

GT DCE mangrove

Rapport bibliographique pour la mise en place d'un indicateur mangrove dans le cadre de la DCE Eaux Littorales dans les DOM

Rédigé par Guillaume Dirberg
juillet 2015 - Version finale

Convention ONEMA/MNHN 2015
Document élaboré dans le cadre de la Solidarité avec l'Outre-mer

Citation :

Dirberg, G., 2015. Rapport bibliographique pour la mise en place d'un indicateur mangrove dans le cadre de la DCE Eaux Littorales dans les DOM. Convention ONEMA/MNHN 2015. 35 pages.

Résumé :

Cette revue bibliographique tente de faire un état de l'art des différents descripteurs d'état utilisés dans la littérature scientifique pour rendre compte des impacts associés à différentes pressions anthropiques sur les mangroves. Ces descripteurs sont regroupés par « compartiments » : sédiments, palétuviers, biote associé, et par niveau de complexité biologique. Les réponses des descripteurs aux pressions identifiées sont fournies quand elles sont établies dans la littérature consultée.

Cette revue bibliographique a été réalisée en soutien aux réflexions du groupe de travail DCE « mangroves », préalablement aux séminaires d'expertise devant conduire à la proposition d'une stratégie de développement d'indicateurs biologiques de l'état écologique des masses d'eau côtières, basés sur les mangroves, pour compléter la mise en œuvre de la DCE dans les DOM.

Mots clés :

bioindication, mangrove, DCE, DOM

Droits d'usage : accès libre

Niveau géographique : national

Couverture géographique : DOM insulaires

Citations locales : eaux littorales

Niveau de lecture : professionnels, experts

Table de matières

1. Le contexte	3
La DCE et le GT mangrove	3
Les mangroves.....	3
2. Synthèse bibliographique.....	5
3. Les pressions.....	6
Les pressions qui s'exercent sur les mangroves.....	6
Les types de pression	6
Les pressions qui dépassent le cadre de la DCE	8
4. Les bio-indicateurs	8
Les sédiments.....	10
Les palétuviers.....	12
Le biote associé	14
5. Les réponses aux pressions.....	18
Modifications de la structure	18
Les palétuviers.....	18
Les sédiments	18
Effets des eaux usées	19
Sur les micro-organismes / la biogéochimie	19
Sur les palétuviers	20
Sur le biote associé.....	21
Effet des éléments traces métalliques et contaminants organiques.....	23
6. Eléments sur la biodiversité spécifique et fonctionnelle, la complexité et les services écosystémiques.	26
7. Faisabilité de la construction d'un bio-indicateur « mangrove ».....	28
8. Un exemple de suivi : MangroveWatch.....	28
Bibliographie	30

1. Le contexte

La DCE et le GT mangrove

La Directive européenne Cadre sur l'Eau a donné en octobre 2000 aux Etats Membre l'objectif de maintenir ou restaurer d'ici 2015 le bon état écologique de toutes les masses d'eau européennes. L'état écologique des masses d'eau doit ainsi être qualifié et suivi. L'obligation de résultat contraint à la mise en œuvre de mesures devant permettre la restauration si l'objectif n'est pas atteint.

L'état écologique est défini comme « l'expression de la qualité de la structure et du fonctionnement des écosystèmes aquatiques associés aux eaux de surface » (Circulaire DCE 2005/12 n°14 du 28 juillet 2005). Son évaluation est basée sur des éléments de qualité biologiques, physicochimiques et hydromorphologiques (éléments support à la biologie). La notion de « bon état écologique » est définie comme étant un état proche d'un état de référence dit peu ou pas perturbé par les activités anthropiques.

La DCE incite à la mise en place de méthode de bio-indication rendant compte de l'impact des diverses pressions anthropiques sur le milieu. Pour les eaux littorales des départements Outre-Mer, plusieurs indicateurs sont en cours de développement, centrés sur différents « éléments de qualité » des eaux littorales : macrofaune benthique des substrats meubles, récifs coralliens, herbiers de phanérogames marines.

Du fait de la spécificité des mangroves et de leur patrimonialité, l'ONEMA a souhaité mettre en place un groupe de travail spécifique (GT DCE mangrove), lui confiant dans un premier temps la tâche d'évaluer la pertinence de la prise en compte des mangroves dans le cadre de la DCE et l'évaluation de la faisabilité du développement d'« indicateurs mangrove ».

L'ONEMA a confié au MNHN la coordination du travail de ce GT et la réalisation d'une synthèse bibliographique sur les mangroves et l'impact des pressions anthropiques sur celles-ci. Cette synthèse a pour but d'alimenter les discussions du séminaire d'expertise qui réunira les experts scientifiques membres du GT les 28, 29 et 30 septembre 2015.

Les mangroves

On ne rappellera ici que quelques caractéristiques des mangroves. Pour plus d'information sur les mangroves, on se référera à la littérature généraliste abondante sur le sujet. On notera l'existence du rapport « Les mangroves de l'Outre-mer français » produit par le Conservatoire du Littoral dans le cadre d'Ifreco qui propose une vision globale des mangroves des Outre-Mer français, ou des documents de synthèse produits localement par exemple « l'Atlas des mangroves de Mayotte » (DAF 2006, DEAL 2012) ou le rapport « Protection et Valorisation des Ecosystèmes Humides Littoraux de l'Espace Caraïbes - Orientations régionales de gestion des forêts humides littorales de Guadeloupe » (ONF 2012).

Contrairement au niveau mondial où un tiers des mangroves a disparu au cours des vingt dernières années (Spalding 2010) et continue à décliner rapidement du fait des activités anthropiques, les mangroves des Outre-mer français occupent une superficie relativement stable sur cette même période. Dans cette perspective, elles ont une valeur patrimoniale d'autant plus importante justifiant la conservation de cet habitat.

Les mangroves se développent sur le littoral de la zone intertropicale, dans la zone de balancement des marées, à l'interface entre le milieu terrestre et le milieu aquatique estuarien ou marin. Par leur situation particulière, elles voient transiter ou sont le réceptacle d'une grande partie des pollutions d'origine terrestre et côtière. Elles sont caractérisées par la présence d'espèces ingénieuses, structurant l'écosystème mangrove, les palétuviers.

Dans les systèmes tels que les mangroves où les contraintes naturelles (variation de salinité, de températures, exondations ...) sont fortes, les communautés écologiques aquatiques présentes sont caractérisées par un faible nombre d'espèces et une abondance élevées des espèces adaptées à ces contraintes. Les mangroves ont un rôle fonctionnel important et sont en particuliers des systèmes extrêmement productifs.

Le rôle des mangroves, tant du point de vue écologique, que du point de vue des services écosystémiques rendus, est très important (à fortiori au regard de la faible superficie qu'elles occupent au niveau mondial).

Les mangroves remplissent des fonctions écologiques essentielles comme habitat d'une faune et d'une flore spécialisée, et comme zone de reproduction, d'alimentation, de refuge pour de nombreuses espèces de poissons, de crustacés, d'oiseaux notamment.

De nombreux services écosystémiques sont associés au fonctionnement de la mangrove :

- Aménités récréatives, esthétiques et spirituelles ;
- Epuration : piégeage de la matière organique particulaire, minéralisation de la matière organique, prélèvement-piégeage-recyclage des nutriments ;
- Piégeage du carbone et séquestration sur le long terme ;
- Piégeage sédimentaire participant à la réduction de la turbidité des eaux côtières ;
- Protection et stabilisation du trait de côte par les palétuviers dont la structure racinaire limite l'érosion et fournit une protection lors d'événements climatiques extrêmes ;
- Production de biomasse : production primaire : bois d'œuvre et bois énergie ; production secondaire via le broutage et la décomposition des végétaux de la mangrove ; production des micro-organismes et de la faune associés dont une importante ressource halieutique (poissons, crustacés, mollusques).

Un dernier service associé au piégeage des sédiments et de la matière organique, est le piégeage des polluants chimiques et organiques (herbicides, PCB, métaux traces ...). Néanmoins ce qui constitue un service au regard de la qualité des eaux littorales constitue une pression au regard du fonctionnement de l'écosystème mangrove. De plus la mangrove pouvant être un puits pour ces substances, peut devenir une source dans différentes situations : remobilisation des sédiments lors d'un cyclone ou de la destruction de la mangrove, modification de l'état du sédiment (biogéochimie, potentiel redox) induisant une modification de la biodisponibilité des polluants par exemple.

Ces **services écosystémiques** doivent être considérés comme **potentiels** et ne sont pas équivalents d'une mangrove à l'autre. D'une part parce que ces mangroves peuvent être structurellement et fonctionnellement très différentes (climat, géologie, espèces ...). D'autre part parce que ces services dépendent de l'état de la structure et du fonctionnement (ensemble des flux de matière et d'énergie, des processus physiques, chimiques et biologiques) de l'écosystème mangrove, et cet état de la structure et du fonctionnement dépend à la fois des conditions naturelles (climatiques, hydrologiques, biologiques, historiques ...) et des pressions anthropiques qui s'exercent sur la mangrove.

2. Synthèse bibliographique

Malgré l'attention particulière portée aux mangroves depuis quelques années, en particulier avec la montée en puissance des politiques de conservation et de la notion de service écosystémique, la bibliographie reste peu développée en comparaison des deux autres écosystèmes souvent cités conjointement aux mangroves que sont les récifs coralliens et les herbiers de phanérogames marines.

Il existe néanmoins un bon nombre d'études ponctuelles (courtes périodes, périmètres restreints) cherchant à caractériser l'impact des pressions anthropiques sur les mangroves, et à identifier des indicateurs de ces pressions. Le plus souvent ces études comparent des sites soumis à des niveaux de pression anthropiques très élevés à des sites non soumis à ces pressions.

Cette revue bibliographique tente de faire un état de l'art des différents descripteurs d'état (**bioindicateurs, variables d'état**), utilisés dans ces études pour rendre compte des impacts associés à différentes **pressions**. Cette revue se base essentiellement sur des publications scientifiques parues dans des journaux internationaux à comité de lecture. Elle est complétée par la littérature grise produite dans les différents DOM quand celle-ci était disponible.

Parmi les articles analysés, une bonne partie s'intéresse aux rejets d'effluents domestiques ou urbains, ou rejets aquacoles dans les mangroves. Il est à noter qu'à de multiples reprises il transparaît dans cette littérature un biais important suivant que le sujet de l'étude soit d'évaluer la capacité de traitement des eaux usées par la mangrove, ou d'évaluer l'impact du rejet sur la biodiversité spécifique et fonctionnelle de la mangrove. Une question de paradigme se pose en filigrane de ces études, dans leurs motivations ou (de manière plus étonnante) dans leurs conclusions, opposant une vision utilitariste, anthropocentrée, de la nature (i.e. il faut maintenir les fonctions écosystémiques de la mangrove qui permettent que la mangrove rende des services écosystémiques à l'homme) et une vision plus proche de l'éthique environnementale contemporaine (cf. valeur intrinsèque de la nature, du vivant, conservation de la biodiversité au-delà de la considération de sa valeur d'usage seule). De ces articles n'ont été extraits que les bio-indicateurs et variables d'états utilisés pour décrire l'état de la mangrove, sans tenir compte des interprétations sur la qualité de cet état ou de l'indicateur utilisé.

