». *Electric Power Systems Research* 146 (mai): 107-14. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.01.026.

Giménez, Marina C., Domien G. M. Beersma, Pauline Bollen, Matthijs L. van der Linden, et Marijke C. M. Gordijn. 2014. « Effects of a Chronic Reduction of Short-Wavelength Light Input on Melatonin and Sleep Patterns in Humans: Evidence for Adaptation ». *Chronobiology International* 31 (5): 690-97. https://doi.org/10.3109/07420528.2014.893242.

Giménez, Marina C., Leonie M. Geerdinck, Mathijs Versteylen, Pieter Leffers, Gaby J. B. M. Meekes, Hannelore Herremans, Boris de Ruyter, Jan Willem Bikker, Petra M. J. C. Kuijpers, et Luc J. M. Schlangen. 2017. « Patient Room Lighting Influences on Sleep, Appraisal and Mood in Hospitalized People ». *Journal of Sleep Research* 26 (2): 236-46. https://doi.org/10.1111/jsr.12470.

Giordanella. 2006. « Rapport sur le thème du sommeil. Paris : Ministère de la Santé et des Solidarités », 2006.

Glickman, G., B. Byrne, C. Pineda, W. W. Hauck, et G. C. Brainard. 2006. « Light therapy for seasonal affective disorder with blue narrow-band light-emitting diodes (LEDs) ». *Biological Psychiatry* 59 (6): 502-7. https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2005.07.006.

Glickman, Randolph D. 2002. « Phototoxicity to the Retina: Mechanisms of Damage ». *International Journal of Toxicology* 21 (6): 473-90. https://doi.org/10.1080/10915810290169909.

Glukhova, L. B., L. O. Sokolyanskaya, E. V. Plotnikov, A. L. Gerasimchuk, O. V. Karnachuk, M. Solioz, et R. A. Karnachuk. 2014. « Increased mycelial biomass production by Lentinula edodes intermittently illuminated by green light emitting diodes ». *Biotechnology Letters* 36 (11): 2283-89. https://doi.org/10.1007/s10529-014-1605-3.

Godeau. 2012. « La santé des collégiens en France / 2010. Données françaises de l'enquête internationale Health Behaviour in School-aged Children (HBSC). » *Saint-Denis : Inpes, coll. Études santé, 2012 : 254 p.*, 2012.

Godet-Cayré, Virginie, Nathalie Pelletier-Fleury, Marc Le Vaillant, Jérôme Dinet, Marie-Anne Massuel, et Damien Léger. 2006. « Insomnia and Absenteeism at Work. Who Pays the Cost? » *Sleep* 29 (2): 179-84.

Goffin, Véronique, Arjen Nikkels, et Gérald Pierard. 2005. « Dermatoses photo-aggravées ». *Revue Médicale de Liège* 60: 83-87.

Gold, D. R., S. Rogacz, N. Bock, T. D. Tosteson, T. M. Baum, F. E. Speizer, et C. A. Czeisler. 1992. « Rotating Shift Work, Sleep, and Accidents Related to Sleepiness in Hospital Nurses ». *American Journal of Public Health* 82 (7): 1011-14.

Gold, M. H. 2011. « Light-Emitting Diode ». *Curr Probl Dermatol* 42: 173-80. https://doi.org/10.1159/000328326.

Gold, M. H., W. Sensing, et J. A. Biron. 2011. « Clinical Efficacy of Home-Use Blue-Light Therapy for Mild- to Moderate Acne ». *J Cosmet Laser Ther* 13 (6): 308-14. https://doi.org/10.3109/14764172.2011.630081.

Gongruttananun, N. 2011. « Influence of red light on reproductive performance, eggshell ultrastructure, and eye morphology in Thai-native hens ». *Poultry Science* 90 (12): 2855-63. https://doi.org/10.3382/ps.2011-01652.

Gooley, J. J., J. Lu, T. C. Chou, T. E. Scammell, et C. B. Saper. 2001. « Melanopsin in Cells of Origin of the Retinohypothalamic Tract ». *Nature Neuroscience* 4 (12): 1165. https://doi.org/10.1038/nn768.

Gooley, Joshua J., Kyle Chamberlain, Kurt A. Smith, Sat Bir S. Khalsa, Shantha M. W. Rajaratnam, Eliza Van Reen, Jamie M. Zeitzer, Charles A. Czeisler, et Steven W. Lockley. 2011. « Exposure to Room Light before Bedtime Suppresses Melatonin Onset and Shortens Melatonin Duration in Humans ». *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism* 96 (3): E463-472. https://doi.org/10.1210/jc.2010-2098.

Government of Canada National Research Council. 2018. « LED Lighting Flicker and Potential Health Concerns: IEEE Standard PAR1789 Update - NRC Publications Archive - National Research Council Canada ». 9 novembre 2018. https://nparc.nrc-cnrc.gc.ca/eng/view/object/?id=7693417e-4d04-4364-9b85-5560861d4dbb.

Green, A., M. Cohen-Zion, A. Haim, et Y. Dagan. 2017. « Evening Light Exposure to Computer Screens Disrupts Human Sleep, Biological Rhythms, and Attention Abilities ». *Chronobiology International* 34 (7): 855-65. https://doi.org/10.1080/07420528.2017.1324878.

———. 2018. « Comparing the Response to Acute and Chronic Exposure to Short Wavelength Lighting Emitted from Computer Screens ». *Chronobiology International* 35 (1): 90-100. https://doi.org/10.1080/07420528.2017.1387555.

Grima, Brigitte, Elisabeth Chélot, Ruohan Xia, et François Rouyer. 2004. « Morning and Evening Peaks of Activity Rely on Different Clock Neurons of the Drosophila Brain ». *Nature* 431 (7010): 869-73. https://doi.org/10.1038/nature02935.

Gronfier, Claude, Kenneth P. Wright, Richard E. Kronauer, Megan E. Jewett, et Charles A. Czeisler. 2004. « Efficacy of a Single Sequence of Intermittent Bright Light Pulses for Delaying Circadian Phase in Humans ». *American Journal of Physiology. Endocrinology and Metabolism* 287 (1): E174-181. https://doi.org/10.1152/ajpendo.00385.2003.

Grønli, Janne, Ida Kristiansen Byrkjedal, Bjørn Bjorvatn, Øystein Nødtvedt, Børge Hamre, et Ståle Pallesen. 2016. « Reading from an IPad or from a Book in Bed: The Impact on Human Sleep. A Randomized Controlled Crossover Trial ». *Sleep Medicine* 21: 86-92. https://doi.org/10.1016/j.sleep.2016.02.006.

Gurtner, Geoffrey C, Sabine Werner, Yann Barrandon, et Michael T Longaker. 2008. « Wound repair and regeneration ». *Nature* 453 (7193): 314-21.

Gyekis, K. F., M. J. Cooper, et D. G. Uzarski. 2006. « A high-intensity LED light source for larval fish and aquatic invertebrate floating quatrefoil light traps ». *Journal of Freshwater Ecology* 21 (4): 621-26. https://doi.org/10.1080/02705060.2006.9664123.

Haim, Abraham, et Abed E. Zubidat. 2015a. « Artificial Light at Night: Melatonin as a Mediator between the Environment and Epigenome ». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 370 (1667). https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0121.

———. 2015b. « LED light between Nobel Prize and cancer risk factor ». *Chronobiology International* 32 (5): 725-27. https://doi.org/10.3109/07420528.2015.1027901.

Halbleib, Andreas, Maciej Gratkowski, Karin Schwab, Carolin Ligges, Herbert Witte, et Jens Haueisen. 2012. « Topographic Analysis of Engagement and Disengagement of Neural Oscillators in Photic Driving: A Combined Electroencephalogram/Magnetoencephalogram Study ». *Journal of Clinical Neurophysiology* 29 (1): 33. https://doi.org/10.1097/WNP.0b013e318246ad6e.

Hallmann, C.A., M. Sorg, E. Jongejans, H. Siepel, N. Hofland, H. Schwan, W. Stenmans, et al. 2017. « More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas ». *Plos One* 12 (10): 1-21. https://doi.org/10.1371/journal.

Ham, W. T., J. J. Ruffolo, H. A. Mueller, A. M. Clarke, et M. E. Moon. 1978. « Histologic Analysis of Photochemical Lesions Produced in Rhesus Retina by Short-Wave-Length Light ». *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 17 (10): 1029-35.

Hamamoto, Hiroshi, et Keisuke Yamazaki. 2009. « Reproductive Response of Okra and Native Rosella to Long-day Treatment with Red, Blue, and Green Light-emitting Diode Lights ». *Hortscience* 44 (5): 1494-97.

Hamblin, Michael R., Scott T. Nelson, et Justin R. Strahan. 2018. « Photobiomodulation and Cancer: What Is the Truth? » *Photomedicine and Laser Surgery* 36 (5): 241-45. https://doi.org/10.1089/pho.2017.4401.

Hammerschlag, Neil, Carl G Meyer, Michael S Grace, Steven T Kessel, Tracey T Sutton, Euan S Harvey, Claire B Paris-Limouzy, David W Kerstetter, et Steven J Cooke. 2017. « Shining a light on fish at night: an overview of fish and fisheries in the dark of night, and in deep and polar seas ». *Bulletin of Marine Science* 93 (2): 253-84.

Hang, C. Y., T. Kitahashi, et I. S. Parhar. 2016. « Neuronal organization of deep brain opsin photoreceptors in adult teleosts ». *Frontiers in Neuroanatomy* 10 (avril). https://doi.org/10.3389/fnana.2016.00048.

Hang, C. Y., S. Moriya, S. Ogawa, et I. S. Parhar. 2016. « Deep brain photoreceptor (val-opsin) gene knockout using CRISPR/Cas affects chorion formation and embryonic hatching in the zebrafish ». *Plos One* 11 (10). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165535.

Hang, Chong Yee, Takashi Kitahashi, et Ishwar S. Parhar. 2014. « Localization and characterization of val-opsin isoform-expressing cells in the brain of adult zebrafish ». *Journal of Comparative Neurology* 522 (17): 3847-60. https://doi.org/10.1002/cne.23645.

Hanley, M. E., et J. P. Wilkins. 2015. « On the verge? Preferential use of road-facing hedgerow margins by bumblebees in agro-ecosystems ». *Journal of Insect Conservation* 19 (1): 67-74. https://doi.org/10.1007/s10841-014-9744-3.

Hannibal, Jens, et Jan Fahrenkrug. 2004. « Melanopsin Containing Retinal Ganglion Cells Are Light Responsive from Birth ». *NeuroReport* 15 (15): 2317.

Harb, Francine, Maria Paz Hidalgo, et Betina Martau. 2015. « Lack of Exposure to Natural Light in the Workspace Is Associated with Physiological, Sleep and Depressive Symptoms ». *Chronobiology International* 32 (3): 368-75. https://doi.org/10.3109/07420528.2014.982757.

Harding and Jeavons. 1994. « Photosensitive Epilepsy. London: Mac Keith Press », 1994.

Harris, J. E., M. Karobath, et R. J. Baldessarini. 1976. « Characteristics of Tyrosine Hydroxylation in Isolated Nerve Endings ». *Biochemical Pharmacology* 25 (1): 91-93.

Hasan, S, et S Saeed. 2015. « Xeroderma Pigmentosum-A Rare Genodermatosis: Overview of Literature. » *XP, the median age of onset of non-melanoma skin cancer was* 8.

Hastings, Michael, John S. O'Neill, et Elizabeth S. Maywood. 2007. « Circadian Clocks: Regulators of Endocrine and Metabolic Rhythms ». *The Journal of Endocrinology* 195 (2): 187-98. https://doi.org/10.1677/JOE-07-0378.

Hattar, S., H. W. Liao, M. Takao, D. M. Berson, et K. W. Yau. 2002. « Melanopsin-Containing Retinal Ganglion Cells: Architecture, Projections, and Intrinsic Photosensitivity ». *Science (New York, N.Y.)* 295 (5557): 1065-70. https://doi.org/10.1126/science.1069609.

Hattar, S., R. J. Lucas, N. Mrosovsky, S. Thompson, R. H. Douglas, M. W. Hankins, J. Lem, et al. 2003. « Melanopsin and Rod-Cone Photoreceptive Systems Account for All Major Accessory Visual Functions in Mice ». *Nature* 424 (6944): 76-81. https://doi.org/10.1038/nature01761.

Hattar, Samer, Monica Kumar, Alexander Park, Patrick Tong, Jonathan Tung, King-Wai Yau, et David M. Berson. 2006. « Central Projections of Melanopsin-Expressing Retinal Ganglion Cells in the Mouse ». *The Journal of Comparative Neurology* 497 (3): 326-49. https://doi.org/10.1002/cne.20970.

He, Mingguang, Fan Xiang, Yangfa Zeng, Jincheng Mai, Qianyun Chen, Jian Zhang, Wayne Smith, Kathryn Rose, et Ian G. Morgan. 2015. « Effect of Time Spent Outdoors at School on the Development of Myopia Among Children in China: A Randomized Clinical Trial ». *JAMA* 314 (11): 1142-48. https://doi.org/10.1001/jama.2015.10803.

Hébert, Marc, Stacia K. Martin, Clara Lee, et Charmane I. Eastman. 2002. « The Effects of Prior Light History on the Suppression of Melatonin by Light in Humans ». *Journal of Pineal Research* 33 (4): 198-203.

Hecht S. and Verrijp. 1933. « Intermittent Stimulation by Light : Iii. The Relation between Intensity and Critical Fusion Frequency for Different Retinal Locations. » *J Gen Physiol. 1933 Nov 20;17(2):251-68.*, 1933. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19872777.

Heeke, D. S., M. P. White, G. D. Mele, J. P. Hanifin, G. C. Brainard, M. D. Rollag, C. M. Winget, et D. C. Holley. 1998. « Light-emitting-diode (LED) light is similar to cool white fluorescent (CWF) light in suppressing pineal melatonin and maintaining retinal function and morphology in the rat ». *Faseb Journal* 12 (5): A1108-A1108.

———. 1999. « Light-emitting diodes and cool white fluorescent light similarly suppress pineal gland melatonin and maintain retinal function and morphology in the rat ». *Laboratory Animal Science* 49 (3): 297-304.

Helfrich-Forster, C., M. N. Nitabach, et T. C. Holmes. 2011. « Insect Circadian Clock Outputs ». In *Essays in Biochemistry: Chronobiology*, édité par H. D. Piggins et C. Guilding, 49:87-101. Essays in Biochemistry. London: Portland Press Ltd. https://doi.org/10.1042/bse0490087.

Hendrickson, C. T., D. H. Matthews, M. Ashe, P. Jaramillo, et F. C. McMichael. 2010. « Reducing Environmental Burdens of Solid-State Lighting through End-of-Life Design ». *Environmental Research Letters* 5 (1): 014016. https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/1/014016.

Henze, Miriam J., Kara Dannenhauer, Martin Kohler, Thomas Labhart, et Matthias Gesemann. 2012. « Opsin evolution and expression in Arthropod compound Eyes and Ocelli: Insights from the cricket Gryllus bimaculatus ». *Bmc Evolutionary Biology* 12 (août). https://doi.org/10.1186/1471-2148-12-163.

Heo, Jung-Yoon, Kiwon Kim, Maurizio Fava, David Mischoulon, George I. Papakostas, Min-Ji Kim, Dong Jun Kim, et al. 2017. « Effects of Smartphone Use with and without Blue Light at Night in Healthy Adults: A Randomized, Double-Blind, Cross-over, Placebo-Controlled Comparison ». *Journal of Psychiatric Research* 87 (avril): 61-70. https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2016.12.010.

Hernandez, R., et C. Kubota. 2016. « Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs ». *Environmental and Experimental Botany* 121 (janvier): 66-74. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.04.001.

Hernandez-Perez, J., J. M. Miguez, M. Libran-Perez, C. Otero-Rodino, F. Naderi, J. L. Soengas, et M. A. Lopez-Patino. 2015. « Daily rhythms in activity and mRNA abundance of enzymes involved in glucose and lipid metabolism in liver of rainbow trout, Oncorhynchus mykiss. Influence of light and food availability ». *Chronobiology International* 32 (10): 1391-1408. https://doi.org/10.3109/07420528.2015.1100633.

Hershberger. 1987. « Saccadic eye movements and the perception of visual direction ». *Perception & Psychophysics, 41, 35-44.*, 1987.

Hershberger, Wayne A., J. Scott Jordan, et Donald R. Lucas. 1998. « Visualizing the Perisaccadic Shift of Spatiotopic Coordinates ». *Perception & Psychophysics* 60 (1): 82-88. https://doi.org/10.3758/BF03211919.

Higa, Kazunari, Shigeto Shimmura, Hideyuki Miyashita, Jun Shimazaki, et Kazuo Tsubota. 2005. « Melanocytes in the Corneal Limbus Interact with K19-Positive Basal Epithelial Cells ». *Experimental Eye Research* 81 (2): 218-23. https://doi.org/10.1016/j.exer.2005.01.023.

Higuchi, Shigekazu, Sang-il Lee, Tomoaki Kozaki, Tetsuo Harada, et Ikuo Tanaka. 2016. « Late Circadian Phase in Adults and Children Is Correlated with Use of High Color Temperature Light at Home at Night ». *Chronobiology International* 33 (4): 448-52. https://doi.org/10.3109/07420528.2016.1152978.

Higuchi, Shigekazu, Yuki Nagafuchi, Sang-il Lee, et Tetsuo Harada. 2014. « Influence of Light at Night on Melatonin Suppression in Children ». *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism* 99 (9): 3298-3303. https://doi.org/10.1210/jc.2014-1629.

Hirshkowitz, Max, Kaitlyn Whiton, Steven M. Albert, Cathy Alessi, Oliviero Bruni, Lydia DonCarlos, Nancy Hazen, et al. 2015. « National Sleep Foundation's Sleep Time Duration Recommendations: Methodology and Results Summary ». *Sleep Health* 1 (1): 40-43. https://doi.org/10.1016/j.sleh.2014.12.010.

Ho, Derek, Ekaterina Kraeva, Ted Wun, R Rivkah Isseroff, et Jared Jagdeo. 2016. « A single-blind, dose escalation, phase I study of high-fluence light-emitting diode-red light (LED-RL) on human skin: study protocol for a randomized controlled trial ». *Trials* 17 (1): 385.

Holden, Brien A., Timothy R. Fricke, David A. Wilson, Monica Jong, Kovin S. Naidoo, Padmaja Sankaridurg, Tien Y. Wong, Thomas J. Naduvilath, et Serge Resnikoff. 2016. « Global Prevalence of Myopia and High Myopia and Temporal Trends from 2000 through 2050 ». *Ophthalmology* 123 (5): 1036-42. https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2016.01.006.

Holker, F., C. Wolter, E. K. Perkin, et K. Tockner. 2010. « Light pollution as a biodiversity threat ». *Trends in Ecology & Evolution* 25 (12): 681-82. https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.09.007.

Holladay, L. L. 1926. « The Fundamentals of Glare and Visibility ». *Journal of the Optical Society of America* 12 (4): 271. https://doi.org/10.1364/JOSA.12.000271.

Hopkins, Samantha, Peter Lloyd Morgan, Luc J. M. Schlangen, Peter Williams, Debra J. Skene, et Benita Middleton. 2017. « Blue-Enriched Lighting for Older People Living in Care Homes: Effect on Activity, Actigraphic Sleep, Mood and Alertness ». *Current Alzheimer Research* 14 (10): 1053-62. https://doi.org/10.2174/1567205014666170608091119.

Horst, Gerard J. C. van der. 1969. « Chromatic Flicker* ». *JOSA* 59 (9): 1213-17. https://doi.org/10.1364/JOSA.59.001213.

Hu, Yue, Tingke Zhang, Jiangshan Chen, Dongge Ma, et Chien-Hong Cheng. 2014. « Hybrid Organic Light-Emitting Diodes with Low Color-Temperature and High Efficiency for Physiologically-Friendly Night Illumination ». *Israel Journal of Chemistry* 54 (7): 979-85. https://doi.org/10.1002/ijch.201400066.

Hu, Zhiyong, Fengxiang Liu, Xin Xu, Zhanqi Chen, Jian Chen, et Daiqin Li. 2012. « Spectral transmission of the principal-eye corneas of jumping spiders: implications for ultraviolet vision ». *Journal of Experimental Biology* 215 (16): 2853-59. https://doi.org/10.1242/jeb.065904.

Huang, Chen, Pei Zhang, Wei Wang, Yongsheng Xu, Minshu Wang, Xiaoyong Chen, et Xuran Dong. 2014. « Long-Term Blue Light Exposure Induces RGC-5 Cell Death in Vitro: Involvement of Mitochondria-Dependent Apoptosis, Oxidative Stress, and MAPK Signaling Pathways ». *Apoptosis: An International Journal on Programmed Cell Death* 19 (6): 922-32. https://doi.org/10.1007/s10495-014-0983-2.

Huang, M. Y., K. H. Lin, C. C. Lu, L. R. Chen, T. C. Hsiung, et W. T. Chang. 2017. « The intensity of blue light-emitting diodes influences the antioxidant properties and sugar content of oyster mushrooms (Lentinus sajor-caju) ». *Scientia Horticulturae* 218 (avril): 8-13. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.02.014.

Huber-Eicher, B, A Suter, et P Spring-Stähli. 2013. « Effects of colored light-emitting diode illumination on behavior and performance of laying hens ». *Poultry science* 92 (4): 869-73.

Huche-Thelier, L., L. Crespel, J. Le Gourrierec, P. Morel, S. Sakr, et N. Leduc. 2016. « Light signaling and plant responses to blue and UV radiations-Perspectives for applications in horticulture ». *Environmental and Experimental Botany* 121 (janvier): 22-38. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.06.009.

