Evaluation rapide des perturbations anthropiques: cas de l'enrichissement en nutriments en milieux côtiers

Eric Goberville[1,2], Grégory Beaugrand[1], Benoit Sautour[2], Paul Tréguer[3]

(1) Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, UMR 8187 CNRS-Univ Lille 1-ULCO, Université du Littoral Côte d'Opale, 32 av Foch, 62930 Wimereux
(2) Laboratoire Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux, UMR 5805 CNRS-Université de Bordeaux 1, 33120 Arcachon
(3) Institut Universitaire Européen de la Mer UMS CNRS 3113, Université Européenne de Bretagne, Technopôle Brest-Iroise, Place Nicolas Copernic, 29280 Plouzané
Mail : e.goberville@epoc.u-bordeaux1.fr

Résumé

Alors que la connaissance des systèmes naturels a considérablement augmentée au cours des dernières décennies, la capacité de mesurer et modéliser ces systèmes reste limitée. Afin de répondre à cette problématique, nous proposons ici une nouvelle procédure de détection instantanée et de quantification des perturbations anthropiques potentielles, à travers l'exemple d'un suivi de l'enrichissement côtier en nutriments.

Mots clés : suivi à long-terme; état de référence relatif; indicateurs anthropiques, enrichissement en nutriments

Early detection and quantification of anthropogenic perturbations in coastal systems

Abstract

While the knowledge on natural systems has improved markedly over the last few decades, the ability to measure and model them remains limited. In order to deal with this conundrum, we propose here a new procedure to early detect and evaluate perturbations by monitoring the phenomenon of anthropogenic nutrient enrichment in coastal systems.

Key words: long-term monitoring; relative reference state; anthropogenic indices; nutrient over-enrichment

Introduction

La majorité de la communauté scientifique s'accorde aujourd'hui pour dire que les activités anthropiques ont, et auront, des conséquences sur le fonctionnement de l'ensemble des systèmes de la planète (IPCC 2007). Presque tous ces systèmes ont déjà subi d'importantes transformations, changeant plus rapidement au cours de la deuxième moitié du XX^{e} siècle qu'à n'importe quelle autre période de l'histoire de l'humanité (IPCC 2007). Parmi ces systèmes, les zones côtières, d'une richesse biologique incomparable (Constanza et al. 1997), sont soumises à de fortes pressions anthropiques (e.g. flux migratoire, industrialisation, tourisme; Kremer et al. 2005).

Ces interventions humaines (e.g. barrages, bétonnage du littoral, transport maritime) impactent les systèmes et la variabilité naturelle des cycles de la matière à différentes échelles de temps et d'espace (Dobson et al. 1997). Entre 1960 et 2000, près de 50% des écosystèmes terrestres ont été transformés par l'homme en terres agricoles, modifiant les écosystèmes d'eau douce et perturbant l'activité des bassins versants (Conley 2000, Milliman et al. 2008). La dynamique naturelle des éléments nutritifs en a été fortement altérée (Vitousek et al. 1997), augmentant les risques de perturbations des milieux littoraux (e.g. les proliférations algales, Anderson et al. 2002; risques d'hypoxie voire d'anoxie des milieux, Diaz 2001).

Cette accumulation des altérations à l'échelle globale, a conduit les scientifiques et les décideurs à encourager le développement de programmes de gestion adaptés (Kremer et al. 2005, IPCC 2007). Afin de mesurer les changements potentiels et caractériser les différents forçages, la mise en place de suivis à long-terme et la création d'indicateurs de l'état des systèmes se sont imposées comme une nécessité (Balmford et al. 2003). Cependant, bien que les indicateurs actuels donnent un aperçu de l'état et de la dynamique de l'environnement (Niemeijer 2002), caractériser précisément les rôles respectifs de la variabilité naturelle et de l'influence anthropique reste un vrai challenge (Goberville et al. 2011).