Il existe aussi de la littérature sur le suivi de plan de restauration de mangrove et sur les systèmes artificiels de traitement des eaux usées inspirés des mangroves. Cette littérature a peu été explorée, ne répondant à priori pas au même type de préoccupations que la DCE.

3. Les pressions

Les pressions qui s'exercent sur les mangroves

Les pressions qui s'exercent sur les mangroves peuvent avoir différentes origines, directement liées aux activités anthropiques ou non. Le tableau 2 (page suivante) tente de rendre compte de l'ensemble des pressions qui s'exercent sur les mangroves (d'après Shaffelke (2005), modifié).

Le chiffre dans la première colonne renvoie aux « types de pression » définis dans le tableau 1.

Les types de pression

Shaffelke (2005) propose, pour faciliter l'appréhension des nombreuses pressions qui s'exercent potentiellement sur les mangroves, de les regrouper en sept grands types de pression (Tableau 1). Ces types de pressions seront utilisés dans la suite de ce rapport plutôt qu'une longue liste des pressions associées aux nombreuses activités humaines potentiellement impactantes sur les mangroves.

Tableau 1 : Types de changement affectant les mangroves et le moteur de ces changements

	Type de pression
1	Dégradations physiques
2	Disponibilité en nutriments - matière organique
3	Sédiments - matières en suspension - débris
4	Polluants chimiques, herbicides
5	Métaux traces
6	Déversements produits pétroliers
7	Assèchement, modifications hydrologies

Tableau 2 : Types de changement affectant les mangroves et le moteur de ces changements

	type de changement	moteur du changement
	A. Direct, intentionnel et directement lié à l'activité anthropique	
1	Défrichement et remplacement par des infrastructures (portuaires, industriels, urbaines, agricoles, aquacoles ...)	Industrie, port, développement urbain, constructions illégales, construction de bassins aquacoles
1	Dommages directs. Mortalité, dégradation de l'état, perte dues aux coupes, à l'exposition des racines, à la perturbation des sédiments, à l'enterrement des racines aériennes, empiètements sur la mangrove de l'agriculture et de l'élevage	Remblais, mise en culture, extension des pâturages, construction de voies d'accès, construction de digues et de systèmes de drains.
	B. Direct, non-intentionnel et directement lié à l'activité anthropique	
7	Diminution des échanges liés à la marée. Mortalité ou dégradation de l'état associée à des projets de construction résultant par exemple dans la retenue d'eau submergeant les pneumatophores.	Constructions, comme des routes ou des digues, altérant le régime hydraulique et l'effet de la marée.
6	Dégradation de l'état suite à des déversements de produits chimiques toxiques qui obstruent les surfaces respiratoires.	Déversement de produits chimiques toxiques, déversements produits pétroliers, huiles usagés
2	Excès de nutriments. Dégradation de l'état ou mortalité associée à la croissance algale induite sur les racines permettant la respiration des palétuviers.	Rejets d'eaux usées dans les mangroves
7	Modification de l'état, changement des espèces, par apport d'eau (salée ou douce) dans la mangrove modifiant la salinité et l'hygrométrie du sol.	Rejets d'eaux dans les mangroves
	C. Indirect, non-intentionnel, lié à l'activité anthropique de manière moins évidente	
3	Gain ou perte de charge sédimentaire, à l'embouchure des estuaires ou en aval des dispositifs de stabilisation de berges (type épis ...)	Défrichement, déforestation, activités minières, pratiques agricoles affectant le bassin versant, perturbation des sols, endiguement des rivières et dispositifs de protections des berges, activités portuaires
2	Excès de nutriments. Mortalité ou dégradation de l'état associée à la croissance algale induite sur les racines permettant la respiration des palétuviers.	Apports en nutriments (engrais, eaux usées, eaux grises) par les eaux du bassin versant
4	Dégradation de l'état, mortalité, liés à des produits chimiques (pesticides, et éléments traces métalliques. Effets espèces-spécifiques.	Apports en produits chimiques toxiques dans les eaux de ruissellement du bassin versant. Agriculture, industrie, transport.
	D. Eventuellement sans lien avec l'activité anthropique, ou lié au changement global	
3, 7	Accumulation de débris. Mortalité ou dégradation de l'état associée à l'accumulation de débris sur les pneumatophores, ou agissant localement comme des digues.	Accumulation de débris de tempête et de débris d'efflorescences algales, associés éventuellement à une mauvaise qualité de l'eau.
1	Attaque d'herbivore / d'insectes. Mortalité ou dégradation de l'état associée à d'importantes attaques d'herbivores/ d'insectes sur les feuilles, branches, troncs, racines.	Effets induits sur les herbivores / insectes, associés potentiellement à un habitat perturbé
1	Dégâts liés à une tempête. Mortalité ou dégradation de l'état associée à de violentes tempêtes ou incidents climatiques.	Grosses tempêtes, vents cycloniques, fortes houles ou vagues, forts débits dans les rivières/chenaux, foudre
7	Déplacement de l'écotone. Mortalité ou dégradation de l'état associée au changement climatique - déplacements au sein de la zone de balancement des marées	Changement du régime de pluie affecté par des facteurs locaux et/ou globaux.
7	Déplacement la zone. Mortalité ou dégradation de l'état associée au changement de niveau marin affectant la zonation des zones humides (mangroves/marais salés)	Changement du niveau marin affecté par des facteurs locaux et/ou globaux.

Les pressions qui dépassent le cadre de la DCE

Parmi ces pressions, trois catégories de pressions sont hors du champ d'action direct de la DCE : les pressions qui se traduisent par une destruction physique intentionnelle de la mangrove (aménagement, urbanisme, agriculture, industrie ...), celles qui résultent du changement climatique et celles liées à des événements non liées à l'activité anthropique : événements climatiques extrêmes, attaques d'insectes. Néanmoins l'évaluation de l'état écologique implique de pouvoir distinguer leur impact de celui induit par les autres pressions.

La destruction de la mangrove et son remplacement par différents usages constitue une perte de l'habitat mangrove, des fonctions et des services écosystémiques qu'il rendait. La DCE n'est pas l'outil permettant d'empêcher ces destructions mais permet, de manière indirecte, de sensibiliser à l'importance des mangroves et des aménités associées à leur maintien. On insistera en particulier, dans le cadre de la DCE, sur les services écosystémiques rendus par les mangroves qui, parmi ceux listés précédemment, participent à l'objectif même de la DCE d'atteinte ou de maintien du bon état écologique des masses d'eau : épuration et piégeage sédimentaire. On peut également noter que la destruction des mangroves peut conduire à une remobilisation des polluants piégés dans les sédiments de la mangrove (et éventuellement du carbone séquestré).

Le changement climatique se traduit pas une modification de l'hygrométrie, une modification du taux de CO₂, une modification de la température, une modification de la fréquence des événements extrêmes (tempêtes, cyclones), une modification du niveau de l'océan. Tous ces paramètres affectent les mangroves. La modification de la salinité et de l'hygrométrie du sol entraineront potentiellement un déplacement / une modification de la succession des strates de mangroves. Par ailleurs la capacité des mangroves à se maintenir dépend d'une part de la compatibilité du taux de sédimentation local avec le maintien d'un sol soumis à la montée des eaux (~3-4mm/an), et d'autre part de la disponibilité d'espace en arrière de la mangrove lui permettant de migrer à mesure que la zone intertidale remonte. Même si de nouvelles zones verront se développer des mangroves là où il n'y en avait pas, les estimations globales prévoient une perte nette de 10-15% de superficie des mangroves (Alongi 2007).

Considérant que les mangroves des littoraux macro-tidaux, le long de côtes tropicales humides ou soumises à d'importants apports fluviaux sont les moins menacées dans le régime actuel de changement climatique, il est possible d'établir les grandes régions où les mangroves seront plus vulnérables au changement climatique. Ainsi, les mangroves de Martinique, Guadeloupe et Mayotte sont plus vulnérables au changement climatique que les mangroves de Guyane.

Toutes les autres pressions anthropiques évoquées dans le tableau précédent sont à prendre en compte.

4. Les bio-indicateurs

Un **bio-indicateur** est une réponse physiologique ou biochimique engendrée par une perturbation d'origine anthropique, et qui se traduit par une réponse biologique à l'échelle d'un organisme, d'une population, d'une communauté ou d'un écosystème (Mc Carty and Munkittrick 1996). Autrement dit,

un bio-indicateur peut être mesuré à n'importe quel niveau d'organisation ou de **complexité biologique**, allant de la biochimie ou du métabolisme d'un organisme jusqu'aux propriétés d'un ensemble de communautés (Fig. 1). Les réponses engendrées par une perturbation seront dans un premier temps détectables au niveau physiologique/biochimique d'un individu, puis au niveau morphologique ou comportemental, et enfin aux niveaux des populations et des communautés (Fig.1).

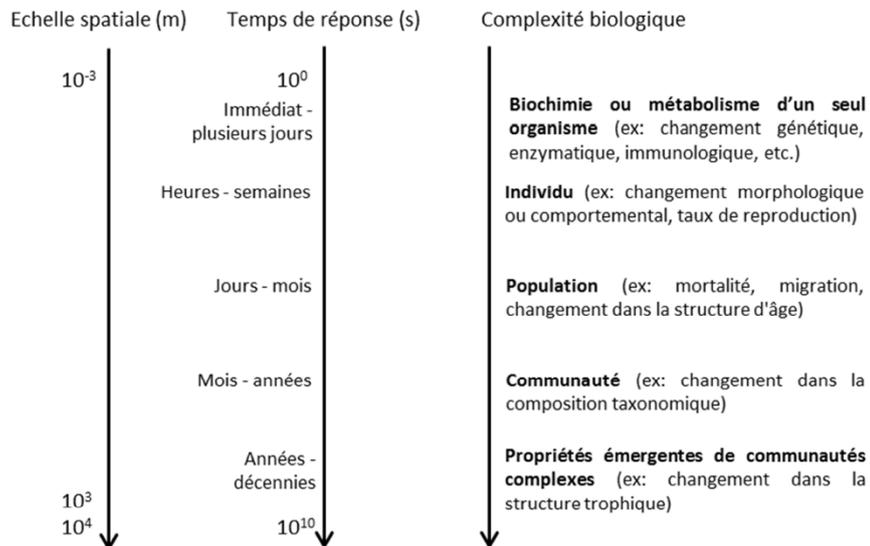


Figure 1 : Complexité biologique et temps moyen de réponse à une perturbation (d'après Martinez-Crego et al. 2010).

L'analyse de la bibliographie scientifique a permis d'identifier un grand nombre de bio-indicateurs et de variables permettant de décrire et qualifier l'état de la mangrove. Les tableaux ci-après rassemblent ces bio-indicateurs et variables, le type de pression auquel ils répondent (dans l'étude duquel il est tiré) et les références bibliographiques associées.

Pour faciliter la lecture, les indicateurs et variables sont regroupés par « compartiments » : sédiments, palétuviers, biote associé, et par niveau de complexité biologique.

Dans la partie suivante, sont tirés de chaque article analysé, quand elles sont fournies, les réponses des indicateurs et variables aux pressions identifiées.