Hung, Shao-Min, Dan Milea, Annadata Venkata Rukmini, Raymond P. Najjar, Joo Huang Tan, Françoise Viénot, Marie Dubail, et al. 2017. « Cerebral neural correlates of differential melanopic photic stimulation in humans ». *NeuroImage* 146 (février): 763-69. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.09.061.

Hung, Y. S., J. P. van Kleef, G. Stange, et M. R. Ibbotson. 2013. « Spectral inputs and ocellar contributions to a pitch-sensitive descending neuron in the honeybee ». *Journal of Neurophysiology* 109 (4): 1202-13. https://doi.org/10.1152/jn.00830.2012.

Hunter, Claudia M., et Mariana G. Figueiro. 2017. « Measuring Light at Night and Melatonin Levels in Shift Workers: A Review of the Literature ». *Biological Research for Nursing* 19 (4): 365-74. https://doi.org/10.1177/1099800417714069.

Hunter, Jennifer J., Jessica I. W. Morgan, William H. Merigan, David H. Sliney, Janet R. Sparrow, et David R. Williams. 2012. « The Susceptibility of the Retina to Photochemical Damage from Visible Light ». *Progress in Retinal and Eye Research* 31 (1): 28-42. https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2011.11.001.

ICNIRP. s. d. « ICNIRP Guidelines on Limits of Exposure to Incoherent Visibl... : Health Physics ». Consulté le 19 juin 2018. https://journals.lww.com/health-physics/Abstract/2013/07000/ICNIRP_Guidelines_on_Limits_of_Exposure_to.9.aspx.

IEC TR 61547-1:2017. 2017. « Equipment for general lighting purposes - EMC immunity requirements- Part 1: An objective light flickermeter and voltage fluctuation immunity test method », 2017. https://webstore.iec.ch/publication/60022.

IEEE. 2015. « - IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers ». *IEEE Std 1789-2015*, 2015.

IES, P. R. s. d. « IES Lighting Handbook : the standard lighting guide, 9th edition », Illuminating Engineering Society of North America edition édition.

Ikeno, Tomoko, Zachary M Weil, et Randy J Nelson. 2014. « Dim light at night disrupts the short-day response in Siberian hamsters ». *General and Comparative Endocrinology* 197: 56-64.

Imamoto, Y., et Y. Shichida. 2014. « Cone visual pigments ». *Biochimica Et Biophysica Acta-Bioenergetics* 1837 (5): 664-73. https://doi.org/10.1016/j.bbabio.2013.08.009.

Institute of Medicine (US) Committee on Sleep Medicine and Research. 2006. *Sleep Disorders and Sleep Deprivation: An Unmet Public Health Problem*. Édité par Harvey R. Colten et Bruce M. Altevogt. The National Academies Collection: Reports Funded by National Institutes of Health. Washington (DC): National Academies Press (US). http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK19960/.

Internationale Beleuchtungskommission, éd. 2002. *CIE Collection on Glare: 2002*. Technical Report / Commission Internationale de l'Éclairage 146. Vienna: CIE, Central Bureau.

———. , éd. 2010. *Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance: Technical Report*. CIE Publications 191. Vienna: CIE Central Bureau.

ISO 14040:2006. 2006. « ISO 14040:2006 - Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Principes et cadre ». 2006. https://www.iso.org/fr/standard/37456.html.

ISO 14044:2006. 2006. « ISO 14044:2006 - Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Exigences et lignes directrices ». 2006. https://www.iso.org/fr/standard/38498.html.

Ito, C., et K. Tomioka. 2016. « Heterogeneity of the Peripheral Circadian Systems in Drosophila Melanogaster: A Review ». *Frontiers in Physiology* 7 (janvier): 7. https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00008.

Ives, F. 1912. « On heterochromatic photometry ». *Philosophical Magazine 24, 845-853*, 1912.

Ixtaina, Pablo, Matias Presso, Nicolás Rosales, et Gustavo H Marin. 2015. « Glare by Light Emitting Diode (LED) Vehicle Traffic Signals ». *International Journal of Mechanical and Materials Engineering* 10 (1). https://doi.org/10.1186/s40712-014-0027-2.

Jaadane, Imene, Pierre Boulenguez, Sabine Chahory, Samuel Carré, Michèle Savoldelli, Laurent Jonet, Francine Behar-Cohen, Christophe Martinsons, et Alicia Torriglia. 2015. « Retinal Damage Induced by Commercial Light Emitting Diodes (LEDs) ». *Free Radical Biology & Medicine* 84 (juillet): 373-84. https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2015.03.034.

Jaadane, Imene, Gloria Elisa Villalpando Rodriguez, Pierre Boulenguez, Sabine Chahory, Samuel Carré, Michèle Savoldelli, Laurent Jonet, Francine Behar-Cohen, Christophe Martinsons, et Alicia Torriglia. 2017. « Effects of White Light-Emitting Diode (LED) Exposure on Retinal Pigment Epithelium in Vivo ». *Journal of Cellular and Molecular Medicine* 21 (12): 3453-66. https://doi.org/10.1111/jcmm.13255.

Jaén, EM. 2011. « A simple visual task to assess flicker effects on visual performance - ». *Lighting Research & Technology*, 2011. https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1477153511405409.

Järvisalo, J., et N. E. Saris. 1975. « Action of Propranolol on Mitochondrial Functions--Effects on Energized Ion Fluxes in the Presence of Valinomycin ». *Biochemical Pharmacology* 24 (18): 1701-5.

Jasser, Samar A., John P. Hanifin, Mark D. Rollag, et George C. Brainard. 2006. « Dim Light Adaptation Attenuates Acute Melatonin Suppression in Humans ». *Journal of Biological Rhythms* 21 (5): 394-404. https://doi.org/10.1177/0748730406292391.

Jeong, Sung Woo, Semin Park, Jong Sung Jin, On Nuri Seo, Gon-Sup Kim, Yun-Hi Kim, Hanhong Bae, et al. 2012. « Influences of four different light-emitting diode lights on flowering and polyphenol variations in the leaves of chrysanthemum (Chrysanthemum morifolium) ». *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 60 (39): 9793-9800. https://doi.org/10.1021/jf302272x.

Jiang et al. 2007. « Human visual cortex responds to invisible chromatic flicker ». *Nature Neuroscience vol. 10, pp. 657 – 662*, 2007. http://www.academia.edu/5244238/Human_visual_cortex_responds_to_invisible_chromatic_flicker.

Jiang, W., G. J. He, T. F. Long, C. Wang, Y. Ni, et R. Q. Ma. 2017. « Assessing light pollution in China based on nighttime light imagery ». *Remote Sensing* 9 (2). https://doi.org/10.3390/rs9020135.

Jones, J., et C. M. Francis. 2003. « The effects of light characteristics on avian mortality at lighthouses ». *Journal of Avian Biology* 34 (4): 328-33. https://doi.org/10.1111/j.0908-8857.2003.03183.x.

Jones, Lisa A., Loraine T. Sinnott, Donald O. Mutti, Gladys L. Mitchell, Melvin L. Moeschberger, et Karla Zadnik. 2007. « Parental History of Myopia, Sports and Outdoor Activities, and Future Myopia ». *Investigative ophthalmology & visual science* 48 (8): 3524-32. https://doi.org/10.1167/iovs.06-1118.

Jones-Jordan, Lisa A., Loraine T. Sinnott, Susan A. Cotter, Robert N. Kleinstein, Ruth E. Manny, Donald O. Mutti, J. Daniel Twelker, Karla Zadnik, et CLEERE Study Group. 2012. « Time Outdoors, Visual Activity, and Myopia Progression in Juvenile-Onset Myopes ». *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 53 (11): 7169-75. https://doi.org/10.1167/iovs.11-8336.

Jong, M. de, S. P. Caro, P. Gienapp, K. Spoelstra, et M. E. Visser. 2017. « Early birds by light at night: Effects of light color and intensity on daily activity patterns in blue tits ». *Journal of Biological Rhythms* 32 (4): 323-33. https://doi.org/10.1177/0748730417719168.

Jong, M. de, J. Q. Ouyang, R. H. A. van Grunsven, M. E. Visser, et K. Spoelstra. 2016. « Do wild great tits avoid exposure to light at night? » *Plos One* 11 (6). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157357.

Jong, M. de, J. Q. Ouyang, A. da Silva, R. H. A. van Grunsven, B. Kempenaers, M. E. Visser, et K. Spoelstra. 2015. « Effects of nocturnal illumination on life-history decisions and fitness in two wild songbird species ». *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 370 (1667). https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0128.

Jong, Maaike de, Lizanne Jeninga, Jenny Q Ouyang, Kees van Oers, Kamiel Spoelstra, et Marcel E Visser. 2016. « Dose-dependent responses of avian daily rhythms to artificial light at night ». *Physiology & behavior* 155: 172-79.

Jou, Jwo-Huei, Chun-Yu Hsieh, Po-Wei Chen, Sudhir Kumar, et James H. Hong. 2014. « Candlelight style organic light-emitting diode: a plausibly human-friendly safe night light ». *Journal of Photonics for Energy* 4 (avril). https://doi.org/10.1117/1.jpe.4.043598.

Jou, Jwo-Huei, Chun-Yu Hsieh, Jing-Ru Tseng, Shiang-Hau Peng, Yung-Cheng Jou, James H. Hong, Shih-Ming Shen, Ming-Chun Tang, Pin-Chu Chen, et Chun-Hao Lin. 2013. « Candle Light-Style Organic Light-Emitting Diodes ». *Advanced Functional Materials* 23 (21): 2750-57. https://doi.org/10.1002/adfm.201203209.

Jung, M. M., T. H. Kim, Y. J. Choi, N. N. Kim, J. Y. Choi, S. Y. Oh, S. G. Lim, et C. Y. Choi. 2016. « Variations in the antioxidant system and circadian rhythms of goldfish, Carassius auratus, exposed to ammonia: profile of the effects of green LED spectra ». *Biological Rhythm Research* 47 (4): 583-96. https://doi.org/10.1080/09291016.2016.1173355.

Jung, S. J., N. N. Kim, Y. J. Choi, J. Y. Choi, Y. U. Choi, Y. S. Heo, et C. Y. Choi. 2016. « Effects of melatonin and green-wavelength LED light on the physiological stress and immunity of goldfish, Carassius auratus, exposed to high water temperature ». *Fish Physiology and Biochemistry* 42 (5): 1335-46. https://doi.org/10.1007/s10695-016-0221-7.

Justice, Michael J, et Teresa C Justice. 2016. « Attraction of insects to incandescent, compact fluorescent, halogen, and led lamps in a light trap: Implications for light pollution and urban ecologies ». *Entomological News* 125 (5): 315-26.

Kankipati, Laxmikanth, Christopher A. Girkin, et Paul D. Gamlin. 2010. « Post-Illumination Pupil Response in Subjects without Ocular Disease ». *Investigative Opthalmology & Visual Science* 51 (5): 2764. https://doi.org/10.1167/iovs.09-4717.

Kantermann, T., M. Juda, M. Merrow, et T. Roenneberg. 2007. « The human circadian clock's seasonal adjustment is disrupted by daylight saving time ». *Current Biology* 17 (22): 1996-2000. https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.10.025.

Kantermann, Thomas, et Till Roenneberg. 2009. « Is Light-at-Night a Health Risk Factor or a Health Risk Predictor? » *Chronobiology International* 26 (6): 1069-74. https://doi.org/10.3109/07420520903223984.

Kara A. Stavros et Lynne Kiorpes. 2008. « Behavioral measurement of temporal contrast sensitivity development in macaque monkeys (Macaca nemestrina) ». *Vision Res. 2008 May; 48(11): 1335–1344*, 2008. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2796546/.

Katsuki, M., K. Arikawa, M. Wakakuwa, Y. Omae, K. Okada, R. Sasaki, K. Shinoda, et T. Miyatake. 2013. « Which wavelength does the cigarette beetle, Lasioderma serricorne (Coleoptera: Anobiidae), prefer? Electrophysiological and behavioral studies using light-emitting diodes (LEDs) ». *Applied Entomology and Zoology* 48 (4): 547-51. https://doi.org/10.1007/s13355-013-0205-3.

Kayaba, Momoko, Kaito Iwayama, Hitomi Ogata, Yumi Seya, Ken Kiyono, Makoto Satoh, et Kumpei Tokuyama. 2014. « The effect of nocturnal blue light exposure from light-emitting diodes on wakefulness and energy metabolism the following morning ». *Environmental Health and Preventive Medicine* 19 (5): 354-61. https://doi.org/10.1007/s12199-014-0402-x.

Kehayias, George, Dionysis Bouliopoulos, Nikos Chiotis, et Pavlos Koutra. 2016. « A photovoltaic-battery-LED lamp raft design for purse seine fishery: Application in a large Mediterranean lake ». *Fisheries Research* 177: 18-23.

Keller, Lena Katharina, Barbara Grünewald, Céline Vetter, Till Roenneberg, et Gerd Schulte-Körne. 2017. « Not Later, but Longer: Sleep, Chronotype and Light Exposure in Adolescents with Remitted Depression Compared to Healthy Controls ». *European Child & Adolescent Psychiatry* 26 (10): 1233-44. https://doi.org/10.1007/s00787-017-0977-z.

Kelly. 1972a. « "Flicker", Kelly, in Visual Psychophysics, Ed. D. Jameson and L. M. Hurvich, Springer-Verlag, » 1972.

Kelly, D. H. 1962a. « Visual Responses to Time-Dependent Stimuli.* III. Individual Variations† ». *JOSA* 52 (1): 89-95. https://doi.org/10.1364/JOSA.52.000089.

———. 1962b. « Visual Responses to Time-Dependent Stimuli. IV. Effects of Chromatic Adaptation ». *JOSA* 52 (8): 940-47. https://doi.org/10.1364/JOSA.52.000940.

———. 1972b. « Adaptation Effects on Spatio-Temporal Sine-Wave Thresholds ». *Vision Research* 12 (1): 89-101.

———. 1979. « Motion and Vision. II. Stabilized Spatio-Temporal Threshold Surface ». *JOSA* 69 (10): 1340-49. https://doi.org/10.1364/JOSA.69.001340.

Kennedy, Alan, et Wayne S. Murray. 1991. « The Effects of Flicker on Eye Movement Control ». *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A* 43 (1): 79-99. https://doi.org/10.1080/14640749108401000.

Killgore, William D. S. 2010. « Effects of Sleep Deprivation on Cognition ». *Progress in Brain Research* 185: 105-29. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53702-7.00007-5.

Kim et al. 2015. « A Study on the Effects of Led Light's Pulse Width Modulation on Work Concentration. » *Vol. 224. Lecture Notes in Business Information Processing*, 2015.

Kim, H. S., W. S. Park, J. I. Baek, B. S. Lee, D. S. Yoo, et S. J. Park. 2015. « Continuous Irradiation with a 633-Nm Light-Emitting Diode Exerts an Anti-Aging Effect on Human Skin Cells ». *Int J Mol Med* 35 (2): 383-90. https://doi.org/10.3892/ijmm.2014.2030.

Kim, K. Y., E. Lee, Y. J. Kim, et J. Kim. 2017. « The association between artificial light at night and prostate cancer in Gwangju City and South Jeolla Province of South Korea ». *Chronobiology International* 34 (2): 203-11. https://doi.org/10.1080/07420528.2016.1259241.

Kim, M. J., W. S. Bang, et H. G. Yuk. 2017. « 405+/-5 nm light emitting diode illumination causes photodynamic inactivation of Salmonella spp. on fresh-cut papaya without deterioration ». *Food Microbiology* 62 (avril): 124-32. https://doi.org/10.1016/j.fm.2016.10.002.

Kim, Mari, Manivannan Subramanian, Yun-Ho Cho, Gye-Hyeong Kim, Eunil Lee, et Joong-Jean Park. 2018. « Short-Term Exposure to Dim Light at Night Disrupts Rhythmic Behaviors and Causes Neurodegeneration in Fly Models of Tauopathy and Alzheimer's Disease ». *Biochemical and Biophysical Research Communications* 495 (2): 1722-29. https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2017.12.021.

Kim, Na Na, Young Jae Choi, Hyun Suk Shin, Jee Rey Lim, Jeong Min Han, Ji Hyung Cho, Jehee Lee, Gyung-Suk Kil, et Cheol Young Choi. 2014. « The effect of LED light spectra on antioxidant system by thermal stress in goldfish, Carassius auratus ». *Molecular & Cellular Toxicology* 10 (1): 47-58. https://doi.org/10.1007/s13273-014-0006-y.

Kim, Seong Jae, Susan Benloucif, Kathryn Jean Reid, Sandra Weintraub, Nancy Kennedy, Lisa F. Wolfe, et Phyllis C. Zee. 2014. « Phase-Shifting Response to Light in Older Adults ». *The Journal of Physiology* 592 (1): 189-202. https://doi.org/10.1113/jphysiol.2013.262899.

Kim, Shinheun, Sangwoo Kim, Arshi Khalid, Yong Jeong, Bumseok Jeong, Soon-Tae Lee, Keun-Hwa Jung, Kon Chu, Sang Kun Lee, et Daejong Jeon. 2016. « Rhythmical Photic Stimulation at Alpha Frequencies Produces Antidepressant-Like Effects in a Mouse Model of Depression ». *PloS One* 11 (1): e0145374. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145374.

Kim, Su-Yeon, Jihye Son, Y Martin Lo, Chan Lee, et Bokyung Moon. 2014. « Effects of light-emitting diode (LED) lighting on the ergosterol content of beech mushrooms (Lyophyllum ulmarium) ». *Journal of food processing and preservation* 38 (4): 1926-31.

Kim, T. W., J. H. Jeong, et S. C. Hong. 2015. « The impact of sleep and circadian disturbance on hormones and metabolism ». *International Journal of Endocrinology*. https://doi.org/10.1155/2015/591729.

Kitsinelis et al. 2012. « A Study on the Flicker of Commercial Lamps ». *.." Light and Engineering 20 (3): 25–33*, 2012.

Klein, D. C., S. L. Coon, P. H. Roseboom, J. L. Weller, M. Bernard, J. A. Gastel, M. Zatz, et al. 1997. « The melatonin rhythm-generating enzyme: Molecular regulation of serotonin N-acetyltransferase in the pineal gland ». In *Recent Progress in Hormone Research, Proceedings of the 1996 Conference, Vol 52*, édité par P. M. Conn, 52:307-58. Recent Progress in Hormone Research. ://WOS:000071740900013.

Knels, Lilla, Monika Valtink, Helmut Piazena, Jamlec Vega Marin, Kerstin Gommel, Amelie Lupp, Cora Roehlecke, Mirko Mehner, et Richard HW Funk. 2016. « Effects of Narrow-band IR-A and of Water-Filtered Infrared A on Fibroblasts ». *Photochemistry and photobiology* 92 (3): 475-87.

Knez, Igor. 2014. « Affective and Cognitive Reactions to Subliminal Flicker from Fluorescent Lighting ». *Consciousness and Cognition* 26 (mai): 97-104. https://doi.org/10.1016/j.concog.2014.02.006.

Knop, E., L. Zoller, R. Ryser, C. G. Erpe, M. Horler, et C. Fontaine. 2017. « Artificial light at night as a new threat to pollination ». *Nature* 548 (7666): 206-+. https://doi.org/10.1038/nature23288.

Ko, G. Y., M. L. Ko, et S. E. Dryer. 2001. « Circadian Regulation of CGMP-Gated Cationic Channels of Chick Retinal Cones. Erk MAP Kinase and Ca2+/Calmodulin-Dependent Protein Kinase II ». *Neuron* 29 (1): 255-66.

Ko, J.K., et S.Y. Choi. s. d. « Contents development for office smart lights, in: CIE x044:2017, "Proceedings of the Conference on "Smarter Lighting for Better Life" ». *CIE Midterm Meeting 2017: October 23-25, 2017, Jeju, South Korea," 2017, pp 1-9. DOI 10.25039/x44.2017.IP01.*

Kobav, M. B., G. Bizjak, Klanjsek M. Gunde, Malovrh K. Rebec, et Cie. 2012. « LED SPECTRA AND ITS PHOTOBIOLOGICAL EFFECTS ». *Proceedings of Cie 2012 Lighting Quality and Energy Efficiency*, 496-502.

Kobav, Matej B., et Grega Bizjak. 2012. « LED SPECTRA AND MELATONIN SUPPRESSION ACTION FUNCTION ». *Light & Engineering* 20 (3): 15-22.

Komarow, Hirsh D, A Robin Eisch, Michael Young, Celeste Nelson, et Dean D Metcalfe. 2015. « Solar Urticaria ». *The journal of allergy and clinical immunology. In practice* 3 (5): 789.

Kranjec, Christian, et John Doorbar. 2016. « Human papillomavirus infection and induction of neoplasia: a matter of fitness ». *Current opinion in virology* 20: 129-36.

Krigel, A., M. Berdugo, E. Picard, R. Levy-Boukris, I. Jaadane, L. Jonet, M. Dernigoghossian, C. Andrieu-Soler, A. Torriglia, et F. Behar-Cohen. 2016. « Light-Induced Retinal Damage Using Different Light Sources, Protocols and Rat Strains Reveals LED Phototoxicity ». *Neuroscience* 339 (décembre): 296-307. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2016.10.015.

Krüger, Lucas, Vitor H Paiva, Maria V Petry, et Jaime A Ramos. 2017. « Strange lights in the night: using abnormal peaks of light in geolocator data to infer interaction of seabirds with nocturnal fishing vessels ». *Polar Biology* 40 (1): 221-26.

Kuhn, L., M. Johansson, T. Laike, et T. Goven. 2013. « Residents' Perceptions Following Retrofitting of Residential Area Outdoor Lighting with LEDs ». *Lighting Research and Technology* 45 (5): 568-84. https://doi.org/10.1177/1477153512464968.

Kulczykowska, Ewa, Wlodzimierz Popek, et BG Kapoor. 2010. *Biological clock in fish*. CRC Press.