Dans le cadre de cette problématique, notre étude propose une nouvelle procédure numérique permettant de (1) s'affranchir de la variabilité climatique naturelle, (2) définir des états de référence relatifs, (3) quantifier l'intensité d'une perturbation potentielle. Par l'approche comparative de trois milieux suivis par le SOMLIT, de nouveaux indicateurs de

l'enrichissement anthropique en nutriments sont également présentés.

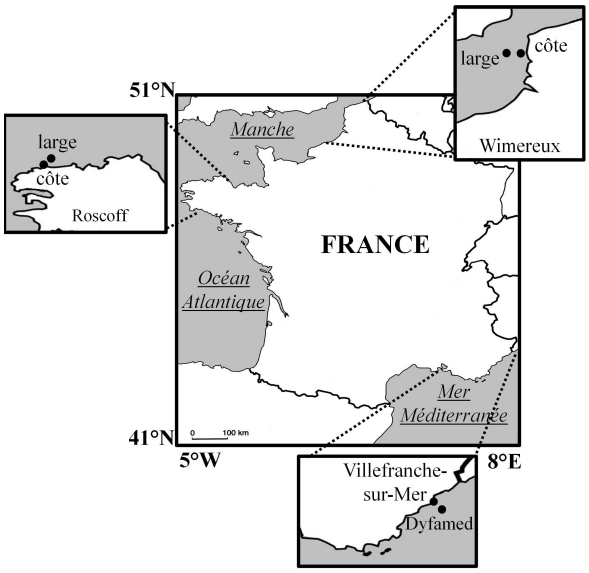

Figure 1 : Localisation des sites côte et large de chaque environnement examiné dans cette étude.

Données environnementales

Nos analyses sont basées sur les données acquises dans le cadre d'un réseau national labellisé par l'INSU[1] (Institut National des Sciences de l'Univers), le programme SOMLIT[2] (Service d'Observation du Milieu LIToral), qui coordonne le suivi à long-terme du milieu littoral français depuis 1997.

Sur les huit stations suivies par le SOMLIT, trois sites ont été sélectionnés pour l'existence de points de prélèvement en côtier et au large (Figure 1). Néanmoins, comme dans le cadre de ce suivi seuls les sites de Roscoff et Wimereux présentent ces conditions, les données acquises par le programme DYFAMED[3] (Dynamique des Flux Atmosphériques en MEDiterranée) ont également été utilisées pour le point au large de Villefranche-sur-Mer. Géographiquement proche de la station de Villefranche-sur-Mer (Figure 1), cette station d'échantillonnage est considérée comme sans influence marquée des eaux continentales et est donc peu impactée par les activités humaines (Marty & Chiavérini 2002).

Quatre paramètres ont été sélectionnés: les températures de surface (SST), les concentrations en silicates (Si), en nitrates (N) et en phosphates (P). Les SST ont été choisies car elles témoignent d'une influence importante du climat sur les systèmes physiques, chimiques et biologiques (Cloern 1996). Les Si, quant à eux, permettent d'évaluer les apports depuis le continent. De plus, ils ne sont pas directement influencés par les activités humaines, contrairement aux concentrations en N et P (Muylaert et al. 2009) qui témoignent, de manière pertinente, de l'enrichissement en nutriments, résultant d'apports anthropiques (Cloern 2001, Ludwig et al. 2009).

[1] http://www.insu.cnrs.fr/

[2] http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr/fr/

[3] http://www.obs-vlfr.fr/sodyf/

Méthodes

Création des indices anthropiques

De nombreuses études ont montré l'existence d'interactions entre le climat et les activités humaines (e.g. Cloern 2001, Goberville et al. 2011). L'enrichissement en nutriment des milieux côtiers peut être modulé par le climat: alors que les précipitations entrainent une augmentation de l'enrichissement, une élévation des SST (témoin de l'activité des compartiments biologiques; Valiela 1995) coïncide avec une diminution du phénomène (Goberville et al. 2011). En se focalisant sur les concentrations en N et P, notre procédure permet la création d'indices de concentrations anthropiques, après soustraction du signal climatique naturel.