Les sédiments

	Bio-indicateur / variable	Pression	Méthodologie / détails	Références
Biogéochimie	taux de matière organique du sédiment	eaux usées	carottage, perte au feu	Andreeta 2014, Bartolini 2011, Melville 2006
	distribution du carbone dans le sol	eaux usées	perte au feu	Andreeta 2014
	âge de la matière organique du sol	eaux usées	datation carbone	Andreeta 2014
	structure du sol	eaux usées	profil pédologique	Andreeta 2014
	état de décomposition de la litière	eaux usées	C/N ratio et acides gras	Aschenbroich 2015
	traceurs de l'enrichissement	eaux usées	$\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$, acides gras	Aschenbroich 2015
	cartographie de l'étendue spatiale de l'enrichissement	eaux usées	$\delta^{15}\text{N}$ une macro-algue sélectionnée (<i>Catenella nipae</i>)	Constanzo 2001
	flux d'oxygène et de nutriments	eaux usées	incubation en aquarium	Molnar 2013
	taux de réduction des nitrates	eaux usées	incubation en aquarium	Molnar 2013, Penha-Lopes 2010
	taux de réduction des sulfates	eaux usées	incubation en aquarium	Penha-Lopes 2010
	flux de CO ₂ et CH ₄ à l'interface sédiment / air-eau	eaux usées		Penha-Lopes 2010
	distribution verticale de la production microbienne anaérobie totale de CO ₂	eaux usées		Penha-Lopes 2010
	respiration par réduction Fe(III)	eaux usées		Penha-Lopes 2010
	concentration en nutriments dans les sédiments	eaux usées	TN, TP	Melville 2006
	concentration en nutriments dans l'eau interstitielle	eaux usées	TDN, DIN, NO _x , NH ₄ ⁺ , DON, PON, TN, TDP, PO ₄ ²⁻ , DOP, POP, TP	Bouchez 2013, Melville 2006, Molnar 2013
	pH de l'eau interstitielle	eaux usées		Bouchez 2013
	salinité de l'eau interstitielle	eaux usées		Bouchez 2013
	oxygène dissous	eaux usées		Melville 2006, Molnar 2013, Penha-Lopes 2010

	potentiel redox des sédiments	multiple		Marchand 2011
	respiration du sol	multiple		Criquet 2014
	activité enzymatique du sol	multiple		Cheviron 2014
	biodisponibilité des éléments traces métalliques	pollution métaux	spéciation chimique, conditions redox sédiments	Marchand 2011
	concentration des métaux traces dans l'eau interstitielle	pollution métaux	Cu, Zn, Pb, Cd, Cr; Ni	Melville 2006
	concentration des métaux traces dans les sédiments	pollution métaux	Li, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ag, Cd, Pb, Hg	Bodin 2013, Melville 2006
	concentration PAH dans les sédiments	pollution chimique		Ramdine 2012
Ecosystème / habitat	présence de macro-déchets	macro-déchets		Ivar do Sul 2014
	mesure taux d'érosion / sédimentation	érosion / sédimentation		Ellison 1998, Ellison 2012
	évolution de la granulométrie des sédiments	érosion / sédimentation		Cardno 2013

Les palétuviers

	Bio-indicateur / descripteur	Pression	Méthodologie / détails	Références
Physiologie / individu	taux de photosynthèse et transpiration	eaux usées	dispositif portatif de photosynthèse (mesure échanges gazeux)	Herteman 2011
	taux de croissance des palétuviers	eaux usées	feuilles, branches, propagules	Herteman 2011
	concentration en pigments des feuilles	multiple	HPLC	Herteman 2011, MacFarlane 2002
	rendement quantique maximum du photosystème II	multiple	fluorimètre portatif	Duke 2005
	état des palétuviers	multiple	espèces, hauteur, circonférence du tronc, état de la canopée	Duke 2005, Ellison 2012
	état des propagules	multiple	hauteur, nombre de nœud, circonférence, nombre de feuilles	Duke 2005
	concentration métaux traces dans feuilles, bourgeons des palétuviers	pollution métaux	Cd,Cr,Cu, Hg, Mn, Pb	Pinheiro 2012
	taux de mutation (déficience en chlorophylle) des <i>Rhizophora mangle</i>	pollution métaux	comptage des embryons à phénotypes déficient en chlorophylle ou albinos	Klekowski 1999
	concentration polluants organiques dans les feuilles et brindilles	pollution chimique		Duke 2005
Population / communauté	densité de pneumatophores	multiple	quadrat, densité et taille	Duke 2005
	densité de jeunes plants et jeunes arbres	multiple	8 quadrats de 1m ² au sein des quadrats fixes 400m ²	Cardno 2013
	survie et croissance des jeunes plants	multiple	quadrats fixes 1m ² + quadrats aléatoires	Cardno 2013
	production litière	multiple		Kristensen 2007, McDonald 2003
	taux de couverture de la canopée	multiple		McDonald 2003, Cardno 2013
	croissance des individus	multiple	diamètre, taille	
	évolution de la formation végétale	multiple		

Ecosystème / habitat	biomasse de la mangrove	multiple	imagerie satellitaire	Fromard 2004, Proisy 2007
	évolution de la superficie	multiple	imagerie satellitaire, photographie aérienne	Marchand & Dumas 2007, Proisy 2007
	évolution du trait d'arrière mangrove	multiple		
	évolution physionomie	multiple	suivi photographique	Cardno 2013
	évolution de la fragmentation	multiple		Mackenzie 2013
	Evolution de l'indice de végétation par différence normalisé (NDVI)	multiple	suivi satellite	Cardno 2013
	indicateur processus d'érosion / sédimentation	érosion / sédimentation	différence entre taille pneumatophore et enfoncement de la racine, signes visuels d'érosion / sédimentation	Duke 2005
	marques de défrichement	dégradation physique		

Le biote associé

	Bio-indicateur / descripteur	Pression	Méthodologie / détails	groupe d'espèces cibles	Références
Physiologie / individu	respiration de la macrofaune	eaux usées		crabes, gastéropodes	Penha-Lopes 2010
	matière organique emmagasinée par les crabes Sesarmides	eaux usées	poids sec/trou	crabes Sesarmides	Andreeta 2014
	modification du comportement des crabes violonistes <i>Uca</i>	eaux usées	observateur immobile	crabes	Bartolini 2009, Bartolini 2011
	bioturbation des crabes	eaux usées	poids sec des pelottes dans quadrat	crabes violonistes	Bartolini 2011
	dimensions des terriers des crabes	eaux usées	moulage résine polymère	crabes violonistes	Bartolini 2011, Penha-Lopes 2010
	bioturbation des gastéropodes	eaux usées		gastéropodes	Penha-Lopes 2010
	ratio ARN/ADN	multiple	indicateur de stress physiologique	crevettes, crabe	Penha-Lopes 2011, Amaral 2009
	concentration métaux traces dans mollusques bivalves	pollution métaux	Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, V, Ag, Mn, Li	mollusques bivalves	Bayen 2012, Bodin 2013
	concentration métaux traces dans mollusques gastéropodes	pollution métaux	As, Cd, Co, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, V, Ag, Mn, Cr, Li	mollusques gastéropodes	Bayen 2012, Bodin 2013
	concentration métaux traces dans crustacés	Pollution métaux	As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	crustacés	Bayen 2012, Pinheiro 2012
	concentration métaux traces dans annélides	pollution métaux	As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sn, Zn	annélides	Bayen 2012
	concentration métaux traces dans poissons	pollution métaux	Cd, Cu, Pb, Zn	poissons	Bayen 2012

	concentration métaux traces dans zooplancton	pollution métaux	Cd, Cu, Pb, Zn	zooplancton	Bayen 2012
	concentration métaux traces dans phytoplancton	pollution métaux	Cd, Cu, Pb, Zn	phytoplancton	Bayen 2012
	concentration métaux traces dans macro-algues	pollution métaux	Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	macro-algues	Bayen 2012
	concentration polluants organiques dans mollusques bivalves	pollution chimique	PAHs, PCBs, DDTs, PBDEs	mollusques bivalves	Bayen 2012, Ramdine 2012
	concentration polluants organiques dans mollusques gastéropodes	pollution chimique	PCBs, DDTs, PBDEs	mollusques gastéropodes	Bayen 2012
	concentration polluants organiques dans crustacés	pollution chimique	PAHs, PCBs, DDTs, PBDEs	crustacés	Bayen 2012
	concentration polluants organiques dans annélides	pollution chimique	PCBs, DDTs, PBDEs	annélides	Bayen 2012
	concentration polluants organiques dans poissons	pollution chimique	PCBs, DDTs, PBDEs	poissons	Bayen 2012
	concentration polluants organiques dans macro-algues	pollution chimique	PCBs, DDTs	macro-algues	Bayen 2012
	concentration polluants organiques dans éponges	pollution chimique	DDTs	éponges	Bayen 2012
	concentration polluants organiques dans tortues	pollution chimique	DDTs	tortues	Bayen 2012
	stress physiologique macrofaune	pollution chimique	peroxydation lipidique, activité enzymatique	huitres de palétuviers	Ramdine 2012
Population / communauté	densité de trous de crabes	eaux usées	quadrats	crabes	Skov 2002, Cannicci 2009, Andreetta 2014, Penha-Lopes 2010
	abondance/densité des crabes	eaux usées	quadrats	crabes	Skov 2002, Cannicci 2009, Andreetta 2014, Penha-Lopes 2010

	biomasse des crabes	eaux usées	dimensions carapaces, poids sec	crabes	Skov 2002, Cannicci 2009, Andreeta 2015, Bartolini 2011, Penha-Lopes 2010
	abondance/densité des mollusques	eaux usées	quadrats	mollusques	Cannicci 2009, Penha-Lopes 2010
	croissance/survie des gastéropodes	eaux usées		gastéropodes	Penha-Lopes 2010
	structure de population et fitness	eaux usées	taux de parasitisme, fécondité et développement embryonnaire, structure de population, état de maturation	crevettes, périophtalmes	Penha-Lopes 2011, Kruitwagen 2006
	biomasse micro-algale	eaux usées	acides gras, Chl a	microphytobenthos	Aschenbroich 2015, Bartolini 2009
	biomasse / production de la fonge dégradant la litière	eaux usées	acides gras	fonge	Aschenbroich 2015
	biomasse / production bactérienne dégradant la litière	eaux usées	acides gras	bactéries	Aschenbroich 2015
	caractérisation de la communauté de microphytobenthos / diatomées	eaux usées	acides gras, Cytométrie en flux, fluorescence, ARN	microphytobenthos	Aschenbroich 2015, Bouchez 2013
	caractérisation de la communauté bactérienne	eaux usées	cytométrie en flux, ARN	bactéries	Bouchez 2013
	assemblage des espèces de crabes et mollusques	eaux usées	statistiques	macrofaune benthique	Cannicci 2009
	richesse et abondance de la macrofaune	multiple		macrofaune benthique, épifaune, endofaune, fourmis, poissons	Cardno 2013
	biomasse macro-algale par unité de surface des pneumatophores	multiple		macro-algues	Melville 2006

	fréquence des espèces de macro-algues sur les pneumatophores	multiple		macroalgues	Melville 2006
	taux de difformités	multiple		périophtalmes	Kruitwagen 2006
	suivie des populations d'oiseaux nicheurs/migrateurs	multiple		oiseaux	Nagelkerken 2007
	suivi des insectes herbivores et leurs prédateurs	multiple		insectes	Nagelkerken 2007
	abondance relative des différents groupes fonctionnels (spécialistes/généralistes)	multiple	transects, abondances par espèce	éponges, bryozoaires	Diaz 2004, Creary 2002
	abondance/biomasse des juvéniles de poissons	multiple	transects, abondances par classe de taille et par espèce	poissons	Mumby 2004, Nagelkerken 2000
	structure de la communauté des parasites	multiple		parasites des poissons	Fajer-Avila 2006
	taux de parasitisme des mulets	multiple		poissons	Fajer-Avila 2006

5. Les réponses aux pressions

Modifications de la structure

Les palétuviers

Par définition la mangrove est caractérisée par la présence des espèces ingénieuses que sont les palétuviers colonisant un substrat meuble intertidal. Les pressions qui s'exercent sur la mangrove affecteront de manière différente ces éléments structuraux de la mangrove que d'autres éléments de l'écosystème mangrove. Les palétuviers ont notamment une grande capacité à résister à un certain nombre de pressions (enrichissement en nutriment et matière organique, éléments traces métalliques) ce qui a conduit à utiliser des mangroves artificielles ou naturelles comme dispositif de traitement des eaux usées.