Kumar, G., et C. R. Engle. 2016. « Technological Advances that Led to Growth of Shrimp, Salmon, and Tilapia Farming ». *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture* 24 (2): 136-52. https://doi.org/10.1080/23308249.2015.1112357.

Kumar, P., S. Murki, G. K. Malik, D. Chawla, A. K. Deorari, N. Karthi, S. Subramanian, J. Sravanthi, P. Gaddam, et S. N. Singh. 2010. « Light Emitting Diodes versus Compact Fluorescent Tubes for Phototherapy in Neonatal Jaundice: A Multi Center Randomized Controlled Trial ». *Indian Pediatr* 47 (2): 131-37.

Kumar, Praveen, Srinivas Murki, GK Malik, Deepak Chawla, Ashok K Deorari, N Karthi, Sreeram Subramanian, Jonnala Sravanthi, Pramod Gaddam, et SN Singh. 2010. « Light-emitting diodes versus compact fluorescent tubes for phototherapy in neonatal jaundice: a multi-center randomized controlled trial ». *Indian pediatrics* 47 (2): 131-37.

Kunz, T. H., E. B. de Torrez, D. Bauer, T. Lobova, et T. H. Fleming. 2011. « Ecosystem services provided by bats ». In *Year in Ecology and Conservation Biology*, édité par R. S. Ostfeld et W. H. Schlesinger, 1223:1-38. Annals of the New York Academy of Sciences. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2011.06004.x.

Kuse, Yoshiki, Kenjiro Ogawa, Kazuhiro Tsuruma, Masamitsu Shimazawa, et Hideaki Hara. 2014. « Damage of Photoreceptor-Derived Cells in Culture Induced by Light Emitting Diode-Derived Blue Light ». *Scientific Reports* 4 (juin): 5223. https://doi.org/10.1038/srep05223.

Kwan, J. W., M. J. Lee, A. F. Mack, J. F. Chiu, et R. D. Fernald. 1996. « Nonuniform distribution of cell proliferation in the adult teleost retina ». *Brain Research* 712 (1): 40-44. https://doi.org/10.1016/0006-8993(95)01426-8.

Kwon, H. K., J. Y. Jeon, et S. J. Oh. 2017. « Potential for heavy metal (copper and zinc) removal from contaminated marine sediments using microalgae and light emitting diodes ». *Ocean Science Journal* 52 (1): 57-66. https://doi.org/10.1007/s12601-017-0001-z.

Labrie, Daniel, Justine Moe, Richard B. T. Price, Mitchell E. Young, et Christopher M. Felix. 2011. « Evaluation of Ocular Hazards from 4 Types of Curing Lights ». *Journal (Canadian Dental Association)* 77: b116.

Lacoeuilhe, Aurelie, Nathalie Machon, Jean-François Julien, Agathe Le Bocq, et Christian Kerbiriou. 2014. « The influence of low intensities of light pollution on bat communities in a semi-natural context ». *PloS one* 9 (10): e103042.

Lai, M. F., N. D. Q. Anh, J. Z. Gao, H. Y. Ma, et H. Y. Lee. 2015. « Design of multisegmented freeform lens for LED fishing/working lamp with high efficiency ». *Applied Optics* 54 (28): E69-74. https://doi.org/10.1364/ao.54.000e69.

Lamb, T. D. 2013. « Evolution of phototransduction, vertebrate photoreceptors and retina ». *Progress in Retinal and Eye Research* 36 (septembre): 52-119. https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2013.06.001.

Lamb, T. D., S. P. Collin, et E. N. Pugh. 2007. « Evolution of the vertebrate eye: opsins, photoreceptors, retina and eye cup ». *Nature Reviews Neuroscience* 8 (12): 960-75. https://doi.org/10.1038/nrn2283.

Lambert, Max R, Geoffrey SJ Giller, Larry B Barber, Kevin C Fitzgerald, et David K Skelly. 2015. « Suburbanization, estrogen contamination, and sex ratio in wild amphibian populations ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112 (38): 11881-86.

Lamia, Katja A., Kai-Florian Storch, et Charles J. Weitz. 2008. « Physiological Significance of a Peripheral Tissue Circadian Clock ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105 (39): 15172-77. https://doi.org/10.1073/pnas.0806717105.

Lange, Mark J. de, Lubna Razzaq, Mieke Versluis, Sven Verlinde, Mehmet Dogrusöz, Stefan Böhringer, Marina Marinkovic, et al. 2015. « Distribution of GNAQ and GNA11 Mutation Signatures in Uveal Melanoma Points to a Light Dependent Mutation Mechanism ». *PloS One* 10 (9): e0138002. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138002.

Le Douarin, P. 2012. « Les éclairages à leds s'adaptent aux élevages ». Réussir Aviculture. 2012. http://www.pleinchamp.com/elevage/volailles-lapins/actualites/les-eclairages-a-leds-s-adaptent-aux-elevages.

Le Grand. 1964. « Optique Physiologique. Tome I. La dioptrie de l'oeil et sa correction », 1964.

Le Tallec, Thomas. 2014. « Impacts de la pollution lumineuse sur les comportements, les rythmes biologiques et les fonctions physiologiques d'un primate non-humain, Microcebus murinus ». Paris, Muséum national d'histoire naturelle.

Le Tallec, Thomas, Marc Théry, et Martine Perret. 2016. « Melatonin concentrations and timing of seasonal reproduction in male mouse lemurs (Microcebus murinus) exposed to light pollution ». *Journal of Mammalogy* 97 (3): 753-60.

Lee, C. H., H. W. Tu, H. C. Chung, Y. H. Chiang, H. L. Hu, M. T. Chu, C. L. Huang, C. W. Lu, et Cie. 2012. « EFFECT OF EVENING LIGHTING TO SLEEP QUALITY USING LED LIGHT SOURCES OF VARIABLE CIRCADIAN ACTION RATIOS ». *Proceedings of Cie 2012 Lighting Quality and Energy Efficiency*, 777-83.

Lee, C-S, J-H Lee, H Pak, SW Park, et D-W Song. 2018. « Phantom Array and Stroboscopic Effects of a Time-Modulated Moving Light Source during Saccadic Eye Movement ». *Lighting Research & Technology* 50 (5): 772-86. https://doi.org/10.1177/1477153517693468.

Lee, E., S. Kim, H. Park, J. Bae, S. Lee, et H. Kim. 2012. « A study on the ergonomic aspects of the proper luminance level of displays ». *Journal of Information Display* 13 (4): 159-66. https://doi.org/10.1080/15980316.2012.742469.

Lee et al. 2016. « Effect of colour and luminance intensity on the phantom array ». *CIE x042:2016 Proceedings of CIE 2016 "Lighting Quality and Energy Efficiency", pp. 232–240*, 2016.

Lee, Hyo Seok, Lian Cui, Ying Li, Ji Suk Choi, Joo-Hee Choi, Zhengri Li, Ga Eon Kim, Won Choi, et Kyung Chul Yoon. 2016. « Influence of Light Emitting Diode-Derived Blue Light Overexposure on Mouse Ocular Surface ». *PloS One* 11 (8): e0161041. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161041.

Lee, Jee-Bum, Soo Hyeon Bae, Ki Rang Moon, Eui Young Na, Sook Jung Yun, et Seung-Chul Lee. 2016. « Light-emitting diodes downregulate cathelicidin, kallikrein and toll-like receptor 2 expressions in keratinocytes and rosacea-like mouse skin ». *Experimental dermatology* 25 (12): 956-61.

Lee, Jee-Bum, Soo-Hyun Kim, Seung-Chul Lee, Hee-Gu Kim, Ho-Geun Ahn, Zhengri Li, et Kyung Chul Yoon. 2014. « Blue Light-Induced Oxidative Stress in Human Corneal Epithelial Cells: Protective

Effects of Ethanol Extracts of Various Medicinal Plant Mixtures ». *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 55 (7): 4119-27. https://doi.org/10.1167/iovs.13-13441.

Lee, Jeongkyung, Mi-Sun Kim, Rongying Li, Victoria Y. Liu, Loning Fu, David D. Moore, Ke Ma, et Vijay K. Yechoor. 2011. « Loss of Bmal1 Leads to Uncoupling and Impaired Glucose-Stimulated Insulin Secretion in β-Cells ». *Islets* 3 (6): 381-88. https://doi.org/10.4161/isl.3.6.18157.

Lee, T. M., et C. C. Chan. 1999. « Dose-Response Relationship of Phototherapy for Seasonal Affective Disorder: A Meta-Analysis ». *Acta Psychiatrica Scandinavica* 99 (5): 315-23.

Léger, Damien, Christian Guilleminault, Gary Bader, Emile Lévy, et Michel Paillard. 2002. « Medical and Socio-Professional Impact of Insomnia ». *Sleep* 25 (6): 625-29.

Léger, Damien, Marie-Anne Massuel, Arnaud Metlaine, et SISYPHE Study Group. 2006. « Professional Correlates of Insomnia ». *Sleep* 29 (2): 171-78.

Leliavski, A., R. Dumbell, V. Ott, et H. Oster. 2015. « Adrenal clocks and the role of adrenal hormones in the regulation of circadian physiology ». *Journal of Biological Rhythms* 30 (1): 20-34. https://doi.org/10.1177/0748730414553971.

Lely, Stéphanie van der, Silvia Frey, Corrado Garbazza, Anna Wirz-Justice, Oskar G. Jenni, Roland Steiner, Stefan Wolf, Christian Cajochen, Vivien Bromundt, et Christina Schmidt. 2015. « Blue Blocker Glasses as a Countermeasure for Alerting Effects of Evening Light-Emitting Diode Screen Exposure in Male Teenagers ». *The Journal of Adolescent Health: Official Publication of the Society for Adolescent Medicine* 56 (1): 113-19. https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2014.08.002.

Lewanzik, D., et C. C. Voigt. 2017. « Transition from conventional to light-emitting diode street lighting changes activity of urban bats ». *Journal of Applied Ecology* 54 (1): 264-71. https://doi.org/10.1111/1365-2664.12758.

Lewanzik, Daniel, et Christian C Voigt. 2014. « Artificial light puts ecosystem services of frugivorous bats at risk ». *Journal of Applied Ecology* 51 (2): 388-94.

Lewy, A. J. 1999. « The Dim Light Melatonin Onset, Melatonin Assays and Biological Rhythm Research in Humans ». *Biological Signals and Receptors* 8 (1-2): 79-83. https://doi.org/10.1159/000014573.

Lewy, A. J., T. A. Wehr, F. K. Goodwin, D. A. Newsome, et S. P. Markey. 1980. « Light Suppresses Melatonin Secretion in Humans ». *Science (New York, N.Y.)* 210 (4475): 1267-69.

Li, Yanhong, Jigang Zhang, Yanfeng Xu, Yunlin Han, Binbin Jiang, Lan Huang, Hua Zhu, Yuhuan Xu, Weiling Yang, et Chuan Qin. 2016. « The Histopathological Investigation of Red and Blue Light Emitting Diode on Treating Skin Wounds in Japanese Big-Ear White Rabbit ». *PloS one* 11 (6): e0157898.

Liebmann, Joerg, Matthias Born, et Victoria Kolb-Bachofen. 2010. « Blue-light irradiation regulates proliferation and differentiation in human skin cells ». *Journal of Investigative Dermatology* 130 (1): 259-69.

Lim, Seong-Rin, Daniel Kang, Oladele A. Ogunseitan, et Julie M. Schoenung. 2011. « Potential Environmental Impacts of Light-Emitting Diodes (LEDs): Metallic Resources, Toxicity, and Hazardous Waste Classification ». *Environmental Science & Technology* 45 (1): 320-27. https://doi.org/10.1021/es101052q.

Lin, Meng-Wei, Pin-Hsuan Hsieh, Erik C. Chang, et Yi-Chun Chen. 2014. « Flicker-Glare and Visual-Comfort Assessments of Light Emitting Diode Billboards ». *Applied Optics* 53 (22): E61-68. https://doi.org/10.1364/AO.53.000E61.

Lincoln, G. A., I. J. Clarke, R. A. Hut, et D. G. Hazlerigg. 2006. « Characterizing a mammalian circannual pacemaker ». *Science* 314 (5807): 1941-44. https://doi.org/10.1126/science.1132009.

Linhares, J.M.M., H. Neves, D. Lopes-Ferreira, M. Faria-Ribeiro, S.C. Peixoto-De-Matos, et J.M. Gonzalez-Meijome. 2013. « Radiometric characterization of a novel LED array system for visual assessment ». *Journal of Modern Optics* 60 (14): 1136-44. https://doi.org/10.1080/09500340.2013.842614.

Liu, B., H. Liu, D. Zhong, et C. Lin. 2010. « Searching for a photocycle of the cryptochrome photoreceptors ». *Current Opinion in Plant Biology* 13: 578–586.

Liu, H., Y. M. Fu, J. Yu, et H. Liu. 2016. « Accumulation and primary metabolism of nitrate in lettuce (Lactuca sativa l. Var. Youmaicai) grown under three different light sources ». *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 47 (17): 1994-2002. https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1225076.

Lockley, Steven W., Erin E. Evans, Frank A. J. L. Scheer, George C. Brainard, Charles A. Czeisler, et Daniel Aeschbach. 2006. « Short-Wavelength Sensitivity for the Direct Effects of Light on Alertness, Vigilance, and the Waking Electroencephalogram in Humans ». *Sleep* 29 (2): 161-68.

Löfgren, Stefan. 2017. « Solar Ultraviolet Radiation Cataract ». *Experimental Eye Research* 156: 112-16. https://doi.org/10.1016/j.exer.2016.05.026.

Logan, Patrick, Miguel Bernabeu, Alberto Ferreira, et Miguel N. Burnier. 2015. « Evidence for the Role of Blue Light in the Development of Uveal Melanoma ». Research article. Journal of Ophthalmology. 2015. https://doi.org/10.1155/2015/386986.

Longcore, T., H. L. Aldern, J. F. Eggers, S. Flores, L. Franco, E. Hirshfield-Yamanishi, L. N. Petrinec, W. A. Yan, et A. M. Barroso. 2015. « Tuning the white light spectrum of light emitting diode lamps to reduce attraction of nocturnal arthropods ». *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 370 (1667). https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0125.

Longcore, Travis. 2010. « Sensory ecology: night lights alter reproductive behavior of blue tits ». *Current Biology* 20 (20): R893-95.

Lougheed, Tim. 2014. « Hidden Blue Hazard? LED Lighting and Retinal Damage in Rats ». *Environmental Health Perspectives* 122 (3): A81-A81. https://doi.org/10.1289/ehp.122-A81.

LRC, Lighting Research Center. 2016. « Response to the 2016 AMA Report on LED Lighting », 2016.

Lubart, R, A Lipovski, Y Nitzan, et H Friedmann. 2011. « A possible mechanism for the bactericidal effect of visible light ». *Laser therapy* 20 (1): 17-22.

Lucas, Robert J., Stuart N. Peirson, David M. Berson, Timothy M. Brown, Howard M. Cooper, Charles A. Czeisler, Mariana G. Figueiro, et al. 2014. « Measuring and Using Light in the Melanopsin Age ». *Trends in Neurosciences* 37 (1): 1-9. https://doi.org/10.1016/j.tins.2013.10.004.

Lucca, AJ, Carol Carter-Wientjes, Kelley A Williams, et Deepak Bhatnagar. 2012. « Blue light (470 nm) effectively inhibits bacterial and fungal growth ». *Letters in applied microbiology* 55 (6): 460-66.

Luginbuhl, Christian B, G Wesley Lockwood, Donald R Davis, Kevin Pick, et Jennifer Selders. 2009. « From the ground up I: light pollution sources in Flagstaff, Arizona ». *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 121 (876): 185-203.

Lunn, Ruth M., David E. Blask, Andrew N. Coogan, Mariana G. Figueiro, Michael R. Gorman, Janet E. Hall, Johnni Hansen, et al. 2017. « Health Consequences of Electric Lighting Practices in the Modern World: A Report on the National Toxicology Program's Workshop on Shift Work at Night, Artificial Light at Night, and Circadian Disruption ». *The Science of the Total Environment* 607-608 (décembre): 1073-84. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.056.

Macarez, R., M. Vanimschoot, P. Ocamica, et J. -L. Kovalski. 2007. « Suivi d'un cas de maculopathie solaire par OCT ». *Journal Français d'Ophtalmologie* 30 (3): 276-80. https://doi.org/10.1016/S0181-5512(07)89590-8.

Macgregor, Callum J, Darren M Evans, Richard Fox, et Michael JO Pocock. 2017. « The dark side of street lighting: impacts on moths and evidence for the disruption of nocturnal pollen transport ». *Global change biology* 23 (2): 697-707.

Macgregor, Callum J, Michael JO Pocock, Richard Fox, et Darren M Evans. 2015. « Pollination by nocturnal Lepidoptera, and the effects of light pollution: a review ». *Ecological entomology* 40 (3): 187-98.

Madison, Kathi C. 2003. « Barrier function of the skin:"la raison d'etre" of the epidermis ». *Journal of Investigative Dermatology* 121 (2): 231-41.

Mainster, Martin A., et Patricia L. Turner. 2012. « Glare's Causes, Consequences, and Clinical Challenges After a Century of Ophthalmic Study ». *American Journal of Ophthalmology* 153 (4): 587-93. https://doi.org/10.1016/j.ajo.2012.01.008.

Maire, M., C. F. Reichert, V. Gabel, A. U. Viola, C. Phillips, C. Berthomier, S. Borgwardt, C. Cajochen, et C. Schmidt. 2018. « Human Brain Patterns Underlying Vigilant Attention: Impact of Sleep Debt, Circadian Phase and Attentional Engagement ». *Scientific Reports* 8 (1): 970. https://doi.org/10.1038/s41598-017-17022-9.

Maisse, G., et B. Breton. 1996. « Contrôle photopériodique de la saison de reproduction chez les salmonidés ». *INRA Production Animale* 9 (1): 71-77.

Malpaux, B., C. Viguié, J.C. Thiery, et P. Chemineau. 1996. « Contrôle photopériodique de la reproduction ». *INRA Production Animale* 9 (1): 9-23.

Mamalis, A., M. Garcha, et J. Jagdeo. 2015. « Light Emitting Diode-Generated Blue Light Modulates Fibrosis Characteristics: Fibroblast Proliferation, Migration Speed, and Reactive Oxygen Species Generation ». *Lasers Surg Med* 47 (2): 210-15. https://doi.org/10.1002/lsm.22293.

Mamalis, Andrew, Eugene Koo, Manveer Garcha, William J Murphy, R Rivkah Isseroff, et Jared Jagdeo. 2016. « High fluence light emitting diode-generated red light modulates characteristics associated with skin fibrosis ». *Journal of biophotonics* 9 (11-12): 1167-79.

Mamalis, Andrew, Daniel Siegel, et Jared Jagdeo. 2016. « Visible Red Light Emitting Diode Photobiomodulation for Skin Fibrosis: Key Molecular Pathways ». *Current dermatology reports* 5 (2): 121-28.

Manivannan, A., P. Soundararajan, Y. G. Park, H. Wei, S. H. Kim, et B. R. Jeong. 2017. « Blue and red light-emitting diodes improve the growth and physiology of in vitro-grown carnations "Green Beauty" and "Purple Beauty" ». *Horticulture Environment and Biotechnology* 58 (1): 12-20. https://doi.org/10.1007/s13580-017-0051-2.

Mårtensson, Björn, Agneta Pettersson, Lars Berglund, et Lisa Ekselius. 2015. « Bright White Light Therapy in Depression: A Critical Review of the Evidence ». *Journal of Affective Disorders* 182 (août): 1-7. https://doi.org/10.1016/j.jad.2015.04.013.

Martinez et al. 2011. « A new sky subdivision for climate based daylight modelling ». *Conférence. 27Th session of the CIA, at South Africa, Volume 1.*, 2011.

Martinez-Nicolas, Antonio, Juan Antonio Madrid, et Maria Angeles Rol. 2014. « Day-Night Contrast as Source of Health for the Human Circadian System ». *Chronobiology International* 31 (3): 382-93. https://doi.org/10.3109/07420528.2013.861845.

Mathews, Fiona, Niamh Roche, Tina Aughney, Nicholas Jones, Julie Day, James Baker, et Steve Langton. 2015. « Barriers and benefits: implications of artificial night-lighting for the distribution of common bats in Britain and Ireland ». *Phil. Trans. R. Soc. B* 370 (1667): 2014.0124. https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0124.

Matynia, Anna, Eileen Nguyen, Xiaoping Sun, Frank W. Blixt, Sachin Parikh, Jason Kessler, Luis Pérez de Sevilla Müller, et al. 2016. « Peripheral Sensory Neurons Expressing Melanopsin Respond to Light ». *Frontiers in Neural Circuits* 10: 60. https://doi.org/10.3389/fncir.2016.00060.

McGinnis, Graham R., et Martin E. Young. 2016. « Circadian Regulation of Metabolic Homeostasis: Causes and Consequences ». *Nature and Science of Sleep* 8: 163-80. https://doi.org/10.2147/NSS.S78946.

McLay, L. K., M. P. Green, et T. M. Jones. 2017. « Chronic exposure to dim artificial light at night decreases fecundity and adult survival in Drosophila melanogaster ». *Journal of Insect Physiology* 100 (juillet): 15-20. https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2017.04.009.

McMahon, Douglas G., P. Michael Iuvone, et Gianluca Tosini. 2014. « Circadian Organization of the Mammalian Retina: From Gene Regulation to Physiology and Diseases ». *Progress in Retinal and Eye Research* 39 (mars): 58-76. https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2013.12.001.

McMahon, Taegan A, Jason R Rohr, et Ximena E Bernal. 2017. « Light and noise pollution interact to disrupt interspecific interactions ». *Ecology* 98 (5): 1290-99.

Mehdi, Madah Khawn-i-Muhammad, et David Hicks. 2010. « Structural and Physiological Responses to Prolonged Constant Lighting in the Cone-Rich Retina of Arvicanthis Ansorgei ». *Experimental Eye Research* 91 (6): 793-99. https://doi.org/10.1016/j.exer.2010.09.012.