Pour soustraire l'effet du climat, les indices anthropiques sont créés en calculant les résidus en N et P après l'application de régressions linéaires multiples (RLMs). Pour chacun des trois sites d'étude, deux RLMs sont appliquées, avec les N (1ère RLM) et les P (2ème RLM) comme "variables à expliquer", et les SST et les Si en "variables explicatives", le modèle général étant le suivant (Sokal & Rohlf 1995):

$$\hat{Y}=a+b.x_1+c.x_2 \qquad (1)$$

$\hat{Y}$ (prédiction du model, i.e. concentrations en N ou P) étant fonction des variables explicatives x_1(SST) et x_2 (Si), *a* l'intercept, b et c les coefficients de régression partielle. Pour évaluer l'influence de chaque variable sur les concentrations en N et P, les coefficients de régression partielle sont examinés. Le coefficient de détermination multiple R^2 est testé par une analyse de variance (Sokal & Rohlf 1995) et la significativité de l'ajout de chaque variable dans la régression est observée (Legendre & Legendre 1998). Les résidus sont obtenus en calculant la différence entre la valeur observée et la valeur prédite pour une observation donnée de la série et ce, pour chaque station. Au total, six RLMs sont appliquées et douze séries temporelles de

concentrations anthropogéniques en N et P sont obtenues ([2 paramètres x 3 environnements] x large et côte).

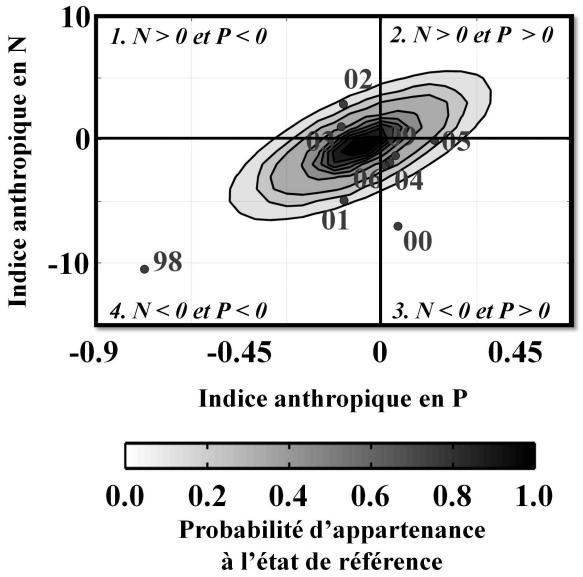

Figure 2 : Cartographie de l'état de référence relatif (large) et superposition des observations côte. Exemple de Wimereux pour le mois de janvier. Différents cas de perturbations, en fonction des indices anthropiques en nitrates et phosphates, sont examinés (cas 1 à 4, voir Méthodes).

Création des états de référence relatifs

Caractériser l'état d'un système, détecter les anomalies et évaluer l'intensité des perturbations, tout en tenant compte de la variabilité naturelle, sous-entend comparer ce système à une situation non perturbée (Goberville et al. 2011). Ce type d'information n'étant que rarement disponible, notre réflexion s'est portée sur l'élaboration d'une nouvelle procédure permettant la création d'états de référence relatifs des systèmes (i.e. état non affecté par les activités humaines, Goberville et al. 2011): pour un même environnement, le site le plus côtier (potentiellement le plus affecté par l'influence humaine depuis le continent) est comparé à un site plus au large (l'état de référence relatif). Au total, 36 matrices de référence sont définies pour chaque mois et chaque environnement (12 mois x 3 environnement = 36 matrices références). Pour quantifier l'écart entre l'observation testée (en côte) et l'état de référence relatif (au large), nous avons appliqué une technique basée sur celle récemment proposée par Beaugrand et al. (2011) et appliquée par Goberville et al. (2011) qui permet de calculer les probabilités qu'une observation appartienne à un état de référence relatif en se basant sur (1) la distance généralisée de Mahalanobis et (2) une version simplifiée de la procédure de permutation multiréponses (test MRPP, Beaugrand & Helaouët 2008). Pour une description mathématique détaillée de la procédure voir Beaugrand et al. (2011) et Goberville et al. (2011).