Le tableau 3 (d'après Shaffelke 2005, modifié) indique les réponses des palétuviers aux différents types de pression.

Tableau 3 : Type de pressions s'appliquant aux mangroves et réponse attendue des palétuviers, d'après Shaffelke (2005)

	Type de pression	Réponse / impact
1	Dégradations physiques	Destruction – dégradation de la structure
2	Disponibilité en nutriments - matière organique	Corrélation entre le contenu dans les tissus et la disponibilité Croissance accrue de la biomasse aérienne vs croissance des racines Augmentation de la couverture épiphytique sur les racines Effet seuil ?
3	Sédiments - matières en suspension - débris	Enterrement, étouffement - progression / érosion, régression
4	Herbicides	Mortalité des espèces sensibles, stress
5	Métaux traces	Stress (dépend des espèces et de la biodisponibilité)
6	Déversements produits pétroliers	Mortalité - dégradation de l'état par étouffement des racines aériennes
7	Assèchement, modifications hydrologiques	Mortalité - dégradation / progression - changements d'espèces

Les sédiments

Ellison 1999 (article de synthèse)

Bien que les mangroves agissent comme des **pièges à sédiments**, certaines espèces de palétuviers ne supportent pas une trop forte sédimentation : si les racines aériennes sont ensevelies (même partiellement), le stress induit par le manque d'oxygène peut conduire à la **mort de l'arbre**. Cela a été observé suite à des événements naturels (fortes crues, inondations, tempêtes et cyclones), mais également comme conséquence à des activités humaines : rejets de boues de dragage de ports, aménagements littoraux (routes, ports, polder ...), érosion importantes des sols dans le bassin versant, activités minières ...

Des taux « naturels » de sédimentation de 1 à 10 mm/an sont observés dans différentes mangroves. Les cas de mortalité rapportés dans la littérature correspondent à des dépôts rapides supérieurs à 8 cm d'épaisseur, mais des signes de **stress** sont présents pour des dépôts de 5cm d'épaisseurs. Mais

ces seuils semblent être très variables suivant les espèces, la nature du sédiment et l'environnement local.

Ivar do Sul 2014 (Brésil)

La rétention des **macro-déchets** dans les mangroves dépend des caractéristiques des déchets (flottabilité, forme), de l'hydrodynamisme local et de la structure de la mangrove. Mais globalement, les **mangroves tendent à retenir les débris plastiques d'origine marine sur le long terme.**

Les dégradations physiques, les modifications hydrologiques, les déversements pétroliers et la modification d'apports sédimentaires sont directement visibles sur la structure de la mangrove : jaunissement du feuillage, diminution de la couverture de la canopée, mortalité des palétuviers, déplacement des strates, enfouissement des pneumatophores, modification de la nature du sédiment ...

L'apport de nutriments, de matière organique, les pollutions aux métaux traces et produits chimiques modifient de manière moins directe l'ensemble de l'écosystème mangrove.

Effets des eaux usées

Sous le terme « eaux usées » sont considérées les eaux usées domestiques, les eaux grises, les rejets aquacoles qui correspondent tous à des effluents apportant un enrichissement en nutriments et matière organique.

Sur les micro-organismes / la biogéochimie

Aschenbroich 2015 (Nouvelle Calédonie) (effluents aquacoles)

Dans une mangrove soumise aux déversements d'effluents de bassins de pénéculture, la détermination de **l'origine et la composition de la matière organique** dans le sédiment de surface, ainsi que leurs variations temporelles, est permise par l'utilisation des **acides gras comme marqueurs biologiques**. Les effluents sont une source d'apport en matière organique. La présence des bactéries dans les effluents et la **stimulation du développement de la fonge accélèrent la décomposition de la litière** directement soumise au ruissellement des effluents modifiant la saisonnalité du processus. L'enrichissement lié à l'effluent et l'apport de diatomées en provenance des bassins **modifient la composition de l'assemblage du microphytobenthos**. La mangrove n'est qu'un filtre partiel des effluents : une partie est exportée vers la masse d'eau adjacente.

Bouchez 2013 (Mayotte)

A Mayotte, la comparaison de deux sites de mangroves, l'un soumis à des effluents pré-traités, l'autre non, montre une **modification de l'abondance et de la composition de la communauté de procaryotes** (probablement en faveur des bactéries dénitrifiantes ou anammox), ainsi qu'une **modification de la communauté phototrophe au profit en particulier des diatomées** (qui pourraient ainsi servir d'indicateur).

Kristensen 2007

Il y a un consensus scientifique autour du fait que l'augmentation des nutriments et de la charge organique dans les mangroves conduit à une forte **augmentation des émissions de méthane** (gaz à effet de serre) du sédiment.

Marchand 2011 (effluents aquacoles)

L'augmentation des durées d'engorgement en eau dans la mangrove soumise aux effluents modifie les **conditions oxydo-réductives du sédiment qui deviennent anoxiques**, au lieu de suboxiques, sur l'ensemble du profil. Ces conditions favorisent le piégeage des métaux traces.

Molnar 2013 (Nouvelle Calédonie) (effluents aquacoles)

Les apports de matière organique par les effluents de l'aquaculture **stimulent tous les processus associés au cycle de l'azote** dans le sol de la mangrove mais les processus de production d'ammonium (DNRA) sont amplifiés de manière préférentielle aux processus de dénitrification. Ainsi la mangrove n'est qu'un filtre partiel des effluents d'aquaculture : si l'azote sous forme particulaire est en bonne partie transformé en azote sous forme dissoute, la plus grande partie de l'azote en provenance des effluents de la ferme aquacole est exportée vers les eaux adjacentes.

Molnar 2014 (Nouvelle Calédonie) (effluents aquacoles)

L'apport en nutriment **stimule la production primaire du microphytobenthos**. De plus malgré l'apport de matière organique exogène, il n'y a **pas de hausse de contenu en matière organique en profondeur dans le sédiment**. Mais, contrairement à la mangrove non soumise aux effluents, le **sédiment n'est pas stratifié, les potentiels redox sont élevés** et la **présence de Fe(III) est détectable jusqu'à 50cm de profondeur**. Ceci est peut-être lié au développement du système racinaire qui permet une meilleure oxygénation du sédiment et accentue ainsi la minéralisation de la matière organique.

Penha-Lopes 2010 (mésocosme)

Le déversement d'eaux usées **stimule l'activité des bactéries hétérotrophes** conduisant à une **augmentation de la minéralisation de la matière organique** et le **relargage de gaz à effet de serre**, dioxyde de carbone essentiellement, mais également méthane. Dans les mésocosmes soumis à un enrichissement en eaux usées, **aucun stockage** de carbone n'est observé : la matière organique est en grande partie, et rapidement, minéralisée, le reste étant exporté hors du système par la marée. L'enrichissement en ammonium **augmente la production primaire nouvelle et la production d'O₂, augmentant le processus de dénitrification**.

La structure biogénique (racines ...) et les activités de bioturbation **modifient la structure physique, chimique et biologique des sédiments et les dynamiques**, conduisant non seulement à une **augmentation de la minéralisation benthique** mais également à un **changement des voies principales de minéralisation microbienne**.

Sur les palétuviers

Herteman 2011 (Mayotte)

La **concentration de pigments photosynthétique** ainsi que la **respiration augmentent** chez *R. mucronata* and *C. tagal* soumise à des déversements d'eaux d'assainissement domestiques pré-traitées. Aucune modification de structure de la forêt n'a été observée en termes de densité et taux de mortalité 12 et 18 mois après le début du déversement, mais la **densité de la canopée et la régénération semblent avoir augmentées** dans la mangrove soumise aux déversements. **Longueur, largeur, surface et poids des feuilles, longueur des branches, longueur des propagules ont augmenté** sur le site impacté.

Lovelock 2009

Un **enrichissement en nutriment**, en particulier en azote, **favorise la croissance de biomasse aérienne** des arbres de la mangrove **au détriment des racines**. Ceci modifie leur capacité de résilience à la variabilité environnementale (en particulier en cas d'augmentation de la salinité du sol, ou de baisse de l'humidité ou de la pluviométrie) conduisant à une hausse de la mortalité face à des événements climatiques extrêmes.

Ainsi s'il y a effet positif sur la croissance des arbres de l'enrichissement en nutriment, il y a un effet négatif sur leur capacité de résilience.

MacFarlane and Burchett 2001; MacFarlane 2002

La concentration de certains **pigments photosynthétiques** dans les feuilles des palétuviers peut être considérée comme un indicateur de modification du fonctionnement de la mangrove (MacFarlane, 2002) : une **diminution peut être liée à une pollution** par les éléments traces métalliques **ou une hausse de la salinité**, une **augmentation peut être liée à un enrichissement en nutriments**. La **concentration des pigments photosynthétiques (Chl a et b, caroténoïdes) diminue** dans les populations de *A. marina* **soumise à une pollution aux éléments traces métalliques** (MacFarlane and Burchett, 2001).

McDonald 2003 (Jamaïque)

Dans des mangroves soumises à un grand nombre de pressions anthropiques, il est difficile d'interpréter l'importance relative de chaque pression. Néanmoins, deux paramètres semblent répondre : la mesure de la **productivité des palétuviers** (litière provenant des feuilles en g/m²/jour) et le **pourcentage de couverture de la canopée** (lumière disponible sous la canopée) **ont permis de distinguer les mangroves impactées par l'eutrophisation** plus que les autres paramètres structurels (hauteur de l'arbre, circonférence du tronc).

Shaffelke 2005 (Australie)

Dans une mangrove du sud de l'Australie on observe une **mortalité anormale** des *Avicennia marina* qui a débuté **six ans après la mise en place d'un émissaire d'eaux usées** et continue à ce jour, causant la perte de 250ha de mangrove. L'enrichissement en nutriment est la cause indirecte de cette mortalité, **favorisant la croissance d'algues vertes du genre Ulva qui étouffent les racines aériennes** des *Avicennia* et qui **retardent la croissance des jeunes pousses**.