Mendez, Natalia, Lorena Abarzua-Catalan, Nelson Vilches, Hugo A. Galdames, Carlos Spichiger, Hans G. Richter, Guillermo J. Valenzuela, Maria Seron-Ferre, et Claudia Torres-Farfan. 2012. « Timed Maternal Melatonin Treatment Reverses Circadian Disruption of the Fetal Adrenal Clock Imposed by Exposure to Constant Light ». *PloS One* 7 (8): e42713. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042713.

Mendoza, J., et E. Challet. 2014. « Circadian insights into dopamine mechanisms ». *Neuroscience* 282 (décembre): 230-42. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2014.07.081.

Meyer, Lars A, et S Mažeika P Sullivan. 2013. « Bright lights, big city: influences of ecological light pollution on reciprocal stream–riparian invertebrate fluxes ». *Ecological applications* 23 (6): 1322-30.

Migaud, Herve, Mairi Cowan, John Taylor, et Hugh W. Ferguson. 2007. « The effect of spectral composition and light intensity on melatonin, stress and retinal damage in post-smolt Atlantic salmon, Salmo salar ». *Aquaculture* 270 (1-4): 390-404. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.04.064.

Millard, Thomas P., et John L. M. Hawk. 2002. « Photosensitivity Disorders: Cause, Effect and Management ». *American Journal of Clinical Dermatology* 3 (4): 239-46.

Miller, Naomi J, et Terry K McGowan. 2015. « Correspondence: Glare in Pedestrian-Friendly Outdoor Lighting ». *Lighting Research & Technology* 47 (6): 760-62. https://doi.org/10.1177/1477153515602199.

Mills, J. N. 1964. « CIRCADIAN RHYTHMS DURING AND AFTER THREE MONTHS IN SOLITUDE UNDERGROUND ». *The Journal of Physiology* 174 (novembre): 217-31.

Min, Jin-Young, et Kyoung-Bok Min. 2018. « Outdoor Light at Night and the Prevalence of Depressive Symptoms and Suicidal Behaviors: A Cross-Sectional Study in a Nationally Representative Sample of Korean Adults ». *Journal of Affective Disorders* 227: 199-205. https://doi.org/10.1016/j.jad.2017.10.039.

Minnaar, Corneile, Justin G Boyles, Ingrid A Minnaar, Catherine L Sole, et Andrew E McKechnie. 2015. « Stacking the odds: light pollution may shift the balance in an ancient predator–prey arms race ». *Journal of applied ecology* 52 (2): 522-31.

Miura et al. s. d. « Effect of a Light-Emitting Timer Device on the Blink Rate of Non-Dry Eye Individuals and Dry Eye Patients ». *Br. J. Ophthalmol. 97, 965–967. Doi:10.1136/Bjophthalmol-2012-302695*. Consulté le 12 novembre 2018. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1136/bjophthalmol-2012-302695.

Miyamura, Yoshinori, Sergio G Coelho, Rainer Wolber, Sharon A Miller, Kazumasa Wakamatsu, Barbara Z Zmudzka, Shosuke Ito, Christoph Smuda, Thierry Passeron, et Wonseon Choi. 2007. « Regulation of human skin pigmentation and responses to ultraviolet radiation ». *Pigment Cell Research* 20 (1): 2-13.

Miyatake, T., T. Yokoi, T. Fuchikawa, N. Korehisa, T. Kamura, K. Nanba, S. Ryouji, et al. 2016. « Monitoring and detecting the cigarette beetle (Coleoptera: Anobiidae) Using ultraviolet (LED) direct and reflected lights and/or pheromone traps in a laboratory and a storehouse ». *Journal of Economic Entomology* 109 (6): 2551-60. https://doi.org/10.1093/jee/tow225.

Mizoguchi, Shin, Hiroki Iwanishi, Reiko Arita, Kumi Shirai, Takayoshi Sumioka, Masahide Kokado, James V. Jester, et Shizuya Saika. 2017. « Ocular Surface Inflammation Impairs Structure and Function of Meibomian Gland ». *Experimental Eye Research* 163: 78-84. https://doi.org/10.1016/j.exer.2017.06.011.

Moeller, Katrin, Vincent Grote, Katharina Keller, Dieter Lorenz, Maximilian Moser, et Tran Quoc Khanh. 2011. « LED Office Lighting to Promote Performance and Well-Being ». In *Ergonomics and Health Aspects of Work with Computers*, édité par M. M. Robertson, 6779:68-77. Lecture Notes in Computer Science. ://WOS:000306310700008.

Moerkens, R, W Vanlommel, R Vanderbruggen, et T Van Delm. 2016. « The added value of LED assimilation light in combination with high pressure sodium lamps in protected tomato crops in Belgium ». In , 119-24.

Monteiro, Ana Filipe, Margarida Rato, et César Martins. 2016. « Drug-induced photosensitivity: Photoallergic and phototoxic reactions ». *Clinics in Dermatology* 34 (5): 571-81.

Moore, R. Y. 1978. « Neural Control of Pineal Function in Mammals and Birds ». *Journal of Neural Transmission. Supplementum*, nº 13: 47-58.

———. 1996. « Neural Control of the Pineal Gland ». *Behavioural Brain Research* 73 (1-2): 125-30.

Mora, Camilo, Rebekka Metzger, Audrey Rollo, et Ransom A Myers. 2007. « Experimental simulations about the effects of overexploitation and habitat fragmentation on populations facing environmental warming ». *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 274 (1613): 1023-28.

Morgan, Ian G., Mingguang He, et Kathryn A. Rose. 2017. « EPIDEMIC OF PATHOLOGIC MYOPIA: What Can Laboratory Studies and Epidemiology Tell Us? » *Retina (Philadelphia, Pa.)* 37 (5): 989-97. https://doi.org/10.1097/IAE.0000000000001272.

Morgan, Ian G., Kyoko Ohno-Matsui, et Seang-Mei Saw. 2012. « Myopia ». *Lancet (London, England)* 379 (9827): 1739-48. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)60272-4.

Morgan, Jessica I. W., Jennifer J. Hunter, Benjamin Masella, Robert Wolfe, Daniel C. Gray, William H. Merigan, François C. Delori, et David R. Williams. 2008. « Light-Induced Retinal Changes Observed with High-Resolution Autofluorescence Imaging of the Retinal Pigment Epithelium ». *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 49 (8): 3715-29. https://doi.org/10.1167/iovs.07-1430.

Mori, Takashi, Kiyoshi Higashi, Tokushige Nakano, Satoshi Ando, Atsushi Kuwahara, Noriyuki Suzuki, et Koichi Saito. 2017. « Novel Phototoxicity Assay Using Human Embryonic Stem Cell-Derived Retinal Pigment Epithelial Cells ». *Toxicology* 378: 1-9. https://doi.org/10.1016/j.tox.2017.01.003.

Motamedzadeh, Majid, Rostam Golmohammadi, Reza Kazemi, et Rashid Heidarimoghadam. 2017. « The Effect of Blue-Enriched White Light on Cognitive Performances and Sleepiness of Night-Shift Workers: A Field Study ». *Physiology & Behavior* 177 (août): 208-14. https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2017.05.008.

Mouritsen, H., G. Feenders, M. Liedvogel, et W. Kropp. 2004. « Migratory birds use head scans to detect the direction of the Earth's magnetic field ». *Current Biology* 14 (21): 1946-49. https://doi.org/10.1016/j.cub.2004.10.025.

Mouritsen, H., U. Janssen-Bienhold, M. Liedvogel, G. Feenders, J. Stalleicken, P. Dirks, et R. Weiler. 2004. « Cryptochromes and neuronal-activity markers colocalize in the retina of migratory birds during magnetic orientation ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101 (39): 14294-99. https://doi.org/10.1073/pnas.0405968101.

MTES. 2017. « Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire - Biodiversité : présentation et enjeux ». 2017. http://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biodiversite-presentation-et-enjeux.

Mukai, Ryo, Hideo Akiyama, Yuki Tajika, Yukitoshi Shimoda, Hiroshi Yorifuji, et Shoji Kishi. 2012. « Functional and Morphologic Consequences of Light Exposure in Primate Eyes ». *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 53 (10): 6035-44. https://doi.org/10.1167/iovs.12-9608.

Münch, Mirjam, Szymon Kobialka, Roland Steiner, Peter Oelhafen, Anna Wirz-Justice, et Christian Cajochen. 2006. « Wavelength-Dependent Effects of Evening Light Exposure on Sleep Architecture and Sleep EEG Power Density in Men ». *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 290 (5): R1421-1428. https://doi.org/10.1152/ajpregu.00478.2005.

Münch, Mirjam, Claudia Nowozin, Johannes Regente, Frederik Bes, Jan De Zeeuw, Sven Hädel, Amely Wahnschaffe, et Dieter Kunz. 2016. « Blue-Enriched Morning Light as a Countermeasure to Light at the Wrong Time: Effects on Cognition, Sleepiness, Sleep, and Circadian Phase ». *Neuropsychobiology* 74 (4): 207-18. https://doi.org/10.1159/000477093.

Münch, Mirjam, Michael Schmieder, Katharina Bieler, Rolf Goldbach, Timo Fuhrmann, Naomi Zumstein, Petra Vonmoos, Jean-Louis Scartezzini, Anna Wirz-Justice, et Christian Cajochen. 2017. « Bright Light Delights: Effects of Daily Light Exposure on Emotions, Restactivity Cycles, Sleep and Melatonin Secretion in Severely Demented Patients ». *Current Alzheimer Research* 14 (10): 1063-75. https://doi.org/10.2174/1567205014666170523092858.

Mure, Ludovic S., Pierre-Loic Cornut, Camille Rieux, Elise Drouyer, Philippe Denis, Claude Gronfier, et Howard M. Cooper. 2009. « Melanopsin Bistability: A Fly's Eye Technology in the Human Retina ». *PloS One* 4 (6): e5991. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005991.

Naeser, Margaret A., Anita Saltmarche, Maxine H. Krengel, Michael R. Hamblin, et Jeffrey A. Knight. 2011. « Improved Cognitive Function after Transcranial, Light-Emitting Diode Treatments in Chronic, Traumatic Brain Injury: Two Case Reports ». *Photomedicine and Laser Surgery* 29 (5): 351-58. https://doi.org/10.1089/pho.2010.2814.

Naeser, Margaret A., Ross Zafonte, Maxine H. Krengel, Paula I. Martin, Judith Frazier, Michael R. Hamblin, Jeffrey A. Knight, William P. Meehan, et Errol H. Baker. 2014. « Significant Improvements in Cognitive Performance Post-Transcranial, Red/near-Infrared Light-Emitting Diode Treatments in Chronic, Mild Traumatic Brain Injury: Open-Protocol Study ». *Journal of Neurotrauma* 31 (11): 1008-17. https://doi.org/10.1089/neu.2013.3244.

Nagai, Ryuhei, Kazushi Watanabe, Akihiko Wakatsuki, Fumiaki Hamada, Koichi Shinohara, Yoshihiro Hayashi, Rina Imamura, et Takao Fukaya. 2008. « Melatonin Preserves Fetal Growth in Rats by Protecting against Ischemia/Reperfusion-Induced Oxidative/Nitrosative Mitochondrial Damage in the Placenta ». *Journal of Pineal Research* 45 (3): 271-76. https://doi.org/10.1111/j.1600-079X.2008.00586.x.

Nair, Govind B, et SJ Dhoble. 2015. « A perspective perception on the applications of light-emitting diodes ». *Luminescence* 30 (8): 1167-75.

Najjar, Raymond P., Christophe Chiquet, Petteri Teikari, Pierre-Loïc Cornut, Bruno Claustrat, Philippe Denis, Howard M. Cooper, et Claude Gronfier. 2014. « Aging of Non-Visual Spectral Sensitivity to Light in Humans: Compensatory Mechanisms? » *PloS One* 9 (1): e85837. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085837.

Najjar, Raymond P., et Jamie M. Zeitzer. 2016. « Temporal Integration of Light Flashes by the Human Circadian System ». *The Journal of Clinical Investigation* 126 (3): 938-47. https://doi.org/10.1172/JCI82306.

Nakamichi, N. 2011. « Molecular mechanisms underlying the Arabidopsis circadian clock ». *Plant and Cell Physiology* 52 (10): 1709-18. https://doi.org/10.1093/pcp/pcr118.

Nakane, Yusuke, Keisuke Ikegami, Masayuki Iigo, Hiroko Ono, Korenori Takeda, Daisuke Takahashi, Maiko Uesaka, Meita Kimijima, Ramu Hashimoto, et Natsumi Arai. 2013. « The saccus vasculosus of fish is a sensor of seasonal changes in day length ». *Nature Communications* 4: 1-7.

Nakane, Yusuke, Keisuke Ikegami, Hiroko Ono, Naoyuki Yamamoto, Shosei Yoshida, Kanjun Hirunagi, Shizufumi Ebihara, Yoshihiro Kubo, et Takashi Yoshimura. 2010. « A mammalian neural tissue opsin (Opsin 5) is a deep brain photoreceptor in birds ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 107 (34): 15264-68.

Nakashima, Yuya, Shigeo Ohta, et Alexander M Wolf. 2017. « Blue light-induced oxidative stress in live skin ». *Free Radical Biology and Medicine*.

Nano, María Eugenia, Van Charles Lansingh, María Soledad Pighin, Natalia Zarate, Hugo Nano, Marissa Janine Carter, João Marcello Furtado, et al. 2013. « Risk Factors of Age-Related Macular Degeneration in Argentina ». *Arquivos Brasileiros De Oftalmologia* 76 (2): 80-84.

NEMA. s. d. « Temporal Light Artifacts: Test Methods and Guidance for Acceptance Criteria - ». Consulté le 8 novembre 2018. https://www.nema.org/Standards/Pages/Temporal-Light-Artifacts-Test-Methods-and-Guidance-for-Acceptance-Criteria.aspx.

Nes, F. L. Van, J. J. Koenderink, H. Nas, et M. A. Bouman. 1967. « Spatiotemporal Modulation Transfer in the Human Eye ». *JOSA* 57 (9): 1082-88. https://doi.org/10.1364/JOSA.57.001082.

Nickla, D. L., et K. Totonelly. 2016. « Brief light exposure at night disrupts the circadian rhythms in eye growth and choroidal thickness in chicks ». *Experimental Eye Research* 146 (mai): 189-95. https://doi.org/10.1016/j.exer.2016.03.003.

Niessner, C., S. Denzau, J. C. Gross, L. Peichl, H. J. Bischof, G. Fleissner, W. Wiltschko, et R. Wiltschko. 2011. « Avian ultraviolet/violet cones identified as probable magnetoreceptors ». *Plos One* 6 (5). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0020091.

Nissila, J., S. Manttari, H. Tuominen, T. Sarkioja, T. Takala, S. Saarela, et M. Timonen. 2012. « The abundance and distribution of melanopsin (OPN4) protein in human brain ». *European Psychiatry* 27. ://WOS:000306695401400.

Noell, Werner K., Virgil S. Walker, Bok Soon Kang, et Steven Berman. 1966. « Retinal Damage by Light in Rats ». *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 5 (5): 450-73.

Noguchi, H., N. Toda, A. Yasukouchi, Q. Nan, et Cie. 2013. « ECO-FRIENDLY COLOR TUNABLE LED OFFICE LIGHTING INCORPORATING CIRCADIAN PHYSIOLOGY ». *Proceedings of the Cie Centenary Conference Towards a New Century of Light*, 1127-30.

Nogueira, Veruska Cronemberger, Leandro Raniero, Guilherme Bueno Costa, Nayana Pinheiro Machado de Freitas Coelho, Fernando Cronemberger Miranda, et Emília Ângela Loschiavo Arisawa. 2016. « Comparative Study of Morphometric and Fourier Transform Infrared Spectroscopy Analyses of the Collagen Fibers in the Repair Process of Cutaneous Lesions ». *Advances in wound care* 5 (2): 55-64.

Norren, D van, et J J Vos. 2016. « Light damage to the retina: an historical approach ». *Eye* 30 (2): 169-72. https://doi.org/10.1038/eye.2015.218.

Norren, Dirk van, et Theo G. M. F. Gorgels. 2011. « The Action Spectrum of Photochemical Damage to the Retina: A Review of Monochromatic Threshold Data ». *Photochemistry and Photobiology* 87 (4): 747-53. https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2011.00921.x.

Northmore, D. P. M. 1991. « VISUAL RESPONSES OF NUCLEUS ISTHMI IN A TELEOST FISH (LEPOMIS-MACROCHIRUS) ». *Vision Research* 31 (3): 525-35. https://doi.org/10.1016/0042-6989(91)90103-c.

Novacek, Michael J, et Elsa E Cleland. 2001. « The current biodiversity extinction event: scenarios for mitigation and recovery ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98 (10): 5466-70.

Oakley, T. H., et D. I. Speiser. 2015. « How complexity originates: The evolution of animal eyes ». In *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, édité par D. J. Futuyma, 46:237-60. Annual Review of Ecology Evolution and Systematics. https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110512-135907.

Obayashi, Kenji, Keigo Saeki, Junko Iwamoto, Yoshito Ikada, et Norio Kurumatani. 2014. « Association between Light Exposure at Night and Nighttime Blood Pressure in the Elderly Independent of Nocturnal Urinary Melatonin Excretion ». *Chronobiology International* 31 (6): 779-86. https://doi.org/10.3109/07420528.2014.900501.

Obayashi, Kenji, Keigo Saeki, et Norio Kurumatani. 2018. « Bedroom Light Exposure at Night and the Incidence of Depressive Symptoms: A Longitudinal Study of the HEIJO-KYO Cohort ». *American Journal of Epidemiology* 187 (3): 427-34. https://doi.org/10.1093/aje/kwx290.

Obayashi, Kenji, Keigo Saeki, Nobuhiro Tone, Junko Iwamoto, Kimie Miyata, Yoshito Ikada, et Norio Kurumatani. 2015. « Lower Melatonin Secretion in Older Females: Gender Differences Independent of Light Exposure Profiles ». *Journal of Epidemiology* 25 (1): 38-43. https://doi.org/10.2188/jea.JE20140035.

OCDE. 2006. « Light's labour's lost », 2006. https://www.oecd-ilibrary.org/energy/light-s-labour-s-lost_9789264109520-en.

OFSP, Office fédéral de santé publique. 2016. « Lampes à LED », 2016.

Oh, Chang Taek, Tae-Rin Kwon, Eun Ja Choi, Soon Re Kim, Joon Seok, Seog Kyun Mun, Kwang Ho Yoo, Yeon Shik Choi, Sun Young Choi, et Beom Joon Kim. 2017. « Inhibitory effect of 660-nm LED on melanin synthesis in in vitro and in vivo ». *Photodermatology, photoimmunology & photomedicine* 33 (1): 49-57.

Oh, Ji Hye, Ki-Heon Lee, Hee Chang Yoon, Heesun Yang, et Young Rag Do. 2014. « Color-by-Blue Display Using Blue Quantum Dot Light-Emitting Diodes and Green/Red Color Converting Phosphors ». *Optics Express* 22 Suppl 2 (mars): A511-520.

Oh, Ji Hye, Heeyeon Yoo, Hoo Keun Park, et Young Rag Do. 2015. « Analysis of Circadian Properties and Healthy Levels of Blue Light from Smartphones at Night ». *Scientific Reports* 5 (juin): 11325. https://doi.org/10.1038/srep11325.

Okatani, Y., K. Okamoto, K. Hayashi, A. Wakatsuki, S. Tamura, et Y. Sagara. 1998. « Maternal-Fetal Transfer of Melatonin in Pregnant Women near Term ». *Journal of Pineal Research* 25 (3): 129-34.

Okatani, Y., A. Wakatsuki, K. Shinohara, K. Taniguchi, et T. Fukaya. 2001. « Melatonin Protects against Oxidative Mitochondrial Damage Induced in Rat Placenta by Ischemia and Reperfusion ». *Journal of Pineal Research* 31 (2): 173-78.

Olanrewaju, H. A., J. L. Purswell, W. R. Maslin, S. D. Collier, et S. L. Branton. 2015. « Effects of color temperatures (kelvin) of LED bulbs on growth performance, carcass characteristics, and ocular development indices of broilers grown to heavy weights ». *Poultry Science* 94 (3): 338-44. https://doi.org/10.3382/ps/peu082.

Olcese, J. M., T. R. Hall, H. R. Figueroa, et V. L. Devlaming. 1981. « Pinealectomy and melatonin effects on daily variations of the hypothalamic serotonergic system in the goldfish ». *Comparative Biochemistry and Physiology a-Physiology* 70 (1): 69-72. https://doi.org/10.1016/0300-9629(81)90396-0.

Olchawa, Magdalena M., Justyna A. Furso, Grzegorz M. Szewczyk, et Tadeusz J. Sarna. 2017. « Lipofuscin-Mediated Photic Stress Inhibits Phagocytic Activity of ARPE-19 Cells; Effect of Donors' Age and Antioxidants ». *Free Radical Research* 51 (9-10): 799-811. https://doi.org/10.1080/10715762.2017.1380307.

Oonincx, Dgab, N. Volk, J. J. E. Diehl, J. J. A. van Loon, et G. Belusic. 2016. « Photoreceptor spectral sensitivity of the compound eyes of black soldier fly (Hermetia illucens) informing the design of LED-based illumination to enhance indoor reproduction ». *Journal of Insect Physiology* 95 (décembre): 133-39. https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2016.10.006.

Opel, D. R., E. Hagstrom, A. K. Pace, K. Sisto, S. A. Hirano-Ali, S. Desai, et J. Swan. 2015. « Light-Emitting Diodes: A Brief Review and Clinical Experience ». *J Clin Aesthet Dermatol* 8 (6): 36-44.