Variabilité de l'enrichissement anthropique en nutriments

Les indicateurs proposés permettent d'évaluer l'état des trois environnements côtiers, en se basant sur la détection et la quantification des anomalies. La distance *d* entre une observation donnée et le centre du maximum de probabilité, caractérisant l'état de référence relatif, est calculée ainsi:

$$d = 1 - p \qquad (2)$$

où *p* est la probabilité que l'observation considérée appartienne à l'état de référence relatif. La distance d reflète l'enrichissement anthropique du site côtier.

L'espace euclidien en 2 dimensions, centré en (0, 0) est défini tel que x représente les concentrations en P anthropique et y les concentrations en N anthropique (Figure 2).

En fonction des concentrations anthropiques en N et P de l'observation considérée, quatre cas sont définis. Le 1er cas est caractérisé par un indice de concentration en N > 0 et un indice de concentration en P < 0 (Figure 2, cas 1). Le 2ème cas est caractérisé par un indice de concentration en N > 0 et un indice de concentration en P > 0 (Figure 2, cas 2). Le 3ème cas est caractérisé par un indice de concentration en N < 0 et un indice de concentration en P < 0 (Figure 2, cas 3). Le 4ème cas est caractérisé par un indice de concentration en N < 0 et un indice de concentration en P < 0 (Figure 2, cas 4).

Une valeur proche de 0 indique alors une faible perturbation, tandis qu'une valeur proche de 1 correspond à une forte anomalie (i.e. l'observation est fortement éloignée de l'état de référence relatif). Un nouvel indice de l'enrichissement en N et P, résumant les cas 1 à 3, est ainsi proposé (Figure 3). Pour chaque environnement, la représentation en diagramme en contour, avec les mois en fonction des années, permet ainsi d'étudier la variabilité temporelle de l'enrichissement en N et P (Figure 3).

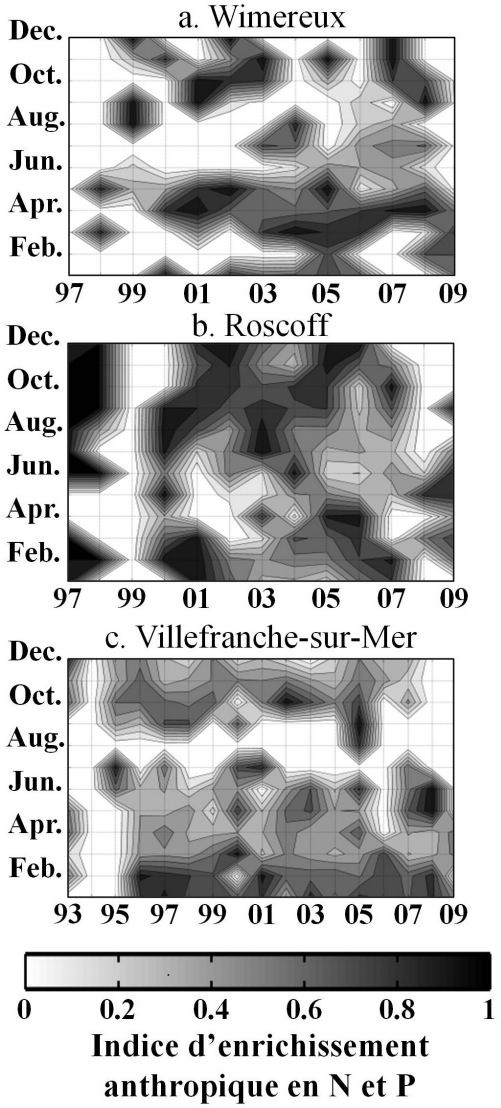

Figure 3 : Cartographie de l'indice d'enrichissement en nitrates $^{et}/_{ou}$ phosphates pour: Wimereux (a), Roscoff (b) et Villefranche-sur-Mer (c). Cet indice correspond aux cas 1, 2 et 3 (voir Figure 2 et Méthodes).