Sur le biote associé

Amaral 2009 (Mozambique)

La concentration en **ARN** est associée à la synthèse de nouvelles protéines ce qui est généralement considéré comme bénéfique pour l'organisme, reflétant le taux d'activité métabolique associé à la croissance et la reproduction. Le contenu en **ADN** restant constant dans un individu, le **ratio est supposé augmenter quand les conditions environnementales sont favorables** (Dahlhoff, 2004). Ce paramètre est particulièrement sensible chez le **crabe** *Uca annulipes* et pourrait être un bon indicateur de la qualité environnementale de la mangrove.

Bartolini 2011 (Kenya) (idem Bartolini 2009 Tanzanie)

L'enrichissement en nutriments a pour conséquence directe une augmentation de l'abondance et de la biomasse de la population de **crabes** violonistes (*Uca spp.*) liée à une augmentation de la biomasse des micro-algues et des bactéries dont ils se nourrissent. Par contre, on observe une diminution de la production de pelotes d'alimentation ainsi qu'une diminution importante de l'activité de bioturbation des crabes, rassasiés plus rapidement, ce qui a une conséquence sur le fonctionnement

global de l'écosystème mangrove. Sur le long terme, la diminution du rôle ingénieur des crabes pourrait se traduire par une diminution de l'oxydation des premiers millimètres des sédiments de la mangrove, favorisant la croissance d'une matrice algale pouvant produire des conditions anoxiques dans l'environnement.

Cannicci 2009 (Kenya et Mozambique)

Les deux sites de mangrove soumis aux effluents urbains (et aquacoles pour celle du Mozambique) le sont depuis plus de 10 ans. Sur les sites péri-urbains, soumis aux effluents, on observe une **forte augmentation de la biomasse et de l'abondance des populations de crabes** et, a contrario, une **diminution importante voire une disparition (*Terebralia palustris*) des gastéropodes**.

Constanzo 2001

Les eaux usées présentent un enrichissement de leur composition isotopique $\delta^{15}\text{N}$. Ainsi, le tissu des végétaux assimilant cet azote provenant des eaux usées présente **une augmentation en $\delta^{15}\text{N}$** . Les analyses isotopiques des tissus d'**algues** permettent de mesurer le ratio isotopique et de visualiser l'extension de l'enrichissement lié aux eaux usées.

Diaz (2004) (Caraïbes)

L'auteur suggère qu'une **augmentation de l'abondance des espèces généralistes** au détriment des espèces spécialistes de la mangrove peut être le signe d'alarme que les conditions physiques et biologiques se détériorent au point que seules des espèces écologiquement résilientes peuvent s'en accommoder. Il donne en particulier l'exemple des **éponges**. Creary 2002 (Jamaïque) donne l'exemple des **bryozoaires**.

De manière plus générale, **l'abondance relative des différents groupes fonctionnels** est un bon paramètre biologique à suivre car chaque groupe répond différemment aux modifications des paramètres physico-chimiques.

Fajer-Avila 2006

Les **parasites** peuvent être des indicateurs de la pollution du fait de leur sensibilité aux perturbations environnementales. La **modification de la diversité et de la structure de population des parasites des poissons** peut être reliée à la perturbation de l'ensemble de la communauté des parasites et/ou à la réduction de la réponse immunitaire des poissons facilitant l'infection par des parasites qui ont un relativement faible potentiel épidémiologique.

Kristensen 2000

La présence des galeries des **crabes** dans les cycles biogéochimiques est importante : on observe que **la réduction des sulfates est réduite de moitié dans une vase présentant des galeries** par rapport à une vase d'où la faune est quasi-absente.

Kruitwagen 2006

Les **périophtalmes** vivant dans une mangrove soumise à des rejets industriels et urbains ont une **structure de population très différente** des autres mangroves non soumises à ces rejets, ainsi qu'un taux important de difformités (absence d'un œil). Les sédiments de cette mangrove présentent notamment des concentrations en métaux traces, PCB, PAH, et pesticides importantes. Les poissons sont sensibles à ces polluants, en particulier dans leurs premiers stades de développement où ces polluants peuvent interférer avec des processus de développement cruciaux. L'exposition à des polluants peut se traduire par exemple par une **réduction de la production d'œufs**, par un **retard ou un échec de l'éclosion**, une **réduction de la croissance** ou des **difformités**. De nombreuses espèces de poissons utilisent la mangrove aux premiers stades de leur vie, les exposant ainsi aux polluants piégés dans les mangroves. Ainsi la pollution des mangroves est une préoccupation qui dépasse les seuls résidents celles-ci.

Melville 2006 (Australie)

La diversité et la distribution des **macro-algues** fixées aux racines des palétuviers reflètent la concentration en contaminants (**métaux traces**) dans le milieu alors que leur **biomasse** est liée à la **concentration en nutriments**. Une espèce, *Catenella nipae* Zanardini, espèce cosmopolite ne présentant pas de variation saisonnière semble une bonne candidate pour indiquer une contamination en métaux traces.

Molnar thèse 2012 (Mayotte) (effluents aquacoles)

L'apport des effluents conduit à un **développement des pneumatophores** des *Avicennia*, à une **augmentation de la population de crabes** *Sesarmides* et une **diminution de celle des crabes du genre *Uca***. Les crabes étant rassasiés plus rapidement, **l'activité de bioturbation est diminuée**. Le **régime alimentaire du gastéropode *Terebralia* est modifié** du fait de l'augmentation de la ressource en micro-algues et bactéries au détriment de la litière composée de débris de palétuviers. De manière générale, on constate l'absence d'eutrophisation et d'anoxie dans la mangrove observée : pas de signes visibles de saturation. Aucun signe d'anoxie ne résulte de cet enrichissement dans la strate à *Avicennia*.

Un rejet d'effluents au moment de la marée montante permet d'éviter le transport rapide de l'effluent hors de la mangrove, permet de respecter les **organismes sensibles à l'alternance des marées** et leur action de bioturbation et de consommation de la matière organique de surface, et permet **l'oxygénation du sédiment lors des phases de dessèchement**.

Penha-Lopes 2010 (mésocosme)

Des expériences en mésocosme ont conduit au même constat que des observations de terrain : les conditions hypoxiques associées au déversement d'eaux usées dans les mangroves **empêche le recrutement du gastéropode *Terebralia palustris*** et **modifie son comportement** et son important rôle ingénieur dans l'écosystème mangrove.

Penha-Lopes 2011 (Mozambique)

La population de la **crevette *Palaemon concinnus*** présente les signes généraux **d'un meilleur état (taille, biomasse, capacité reproductive ... sauf taux de parasitisme)** dans une mangrove soumise à des effluents urbains. **L'augmentation du taux de parasitisme** pourrait être la conséquence d'une augmentation de la disponibilité d'hôtes intermédiaires pour le parasite.

Penha-Lopes 2012 (mésocosme)

L'activité de la **macrofaune** augmente la capacité de traitement des eaux usées de la mangrove, mais **la mortalité de cette macrofaune augmente**, du fait du faible niveau d'oxygène pendant les périodes d'immersion et des conditions anoxiques du sédiment, même à de faible niveau d'apport d'eaux usées.

Effet des éléments traces métalliques et contaminants organiques

Le plomb, le cadmium et le mercure sont considérés comme dangereux pour la consommation humaine. (Règlement européen 1881/2006). Les concentrations maximales admissibles dans l'eau, les sédiments et le biote sont fournis dans la Directive n° 2013/39/UE du 12/08/13 mais ne prennent pas en compte la biodisponibilité de ces éléments qui est fonction de leur spéciation.

Bayen 2012, Lewis 2011

Dans son article de synthèse, Bayen fournit un tableau des concentrations observées en métaux traces et polluants organiques dans les sédiments et dans les tissus de certaines espèces des

mangroves. Les **espèces bio-indicatrices utilisées** sont principalement mollusques (bivalves et gastéropodes) et crustacés, mais également annélides, poissons, zooplancton, phytoplancton, macroalgues, éponges et tortues.

Les métaux traces et les polluants organiques lipophiles ont une affinité pour la matière organique ce qui affecte leur mobilité et leur biodisponibilité. Ils sont également adsorbés sur les sédiments, en particuliers sur les sédiments fins (présentant une grande surface de contact et une grande capacité d'échange de cations avec les polluants). Aussi se retrouvent-ils piégés dans les mangroves qui sont des zones privilégiées de sédimentation.

Suivant les conditions oxydo-réductrices des sédiments, les métaux traces précipitent (en condition d'anoxie sulfique) et peuvent ainsi être immobilisés dans la mangrove.

Les bactéries sulfato-réductrices induisent la méthylation du mercure. Le **méthylmercure**, forme la plus toxique du mercure organique, est bioconcentré au sein du réseau trophique.

La concentration seule ne permet pas de décrire le comportement ou la toxicité des polluants. La biodisponibilité dépend de la spéciation des polluants traces qui dépend de nombreux facteurs comme la taille et composition des sédiments, les conditions d'oxydo-réduction, le taux de matière organique, la salinité ou l'hydrologie ; ces facteurs varient grandement au sein d'une mangrove, la présence et la biodisponibilité des polluants traces également. Une conséquence pratique directe est la difficulté de construire un plan d'échantillonnage qui permettra de mesurer la présence de ces polluants et leur biodisponibilité.

Bodin 2013

Deux bivalves et trois gastéropodes sont utilisés comme bio-indicateur de contamination en métaux traces dans les mangroves du Sine-Saloum (Sénégal).

Un bio-indicateur donné de contamination en métal trace fournit une information sur la biodisponibilité des métaux pour cette espèce seulement, car cette contamination dépend de la stratégie d'alimentation de l'espèce bio-indicatrice ciblée et de la biodisponibilité des métaux dans son habitat d'alimentation (filtreur fixé sur les racines échasses ≠ filtreurs endogés). Ainsi il est **nécessaire d'utiliser plusieurs espèces bio-indicatrices** pour rendre compte de la biodisponibilité des métaux à travers plusieurs sources (sédiments, particules en suspension, colonne d'eau, source d'alimentation spécifique, ...).

Duke 2005, Shaffelke 2005 (Australie)

Des **herbicides** (en particulier le Durion) utilisés dans la culture de la canne à sucre sont responsables depuis 1990 du **dépérissement à grande échelle des Avicennia marina. L'état de la canopée et des jeunes plants est fortement dégradé.**

Klekowski 1999 (Trinidad)

Rhizophora mangle montre un **taux élevé de mutation génétique** (facilement mis en évidence par une déficience en chlorophylle des jeunes plants) dû à un taux élevé de mercure dans le sédiment. Dans ce cas précis le mercure a été apporté par les oiseaux (plumes perdues sur site de nidification) qui se nourrissent d'invertébrés benthiques, dans une zone où les sédiments sont contaminés par le mercure (du fait de l'exploitation aurifère).