Opländer, Christian, Annika Deck, Christine M Volkmar, Michael Kirsch, Jörg Liebmann, Matthias Born, Frank Van Abeelen, Ernst E Van Faassen, Klaus-Dietrich Kröncke, et Joachim Windolf. 2013. « Mechanism and biological relevance of blue-light (420–453nm)-induced nonenzymatic nitric oxide generation from photolabile nitric oxide derivates in human skin in vitro and in vivo ». *Free Radical Biology and Medicine* 65: 1363-77.

Opländer, Christian, Sarah Hidding, Frauke B Werners, Matthias Born, Norbert Pallua, et Christoph V Suschek. 2011. « Effects of blue light irradiation on human dermal fibroblasts ». *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 103 (2): 118-25.

Organisciak, D. T., R. M. Darrow, L. Barsalou, R. K. Kutty, et B. Wiggert. 2000. « Circadian-Dependent Retinal Light Damage in Rats ». *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 41 (12): 3694-3701.

Organisciak, Daniel T., et Dana K. Vaughan. 2010. « Retinal Light Damage: Mechanisms and Protection ». *Progress in Retinal and Eye Research* 29 (2): 113-34. https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2009.11.004.

Ormond, Alexandra B, et Harold S Freeman. 2013. « Dye sensitizers for photodynamic therapy ». *Materials* 6 (3): 817-40.

Osram Opto Semiconductors GmbH. 2009. « Life cycle assessment of illuminants - A comparison of light bulbs, compact fluorescent lamps and LED lamps », 2009.

Ostrin, Lisa A., Kaleb S. Abbott, et Hope M. Queener. 2017. « Attenuation of Short Wavelengths Alters Sleep and the IpRGC Pupil Response ». *Ophthalmic & Physiological Optics: The Journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists)* 37 (4): 440-50. https://doi.org/10.1111/opo.12385.

Ou, Haiyan, Dennis Corell, Yiyu Ou, Peter Behrensdorff Poulsen, Carsten Dam-Hansen, et Paul-Michael Petersen. 2012. « Spectral design flexibility of LED brings better life ». In *Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting Xvi*, édité par K. P. Streubel, H. Jeon, L. W. Tu, et N. Linder. Vol. 8278. Proceedings of SPIE. https://doi.org/10.1117/12.916204.

Ouyang, J. Q., M. de Jong, M. Hau, M. E. Visser, R. H. A. van Grunsven, et K. Spoelstra. 2015. « Stressful colours: corticosterone concentrations in a free-living songbird vary with the spectral composition of experimental illumination ». *Biology Letters* 11 (8). https://doi.org/10.1098/rsbl.2015.0517.

Ouzounis, Theoharis, Xavier Frette, Carl-Otto Ottosen, et Eva Rosenqvist. 2015. « Spectral effects of LEDs on chlorophyll fluorescence and pigmentation in Phalaenopsis "Vivien'' and « Purple Star'' »" ». *Physiologia Plantarum* 154 (2): 314-27. https://doi.org/10.1111/ppl.12300.

Paller, Amy S, John LM Hawk, Paul Honig, Yoke Chin Giam, Steven Hoath, M Catherine Mack, et Georgios N Stamatas. 2011. « New insights about infant and toddler skin: implications for sun protection ». *Pediatrics* 128 (1): 92-102.

Pan, An, Eva S. Schernhammer, Qi Sun, et Frank B. Hu. 2011. « Rotating Night Shift Work and Risk of Type 2 Diabetes: Two Prospective Cohort Studies in Women ». *PLoS Medicine* 8 (12): e1001141. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1001141.

Pan, J. M., Y. F. Yang, B. Yang, W. H. Dai, et Y. H. Yu. 2015. « Human-friendly light-emitting diode source stimulates broiler growth ». *Plos One* 10 (8). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135330.

Panda, Satchidananda, John B. Hogenesch, et Steve A. Kay. 2002. « Circadian Rhythms from Flies to Human ». *Nature* 417 (6886): 329-35. https://doi.org/10.1038/417329a.

Pandi-Perumal, Seithikurippu R., Marcel Smits, Warren Spence, Venkataramanujan Srinivasan, Daniel P. Cardinali, Alan D. Lowe, et Leonid Kayumov. 2007. « Dim Light Melatonin Onset (DLMO): A Tool for the Analysis of Circadian Phase in Human Sleep and Chronobiological Disorders ». *Progress in Neuro-Psychopharmacology & Biological Psychiatry* 31 (1): 1-11. https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2006.06.020.

Pankey, S., H. Sunada, T. Horikoshi, et M. Sakakibara. 2010. « Cyclic nucleotide-gated channels are involved in phototransduction of dermal photoreceptors in Lymnaea stagnalis ». *Journal of Comparative Physiology B-Biochemical Systemic and Environmental Physiology* 180 (8): 1205-11. https://doi.org/10.1007/s00360-010-0490-x.

Papantoniou, Kyriaki, Oscar J. Pozo, Ana Espinosa, Josep Marcos, Gemma Castaño-Vinyals, Xavier Basagaña, Ferran Calduch Ribas, et al. 2014. « Circadian Variation of Melatonin, Light Exposure, and Diurnal Preference in Day and Night Shift Workers of Both Sexes ». *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention: A Publication of the American Association for Cancer Research, Cosponsored by the American Society of Preventive Oncology* 23 (7): 1176-86. https://doi.org/10.1158/1055-9965.EPI-13-1271.

Parish, James M. 2013. « Genetic and Immunologic Aspects of Sleep and Sleep Disorders ». *Chest* 143 (5): 1489-99. https://doi.org/10.1378/chest.12-1219.

Park, J. A., C. Gardner, Y. S. Jang, M. I. Chang, Y. I. Seo, et D. H. Kim. 2015. « The economic feasibility of light-emitting diode (LED) lights for the Korean offshore squid-jigging fishery ». *Ocean & Coastal Management* 116 (novembre): 311-17. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.08.012.

Park, J. H., B. K. Sung, et H. S. Lee. 2015. « Phototactic behavior 7: phototactic response of the maize weevil, Sitotroga zeamais motsch (Coleopter: Curculionidae), to light-emitting diodes ». *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry* 58 (3): 373-76. https://doi.org/10.1007/s13765-015-0056-4.

Park, Jin Young, Ra-Yeon Ha, Vin Ryu, Eosu Kim, et Young-Chul Jung. 2013. « Effects of Color Temperature and Brightness on Electroencephalogram Alpha Activity in a Polychromatic Light-Emitting Diode ». *Clinical Psychopharmacology and Neuroscience: The Official Scientific Journal of the Korean College of Neuropsychopharmacology* 11 (3): 126-31. https://doi.org/10.9758/cpn.2013.11.3.126.

Park, Mi Seon, Hyun Suk Shin, Na Na Kim, Jehee Lee, Gyung-Suk Kil, et Cheol Young Choi. 2013. « Effects of LED spectral sensitivity on circadian rhythm-related genes in the yellowtail clownfish, Amphiprion clarkii ». *Animal Cells and Systems* 17 (2): 99-105. https://doi.org/10.1080/19768354.2013.779935.

Parlanti, Eleonora, Donatella Pietraforte, Egidio Iorio, Sergio Visentin, Chiara De Nuccio, Andrea Zijno, Mariarosaria D'Errico, Valeria Simonelli, Massimo Sanchez, et Paola Fattibene. 2015. « An altered redox balance and increased genetic instability characterize primary fibroblasts derived from xeroderma pigmentosum group A patients ». *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis* 782: 34-43.

Parvin, R, MMH Mushtaq, MJ Kim, et HC Choi. 2014. « Light emitting diode (LED) as a source of monochromatic light: a novel lighting approach for immunity and meat quality of poultry ». *World's poultry science journal* 70 (3): 557-62.

Paul, J. R., D. DeWoskin, L. J. McMeekin, R. M. Cowell, D. B. Forger, et K. L. Gamble. 2016. « Regulation of persistent sodium currents by glycogen synthase kinase 3 encodes daily rhythms of neuronal excitability ». *Nature Communications* 7 (novembre). https://doi.org/10.1038/ncomms13470.

Pawson, S. M., et M. K. F. Bader. 2014. « LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature ». *Ecological Applications* 24 (7): 1561-68.

Pegoraro, M., et E. Tauber. 2011. « Animal clocks: a multitude of molecular mechanisms for circadian timekeeping ». *Wiley Interdisciplinary Reviews-Rna* 2 (2): 312-20. https://doi.org/10.1002/wrna.58.

Peirson, Stuart N., Stephanie Halford, et Russell G. Foster. 2009. « The Evolution of Irradiance Detection: Melanopsin and the Non-Visual Opsins ». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 364 (1531): 2849-65. https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0050.

Pendoley, K., et R. L. Kamrowski. 2015. « Influence of horizon elevation on the sea-finding behaviour of hatchling flatback turtles exposed to artificial light glow ». *Marine Ecology Progress Series* 529 (juin): 279-88. https://doi.org/10.3354/meps11305.

Perez-Cerezales, S., S. Boryshpolets, O. Afanzar, A. Brandis, R. Nevo, V. Kiss, et M. Eisenbach. 2015. « Involvement of opsins in mammalian sperm thermotaxis ». *Scientific Reports* 5 (novembre). https://doi.org/10.1038/srep16146.

Pergner, J., et Z. Kozmik. 2017. « Amphioxus photoreceptors - insights into the evolution of vertebrate opsins, vision and circadian rhythmicity ». *International Journal of Developmental Biology* 61 (10-12): 665-81. https://doi.org/10.1387/ijdb.170230zk.

Perkin, E. K., F. Holker, S. Heller, et R. Berghahn. 2014. « Artificial light and nocturnal activity in gammarids ». *Peerj* 2 (mars). https://doi.org/10.7717/peerj.279.

Perkin, E. K., F. Holker, et K. Tockner. 2014. « The effects of artificial lighting on adult aquatic and terrestrial insects ». *Freshwater Biology* 59 (2): 368-77. https://doi.org/10.1111/fwb.12270.

Perkin, E. K., F. Holker, K. Tockner, et J. S. Richardson. 2014. « Artificial light as a disturbance to light-naive streams ». *Freshwater Biology* 59 (11): 2235-44. https://doi.org/10.1111/fwb.12426.

Perz et al. 2017. « Acceptability Criteria for the Stroboscopic Effect Visibility Measure ». *CIE Midterm Meeting 2017, October 23-25, 2017, Jeju, South Korea, ISBN 978-3-901906-95-4, DOI: 10.25039/X44.2017*, 2017. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.25039/x44.2017.WP05.

Perz, M, IMLC Vogels, D Sekulovski, L Wang, Y Tu, et IEJ Heynderickx. 2015. « Modeling the Visibility of the Stroboscopic Effect Occurring in Temporally Modulated Light Systems ». *Lighting Research & Technology* 47 (3): 281-300. https://doi.org/10.1177/1477153514534945.

Perz, Małgorzata, Dragan Sekulovski, Ingrid Vogels, et Ingrid Heynderickx. 2017. « Quantifying the Visibility of Periodic Flicker ». *LEUKOS* 13 (3): 127-42. https://doi.org/10.1080/15502724.2016.1269607.

Peschel, N., et C. Helfrich-Forster. 2011. « Setting the clock - by nature: Circadian rhythm in the fruitfly Drosophila melanogaster ». *Febs Letters* 585 (10): 1435-42. https://doi.org/10.1016/j.febslet.2011.02.028.

Peterlin, B. L., et A. I. Scher. 2013. « Migraine and the Social Selection vs Causation Hypotheses: A Question Larger than Either/Or? » *Neurology* 81 (11): 942-43. https://doi.org/10.1212/WNL.0b013e3182a43ea7.

Peters, J. L., et V. M. Cassone. 2005. « Melatonin regulates circadian electroretinogram rhythms in a dose- and time-dependent fashion ». *Journal of Pineal Research* 38 (3): 209-15. https://doi.org/10.1111/j.1600-079X.2004.00195.x.

Petsakou, A., T. P. Sapsis, et J. Blau. 2015. « Circadian rhythms in Rho1 activity regulate neuronal plasticity and network hierarchy ». *Cell* 162 (4): 823-35. https://doi.org/10.1016/j.cell.2015.07.010.

Pfaff, Stephanie, Jörg Liebmann, Matthias Born, Hans F Merk, et Verena Von Felbert. 2015. « Prospective randomized long-term study on the efficacy and safety of UV-free blue light for treating mild psoriasis vulgaris ». *Dermatology* 231 (1): 24-34.

Plano, Santiago A., Leandro P. Casiraghi, Paula García Moro, Natalia Paladino, Diego A. Golombek, et Juan J. Chiesa. 2017. « Circadian and Metabolic Effects of Light: Implications in Weight Homeostasis and Health ». *Frontiers in Neurology* 8: 558. https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00558.

Pogodina, V. V. 1975. « Elizaveta Nilolaevna Levkovich-75th Birthday ». *Acta Virologica* 19 (6): 509.

Polak, T, C Korine, S Yair, et MW Holderied. 2011. « Differential effects of artificial lighting on flight and foraging behaviour of two sympatric bat species in a desert ». *Journal of Zoology* 285 (1): 21-27.

Porter, M. L., J. R. Blasic, M. J. Bok, E. G. Cameron, T. Pringle, T. W. Cronin, et P. R. Robinson. 2012. « Shedding new light on opsin evolution ». *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* 279 (1726): 3-14. https://doi.org/10.1098/rspb.2011.1819.

Pozo, Ana del, Jack Falcon, et F Javier Sanchez-Vazquez. 2014. « The Biological Clock and Dualism ». *Biology of European Sea Bass*, 34.

Price, Richard B. T., Daniel Labrie, Ellen M. Bruzell, David H. Sliney, et Howard E. Strassler. 2016. « The Dental Curing Light: A Potential Health Risk ». *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 13 (8): 639-46. https://doi.org/10.1080/15459624.2016.1165822.

Principi, Paolo, et Roberto Fioretti. 2014. « A comparative life cycle assessment of luminaires for general lighting for the office – compact fluorescent (CFL) vs Light Emitting Diode (LED) – a case study ». *Journal of Cleaner Production* 83 (novembre): 96-107. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.031.

Prost-Squarcioni, Catherine. 2006. « Histologie de la peau et des follicules pileux ». *médecine/sciences* 22 (2): 131-37.

Provencio, I., G. Jiang, W. J. De Grip, W. P. Hayes, et M. D. Rollag. 1998. « Melanopsin: An Opsin in Melanophores, Brain, and Eye ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 95 (1): 340-45.

Provencio, Ignacio, Ignacio R. Rodriguez, Guisen Jiang, William Pär Hayes, Ernesto F. Moreira, et Mark D. Rollag. 2000. « A Novel Human Opsin in the Inner Retina ». *Journal of Neuroscience* 20 (2): 600-605. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.20-02-00600.2000.

Provencio, Ignacio, Mark D. Rollag, et Ana Maria Castrucci. 2002. « Photoreceptive Net in the Mammalian Retina. This Mesh of Cells May Explain How Some Blind Mice Can Still Tell Day from Night ». *Nature* 415 (6871): 493. https://doi.org/10.1038/415493a.

Public Health England. 2013. « How healthy behaviour supports children's wellbeing. » *PHE publications gateway number: 2013146 August 2013*, 2013.

Qian, Yi-Feng, Rui Liu, Jin-Hui Dai, Min-Jie Chen, Xing-Tao Zhou, et Ren-Yuan Chu. 2013. « Transfer from Blue Light or Green Light to White Light Partially Reverses Changes in Ocular Refraction and Anatomy of Developing Guinea Pigs ». *Journal of Vision* 13 (11). https://doi.org/10.1167/13.11.16.

Quirck, L. 2009. « Life-Cycle Assessment and Policy Implications of Energy Efficient Lighting Technologies. » *Senior Research Seminar*, 2009.

Quirk, J. A., D. R. Fish, S. J. Smith, J. W. Sander, S. D. Shorvon, et P. J. Allen. 1995. « Incidence of Photosensitive Epilepsy: A Prospective National Study ». *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 95 (4): 260-67.

Raap, T., G. Casasole, R. Pinxten, et M. Eens. 2016. « Early life exposure to artificial light at night affects the physiological condition: An experimental study on the ecophysiology of free-living nestling songbirds ». *Environmental Pollution* 218 (novembre): 909-14. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.024.

Raap, T., R. Pinxten, G. Casasole, N. Dehnhard, et M. Eens. 2017. « Ambient anthropogenic noise but not light is associated with the ecophysiology of free-living songbird nestlings ». *Scientific Reports* 7 (juin). https://doi.org/10.1038/s41598-017-02940-5.

Raap, Thomas, Giulia Casasole, David Costantini, Hamada AbdElgawad, Han Asard, Rianne Pinxten, et Marcel Eens. 2016. « Artificial light at night affects body mass but not oxidative status in free-living nestling songbirds: an experimental study ». *Scientific reports* 6.

Raap, Thomas, Rianne Pinxten, et Marcel Eens. 2015. « Light pollution disrupts sleep in free-living animals ». *Scientific reports* 5.

———. 2016. « Artificial light at night disrupts sleep in female great tits (Parus major) during the nestling period, and is followed by a sleep rebound ». *Environmental Pollution* 215: 125-34.

Rahman, Shadab A., Melissa A. St Hilaire, Anne-Marie Chang, Nayantara Santhi, Jeanne F. Duffy, Richard E. Kronauer, Charles A. Czeisler, Steven W. Lockley, et Elizabeth B. Klerman. 2017. « Circadian Phase Resetting by a Single Short-Duration Light Exposure ». *JCI Insight* 2 (7): e89494. https://doi.org/10.1172/jci.insight.89494.

Rahman, Shadab A., Melissa A. St Hilaire, et Steven W. Lockley. 2017. « The Effects of Spectral Tuning of Evening Ambient Light on Melatonin Suppression, Alertness and Sleep ». *Physiology & Behavior* 177 (août): 221-29. https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2017.05.002.

Rajaratnam, Shantha M. W., Mark E. Howard, et Ronald R. Grunstein. 2013. « Sleep Loss and Circadian Disruption in Shift Work: Health Burden and Management ». *The Medical Journal of Australia* 199 (8): S11-15.

Ramos, B. C. R., M. Moraes, M. O. Poletini, L.H.R.G. Lima, et A. M. L. Castrucci. 2014. « From blue light to clock genes in zebrafish ZEM-2S cells ». *Plos One* 9 (9). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106252.

Rångtell, Frida H., Emelie Ekstrand, Linnea Rapp, Anna Lagermalm, Lisanne Liethof, Marcela Olaya Búcaro, David Lingfors, Jan-Erik Broman, Helgi B. Schiöth, et Christian Benedict. 2016. « Two Hours of Evening Reading on a Self-Luminous Tablet vs. Reading a Physical Book Does Not Alter Sleep after Daytime Bright Light Exposure ». *Sleep Medicine* 23: 111-18. https://doi.org/10.1016/j.sleep.2016.06.016.

Rasengane, Tuwani A., Dale Allen, et Ruth E. Manny. 1997. « Development of temporal contrast sensitivity in human infants ». *Vision Research* 37 (13): 1747-54. https://doi.org/10.1016/S0042-6989(96)00300-8.

Rashbass, C. 1970. « The Visibility of Transient Changes of Luminance ». *The Journal of Physiology* 210 (1): 165-86. https://doi.org/10.1113/jphysiol.1970.sp009202.

Rea, Mark S., Mariana G. Figueiro, Andrew Bierman, et John D. Bullough. 2010. « Circadian Light ». *Journal of Circadian Rhythms* 8 (1): 2. https://doi.org/10.1186/1740-3391-8-2.

Rea, Mark S., Mariana G. Figueiro, John D. Bullough, et Andrew Bierman. 2005. « A Model of Phototransduction by the Human Circadian System ». *Brain Research. Brain Research Reviews* 50 (2): 213-28. https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2005.07.002.

Rea, MS, MG Figueiro, A Bierman, et R Hamner. 2012. « Modelling the Spectral Sensitivity of the Human Circadian System , Modelling the Spectral Sensitivity of the Human Circadian System ». *Lighting Research & Technology* 44 (4): 386-96. https://doi.org/10.1177/1477153511430474.

Rebec, Katja Malovrh, Marta Klanjšek-Gunde, Grega Bizjak, et Matej B. Kobav. 2015. « White LED Compared with Other Light Sources: Age-Dependent Photobiological Effects and Parameters for Evaluation ». *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics: JOSE* 21 (3): 391-98. https://doi.org/10.1080/10803548.2015.1085163.

Reddy, T Raghunath, et P Krishna Prasad. 2014. « Light-emitting Diodes versus Compact Fluorescent Tubes for Phototherapy in Neonatal Jaundice: A randomised control trial ». *Pediatric Review: International Journal of Pediatric Research* 1 (03).

Regan, D. 1968. « A high frequency mechanism which underlies visual evoked potentials ». *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 25 (3): 231-37. https://doi.org/10.1016/0013-4694(68)90020-5.

Regente, J., J. de Zeeuw, F. Bes, C. Nowozin, S. Appelhoff, A. Wahnschaffe, M. Münch, et D. Kunz. 2017. « Can Short-Wavelength Depleted Bright Light during Single Simulated Night Shifts Prevent Circadian Phase Shifts? » *Applied Ergonomics* 61 (mai): 22-30. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.12.014.

Reinke, JM, et H Sorg. 2012. « Wound repair and regeneration ». *European Surgical Research* 49 (1): 35-43.

Reiter, R.J. 1991. « Melatonin: the chemical expression of darkness ». *Mololecular and Cellular Endocrinology* 79 (1-3): 153-58.

Reiter, R.J., G.G. Ortiz, M.G. Monti, et R.C. Carneiro. 1997. « Cellular and molecular actions of melatonin as an antioxidant ». In *Therapeutic Potential of Melatonin*, édité par G.J.M. Maestroni, A. Conti, et R.J. Reiter, 81-88. Frontiers of Hormone Research. CH-4009 Basel: Karger.