Résultats

L'étude des séries temporelles des résidus en N et P, issus des régressions linéaires multiples (non représentées), a montré que la part de variabilité climatique naturelle a été soustraite, permettant de discriminer les apports liés aux activités humaines. Cette approche a rendu possible la création d'indices de concentrations anthropiques en N et P, un résidu positif attestant d'un enrichissement en nutriments depuis le continent vers le milieu côtier. Ces indices de concentrations anthropiques en N et P ont ensuite été utilisés afin de caractériser l'état d'anthropisation des trois milieux côtiers suivis (i.e. Wimereux, Roscoff et Villefranche-sur-Mer).

Pour chaque milieu suivi, notre nouvelle procédure numérique a permis la création d'états de référence relatifs basés sur les indices de concentrations anthropiques en N et P (Figure 2). Les perturbations potentielles ont été examinées en comparant les indices anthropiques déterminés en côtier, aux états de référence relatifs (large). Pour un mois donnée d'une année choisie, plus les indices anthropiques au point de prélèvement côtier étaient similaires à l'état de référence du large (symbolisé par un centroïde de probabilité), plus la probabilité obtenue était forte (tend vers 1, e.g. 2003 voir Figure 2). Plus les indices anthropiques en côtier étaient éloignés de l'état de référence, plus la probabilité obtenue était faible (tend vers 0, e.g. 1998 voir Figure 2).

L'indice d'enrichissement en N et P, déterminé à partir des cas 1 à 3 a montré une nette augmentation des concentrations en nutriments entre mars et juin à Wimereux, causée par les apports en N et en P (Figure 3a). Pour le reste de la période, et depuis 2003, les perturbations sont essentiellement causées par une augmentation des concentrations en P (étude du cas 3). A Roscoff, l'enrichissement est plus étendu temporellement et est principalement détecté entre l'été et l'hiver (Figure 3b). Une diminution de la perturbation en N et P est également observable après 2004. Contrairement aux 2 sites situés en Manche, où le signal anthropique est clairement mis en évidence, l'enrichissement en N et P à Villefranche-sur-Mer semble toujours modulé par la variabilité climatique saisonnière, et ce, malgré l'utilisation des résidus issus des modèles de régression linéaire (Figure 3c).

Discussion et conclusion

En milieu côtier, l'enrichissement en nutriments provoque une altération potentielle des cycles biogéochimiques, résultante des forçages anthropiques (e.g. Cloern 2001, Borja et al. 2008, Goberville et al. 2011). Alors que la littérature fait état d'apports disproportionnés en nutriments depuis le continent, avec notamment des augmentations de l'ordre de 6 à 50 des N, et de 18 à 180 des P en Mer Baltique ou dans la Baie de Chesapeake (Conley 2000), cette quantification reste le fruit d'une comparaison à une situation naturelle hypothétique, considérée comme non perturbée par l'homme (Billen & Garnier 2007). Ainsi, l'absence de données historiques rend complexe la comparaison avec l'état actuel des systèmes (Nixon 1995, Conley 2000). C'est donc dans le but de répondre aux attentes scientifiques

et sociétales de gestion et de préservation des systèmes naturels que nous proposons un nouvel indicateur de quantification de l'enrichissement anthropique en nutriments.

En tenant compte de l'effet de la variabilité climatique sur la dynamique des concentrations en nutriments (Goberville et al. 2011) et en retirant cet impact d'origine naturelle, nous nous sommes focalisés sur la part anthropique des concentrations en N et P. Deux paramètres sont pris en compte pour chaque nutriment : (1) les SST, témoin de l'influence du climat sur les systèmes physiques, chimiques et biologiques (Cloern 1996) et (2) les Si, attestant des apports naturels depuis le continent vers l'océan et non influencées par les activités humaines (Muylaert et al. 2009). Les sites côte et large d'un même environnement sont comparés pour prendre en considération les propriétés naturelles des cycles biogéochimiques en milieu côtier. L'application des modèles de régressions linéaires multiples permet la création d'indicateurs de concentrations anthropiques en N et P.