MacFarlane 2007

Les métaux traces sont parmi les principaux polluants qui peuvent atteindre les mangroves. Les enrichissements métalliques dans les mangroves proviennent des ruissellements agricoles et urbains, des effluents industriels, de la navigation plaisancière et des usages récréatifs des plans d'eau, des déversements chimiques, des usines de traitement des eaux usées, des lixiviats en provenance des décharges ou des sites miniers. La toxicité des métaux traces dans les organismes aquatiques, associés au temps de résidence long dans la chaîne alimentaire et au risque sanitaire potentiel pour l'homme, rendent nécessaire le suivi de ces contaminants dans les organismes et plus généralement dans les mangroves.

Marchand 2007

Les différences de conditions physico-chimiques du sédiment dans les différentes strates végétales de la mangrove sont considérables et conditionnent les associations entre métaux et oxy-hydroxydes ou bien métaux et sulfures, métaux sous formes dissoutes ou bien métaux sous forme solides, et par conséquent la **toxicité et la disponibilité des métaux** vis-à-vis des organismes vivants.

Marchand 2011

À cause de leur toxicité, de leur capacité à se bio-concentrer le long de la chaîne alimentaire, les éléments traces métalliques représentent une menace pour la biodiversité des mangroves et la santé humaine.

Du fait de la **capacité des mangroves de piéger les particules en suspension** dans la colonne d'eau (Furukawa et al., 1997), et la grande affinité de la matière organique pour les métaux (Nissenbaum et Swaine, 1976), **les sédiments de la mangrove ont une grande capacité d'accumuler ces polluants**. Les sédiments de mangroves, riches en matière organique, subissent différents processus de diagenèse qui dépendent notamment de la capacité du système racinaire de la mangrove à diffuser de l'oxygène dans le sédiment, de l'intensité de la bioturbation, et de la variabilité saisonnière de l'engorgement en eau. Ainsi, **dans certaines conditions, les sédiments de la mangrove qui étaient des pièges pour les métaux traces peuvent devenir des sources de métaux traces**.

Ramdine2012 (Guadeloupe)

La mesure des concentrations de HAP dans le sédiment de surface et dans les huîtres de palétuvier a été réalisée sur 10 stations. Les niveaux de contamination des sédiments ne sont pas homogènes montrant différentes sources de pollution. Ce niveau est maximum dans la Manche à eau, près de l'aéroport. Le niveau de contamination est plus homogène dans les huîtres et un cas de pollution accidentelle a été détecté. Les mesures suggèrent que les **huîtres de palétuvier** sont contaminées par des **HAP d'origine pétrogénique et pyrogénique** (combustion partielle) et liées aux activités humaines et directement par du pétrole présent dans l'eau.

L'utilisation des **biomarqueurs de stress oxydatifs** sont une bonne méthode d'indication de la présence de HAP dans l'environnement. L'huître de palétuvier est un bon **organisme sentinelle** utilisable pour la bio-indication dans le cadre de suivis environnementaux.

Yim et Tam 1999

Les palétuviers et les microorganismes associés ont une **croissance réduite** quand ils sont exposés à des éléments traces métalliques, en particulier à des concentrations dépassant de cinq fois celles des sols de mangroves non impactées. **L'activité microbienne est généralement plus sensible à la toxicité des métaux traces que les palétuviers**.

6. Eléments sur la biodiversité spécifique et fonctionnelle, la complexité et les services écosystémiques.

Alongi 2004

L'efficacité de la **séquestration de carbone** dans le sédiment augmente avec l'âge de la mangrove. Alongi donne un exemple en Malaisie, passant de 16% pour une mangrove de 5ans à 27% pour une mangrove de 85ans.

Andreetta 2014

La **sédimentation** de particules fines riches en carbone dans les mangroves n'est pas le seul processus de piégeage du carbone dans le système. La faune joue un rôle important dans le **stockage du carbone** dans le sol des mangroves : les **crabes** de la famille des Sesarmides creusent des galeries profondes dans lesquelles ils stockent des feuilles de la litière, des propagules et d'autres matériaux organiques, favorisant ainsi la rétention de carbone dans le système.

Arfi 2012 (Nouvelle Calédonie)

La **fonge** a un rôle important dans le **recyclage de la matière organique** dans la mangrove, aussi bien dans la zone de surface que dans le sédiment anoxique, mais reste encore largement méconnue.

Cannicci 2008

Si les **crabes** sont considérés comme des espèces ingénieurs essentielles des mangroves (herbivorie → transfert énergie, contrôle structure de la forêt ; creusement de galeries → remaniement et oxygénation des sédiments, bioturbation/oxygénation des sédiments de surface liée à leur recherche de nourriture), ils ne sont pas les seuls : la consommation de la litière par les **gastéropodes** et leur contribution à la dynamique des nutriments qui en résulte peut être supérieure à celle des crabes ; les **bivalves** filtrent la matière en suspension ; les **isopodes** apparaissent également comme des espèces ingénieurs non négligeables ; **éponges** et **ascidies** ont également un rôle dans la dynamique des mangroves ; les **insectes** herbivores ne doivent pas non plus être négligés ; leur actions est contrôlée par les **fourmis** qui ont ainsi un rôle positif pour le développement de la mangrove. Tous ont un rôle dans le développement des arbres et la régénération de la mangrove ; ainsi les études écologiques, comme la gestion, doivent garder en tête **l'importance de la biodiversité associées à la mangrove et l'important rôle fonctionnel de chacun des éléments constitutifs de cet écosystème.**

Duke 2006

Il a été estimé, pour l'Australie de l'Est, que la contribution des espèces liées aux mangroves représente environ 67% de l'ensemble de la pêche commerciale.

Kristensen 2007

Les sédiments des mangroves sont riches en carbone organique d'origine locale (feuillage, racines, microphytobenthos, bactéries...) ou importée (phytoplanton, débris de macrophytes).

Les **crabes** sont des **espèces ingénieuses** essentielles dans le cycle du carbone, ingurgitant deux fois plus de matière organique qu'ils n'en assimilent, rendant via leur fèces cette MO non assimilée plus facilement disponible (particule plus petites et enrichissement en azote) pour le **réseau trophique** des détritivores ou des bactéries.

Mumby 2004 (Caraïbes)

Les mangroves agissent comme des **habitats intermédiaires** pour les juvéniles de nombreuses espèces, influencent fortement la structure de la communauté des récifs adjacents, et la biomasse de certaines populations s'en trouve fortement augmentée. Au moins une espèce, *Scarus guacamaia*, la

plus grosse espèce de poisson herbivore des Caraïbes, est fonctionnellement dépendantes des mangroves.

Ce constat n'est néanmoins pas généralisable à tous les systèmes coralliens présentant des mangroves (Blaber 2007). Il existe de nombreuses études démontrant le rôle fonctionnel des mangroves pour les ressources halieutiques (notamment poissons et crevettes), mais une telle relation n'est pas systématique.

Nagelkerken (2000) Antilles néerlandaises

Le rôle des mangroves comme **nurserie** est avéré, comme celui des herbiers et de la partie peu profonde des récifs coralliens. La turbidité, l'amplitude de la marée et la variation de la salinité de cette mangrove sont réduites par rapport à d'autres comme celles de l'Indo Pacifique. Les conditions permettant la fonction de nurserie sont probablement différentes.

Nagelkerken 2007

Comme tous les écosystèmes, la mangrove se caractérise par la **complexité** des relations entre les différents éléments qui la composent et la biodiversité qu'elle supporte de manière directe ou indirecte.

Les racines des palétuviers sont protégées des isopodes xylophages par les éponges et ascidies, épibiontes filtreurs s'alimentant des bactéries en suspensions qui se sont développées notamment en dégradant la litière produite par les palétuviers. Les feuilles des palétuviers tombant sur le sédiment sont rapidement colonisées par une succession d'organismes détritiques, bactéries, fonge, méiofaune. La méiofaune constitue une source d'alimentation importante pour les crustacés de la mangrove et les poissons venant s'alimenter dans la mangrove à chaque marée. La construction des terriers et la bioturbation des crustacés, modifient de manière importante les propriétés des sédiments et les cycles biogéochimiques, participant à la minéralisation aussi bien qu'à la séquestration de la matière organique. La consommation par les crustacés et les gastéropodes des graines des palétuviers ont un rôle important dans la structuration de la communauté des palétuviers ... A cela se rajoute toute la faune occupant la partie aérienne de la mangrove (insectes, oiseaux, amphibiens, reptiles ...) et toutes les interactions, toute la diversité fonctionnelle associée.

Vaslet 2008 (Guadeloupe)

Met en évidence la proportion importante de juvéniles parmi les **poissons** capturés (95% des individus, 50% de la biomasse) à proximité des mangroves indiquant l'importance de cet **habitat pour les juvéniles**. Les raisons avancées sont : 1- la structure complexe du système racinaires-propagules des mangroves et la turbidité, fournissent un abri aux juvéniles, 2- les mangroves augmentent la disponibilité en nourriture (de manière directe par la chaîne alimentaire détritique, et indirecte par les nombreuses proies attirées par la mangrove).

7. Faisabilité de la construction d'un bio-indicateur « mangrove »

Ce rapport bibliographique a pour but d'alimenter la réflexion qui sera menée dans le cadre du séminaire du GT DCE mangrove de septembre. Si la pertinence de la prise en compte des mangroves dans le cadre de la DCE paraît claire au regard de l'importance fonctionnelle de cet habitat, de sa patrimonialité, des nombreux services écosystémiques rendus et de sa situation très particulière vis-à-vis des pressions anthropiques, il reste néanmoins à évaluer la faisabilité technique et financière du développement d'un « indicateur mangrove » pour la DCE.

Il ne s'agit pas de choisir un seul indicateur mais plusieurs indicateurs et variables complémentaires, considérés comme nécessaires et suffisants à l'évaluation de l'état écologique, et qui :

- permettent de détecter tôt les perturbations ;
- puissent être mis en œuvre relativement facilement ;
- soient interprétables par rapport à des conditions de référence ;
- puissent être reliés à une pression ou un stress particulier ;
- réagissent à une diminution des pressions ;
- permettent de rendre compte de l'efficacité de mesures de gestion mises en place, le cas échéant, pour restaurer le bon état ;
- permettent la prise en compte des différents niveaux de complexité biologique et d'échelle spatiale.

Ainsi il s'agira notamment d'identifier parmi les nombreux indicateurs et variables d'état extraits de la littérature, et ceux qui pourront être proposés par les experts :

- ceux qui paraissent pertinents au regard des objectifs et des conditions de mise en œuvre de la DCE et qu'il est recommandé de suivre dans le cadre DCE ;
- ceux qu'il est recommandé de suivre et dont la pertinence ne pourra être évaluée qu'à la suite d'une analyse ultérieure, ou parce qu'ils apportent des informations sur le contexte nécessaires à l'analyse ;
- ceux qui présentent un bon potentiel mais nécessitent des développements de recherche.

8. Un exemple de suivi : MangroveWatch

Il s'agit d'un réseau de science participative réalisant un suivi de l'état des mangroves du Queensland selon un protocole proposé par la James Cook University (Australie) qui coordonne également ce programme. Ce protocole semble particulièrement adapté aux estuaires et littoraux australiens présentant de très grands linéaires de mangroves.