Reiter, Russel J., Dun Xian Tan, Ahmet Korkmaz, et Sergio A. Rosales-Corral. 2014. « Melatonin and Stable Circadian Rhythms Optimize Maternal, Placental and Fetal Physiology ». *Human Reproduction Update* 20 (2): 293-307. https://doi.org/10.1093/humupd/dmt054.

Ribelayga, Christophe, Yu Cao, et Stuart C. Mangel. 2008. « The Circadian Clock in the Retina Controls Rod-Cone Coupling ». *Neuron* 59 (5): 790-801. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2008.07.017.

Richter, Hans G., Jeremy A. Hansell, Shruti Raut, et Dino A. Giussani. 2009. « Melatonin Improves Placental Efficiency and Birth Weight and Increases the Placental Expression of Antioxidant Enzymes in Undernourished Pregnancy ». *Journal of Pineal Research* 46 (4): 357-64. https://doi.org/10.1111/j.1600-079X.2009.00671.x.

Richter, Hans G., Claudia Torres-Farfán, Pedro P. Rojas-García, Carmen Campino, Fernando Torrealba, et María Serón-Ferré. 2004. « The Circadian Timing System: Making Sense of Day/Night Gene Expression ». *Biological Research* 37 (1): 11-28.

Riley, WD, PI Davison, DL Maxwell, RC Newman, et MJ Ives. 2015. « A laboratory experiment to determine the dispersal response of Atlantic salmon (Salmo salar) fry to street light intensity ». *Freshwater Biology* 60 (5): 1016-28.

Rimmer, D. W., D. B. Boivin, T. L. Shanahan, R. E. Kronauer, J. F. Duffy, et C. A. Czeisler. 2000. « Dynamic Resetting of the Human Circadian Pacemaker by Intermittent Bright Light ». *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 279 (5): R1574-1579. https://doi.org/10.1152/ajpregu.2000.279.5.R1574.

Risse, Jean-François, et Société française d'ophtalmologie. 1999. *Exploration de la fonction visuelle: applications au domaine sensoriel de l'oeil normal et en pathologie*. Paris: Masson.

RIVM. s. d. « Schermgebruik en blauw licht: Omvang van blootstelling en relatie met slaap - RIVM Rapport 2017-0106 ». *2014*.

Robert, K. A., J. A. Lesku, J. Partecke, et B. Chambers. 2015. « Artificial light at night desynchronizes strictly seasonal reproduction in a wild mammal ». *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* 282 (1816). ://WOS:000379663700002.

Roberts, JE, et AJ Wilkins. 2013. « Flicker Can Be Perceived during Saccades at Frequencies in Excess of 1 KHz ». *Lighting Research & Technology* 45 (1): 124-32. https://doi.org/10.1177/1477153512436367.

Robertson, Katharine, David T Booth, et Colin J Limpus. 2016. « An assessment of 'turtle-friendly'lights on the sea-finding behaviour of loggerhead turtle hatchlings (Caretta caretta) ». *Wildlife Research* 43 (1): 27-37.

Robson, J. G. 1966. « Spatial and Temporal Contrast-Sensitivity Functions of the Visual System ». *JOSA* 56 (8): 1141-42. https://doi.org/10.1364/JOSA.56.001141.

Rocha, R. J. M., T. Pimentel, J. Serodio, R. Rosa, et R. Calado. 2013. « Comparative performance of light emitting plasma (LEP) and light emitting diode (LED) in ex situ aquaculture of scleractinian corals ». *Aquaculture* 402 (juillet): 38-45. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.03.028.

Rodriguez, A., P. Dann, et A. Chiaradia. 2017. « Reducing light-induced mortality of seabirds: High pressure sodium lights decrease the fatal attraction of shearwaters ». *Journal for Nature Conservation* 39 (septembre): 68-72. https://doi.org/10.1016/j.jnc.2017.07.001.

Roh and Weiter. 1994. « Light damage to the eye. » *J. Fla. Med. Assoc. 81, 248–251.*, 1994.

Ronconi, R. A., K. A. Allard, et P. D. Taylor. 2015. « Bird interactions with offshore oil and gas platforms: Review of impacts and monitoring techniques ». *Journal of Environmental Management* 147 (janvier): 34-45. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.031.

Rotics, Shay, Tamar Dayan, et Noga Kronfeld-Schor. 2011. « Effect of artificial night lighting on temporally partitioned spiny mice ». *Journal of Mammalogy* 92 (1): 159-68.

Rotics, Shay, Tamar Dayan, Ofir Levy, et Noga Kronfeld-Schor. 2011. « Light masking in the field: an experiment with nocturnal and diurnal spiny mice under semi-natural field conditions ». *Chronobiology international* 28 (1): 70-75.

Rougvie, A.E., et M.B. O'Connor. 2013. *Developmental timing*. Vol. 105. 1 vol. Current Topics in Developmental Biology.

Rowse, E. G., S. Harris, et G. Jones. 2016. « The switch from low-pressure sodium to light emitting diodes does not affect bat activity at street lights ». *Plos One* 11 (3). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150884.

Ruby, Norman F., Thomas J. Brennan, Xinmin Xie, Vinh Cao, Paul Franken, H. Craig Heller, et Bruce F. O'Hara. 2002. « Role of Melanopsin in Circadian Responses to Light ». *Science (New York, N.Y.)* 298 (5601): 2211-13. https://doi.org/10.1126/science.1076701.

Ruf, T., et F. Geiser. 2015. « Daily torpor and hibernation in birds and mammals ». *Biological Reviews* 90 (3): 891-926. https://doi.org/10.1111/brv.12137.

Russ, A., T. Lucenicova, et R. Klenke. 2017. « Altered breeding biology of the European blackbird under artificial light at night ». *Journal of Avian Biology* 48 (8): 1114-25. https://doi.org/10.1111/jav.01210.

Russ, Anja, Susanne Reitemeier, Anne Weissmann, Jutta Gottschalk, Almuth Einspanier, et Reinhard Klenke. 2015. « Seasonal and urban effects on the endocrinology of a wild passerine ». *Ecology and evolution* 5 (23): 5698-5710.

Russ, Anja, Annika Rüger, et Reinhard Klenke. 2015. « Seize the night: European Blackbirds (Turdus merula) extend their foraging activity under artificial illumination ». *Journal of ornithology* 156 (1): 123-31.

Russart, Kathryn L. G., et Randy J. Nelson. 2018. « Light at Night as an Environmental Endocrine Disruptor ». *Physiology & Behavior* 190 (juin): 82-89. https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2017.08.029.

Ryckaert, W.R., K.A.G. Smet, I.A.A. Roelandts, M. Van Gils, et P. Hanselaer. 2012. « Linear LED tubes versus fluorescent lamps: An evaluation ». *Energy and Buildings* 49: 429-36. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.042.

Sahin, Levent, et Mariana G. Figueiro. 2013. « Alerting Effects of Short-Wavelength (Blue) and Long-Wavelength (Red) Lights in the Afternoon ». *Physiology & Behavior* 116-117 (mai): 1-7. https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2013.03.014.

Salehpour, Farzad, Javad Mahmoudi, Farzin Kamari, Saeed Sadigh-Eteghad, Seyed Hossein Rasta, et Michael R. Hamblin. 2018. « Brain Photobiomodulation Therapy: A Narrative Review ». *Molecular Neurobiology* 55 (8): 6601-36. https://doi.org/10.1007/s12035-017-0852-4.

Salmon, P., J. F. Nilsson, A. Nord, S. Bensch, et C. Isaksson. 2016. « Urban environment shortens telomere length in nestling great tits, Parus major ». *Biology Letters* 12 (6). https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0155.

Salvaia, J., S. Elias, et A.J. Shepherd. 2014. « Symptoms of visual discomfort from automobile lights and their correlation with headache in night-time taxi drivers ». *Lighting Research and Technology* 46 (3): 354-63. https://doi.org/10.1177/1477153513496782.

Sammarco, John J., et Timothy Lutz. 2007. « Visual Performance for Incandescent and Solid-State Cap Lamps in an Underground Mining Environment ». In , 2090-95. IEEE. https://doi.org/10.1109/07IAS.2007.316.

Sanders, D., R. Kehoe, K. Tiley, J. Bennie, D. Cruse, T. W. Davies, F. J. F. van Veen, et K. J. Gaston. 2015. « Artificial nighttime light changes aphid-parasitoid population dynamics ». *Scientific Reports* 5 (octobre). https://doi.org/10.1038/srep15232.

Sandrelli, F., R. Costa, C. P. Kyriacou, et E. Rosato. 2008. « Comparative Analysis of Circadian Clock Genes in Insects ». *Insect Molecular Biology* 17 (5): 447-63. https://doi.org/10.1111/j.1365-2583.2008.00832.x.

Sangwan, Kuldip Singh, Vikrant Bhakar, Shilpa Naik, et Sylvi Nazareth Andrat. 2014. « Life Cycle Assessment of Incandescent, Fluorescent, Compact Fluorescent and Light Emitting Diode Lamps in an Indian Scenario ». *Procedia CIRP*, 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering, 15 (janvier): 467-72. https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.017.

Santiago-Moreno, J., A. Gomez-Brunet, A. Gonzalez-Bulnes, A. Toledano-Diaz, B. Malpaux, et A. Lopez-Sebastian. 2005. « Differences in reproductive pattern between wild and domestic rams are not associated with inter-specific annual variations in plasma prolactin and melatonin concentrations ». *Domestic Animal Endocrinology* 28 (4): 416-29. https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2005.02.002.

Saraiji, R, D Younis, Mt Madi, et Rb Gibbons. 2016. « Pedestrian Visibility at Night: The Effect of Solid State Streetlights ». *Lighting Research & Technology* 48 (8): 976-91. https://doi.org/10.1177/1477153515619777.

Sarrazin, F., et J. Lecomte. 2016. « Invasive species shape evolution response ». *Science* 352 (6284): 922-23.

Sasseville, Alexandre, et Marc Hébert. 2010. « Using Blue-Green Light at Night and Blue-Blockers during the Day to Improves Adaptation to Night Work: A Pilot Study ». *Progress in Neuro-Psychopharmacology & Biological Psychiatry* 34 (7): 1236-42. https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2010.06.027.

Sathya, P., et R. Natarajan. 2016. « Effect of energy efficient light sources on readability of students – An experimental approach ». *Journal of Engineering Science and Technology* 11 (1): 29-45.

Savoye, I., C. Olsen, L. Wald, F. Clavel-Chapelon, M. C. Boutron-Ruault, et M. Kvaskoff. 2016. « Profils d'exposition solaire et risque de cancer cutané : étude cas-témoin nichée dans E3 N ». *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique* 64, Supplement 4: S224. https://doi.org/10.1016/j.respe.2016.06.216.

Saw, Seang-Mei, Gus Gazzard, Edwin Chan Shih-Yen, et Wei-Han Chua. 2005. « Myopia and Associated Pathological Complications ». *Ophthalmic & Physiological Optics: The Journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists)* 25 (5): 381-91. https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.2005.00298.x.

Scammell, Thomas E., Elda Arrigoni, et Jonathan O. Lipton. 2017. « Neural Circuitry of Wakefulness and Sleep ». *Neuron* 93 (4): 747-65. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.01.014.

SCENIHR. 2012. « The Health Effects of Artificial Light ». *Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks*, 2012.

SCHEER. 2017. « Final Opinion on Light Emitting Diodes (LEDs) - Public Health - European Commission ». *Public Health*, 2017. /health/scientific_committees/consultations/public_consultations/scheer_consultation_05_en.

———. 2018. « Potential risks to human health of Light Emitting Diodes 10 (LEDs) ». *Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks*, 2018.

Schick, Tina, Lebriz Ersoy, Yara T. E. Lechanteur, Nicole T. M. Saksens, Carel B. Hoyng, Anneke I. den Hollander, Bernd Kirchhof, et Sascha Fauser. 2016. « HISTORY OF SUNLIGHT EXPOSURE IS A RISK FACTOR FOR AGE-RELATED MACULAR DEGENERATION ». *Retina (Philadelphia, Pa.)* 36 (4): 787-90. https://doi.org/10.1097/IAE.0000000000000756.

Schoech, Stephan J, Reed Bowman, Thomas P Hahn, Wolfgang Goymann, Ingrid Schwabl, et Eli S Bridge. 2013. « The effects of low levels of light at night upon the endocrine physiology of western scrub-jays (Aphelocoma californica) ». *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological Genetics and Physiology* 319 (9): 527-38.

Scholand, Michael, et Heather Dillon. 2012. *Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products Part 2: LED Manufacturing and Performance*. https://doi.org/10.2172/1044508.

Scholz, S., et I. Mayer. 2008. « Molecular biomarkers of endocrine disruption in small model fish ». *Molecular and Cellular Endocrinology* 293 (1-2): 57-70. https://doi.org/10.1016/j.mce.2008.06.008.

Schulze, Peter SC, Luísa A Barreira, Hugo GC Pereira, José A Perales, et João CS Varela. 2014. « Light emitting diodes (LEDs) applied to microalgal production ». *Trends in biotechnology* 32 (8): 422-30.

Shady, Sherif, Donald I. A. MacLeod, et Heidi S. Fisher. 2004. « Adaptation from Invisible Flicker ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101 (14): 5170-73. https://doi.org/10.1073/pnas.0303452101.

Shahzad, K., M. Rehan, I. M. I. Ismail, M. Sagir, M. S. Tahir, B. Bertok, et A. Nizami. 2015. « Comparative Life Cycle Analysis of Different Lighting Devices ». *Chemical Engineering Transactions* 45 (septembre): 631-36. https://doi.org/10.3303/CET1545106.

Shang, Yu-Man, Gen-Shuh Wang, David H. Sliney, Chang-Hao Yang, et Li-Ling Lee. 2017. « Light-emitting-diode induced retinal damage and its wavelength dependency in vivo ». *International Journal of Ophthalmology* 10 (2): 191-202. https://doi.org/10.18240/ijo.2017.02.03.

Shang, Yu-Man, Gen-Shuh Wang, David Sliney, Chang-Hao Yang, et Li-Ling Lee. 2014. « White Light-Emitting Diodes (LEDs) at Domestic Lighting Levels and Retinal Injury in a Rat Model ». *Environmental Health Perspectives* 122 (3): 269-76. https://doi.org/10.1289/ehp.1307294.

Sharideh, H., et M. Zaghari. 2017. « Effect of light emitting diodes with different color temperatures on immune responses and growth performance of male broiler ». *Annals of Animal Science* 17 (2): 545-53. https://doi.org/10.1515/aoas-2016-0073.

Shaw, Peter X., Travis Stiles, Christopher Douglas, Daisy Ho, Wei Fan, Hongjun Du, et Xu Xiao. 2016. « Oxidative stress, innate immunity, and age-related macular degeneration ». *AIMS molecular science* 3 (2): 196-221. https://doi.org/10.3934/molsci.2016.2.196.

Shen, W. L., Y. Kwon, A. A. Adegbola, J. J. Luo, A. Chess, et C. Montell. 2011. « Function of rhodopsin in temperature discrimination in drosophila ». *Science* 331 (6022): 1333-36. https://doi.org/10.1126/science.1198904.

Shepherd, Alex J. 2010. « Visual Stimuli, Light and Lighting Are Common Triggers of Migraine and Headache ». *Journal of Light & Visual Environment* 34 (2): 94-100. https://doi.org/10.2150/jlve.34.94.

Shichida, Y., et T. Matsuyama. 2009. « Evolution of opsins and phototransduction ». *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 364 (1531): 2881-95. https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0051.

Shin, Hyun Suk, et Cheol Young Choi. 2014. « The stimulatory effect of LED light spectra on genes related to photoreceptors and skin pigmentation in goldfish (Carassius auratus) ». *Fish Physiology and Biochemistry* 40 (4): 1229-38. https://doi.org/10.1007/s10695-014-9918-7.

Shin, Hyun Suk, Hamid R. Habibi, et Cheol Young Choi. 2014. « The environmental regulation of maturation in goldfish, Carassius auratus: Effects of various LED light spectra ». *Comparative Biochemistry and Physiology a-Molecular & Integrative Physiology* 168 (février): 17-24. https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2013.11.003.

Shin, Hyun Suk, Na Na Kim, Young Jae Choi, Hamid R. Habibi, Jae Won Kim, et Cheol Young Choi. 2013. « Light-emitting diode spectral sensitivity relationship with reproductive parameters and ovarian maturation in yellowtail damselfish, Chrysiptera parasema ». *Journal of Photochemistry and Photobiology B-Biology* 127 (octobre): 108-13. https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2013.07.026.

Shin, Hyun Suk, Jehee Lee, et Cheol Young Choi. 2011. « Effects of LED light spectra on oxidative stress and the protective role of melatonin in relation to the daily rhythm of the yellowtail clownfish, Amphiprion clarkii ». *Comparative Biochemistry and Physiology a-Molecular & Integrative Physiology* 160 (2): 221-28. https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2011.06.002.

———. 2012. « Effects of LED light spectra on the growth of the yellowtail clownfish Amphiprion clarkii ». *Fisheries Science* 78 (3): 549-56. https://doi.org/10.1007/s12562-012-0482-8.

Shubin, N., C. Tabin, et S. Carroll. 2009. « Deep homology and the origins of evolutionary novelty ». *Nature* 457 (7231): 818-23. https://doi.org/10.1038/nature07891.

Sikka, Gautam, G. Patrick Hussmann, Deepesh Pandey, Suyi Cao, Daijiro Hori, Jong Taek Park, Jochen Steppan, et al. 2014. « Melanopsin Mediates Light-Dependent Relaxation in Blood Vessels ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111 (50): 17977-82. https://doi.org/10.1073/pnas.1420258111.

Silva, F. S., J. M. Brito, B. M. Costa-Neta, et S. E. P. Lobo. 2015. « Evaluation of light-emitting diodes as attractant for sandflies (Diptera: Psychodidae: Phlebotominae) in northeastern Brazil ». *Memorias Do Instituto Oswaldo Cruz* 110 (6): 801-3. https://doi.org/10.1590/0074-02760150132.

Silveira, Paulo CL, Karina B Ferreira, Franciani R da Rocha, Bruno LS Pieri, Giulia S Pedroso, Claudio T De Souza, Renata T Nesi, et Ricardo A Pinho. 2016. « Effect of low-power laser (LPL) and light-emitting diode (LED) on inflammatory response in burn wound healing ». *Inflammation* 39 (4): 1395-1404.

Singh, Devesh, Chandrajit Basu, Merve Meinhardt-Wollweber, et Bernhard Roth. 2015. « LEDs for energy efficient greenhouse lighting ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49: 139-47.

Singh, Jyoti, Sangeeta Rani, et Vinod Kumar. 2012. « Functional similarity in relation to the external environment between circadian behavioral and melatonin rhythms in the subtropical Indian weaver bird ». *Hormones and behavior* 61 (4): 527-34.

Sletten, Tracey L., Victoria L. Revell, Benita Middleton, Katharin A. Lederle, et Debra J. Skene. 2009. « Age-Related Changes in Acute and Phase-Advancing Responses to Monochromatic Light ». *Journal of Biological Rhythms* 24 (1): 73-84. https://doi.org/10.1177/0748730408328973.

Sloane, P. D., M. Figueiro, S. Garg, L. W. Cohen, D. Reed, C. S. Williams, J. Preisser, et S. Zimmerman. 2015. « Effect of Home-Based Light Treatment on Persons with Dementia and Their Caregivers ». *Lighting Research & Technology (London, England: 2001)* 47 (2): 161-76. https://doi.org/10.1177/1477153513517255.

Slocum, Amanda. 2005. « A Technology Assessment of Light Emitting Diode (LED) Solid-State Lighting for General Illumination ». 200504. NCEE Working Paper Series. National Center for Environmental Economics, U.S. Environmental Protection Agency. https://ideas.repec.org/p/nev/wpaper/wp200504.html.

Smarr, Benjamin L., Azure D. Grant, Luz Perez, Irving Zucker, et Lance J. Kriegsfeld. 2017. « Maternal and Early-Life Circadian Disruption Have Long-Lasting Negative Consequences on Offspring Development and Adult Behavior in Mice ». *Scientific Reports* 7 (1): 3326. https://doi.org/10.1038/s41598-017-03406-4.

Smith, Kurt A., Martin W. Schoen, et Charles A. Czeisler. 2004. « Adaptation of Human Pineal Melatonin Suppression by Recent Photic History ». *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism* 89 (7): 3610-14. https://doi.org/10.1210/jc.2003-032100.

Smith, R. J., et R. G. Bryant. 1975. « Metal Substitutions Incarbonic Anhydrase: A Halide Ion Probe Study ». *Biochemical and Biophysical Research Communications* 66 (4): 1281-86.

Smolensky, Michael H., Linda L. Sackett-Lundeen, et Francesco Portaluppi. 2015. « Nocturnal Light Pollution and Underexposure to Daytime Sunlight: Complementary Mechanisms of Circadian Disruption and Related Diseases ». *Chronobiology International* 32 (8): 1029-48. https://doi.org/10.3109/07420528.2015.1072002.

Söderberg, P G, N Talebizadeh, Z Yu, et K Galichanin. 2016. « Does infrared or ultraviolet light damage the lens? » *Eye* 30 (2): 241-46. https://doi.org/10.1038/eye.2015.266.

Soliveres, S., F. van der Plas, P. Manning, D. Prati, M. M. Gossner, S. C. Renner, F. Alt, et al. 2016. « Biodiversity at multiple trophic levels is needed for ecosystem multifunctionality ». *Nature* 536 (7617): 456-+. https://doi.org/10.1038/nature19092.

Solovei, Irina, Moritz Kreysing, Christian Lanctôt, Süleyman Kösem, Leo Peichl, Thomas Cremer, Jochen Guck, et Boris Joffe. 2009. « Nuclear Architecture of Rod Photoreceptor Cells Adapts to Vision in Mammalian Evolution ». *Cell* 137 (2): 356-68. https://doi.org/10.1016/j.cell.2009.01.052.