A partir des images du littoral filmées depuis une embarcation, différentes caractéristiques de la mangrove sont évalués pour chaque portion de 10m de littoral :

- Présence et biomasse (hauteur de la canopée et densité des arbres) ;
- Condition de la mangrove (signes de dépérissement des arbres : arbres / branches / rameaux morts, feuillage plus ou moins clairsemé) ;

- Signes de changement du littoral, progression ou régression de la mangrove (racines exposées, berge entamée / s'effondrant, arbres tombés, changements abrupts du profil de la berge ; nombreuses propagules, jeunes pousses à la lisière de la mangrove) ;
- Fragmentation de la mangrove (nombre d'interruption du continuum de mangrove, pourcentage) ;
- L'évolution historique du trait de côte ;
- L'évolution historique de la superficie de l'habitat.

L'évaluation de l'état de la mangrove du rivage seul peut masquer des dégradations importantes de la mangrove située derrière, comme cela a été constaté par Duke (2010).

Pour chacun des descripteurs listés précédemment a été établie une échelle d'évaluation semi quantitative dont un exemple est donné ci-dessous

Tableau 4 : Exemple d'échelle d'évaluation semi-quantitative pour l'indicateur "biomasse de la mangrove" (Mackenzie 2013, MangroveWatch)

Biomasse de la mangrove	0	1	2	3	4	5
classification de la hauteur de la canopée	pas de mangrove	hauteur de la canopée <2m	hauteur de la canopée 2-4m	hauteur de la canopée 4-6m	hauteur de la canopée 6-8m	hauteur de la canopée >10m
classification de la structure de la forêt	-	mangrove diffuse - quelques arbres individuels dispersés. 1 à 2 arbres	mangrove clairsemée - quelques arbres séparés de plus de 2m ou petits groupes d'arbres	forêt ouverte - présence d'un linéaire de mangrove mais avec des espaces entre les couronnes des arbres	forêt ouvert continue. Houppiers des arbres se touchant et se chevauchant	forêt dense continue. Houppiers des arbres entremêlés

Bibliographie

- Abdallah, K. & Eymard, S., 2013. Atlas des mangroves de Mayotte 2012. DEAL/SEPR/Unité Biodiversité - décembre 2013
- Alongi, D.M., Sasekumar, A., Tirendi, F., Trott, L., Pfitzner, J., Dixon, P., Brunskill, G.J., 2004. Sediment accumulation and rates of carbon and nitrogen flow in mangrove forests of different age: estimates of land-ocean-atmosphere exchange in peninsular Malaysia. *Marine Geology* 208, 383–402.
- Alongi, D.M., 2008. Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 76, 1–13. doi:10.1016/j.ecss.2007.08.024
- Alongi, D.M., 2002. Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation* 29. doi:10.1017/S0376892902000231
- Amaral, V., Penha-Lopes, G., Paula, J., 2009. RNA/DNA ratio of crabs as an indicator of mangrove habitat quality. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 19, S56–S62. doi:10.1002/aqc.1039
- Andreetta, A., Fusi, M., Cameldi, I., Cimò, F., Carnicelli, S., Cannicci, S., 2014. Mangrove carbon sink. Do burrowing crabs contribute to sediment carbon storage? Evidence from a Kenyan mangrove system. *Journal of Sea Research* 85, 524–533. doi:10.1016/j.seares.2013.08.010
- Arfi, Y., Marchand, C., Wartel, M., Record, E., 2012. Fungal diversity in anoxic-sulfidic sediments in a mangrove soil. *Fungal Ecology* 5, 282–285. doi:10.1016/j.funeco.2011.09.004
- Aschenbroich, A., Marchand, C., Molnar, N., Deborde, J., Hubas, C., Rybarczyk, H., Meziane, T., 2015. Spatio-temporal variations in the composition of organic matter in surface sediments of a mangrove receiving shrimp farm effluents (New Caledonia). *Science of The Total Environment* 512-513, 296–307. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.12.082
- Bartolini, F., Cimò, F., Fusi, M., Dahdouh-Guebas, F., Lopes, G.P., Cannicci, S., 2011. The effect of sewage discharge on the ecosystem engineering activities of two East African fiddler crab species: Consequences for mangrove ecosystem functioning. *Marine Environmental Research* 71, 53–61. doi:10.1016/j.marenvres.2010.10.002
- Bartolini, F., Penha-Lopes, G., Limbu, S., Paula, J., Cannicci, S., 2009. Behavioural responses of the mangrove fiddler crabs (*Uca annulipes* and *U. inversa*) to urban sewage loadings: Results of a mesocosm approach. *Marine Pollution Bulletin* 58, 1860–1867. doi:10.1016/j.marpolbul.2009.07.019
- Bayen, S., 2012. Occurrence, bioavailability and toxic effects of trace metals and organic contaminants in mangrove ecosystems: A review. *Environment International* 48, 84–101. doi:10.1016/j.envint.2012.07.008
- Blaber, S.J.M., 2007. Mangroves and fishes: issues of diversity, dependence, and dogma. *Bulletin of Marine Science* 80, 457–472.
- Bodin, N., N’Gom-Kâ, R., Kâ, S., Thiaw, O.T., Tito de Morais, L., Le Loc’h, F., Rozuel-Chartier, E., Auger, D., Chiffolleau, J.-F., 2013. Assessment of trace metal contamination in mangrove ecosystems from Senegal, West Africa. *Chemosphere* 90, 150–157. doi:10.1016/j.chemosphere.2012.06.019
- Bosire, J.O., Dahdouh-Guebas, F., Walton, M., Crona, B.I., Lewis, R.R., Field, C., Kairo, J.G., Koedam, N., 2008. Functionality of restored mangroves: A review. *Aquatic Botany* 89, 251–259. doi:10.1016/j.aquabot.2008.03.010
- Bouchez, A., Pascault, N., Chardon, C., Bouvy, M., Cecchi, P., Lambs, L., Herteman, M., Fromard, F., Got, P., Leboulanger, C., 2013. Mangrove microbial diversity and the impact of trophic contamination. *Marine Pollution Bulletin* 66, 39–46. doi:10.1016/j.marpolbul.2012.11.015
- Bouillon, S., Moens, T., Overmeer, I., Koedam, N., Dehairs, F., 2004. Resource utilization patterns of epifauna from mangrove forests with contrasting inputs of local versus imported organic matter. *Marine Ecology Progress Series* 278, 77–88. doi:10.3354/meps278077
- Bui, T.H.H., Lee, S.Y., 2014. Does “You Are What You Eat” Apply to Mangrove Grapsid Crabs? *PLoS ONE* 9, e89074. doi:10.1371/journal.pone.0089074

- Cannicci, S., Bartolini, F., Dahdouh-Guebas, F., Fratini, S., Litulo, C., Macia, A., Mrabu, E.J., Penha-Lopes, G., Paula, J., 2009. Effects of urban wastewater on crab and mollusc assemblages in equatorial and subtropical mangroves of East Africa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 84, 305–317. doi:10.1016/j.ecss.2009.04.021
- Cannicci, S., Burrows, D., Fratini, S., Smith, T.J., Offenberg, J., Dahdouh-Guebas, F., 2008. Faunal impact on vegetation structure and ecosystem function in mangrove forests: A review. *Aquatic Botany* 89, 186–200. doi:10.1016/j.aquabot.2008.01.009
- CARDNO 2013. Mangrove Community Health Monitoring Program Baseline Phase Report. Ichthys Nearshore Environmental Monitoring Program. L384-AW-REP-10001. Prepared for INPEX. October 2013. <http://www.inpex.com.au/media/1787/mangrove-community-health-baseline-report.pdf>
- Cheviron, N et al., 2014. Les activités enzymatiques. Fiche outil ADEME. https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/download/fiches-outil/fiche_outil_5_respirometrie_oxitop.pdf
- Costanzo, S.D., O'Donohue, M.J., Dennison, W.C., Loneragan, N.R., Thomas, M., 2001. A New Approach for Detecting and Mapping Sewage Impacts. *Marine Pollution Bulletin* 42, 149–156. doi:10.1016/S0025-326X(00)00125-9
- Criquet, S et coll., 2014. Respirométrie Oxitop®. Fiche outil ADEME. https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/download/fiches-outil/fiche_outil_4_activites_enzymatiques.pdf
- Duke, N.C., Bell, A.M., Pederson, D.K., Roelfsema, C.M., Bengtson Nash, S., 2005. Herbicides implicated as the cause of severe mangrove dieback in the Mackay region, NE Australia: consequences for marine plant habitats of the GBR World Heritage Area. *Marine Pollution Bulletin* 51, 308–324. doi:10.1016/j.marpolbul.2004.10.040
- Duke, N.C. (2008) *Australia's Mangroves. The Authoritative Guide to Australia's Mangrove Plants*. 200 pages, University of Queensland, ISBN: 9780646461960
- Duke, N.C., A. Haller, S. Brisbane, A. Wood, and B. Rogers. (2010). 'Sinking Centres' in Moreton Bay mangrove. Maps showing areas of unusual anoxic ponds and mangrove dieback in tidal wetlands of the bay area in 2003-2008. Pages 221. Report to Queensland Fisheries, DEEDI. University of Queensland, School of Biological Sciences, Mangrove Hub, Brisbane.
- Ellison, J., 2012. *Manual for mangrove monitoring in the Pacific Islands region*. SPREP, Apia, Samoa.
- Ellison, J.C., 1999. Impacts of Sediment Burial on Mangroves. *Marine Pollution Bulletin* 37, 420–426. doi:10.1016/S0025-326X(98)00122-2
- Fajer-Ávila, E.J., García-Vásquez, A., Plascencia-González, H., Ríos-Sicairos, J., Parra, L.M.G.-D.L., Betancourt-Lozano, M., 2006. Copepods and Larvae of Nematodes Parasiting the White Mullet Mugil Curema (Valenciennes, 1836): Indicators of Anthropogenic Impacts in Tropical Coastal Lagoons? *Environmental Monitoring and Assessment* 122, 221–237. doi:10.1007/s10661-005-9177-2
- Fromard, F., Vega, C., Proisy, C., 2004. Half a century of dynamic coastal change affecting mangrove shorelines of French Guiana. A case study based on remote sensing data analyses and field surveys. *Marine Geology* 208, 265–280. doi:10.1016/j.margeo.2004.04.018
- Gardel, A., Proisy, C., Gratiot, N., Polidori, L., de Coligny, F., 2002. Du banc de vase à la mangrove: apport d'une série d'images SPOT 1986-2001 pour le suivi de la dynamique du littoral guyanais, in: Proc. VI Workshop ECOLAB. pp. 22–29.
- Herteman, M., Fromard, F., Lambs, L., 2011. Effects of pretreated domestic wastewater supplies on leaf pigment content, photosynthesis rate and growth of mangrove trees: A field study from Mayotte Island, SW Indian Ocean. *Ecological Engineering* 37, 1283–1291. doi:10.1016/j.ecoleng.2011.03.027
- Ivar do Sul, J.A., Costa, M.F., Silva-Cavalcanti, J.S., Araújo, M.C.B., 2014. Plastic debris retention and exportation by a mangrove forest patch. *Marine Pollution Bulletin* 78, 252–257. doi:10.1016/j.marpolbul.2013.11.011
- Klekowski, E., Temple, S., Siung-Chang, A., Kumarsingh, K., 1999. An association of mangrove mutation, scarlet ibis, and mercury contamination in Trinidad, West Indies. *Environmental Pollution* 105, 185–189. doi:10.1016/S0269-7491(99)00028-7
- Kristensen, E., Bouillon, S., Dittmar, T., Marchand, C., 2008. Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review. *Aquatic Botany* 89, 201–219. doi:10.1016/j.aquabot.2007.12.005

- Kruitwagen, G., Hecht, T., Pratap, H.B., Wendelaar Bonga, S.E., 2006. Changes in morphology and growth of the mudskipper (*Periophthalmus argentilineatus*) associated with coastal pollution. *Marine Biology* 149, 201–211. doi:10.1007/s00227-005-0178-z
- Lallierverges, E., Marchand, C., Disnar, J., Lottier, N., 2008. Origin and diagenesis of lignin and carbohydrates in mangrove sediments of Guadeloupe (French West Indies): Evidence for a two-step evolution of organic deposits. *Chemical Geology* 255, 388–398. doi:10.1016/j.chemgeo.2008.07.009
- Lambs, L., Léopold, A., Zeller, B., Herteman, M., Fromard, F., 2011. Tracing sewage water by 15N in a mangrove ecosystem to test its bioremediation ability: Tracing sewage water by 15N in a mangrove ecosystem. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 25, 2777–2784. doi:10.1002/rcm.5120
- Lewis, M., Pryor, R., Wilking, L., 2011. Fate and effects of anthropogenic chemicals in mangrove ecosystems: A review. *Environmental Pollution* 159, 2328–2346. doi:10.1016/j.envpol.2011.04.027
- Linton, D.M., Warner, G.F., 2003. Biological indicators in the Caribbean coastal zone and their role in integrated coastal management. *Ocean & Coastal Management* 46, 261–276. doi:10.1016/S0964-5691(03)00007-3
- Marchand, C., Allenbach, M., Lallier-Vergès, E., 2011. Relationships between heavy metals distribution and organic matter cycling in mangrove sediments (Conception Bay, New Caledonia). *Geoderma* 160, 444–456. doi:10.1016/j.geoderma.2010.10.015
- Marchand, C., Dumas, P., 2008. Typologies et biodiversité des mangroves de Nouvelle-Calédonie. 1. Rapport ZoNéCo. Nouméa: IRD, UNC, DTSI, Sabrina Virly Consultant, ZoNéCo.
- Marchand, C., Fernandez, J.-M., Moreton, B., Landi, L., Lallier-Vergès, E., Baltzer, F., 2012. The partitioning of transitional metals (Fe, Mn, Ni, Cr) in mangrove sediments downstream of a ferralitized ultramafic watershed (New Caledonia). *Chemical Geology* 300-301, 70–80. doi:10.1016/j.chemgeo.2012.01.018
- Marchand, C., Lallier-Vergès, E., Allenbach, M., 2011. Redox conditions and heavy metals distribution in mangrove forests receiving effluents from shrimp farms (Teremba Bay, New Caledonia). *Journal of Soils and Sediments* 11, 529–541. doi:10.1007/s11368-010-0330-3
- Martínez-Crego, B., Alcoverro, T., Romero, J., 2010. Biotic indices for assessing the status of coastal waters: a review of strengths and weaknesses. *Journal of Environmental Monitoring* 12, 1013. doi:10.1039/b920937a
- Mackenzie, J. & Duke, NC 2013. MangroveWatch Moreton Bay 2012 Data Summary. MangroveWatch Science Hub, Centre for Tropical Water & Aquatic Ecosystem Research. Publication 13/x, James Cook University, Townsville. 38pp
<https://research.jcu.edu.au/tropwater/resources/13%2029%20Mangrove%20Watch%20moreton%20Bay%202012%20Summary.pdf>
- McDonald, K.O., Webber, D.F., Webber, M.K., 2003. Mangrove forest structure under varying environmental conditions. *Bulletin of Marine Science* 73, 491–505.
- Miller, S.C., Kaiserman, M., Osmond, D.G., 1978. Small lymphocyte production and lymphoid cell proliferation in mouse bone marrow. *Experientia* 34, 129–131.
- Molnar N, M.C., 2014. Seasonal Pattern of the Biogeochemical Properties of Mangrove Sediments Receiving Shrimp Farm Effluents (New Caledonia). *Journal of Aquaculture Research & Development* 05. doi:10.4172/2155-9546.1000262
- Molnar, N., Meziane, T., Muséum national d'histoire naturelle (Paris), École doctorale Sciences de la Nature et de l'Homme (Paris), 2012. Impact des effluents de la crevetticulture sur la dynamique de la matière organique benthique et leurs implications sur les processus biogéochimiques dans une mangrove (Nouvelle-Calédonie). s.n.], S.I.
- Molnar, N., Welsh, D.T., Marchand, C., Deborde, J., Meziane, T., 2013. Impacts of shrimp farm effluent on water quality, benthic metabolism and N-dynamics in a mangrove forest (New Caledonia). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 117, 12–21. doi:10.1016/j.ecss.2012.07.012
- Mumby, P.J., Edwards, A.J., Ernesto Arias-Gonzalez, J., Lindeman, K.C., Blackwell, P.G., Gall, A., Gorczyńska, M.I., Harborne, A.R., Pescod, C.L., Renken, H., C. C. Wabnitz, C., Llewellyn, G., 2004. Mangroves enhance the biomass of coral reef fish communities in the Caribbean. *Nature* 427, 533–536. doi:10.1038/nature02286

- Nagelkerken, I., Blaber, S.J.M., Bouillon, S., Green, P., Haywood, M., Kirton, L.G., Meynecke, J.-O., Pawlik, J., Penrose, H.M., Sasekumar, A., Somerfield, P.J., 2008. The habitat function of mangroves for terrestrial and marine fauna: A review. *Aquatic Botany* 89, 155–185.
doi:10.1016/j.aquabot.2007.12.007
- Nagelkerken, I., van der Velde, G., Gorissen, M.W., Meijer, G.J., Van't Hof, T., den Hartog, C., 2000. Importance of Mangroves, Seagrass Beds and the Shallow Coral Reef as a Nursery for Important Coral Reef Fishes, Using a Visual Census Technique. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 51, 31–44.
doi:10.1006/ecss.2000.0617
- Penha-Lopes, G., Bartolini, F., Limbu, S., Cannicci, S., Mgaya, Y., Kristensen, E., Paula, J., 2010a. Ecosystem engineering potential of the gastropod *Terebralia palustris* (Linnaeus, 1767) in mangrove wastewater wetlands – A controlled mesocosm experiment. *Environmental Pollution* 158, 258–266.
doi:10.1016/j.envpol.2009.07.009
- Penha-Lopes, G., Kristensen, E., Flindt, M., Mangion, P., Bouillon, S., Paula, J., 2010b. The role of biogenic structures on the biogeochemical functioning of mangrove constructed wetlands sediments – A mesocosm approach. *Marine Pollution Bulletin* 60, 560–572. doi:10.1016/j.marpolbul.2009.11.008
- Penha-Lopes, G., Flindt, M.R., Ommen, B., Kristensen, E., Garret, P., Paula, J., 2012. Organic carbon dynamics in a constructed mangrove wastewater wetland populated with benthic fauna: A modelling approach. *Ecological Modelling* 232, 97–108. doi:10.1016/j.ecolmodel.2012.02.005
- Penha-Lopes, G., Torres, P., Cannicci, S., Narciso, L., Paula, J., 2011. Monitoring anthropogenic sewage pollution on mangrove creeks in southern Mozambique: A test of *Palaemon concinnus* Dana, 1852 (*Palaemonidae*) as a biological indicator. *Environmental Pollution* 159, 636–645.
doi:10.1016/j.envpol.2010.09.029
- Pinheiro, M.A.A., Silva, P.P.G. e, Duarte, L.F. de A., Almeida, A.A., Zanotto, F.P., 2012. Accumulation of six metals in the mangrove crab *Ucides cordatus* (Crustacea: Ucididae) and its food source, the red mangrove *Rhizophora mangle* (Angiosperma: Rhizophoraceae). *Ecotoxicology and Environmental Safety* 81, 114–121. doi:10.1016/j.ecoenv.2012.05.004
- Polastro, E., Looze, Y., Léonis, J., 1976. Study of the biological significance of cytochrome methylation. I. Thermal, acid and guanidinium hydrochloride denaturations of baker's yeast ferricytochromes c. *Biochim. Biophys. Acta* 446, 310–320.
- Proisy, C., Coutron, P., Fromard, F., 2007. Predicting and mapping mangrove biomass from canopy grain analysis using Fourier-based textural ordination of IKONOS images. *Remote Sensing of Environment* 109, 379–392. doi:10.1016/j.rse.2007.01.009
- Ramdine, G., Fichet, D., Louis, M., Lemoine, S., 2012. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediment and oysters (*Crassostrea rhizophorae*) from mangrove of Guadeloupe: Levels, bioavailability, and effects. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 79, 80–89.
doi:10.1016/j.ecoenv.2011.12.005
- Roussel Erwan, Ducombe Marc, et Gabrié Catherine, “Les mangroves de l’outre-mer français - Ecosystèmes associés aux récifs coralliens,” Documentation Ifreco, consulté le 26 juin 2015, <http://ifreco-doc.fr/items/show/1481>, n.d.
- Schaffelke, B., Mellors, J., Duke, N.C., 2005. Water quality in the Great Barrier Reef region: responses of mangrove, seagrass and macroalgal communities. *Marine Pollution Bulletin* 51, 279–296.
doi:10.1016/j.marpolbul.2004.10.025
- Skov, M., Hartnoll, R., 2002. Paradoxical selective feeding on a low-nutrient diet: why do mangrove crabs eat leaves? *Oecologia* 131, 1–7. doi:10.1007/s00442-001-0847-7
- Spalding, M., 2010. *World atlas of mangroves*. Routledge.
- Vaslet, A., Bouchon-Navaro, M., Louis, M., Bouchon, C., 2008. Potential Effect of Mangrove Regression for Fish Species of Commercial Interest in Guadeloupe. *Proceedings of the 61st Gulf and Caribbean Fisheries Institute*.
- Virly, S., 2007. Typologies et biodiversité des mangroves de Nouvelle-Calédonie, *Cartographie des mangroves*. Nouméa, Nouvelle Calédonie.

- Wickramasinghe, S., Borin, M., Kotagama, S.W., Cochard, R., Anceno, A.J., Shipin, O.V., 2009. Multi-functional pollution mitigation in a rehabilitated mangrove conservation area. *Ecological Engineering* 35, 898–907. doi:10.1016/j.ecoleng.2008.12.021
- Yim, M., Tam, N.F., 1999. Effects of Wastewater-borne Heavy Metals on Mangrove Plants and Soil Microbial Activities. *Marine Pollution Bulletin* 39, 179–186. doi:10.1016/S0025-326X(99)00067-3
- Zhang, Z.-W., Xu, X.-R., Sun, Y.-X., Yu, S., Chen, Y.-S., Peng, J.-X., 2014. Heavy metal and organic contaminants in mangrove ecosystems of China: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 21, 11938–11950. doi:10.1007/s11356-014-3100-8