Solov'yov, I. A., H. Mouritsen, et K. Schulten. 2010. « Acuity of a cryptochrome and vision-based magnetoreception system in birds ». *Biophysical Journal* 99 (1): 40-49. https://doi.org/10.1016/j.bpj.2010.03.053.

Song et al. 2012. « The Photocytotoxicity of Different Lights on Mammalian Cells in Interior Lighting System ». *J. Photochem. Photobiol. B 117, 13–18. Doi:10.1016/j.Jphotobiol.2012.08.007*, 2012. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2012.08.007.

Song, H., D. F. Wang, F. D. Perez, R. R. Xie, Z. P. Liu, C. C. Chen, M. J. Yu, L. D. Yuan, R. D. Fernald, et S. Zhao. 2017. « Rhythmic expressed clock regulates the transcription of proliferating cellular nuclear antigen in teleost retina ». *Experimental Eye Research* 160 (juillet): 21-30. https://doi.org/10.1016/j.exer.2017.04.004.

Song, J. A., N. N. Kim, Y. J. Choi, J. Y. Choi, B. S. Kim, et C. Y. Choi. 2016. « Effects of light-emitting diode spectra on the vertebrate ancient long opsin and gonadotropin hormone in the goldfish Carassius auratus ». *Biochemical and Biophysical Research Communications* 476 (4): 541-45. https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2016.05.159.

Song, Jin Ah, Ji Yong Choi, Na Na Kim, Young Jae Choi, Mi Ae Park, et Cheol Young Choi. 2015. « Effect of LED light spectra on exogenous prolactin-regulated circadian rhythm in goldfish, Carassius auratus ». *Biological Rhythm Research* 46 (1): 121-35. https://doi.org/10.1080/09291016.2014.963947.

Spoelstra, K., R. H. A. van Grunsven, J. J. C. Ramakers, K. B. Ferguson, T. Raap, M. Donners, E. M. Veenendaal, et M. E. Visser. 2017. « Response of bats to light with different spectra: light-shy and agile bat presence is affected by white and green, but not red light ». *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* 284 (1855). https://doi.org/10.1098/rspb.2017.0075.

Spudich, J. L. 2000. « Structural biology - A chloride pump at atomic resolution ». *Science* 288 (5470): 1358-59. https://doi.org/10.1126/science.288.5470.1358.

Sroykham, Watchara, Yodchanan Wongsawat, et Ieee. 2013. « Effects of LED-backlit Computer Screen and Emotional Self-regulation on Human Melatonin Production ». In *2013 35th Annual International Conference of the Ieee Engineering in Medicine and Biology Society*, 1704-7. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Conference Proceedings. ://WOS:000341702102046.

Stephan, F. K., et I. Zucker. 1972. « Circadian Rhythms in Drinking Behavior and Locomotor Activity of Rats Are Eliminated by Hypothalamic Lesions ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 69 (6): 1583-86.

Stevens, Richard G. 2009. « Light-at-Night, Circadian Disruption and Breast Cancer: Assessment of Existing Evidence ». *International Journal of Epidemiology* 38 (4): 963-70. https://doi.org/10.1093/ije/dyp178.

Stevens, Richard G., George C. Brainard, David E. Blask, Steven W. Lockley, et Mario E. Motta. 2014. « Breast Cancer and Circadian Disruption from Electric Lighting in the Modern World ». *CA: A Cancer Journal for Clinicians* 64 (3): 207-18. https://doi.org/10.3322/caac.21218.

Stone, E. L., G. Jones, et S. Harris. 2012. « Conserving energy at a cost to biodiversity? Impacts of LED lighting on bats ». *Global Change Biology* 18 (8): 2458-65. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02705.x.

Strouthos, Iosif, Georgios Chatzikonstantinou, Nikolaos Tselis, Dimitra Bon, Efstratios Karagiannis, Eleni Zoga, Konstantinos Ferentinos, Julia Maximenko, Vassiliki Nikolettou-Fischer, et Nikolaos Zamboglou. 2017. « Photobiomodulation therapy for the management of radiation-induced dermatitis ». *Strahlentherapie und Onkologie* 193 (6): 491-98.

Strutt, John William. 2009. « On the Transmission of Light through an Atmosphere Containing Small Particles in Suspension, and on the Origin of the Blue of the Sky ». Scientific Papers. juillet 2009. https://doi.org/10.1017/CBO9780511703997.052.

Sui, Guo-Yuan, Guang-Cong Liu, Guang-Ying Liu, Yan-Yan Gao, Yan Deng, Wen-Ying Wang, Shu-Hui Tong, et Lie Wang. 2013. « Is Sunlight Exposure a Risk Factor for Age-Related Macular Degeneration? A Systematic Review and Meta-Analysis ». *The British Journal of Ophthalmology* 97 (4): 389-94. https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2012-302281.

Sullivan, B. G., A. D. M. Wilson, L. F. G. Gutowsky, P. H. Patrick, M. Sills, et S. J. Cooke. 2016. « The Behavioral Responses of a Warmwater Teleost to Different Spectra of Light-Emitting Diodes ». *North American Journal of Fisheries Management* 36 (5): 1000-1005. https://doi.org/10.1080/02755947.2016.1141123d.

Sun, C.-C., C.-J. Jiang, Y.-C. Chen, et T.-H. Yang. 2014. « Glare effect for three types of street lamps based on White LEDs ». *Optical Review* 21 (3): 215-19. https://doi.org/10.1007/s10043-014-0031-z.

Svrcek, C., et D. W. Smith. 2004. « Cyanobacteria toxins and the current state of knowledge on water treatment options: a review ». *Journal of Environmental Engineering and Science* 3 (3): 155-85. https://doi.org/10.1139/s04-010.

Sweater-Hickcox, K., N. Narendran, J.D. Bullough, et J.P. Freyssinier. 2013. « Effect of different coloured luminous surrounds on LED discomfort glare perception ». *Lighting Research and Technology* 45 (4): 464-75. https://doi.org/10.1177/1477153512474450.

Tähkämö. 2013a. « Life cycle assessment of light-emitting diode downlight luminaire - A case study ». *The International Journal of Life Cycle Assessment June 2013, Volume 18, Issue 5, pp 1009–1018*, 2013. https://www.researchgate.net/publication/257679886_Life_cycle_assessment_of_light-emitting_diode_downlight_luminaire_-_A_case_study.

Tähkämö, Leena. 2013b. « Life cycle assessment of light sources - Case studies and review of the analyses ».

Tähkämö, Leena, et Liisa Halonen. 2015. « Life cycle assessment of road lighting luminaires – Comparison of light-emitting diode and high-pressure sodium technologies ». *Journal of Cleaner Production* 93 (avril): 234-42. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.025.

Tähkämö, Leena, Christophe Martinsons, Pierre Ravel, Francis Grannec, et Georges Zissis. 2014. « Solid State Lighting Annex: Life Cycle Assessment of Solid State Lighting: Final Report ». https://research.aalto.fi/en/publications/solid-state-lighting-annex-life-cycle-assessment-of-solid-state-lighting(e3968d58-ae00-45c0-8abd-9313119fa6db)/export.html.

Taillard, Jacques, Aurore Capelli, Patricia Sagaspe, Anna Anund, Torbjorn Akerstedt, et Pierre Philip. 2012. « In-Car Nocturnal Blue Light Exposure Improves Motorway Driving: A Randomized Controlled Trial ». *PloS One* 7 (10): e46750. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0046750.

Takahashi, A., S. Kasagi, N. Murakami, S. Furufuji, S. Kikuchi, K. Mizusawa, et T. Andoh. 2016. « Chronic effects of light irradiated from LED on the growth performance and endocrine properties of barfin flounder Verasper moseri ». *General and Comparative Endocrinology* 232 (juin): 101-8. https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2016.01.008.

Takahashi, J. S. 1996. « Circadian rhythms - Ion channels get the message ». *Nature* 382 (6587): 117-18. https://doi.org/10.1038/382117a0.

Talathi, S. S., D. U. Hwang, W. L. Ditto, T. Mareci, H. Sepulveda, M. Spano, et P. R. Carney. 2009. « Circadian control of neural excitability in an animal model of temporal lobe epilepsy ». *Neuroscience Letters* 455 (2): 145-49. https://doi.org/10.1016/j.neulet.2009.03.057.

Tamir, R., A. Lerner, C. Haspel, Z. Dubinsky, et D. Iluz. 2017. « The spectral and spatial distribution of light pollution in the waters of the northern Gulf of Aqaba (Eilat) ». *Scientific Reports* 7 (février). https://doi.org/10.1038/srep42329.

Tashiro, T, S Kawanobe, T Kimura-Minoda, S Kohko, T Ishikawa, et M Ayama. 2015. « Discomfort Glare for White LED Light Sources with Different Spatial Arrangements ». *Lighting Research & Technology* 47 (3): 316-37. https://doi.org/10.1177/1477153514532122.

Teuschl, Andreas, Elizabeth Rosado Balmayor, Heinz Redl, Martijn van Griensven, et Peter Dungel. 2015. « Phototherapy with LED light modulates healing processes in an in vitro scratch-wound model using 3 different cell types ». *Dermatologic surgery* 41 (2): 261-68.

Thapan, K., J. Arendt, et D. J. Skene. 2001. « An Action Spectrum for Melatonin Suppression: Evidence for a Novel Non-Rod, Non-Cone Photoreceptor System in Humans ». *The Journal of Physiology* 535 (Pt 1): 261-67.

Thomas, J. R., J. James, R. C. Newman, W. D. Riley, S. W. Griffiths, et J. Cable. 2016. « The impact of streetlights on an aquatic invasive species: Artificial light at night alters signal crayfish behaviour ». *Applied Animal Behaviour Science* 176 (mars): 143-49. https://doi.org/10.1016/j.applanim.2015.11.020.

Timonen, Markku, Juuso Nissilä, Anu Liettu, Jari Jokelainen, Heidi Jurvelin, Antti Aunio, Pirkko Räsänen, et Timo Takala. 2012. « Can Transcranial Brain-Targeted Bright Light Treatment via Ear Canals Be Effective in Relieving Symptoms in Seasonal Affective Disorder? A Pilot Study ». *Medical Hypotheses* 78 (4): 511-15. https://doi.org/10.1016/j.mehy.2012.01.019.

Tomioka, K., et A. Matsumoto. 2010. « A Comparative View of Insect Circadian Clock Systems ». *Cellular and Molecular Life Sciences* 67 (9): 1397-1406. https://doi.org/10.1007/s00018-009-0232-y.

Tong, M. Q., E. Watanabe, N. Yamamoto, M. Nagahata-Ishiguro, K. Maemura, N. Takeda, R. Nagai, et Y. Ozaki. 2013. « Circadian expressions of cardiac ion channel genes in mouse might be associated with the central clock in the SCN but not the peripheral clock in the heart ». *Biological Rhythm Research* 44 (4): 519-30. https://doi.org/10.1080/09291016.2012.704801.

Tonsfeldt, Karen J, et Patrick E Chappell. 2012. « Clocks on top: the role of the circadian clock in the hypothalamic and pituitary regulation of endocrine physiology ». *Molecular and cellular endocrinology* 349 (1): 3-12.

Torii, Hidemasa, Toshihide Kurihara, Yuko Seko, Kazuno Negishi, Kazuhiko Ohnuma, Takaaki Inaba, Motoko Kawashima, et al. 2017. « Violet Light Exposure Can Be a Preventive Strategy Against Myopia Progression ». *EBioMedicine* 15 (février): 210-19. https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2016.12.007.

Tosini, G., et R. Avery. 1996. « Spectral composition of light influences thermoregulatory behaviour in a lacertid lizard (Podarcis muralis) ». *Journal of Thermal Biology* 21 (3): 191-95. https://doi.org/10.1016/0306-4565(96)00002-2.

Tosini, G., et M. Menaker. 1996. « Circadian Rhythms in Cultured Mammalian Retina ». *Science (New York, N.Y.)* 272 (5260): 419-21.

Touitou, Yvan, Alain Reinberg, et David Touitou. 2017. « Association between Light at Night, Melatonin Secretion, Sleep Deprivation, and the Internal Clock: Health Impacts and Mechanisms of Circadian Disruption ». *Life Sciences* 173 (mars): 94-106. https://doi.org/10.1016/j.lfs.2017.02.008.

Touitou, Yvan, David Touitou, et Alain Reinberg. 2016. « Disruption of Adolescents' Circadian Clock: The Vicious Circle of Media Use, Exposure to Light at Night, Sleep Loss and Risk Behaviors ». *Journal of Physiology, Paris* 110 (4 Pt B): 467-79. https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2017.05.001.

Tran, L. H., et S. Y. Jung. 2017. « Effects of light-emitting diode irradiation on growth characteristics and regulation of porphyrin biosynthesis in rice seedlings ». *International Journal of Molecular Sciences* 18 (3). https://doi.org/10.3390/ijms18030641.

Trivedi, AK, S Rani, et V Kumar. 2006. « Day length regulates seasonal reproduction in subtropical House Sparrows: Evidence for photoperiodism as an adaptive strategy ». In , 147:265-265. SPRINGER 233 SPRING STREET, NEW YORK, NY 10013 USA.

Truscott, Zoe, David T Booth, et Colin J Limpus. 2017. « The effect of on-shore light pollution on sea-turtle hatchlings commencing their off-shore swim ». *Wildlife Research* 44 (2): 127-34.

Turner, P. L., et M. A. Mainster. 2008. « Circadian Photoreception: Ageing and the Eye's Important Role in Systemic Health ». *The British Journal of Ophthalmology* 92 (11): 1439-44. https://doi.org/10.1136/bjo.2008.141747.

Udovičić et al. s. d. « Photobiologische Sicherheit von Licht emittierenden Dioden (LED) ». *BauA, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin*.

Ueda, Keiko, Jin Zhao, Hye Jin Kim, et Janet R. Sparrow. 2016. « Photodegradation of Retinal Bisretinoids in Mouse Models and Implications for Macular Degeneration ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 113 (25): 6904-9. https://doi.org/10.1073/pnas.1524774113.

Ukai, H., et H. R. Ueda. 2010. « Systems biology of mammalian circadian clocks ». In *Annual Review of Physiology*, 72:579-603. Annual Review of Physiology. https://doi.org/10.1146/annurev-physiol-073109-130051.

Underwood, C. N., T. W. Davies, et A. M. Queiros. 2017. « Artificial light at night alters trophic interactions of intertidal invertebrates ». *Journal of Animal Ecology* 86 (4): 781-89. https://doi.org/10.1111/1365-2656.12670.

Underwood, H. 1989. « The pineal and melatonin: regulators of circadian function in lower vertebrates ». *Experientia* 45: 914-22.

Urbanova, V., O. Bazalova, H. Vaneckova, et D. Dolezel. 2016. « Photoperiod regulates growth of male accessory glands through juvenile hormone signaling in the linden bug, Pyrrhocoris apterus ». *Insect Biochemistry and Molecular Biology* 70 (mars): 184-90. https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2016.01.003.

Urrestarazu, M., C. Najera, et M. D. Gea. 2016. « Effect of the spectral quality and intensity of light-emitting diodes on several horticultural crops ». *Hortscience* 51 (3): 268-71.

U.S. Department of Energy (DOE). 2013. « Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products, Part 3: LED Environmental Testing ». *ResearchGate*, 2013. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.2172/1074312.

Valdez, Diego J., Paula S. Nieto, Eduardo Garbarino-Pico, Lucia B. Avalle, Hugo Diaz-Fajreldines, Clemar Schurrer, Kimberly M. Cheng, et Mario E. Guido. 2009. « A nonmammalian vertebrate model of blindness reveals functional photoreceptors in the inner retina ». *Faseb Journal* 23 (4): 1186-95. https://doi.org/10.1096/fj.08-117085.

Valladeau, Jenny. 2006. « Les cellules de Langerhans ». *médecine/sciences* 22 (2): 144-48.

Valo, Martine. 2012. « Après les algues vertes, "les algues bleues" : un problème d'environnement majeur ». *Le Monde*, 08 2012.

Van Gelder, Russell N. 2003. « Making (a) Sense of Non-Visual Ocular Photoreception ». *Trends in Neurosciences* 26 (9): 458-61. https://doi.org/10.1016/S0166-2236(03)00211-X.

Van Langevelde, Frank, Roy HA Van Grunsven, Elmar M Veenendaal, et Thijs PM Fijen. 2017. « Artificial night lighting inhibits feeding in moths ». *Biology Letters* 13 (3): 20160874.

Van Soest, J.L., et De Lange, H. s. d. « Attenuation Characteristics and Phase Shift Characteristics of the Human Fovea-Cortex Systems in Relation to Flicker-Fusion Phenomena ». Consulté le 9 novembre 2018. http://resolver.tudelft.nl/uuid:eb62912c-1dd6-4f69-973d-160ede6792c8.

Van Someren, Eus J. W., Rixt F. Riemersma, et Dick F. Swaab. 2002. « Functional Plasticity of the Circadian Timing System in Old Age: Light Exposure ». *Progress in Brain Research* 138: 205-31. https://doi.org/10.1016/S0079-6123(02)38080-4.

Vancura, P., T. Wolloscheck, K. Baba, G. Tosini, P. M. Luvone, et R. Spessert. 2016. « Circadian and dopaminergic regulation of fatty acid oxidation pathway genes in retina and photoreceptor cells ». *Plos One* 11 (10). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164665.

Vandewalle, Gilles, S. Gais, M. Schabus, Evelyne Balteau, Geneviève Albouy, Virginie Sterpenich, D. Dijk, et Pierre Maquet. 2006. « Superiority of Blue (470 Nm) Light in Eliciting Non-Image Forming Brain Responses during Auditory Working Memory in Humans: A FMRI Study ». *Journal of Sleep Research* 15 (Suppl. 1). https://orbi.uliege.be/handle/2268/138377.

Vanninen, I., D. Pinto, A. Nissinen, N. S. Johansen, et L. Shipp. 2012. « Prospecting the use of artificial lighting for integrated pest management ». In *Vii International Symposium on Light in Horticultural Systems*, édité par S. Hemming et E. Heuvelink, 956:593-608. Acta Horticulturae. ://WOS:000323764600071.

Varcoe, Tamara J., Nicole Wight, Athena Voultsios, Mark D. Salkeld, et David J. Kennaway. 2011. « Chronic Phase Shifts of the Photoperiod throughout Pregnancy Programs Glucose Intolerance and Insulin Resistance in the Rat ». *PloS One* 6 (4): e18504. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0018504.

Varkevisser, Michel, Roy J. E. M. Raymann, et David V. Keyson. 2011. « Nonvisual Effects of Led Coloured Ambient Lighting on Well-Being and Cardiac Reactivity: Preliminary Findings ». In *Ergonomics and Health Aspects of Work with Computers*, édité par M. M. Robertson, 6779:159-67. Lecture Notes in Computer Science. ://WOS:000306310700017.

Vartanian, Garen V., Xiwu Zhao, et Kwoon Y. Wong. 2015. « Using Flickering Light to Enhance Nonimage-Forming Visual Stimulation in Humans ». *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 56 (8): 4680-88. https://doi.org/10.1167/iovs.15-16468.

Vatine, G., D. Vallone, Y. Gothilf, et N. S. Foulkes. 2011. « It's time to swim! Zebrafish and the circadian clock ». *Febs Letters* 585 (10): 1485-94. https://doi.org/10.1016/j.febslet.2011.04.007.

Vaughan, Dana K., Jenny L. Nemke, Steven J. Fliesler, Ruth M. Darrow, et Daniel T. Organisciak. 2002. « Evidence for a Circadian Rhythm of Susceptibility to Retinal Light Damage ». *Photochemistry and Photobiology* 75 (5): 547-53.

Veitch and McColl. 1995. « Modulation of fluorescent light: Flicker rate and light source effects on visual performance and visual comfort - », 1995. https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/14771535950270040301.

Venter, O., E. W. Sanderson, A. Magrach, J. R. Allan, J. Beher, K. R. Jones, H. P. Possingham, et al. 2016. « Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation ». *Nature Communications* 7 (août). https://doi.org/10.1038/ncomms12558.

Veraszto, Csaba, Martin Guhmann, Huiyong Jia, Vinoth Babu Veedin Rajan, Luis A Bezares-Calderon, Cristina Pineiro Lopez, Nadine Randel, Reza Shahidi, Nico K Michiels, et Shozo Yokoyama. 2018. « Ciliary and rhabdomeric photoreceptor-cell circuits form a spectral depth gauge in marine zooplankton ». *bioRxiv*, 251686.

Vienot, F., et A. Chiron. 1992. « Brightness Matching and Flicker Photometric Data Obtained over the Full Mesopic Range ». *Vision Research* 32 (3): 533-40.

Viénot, Françoise, Hans Brettel, Tuong-Vi Dang, et Jean Le Rohellec. 2012. « Domain of Metamers Exciting Intrinsically Photosensitive Retinal Ganglion Cells (IpRGCs) and Rods ». *Journal of the Optical Society of America A* 29 (2): A366. https://doi.org/10.1364/JOSAA.29.00A366.

Viénot, Françoise, Marie-Lucie Durand, et Elodie Mahler. 2009. « Kruithof's Rule Revisited Using LED Illumination ». *Journal of Modern Optics* 56 (13): 1433-46. https://doi.org/10.1080/09500340903151278.

Viitanen, J., J. Lehtovaara, E. Tetri, et L. Halonen. 2013. « User preferences in office lighting: A case study comparing LED and t5 lighting ». *LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America* 9 (4): 261-90. https://doi.org/10.1582/LEUKOS.2013.09.04.003.

Vilches, Nelson, Carlos Spichiger, Natalia Mendez, Lorena Abarzua-Catalan, Hugo A. Galdames, David G. Hazlerigg, Hans G. Richter, et Claudia Torres-Farfan. 2014. « Gestational Chronodisruption Impairs Hippocampal Expression of NMDA Receptor Subunits Grin1b/Grin3a and Spatial Memory in the Adult Offspring ». *PloS One* 9 (3): e91313. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091313.

Villa, C, R Bremond, et E Saint Jacques. 2015. « Visibility and Discomfort Glare of LED Road Studs ». *Lighting Research & Technology* 47 (8): 945-63. https://doi.org/10.1177/1477153514563637.

Villa, C, R Bremond, et E Saint-Jacques. 2017. « Assessment of Pedestrian Discomfort Glare from Urban LED Lighting ». *Lighting Research & Technology* 49 (2): 147-72. https://doi.org/10.1177/1477153516673402.

Voiculescu, S. E., A. E. Rosca, V. Zeca, L. Zagrean, et A. M. Zagrean. 2015. « Impact of Maternal Melatonin Suppression on Forced Swim and Tail Suspension Behavioral Despair Tests in Adult Offspring ». *Journal of Medicine and Life* 8 (2): 202-6.

Vojniković, Bozo, Svatopluk Synek, Vladimir Mićović, Mirna Telezar, et Zeljko Linsak. 2010. « Epidemiological Study of Sun Exposure and Visual Field Damage in Children in Primorsko-Goranska County--the Risk Factors of Earlier Development of Macular Degeneration ». *Collegium Antropologicum* 34 Suppl 2 (avril): 57-59.

Vojniković, Bozo, et Davor Vojniković. 2010. « Benedictine Monastery on the Island of Rab Hides the Mystery of Sunlight Influence on Development of Macular Degeneration (AMD). Is a Harmful Sunlight, Risk Factor or Cause of Macular Degeneration? » *Collegium Antropologicum* 34 Suppl 2 (avril): 5-8.

Von Frisch, K. 1911. « Beiträge zur Physiologie der Pigmentzellen in der Fischhaut ». *Gesamte Physiologie des Menschen und Tiere* 138 (7): 319-87.

Votsi, N. E. P., A. S. Kallimanis, et I. D. Pantis. 2017. « An environmental index of noise and light pollution at EU by spatial correlation of quiet and unlit areas ». *Environmental Pollution* 221 (février): 459-69. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.015.

Wahnschaffe, Amely, Claudia Nowozin, Andreas Rath, Theresa Floessner, Stefan Appelhoff, Mirjam Münch, et Dieter Kunz. 2017. « Night-Time Activity Forecast by Season and Weather in a Longitudinal Design - Natural Light Effects on Three Years' Rest-Activity Cycles in Nursing Home Residents with Dementia ». *International Psychogeriatrics* 29 (12): 2071-80. https://doi.org/10.1017/S1041610217001235.

Wakefield, A., E. L. Stone, G. Jones, et S. Harris. 2015. « Light-emitting diode street lights reduce last-ditch evasive manoeuvres by moths to bat echolocation calls ». *Royal Society Open Science* 2 (8). https://doi.org/10.1098/rsos.150291.

Wald, G., et S. Rayport. 1977. « Vision in annelid worms ». *Science* 196 (4297): 1434-39. https://doi.org/10.1126/science.196.4297.1434.

Walmsley, Lauren, Lydia Hanna, Josh Mouland, Franck Martial, Alexander West, Andrew R. Smedley, David A. Bechtold, Ann R. Webb, Robert J. Lucas, et Timothy M. Brown. 2015. « Colour as a Signal for Entraining the Mammalian Circadian Clock ». *PLoS Biology* 13 (4): e1002127. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002127.

Walsh, C. M., R. L. Prendergast, J. T. Sheridan, et B. A. Murphy. 2013. « Blue light from light-emitting diodes directed at a single eye elicits a dose-dependent suppression of melatonin in horses ». *Veterinary Journal* 196 (2): 231-35. https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2012.09.003.

Wang, S., X. L. Tan, X. J. Guo, et F. Zhang. 2013. « Effect of Temperature and Photoperiod on the Development, Reproduction, and Predation of the Predatory Ladybird Cheilomenes sexmaculata (Coleoptera: Coccinellidae) ». *Journal of Economic Entomology* 106 (6): 2621-29. https://doi.org/10.1603/ec13095.

Warrant, E. 2010. « Vision: invertebrates ». In *Encyclopedia of Animal Behaviour*, édité par M. D. Breed et J. Moore, 511-24. London: Burlington, M.A., Elsevier.

Warrant, E. J., A. Kelber, R. Wallen, et W. T. Wcislo. 2006. « Ocellar optics in nocturnal and diurnal bees and wasps ». *Arthropod Structure & Development* 35 (4): 293-305. https://doi.org/10.1016/j.asd.2006.08.012.

Watson A., Ahumada A. 2016. « The pyramid of Visibility ». *Proc. IS&T International Symposium on Electronic Imaging 2016 Human Vision and Electronic Imaging*, 2016, 2016 édition.

Watson and Yellot. 2012. « A unified formula for light-adapted pupil size. » *Journal of Vision*, 2012.

Weiss, Robert A, David H McDaniel, Roy G Geronemus, A WEISS MARGARET, L BEASLEY KAREN, Girish M Munavalli, et Supriya G Bellew. 2005. « Clinical Experience with Light-Emitting Diode (LED) Photomodulation ». *Dermatologic surgery* 31 (s3): 1199-1205.

Wenzel, Andreas, Christian Grimm, Marijana Samardzija, et Charlotte Remé. 2005. *uced photoreceptor apoptosis and neuroprotection for retinal degeneration. Prog Retin Eye Res 24: 275-306*. Vol. 24. https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2004.08.002.

West, Alexander C., et David A. Bechtold. 2015. « The Cost of Circadian Desynchrony: Evidence, Insights and Open Questions ». *BioEssays: News and Reviews in Molecular, Cellular and Developmental Biology* 37 (7): 777-88. https://doi.org/10.1002/bies.201400173.

West, Dennis P, Sophie Worobec, et Lawrence M Solomon. 1981. « Pharmacology and toxicology of infant skin ». *Journal of Investigative Dermatology* 76 (3): 147-50.

West, Kathleen E., Michael R. Jablonski, Benjamin Warfield, Kate S. Cecil, Mary James, Melissa A. Ayers, James Maida, et al. 2011. « Blue light from light-emitting diodes elicits a dose-dependent suppression of melatonin in humans ». *Journal of Applied Physiology* 110 (3): 619-26. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01413.2009.

Whitmore, D., N. S. Foulkes, U. Strahle, et P. Sassone-Corsi. 1998. « Zebrafish Clock rhythmic expression reveals independent peripheral circadian oscillators ». *Nat Neurosci* 1 (8): 701-7.

Wijgerde, T., P. Henkemans, et R. Osinga. 2012. « Effects of irradiance and light spectrum on growth of the scleractinian coral Galaxea fascicularis - Applicability of LEP and LED lighting to coral aquaculture ». *Aquaculture* 344 (mai): 188-93. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.03.025.

Wilkins A. J. 1989. « Fluorescent lighting, headaches and eyestrain - A.J. Wilkins, I. Nimmo-Smith, A.I. Slater, L. Bedocs, 1989 ». *Light. Res. Technol., vol. 21, no. 1, p. 11*, 1989. https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/096032718902100102.

Wilkins, Arnold. 1986. « Intermittent Illumination from Visual Display Units and Fluorescent Lighting Affects Movements of the Eyes Across Text ». *Human Factors* 28 (1): 75-81. https://doi.org/10.1177/001872088602800108.

Williams, Jonathan, Deepa Ramaswamy, et Abderrahim Oulhaj. 2006. « 10 Hz Flicker Improves Recognition Memory in Older People ». *BMC Neuroscience* 7 (mars): 21. https://doi.org/10.1186/1471-2202-7-21.

Williams, Katie M., Graham C. G. Bentham, Ian S. Young, Ann McGinty, Gareth J. McKay, Ruth Hogg, Christopher J. Hammond, et al. 2017. « Association Between Myopia, Ultraviolet B Radiation Exposure, Serum Vitamin D Concentrations, and Genetic Polymorphisms in Vitamin D Metabolic Pathways in a Multicountry European Study ». *JAMA Ophthalmology* 135 (1): 47-53. https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2016.4752.

Williams, R. A., A. G. Howard, et T. P. Williams. 1985. « Retinal Damage in Pigmented and Albino Rats Exposed to Low Levels of Cyclic Light Following a Single Mydriatic Treatment ». *Current Eye Research* 4 (2): 97-102.

Wojciechowska, R., A. Kolton, O. Dlugosz-Grochowska, et E. Knop. 2016. « Nitrate content in Valerianella locusta L. plants is affected by supplemental LED lighting ». *Scientia Horticulturae* 211 (novembre): 179-86. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.08.021.

Wolf-Schnurrbusch, Ute EK, Christian K Brinkmann, Lisa Berger, et Sebastian Wolf. 2011. « Effects of combination therapy with verteporfin photodynamic therapy and ranibizumab in patients with age-related macular degeneration ». *Acta ophthalmologica* 89 (6): 585-90.

Wolkoff. 2006. « The modern office environment desiccates the eyes? » *Indoor Air - Wiley Online Library*, 2006. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1600-0668.2006.00429.x.

Wood, Brittany, Mark S. Rea, Barbara Plitnick, et Mariana G. Figueiro. 2013. « Light Level and Duration of Exposure Determine the Impact of Self-Luminous Tablets on Melatonin Suppression ». *Applied Ergonomics* 44 (2): 237-40. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2012.07.008.

Wood, Shona, et Andrew Loudon. 2014. « Clocks for all seasons: unwinding the roles and mechanisms of circadian and interval timers in the hypothalamus and pituitary ». *Journal of Endocrinology* 222 (2): R39-59.

Wright, H. R., L. C. Lack, et K. J. Partridge. 2001. « Light emitting diodes can be used to phase delay the melatonin rhythm ». *Journal of Pineal Research* 31 (4): 350-55. https://doi.org/10.1034/j.1600-079X.2001.310410.x.

Wu, How-Chiun, et Chun-Chih Lin. 2012. « Red light-emitting diode light irradiation improves root and leaf formation in difficult-to-propagate Protea cynaroides l. Plant lets in vitro ». *Hortscience* 47 (10): 1490-94.

Wu, Jiun-Yan, Hua-Bing Chen, Mei-Jheng Chen, Shu-Chen Kan, Chwen-Jen Shieh, et Yung-Chuan Liu. 2013. « Quantitative analysis of LED effects on edible mushroom Pleurotus eryngii in solid and submerged cultures ». *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 88 (10): 1841-46.

Wu, Pei-Chang, Chia-Ling Tsai, Hsiang-Lin Wu, Yi-Hsin Yang, et Hsi-Kung Kuo. 2013. « Outdoor Activity during Class Recess Reduces Myopia Onset and Progression in School Children ». *Ophthalmology* 120 (5): 1080-85. https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2012.11.009.

Wyse, Cathy A., Stephany M. Biello, et Jason M. R. Gill. 2014. « The Bright-Nights and Dim-Days of the Urban Photoperiod: Implications for Circadian Rhythmicity, Metabolism and Obesity ». *Annals of Medicine* 46 (5): 253-63. https://doi.org/10.3109/07853890.2014.913422.

Xiaolong, Gao, Zhang Mo, Tian Huiqin, Zheng Jimeng, Li Xian, Song Changbin, et Liu Ying. 2016. « Effect of LED light quality on respiratory metabolism and activities of related enzymes of Haliotis discus hannai ». *Aquaculture* 452: 52-61.

Xie, Chen, Xiuyi Li, Jianping Tong, Yangshun Gu, et Ye Shen. 2014. « Effects of White Light-Emitting Diode (LED) Light Exposure with Different Correlated Color Temperatures (CCTs) on Human Lens Epithelial Cells in Culture ». *Photochemistry and Photobiology* 90 (4): 853-59. https://doi.org/10.1111/php.12250.

Xu, Yingchao, Yongxiao Chang, Guanyu Chen, et Hongyi Lin. 2016. « The research on LED supplementary lighting system for plants ». *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* 127 (18): 7193-7201.

Yabumoto N, Hatta A, Jinno M & Hattori H. 2010. « Life cycle assessment of LED lamps and CFLs as the ideal light source for "sustainable development". » *Proceedings of the 12th International Symposium on the Science and Technology of Light Sources and the 3rd White LED Conference*, 2010.

Yam, Jason C. S., et Alvin K. H. Kwok. 2014. « Ultraviolet Light and Ocular Diseases ». *International Ophthalmology* 34 (2): 383-400. https://doi.org/10.1007/s10792-013-9791-x.

Yang, Y. F., Y. H. Yu, J. M. Pan, Y. B. Ying, et H. Zhou. 2016. « A new method to manipulate broiler chicken growth and metabolism: Response to mixed LED light system ». *Scientific Reports* 6 (mai). https://doi.org/10.1038/srep25972.

Yeh, N., P. Yeh, N. Sh'ih, O. Byadgi, et T. C. Cheng. 2014. « Applications of light-emitting diodes in researches conducted in aquatic environment ». *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 32 (avril): 611-18. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.047.

Yoshimura, Michitaka, Momoko Kitazawa, Yasuhiro Maeda, Masaru Mimura, Kazuo Tsubota, et Taishiro Kishimoto. 2017. « Smartphone Viewing Distance and Sleep: An Experimental Study Utilizing Motion Capture Technology ». *Nature and Science of Sleep* 9: 59-65. https://doi.org/10.2147/NSS.S123319.

Yu et al. s. d. « Intraretinal Oxygen Distribution in the Monkey Retina and the Response to Systemic Hyperoxia ». *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. 46, 4728–4733. Doi:10.1167/lovs.05-0694*. Consulté le 12 novembre 2018. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1167/iovs.05-0694.

Yu, Zhaohua, Karl Schulmeister, Nooshin Talebizadeh, Martin Kronschläger, et Per Söderberg. 2015a. « Temperature-Controlled in Vivo Ocular Exposure to 1090-Nm Radiation Suggests That near-Infrared Radiation Cataract Is Thermally Induced ». *Journal of Biomedical Optics* 20 (1): 015003. https://doi.org/10.1117/1.JBO.20.1.015003.

Yu, Zhaohua, Karl Schulmeister, Nooshin Talebizadeh, Martin Kronschläger, et Per G. Söderberg. 2014. « Ocular Temperature Elevation Induced by Threshold in Vivo Exposure to 1090-Nm Infrared Radiation and Associated Heat Diffusion ». *Journal of Biomedical Optics* 19 (10): 105008. https://doi.org/10.1117/1.JBO.19.10.105008.

———. 2015b. « 1090 Nm Infrared Radiation at Close to Threshold Dose Induces Cataract with a Time Delay ». *Acta Ophthalmologica* 93 (2): e118-122. https://doi.org/10.1111/aos.12508.

Yuan, Du, Richard D. Collage, Hai Huang, Xianghong Zhang, Benjamin C. Kautza, Anthony J. Lewis, Brian S. Zuckerbraun, Allan Tsung, Derek C. Angus, et Matthew R. Rosengart. 2016. « Blue Light Reduces Organ Injury from Ischemia and Reperfusion ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 113 (19): 5239-44. https://doi.org/10.1073/pnas.1515296113.

Yuan, S. S., H. Z. Xu, L. Q. Liu, et J. L. Zheng. 2017. « Different effects of blue and red light-emitting diodes on antioxidant responses in the liver and ovary of zebrafish Danio rerio ». *Fish Physiology and Biochemistry* 43 (2): 411-19. https://doi.org/10.1007/s10695-016-0296-1.

Zachmann, Andreas, M Ather Ali, et Jacky Falcón. 1992. « Melatonin and its effects in fishes: an overview ». *Rhythms in fishes* 236: 149-65.

Zaidi, Farhan H., Joseph T. Hull, Stuart N. Peirson, Katharina Wulff, Daniel Aeschbach, Joshua J. Gooley, George C. Brainard, et al. 2007. « Short-Wavelength Light Sensitivity of Circadian, Pupillary, and

Visual Awareness in Humans Lacking an Outer Retina ». *Current Biology: CB* 17 (24): 2122-28. https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.11.034.

Zammit, Mark L. 2010. « Photosensitivity: Light, sun and pharmacy ». *Journal of The Malta College of Pharmacy Practice*, nº 16: 12-17.

Zeitzer, Jamie M., Norman F. Ruby, Ryan A. Fisicaro, et H. Craig Heller. 2011. « Response of the Human Circadian System to Millisecond Flashes of Light ». *PloS One* 6 (7): e22078. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022078.

Zhao, X. B., M. Y. Chen, Z. L. Wu, et Z. J. Wang. 2014. « Factors influencing phototaxis in nocturnal migrating birds ». *Zoological Science* 31 (12): 781-88. https://doi.org/10.2108/zs130237.

Zheng, J. L., S. S. Yuan, W. Y. Li, et C. W. Wu. 2016. « Positive and negative innate immune responses in zebrafish under light emitting diodes conditions ». *Fish & Shellfish Immunology* 56 (septembre): 382-87. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2016.07.026.

Zisapel, Nava. 2018. « New Perspectives on the Role of Melatonin in Human Sleep, Circadian Rhythms and Their Regulation ». *British Journal of Pharmacology*, janvier. https://doi.org/10.1111/bph.14116.

Zubidat, Abed E., et Abraham Haim. 2017. « Artificial Light-at-Night - a Novel Lifestyle Risk Factor for Metabolic Disorder and Cancer Morbidity ». *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology* 28 (4): 295-313. https://doi.org/10.1515/jbcpp-2016-0116.

Zurek, Daniel B., Thomas W. Cronin, Lisa A. Taylor, Kevin Byrne, Mara L. G. Sullivan, et Nathan I. Morehouse. 2015. « Spectral filtering enables trichromatic vision in colorful jumping spiders ». *Current Biology* 25 (10): R403-4. https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.03.033.

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de saisine

2014 -SA- 0 2 5 3

COURRIER ARRIVE

1 9 DEC. 2014

DIRECTION GENERALE

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTERE DES AFFAIRES SOCIALES, DE LA SANTE ET DES DROITS DES FEMMES

Direction générale de la santé

MINISTERE DU TRAVAIL, DE l'EMPLOI, DE LA FORMATION PROFESSIONNELLE ET DU DIALOGUE SOCIAL

Direction générale du travail

MINISTERE DE L'ECONOMIE, DE L'INDUSTRIE ET DU NUMERIQUE

Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes

MINISTERE DE L'ECOLOGIE, DU DEVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ENERGIE

Direction générale de la prévention des risques

Paris le 1 6 DEC. 2014

Le Directeur général de la santé
Le Directeur général du travail
La Directrice générale de la prévention des risques
La Directrice générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes

à

Monsieur le Directeur général de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
14 rue Pierre et Marie Curie
94701 Maisons-Alfort Cedex

Objet : mise à jour de l'expertise relative aux effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED).

Monsieur le Directeur général,

Suite à une auto-saisine, votre Agence a publié en octobre 2010 une expertise collective sur les effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED).

Cette expertise avait mis en évidence des effets sanitaires potentiels liés à l'usage des LED résultant de la forte proportion de lumière bleue dans le spectre d'émission de ces lampes et à l'éblouissement qu'elles produisent.

Depuis cette date, compte tenu des mutations rapides de cette technologie et d'un marché en pleine expansion sous l'impulsion de dispositions européennes, la mise à jour de cette expertise apparaît nécessaire.

Conformément au programme de travail 2015 de l'Agence, nous vous demandons de procéder à cette mise à jour dans le courant du premier semestre 2016.

Vous porterez une attention toute particulière à ce que l'évaluation des risques distingue les différents types d'application de ces systèmes d'éclairage (éclairage domestique, usages professionnels, phares de véhicules) ou objets en disposant (jouets, écrans...) et prenne en compte les situations réelles d'exposition aussi bien de la population générale que des travailleurs.

Nous vous demandons également de :

- mettre en perspective les risques liés à la lumière bleue et les risques d'éblouissements avec les autres technologies d'éclairage ;
- proposer des axes d'amélioration du cadre normatif existant relatif à l'évaluation du risque phototoxique, et plus particulièrement son protocole de mesure ;
- faire des propositions en vue d'améliorer l'information notamment des consommateurs sur les risques éventuellement encourus et la manière de s'en protéger.

Enfin, vous examinerez du point de vue de la protection de l'environnement les éventuels risques que pourraient poser ces systèmes tout au long de leur cycle de vie (prélèvement de ressources rares, substances dangereuses, déchets…).

Vous voudrez bien nous faire parvenir dans les 2 mois une note d'étape de l'organisation de ces travaux.

Le Directeur général de la santé

Benoît VALLET

Le Directeur général du travail

Yves STRUILLOU

La Directrice générale de la prévention des risques

Patricia BLANC

La Directrice générale la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes

Nathalie HOMOBONO

Copie : DGEC, M. Laurent MICHEL

Annexe 2 : Synthèse sur la réglementation et la normalisation applicables aux LED

Voir l'annexe numérique disponible sur le site de l'Anses (www.anses.fr).

Annexe 3 : Éblouissement et inconfort visuel : notions supplémentaires en photométrie

Voir l'annexe numérique disponible sur le site de l'Anses (www.anses.fr).

Annexe 4 : Les données d'expositionss issues du logiciel Lumexpo

Voir l'annexe numérique disponible sur le site de l'Anses (www.anses.fr).

Annexe 5 : Analyse du cycle de vie

Voir l'annexe numérique disponible sur le site de l'Anses (www.anses.fr).

Notes

Agence nationale de sécurité sanitaire
de l'alimentation, de l'environnement et du travail
14 rue Pierre et Marie Curie
F94701 Maisons-Alfort cedex
www.anses.fr
@Anses_fr

ISBN 979-10-286-0289-5 - Dépôt légal : mars 2019 - © Anses Éditions : mars 2019 - Date de publication : mars 2019 - Couverture : Parimage (création), Anses (réalisation) - Crédit photo : iStock