Alors que les trois environnements étudiés montrent une variabilité temporelle similaire des concentrations en nutriments (i.e. un comportement conservatif pendant l'hiver; Gentilhomme & Lizon 1997; une consommation par le compartiment biologique pendant la période estivale; Rippeth & Jones 1997), les concentrations varient sensiblement entre les sites. Les indicateurs de concentrations anthropiques en N et P, déterminés pour les trois environnements suivis, confirment l'existence de deux fonctionnements distincts, avec un système au nord (mésotrophe à tendance eutrophe) et un système au sud (oligotrophe). Entre les deux sites localisés en Manche et le site de Villefranche-sur-Mer, les concentrations en N varient d'un facteur 3 à 6 et celles en P d'un facteur 2 à 4, phénomène imputable aux caractéristiques locales (Billen & Garnier 2007). Les stations du système Manche sont clairement impactées par les apports des rivières proches des sites de prélèvement, mais également par des arrivées massives en nutriments depuis l'Océan Atlantique Nord (Jickells 1998). Dans ce système, la croissance phytoplanctonique est limitée par la disponibilité en lumière, avec pour conséquence une amplification du comportement conservatif des nutriments au cours de la période hivernale (Walne 1993). Ces observations sont confirmées par les fortes corrélations existant entre les concentrations en N ou P et les concentrations en Si ($r = -0.759$, $p<0.001$ à Wimereux avec les N) ou la température ($r = -0.748$, $p<0.001$ à Wimereux avec les N). A l'inverse, le site de Villefranche-sur-Mer n'est pas limité par la disponibilité en lumière (Guizien et al. 2007) et ce sont les forçages hydro-climatiques, déjà identifiés dans la littérature (e.g. Font et al. 1988), qui jouent un rôle prépondérant sur la disponibilité en nutriments, pouvant engendrer une limitation en N et en P (Guizien et al. 2007).

A Villefranche-sur-Mer, la variabilité saisonnière des indicateurs anthropiques est toujours visible. La persistance de ce signal, malgré la soustraction de la composante climatique, montre que l'enrichissement anthropique en nutriments du système côtier méditerranéen n'est pas majoritairement modulé par l'action de la température et de l'influence continentale. Comme le confirment de nombreux travaux, l'importance des apports atmosphériques en P (Krom et al. 1991) ou en N (Kerhervé et al. 2001) complexifient fortement les cycles biogéochimiques en milieu méditerranéen.

A l'inverse, l'influence climatique exercée sur les sites de Wimereux et Roscoff est totalement soustraite, permettant de ne caractériser que l'enrichissement en nutriments lié aux activités humaines. Bien que les masses d'eaux présentent des caractéristiques similaires, avec notamment une tendance à l'eutrophie et des apports marqués en nutriments depuis l'océan et les continents (Jickells 1998, Vermaat et al. 2008), les indicateurs de l'enrichissement en nutriments révèlent l'existence d'un impact anthropique distinct entre les deux sites.

Cette disparité s'explique, une fois de plus, par les particularités locales des sites. A Wimereux l'enrichissement lié aux activités humaines survient principalement entre Mars et Juin, phénomène confirmé par une concentration de l'activité agricole sur quelques mois de l'année[4]. A Roscoff, les indicateurs attestent d'apports continus en N et P tout au long de la période étudiée, témoignant d'une utilisation intense et constante de fertilisants agricoles (riches en N et P; Wafar 1981, Desalos 1999). De plus, ce phénomène est amplifié par la proximité de l'embouchure de la Penzé (0,5 mille), qui engendre d'importants apports au niveau du site de prélèvement (Dussauze et Ménesguen 2008) et rend surement le signal anthropique plus intense qu'à Wimereux, où l'éloignement du site large

[4] Source: Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Fôret: http://www.draf.nord-pas-de-calais.agriculture.gouv.fr/

(3,5 milles de la côte) contribue à atténuer l'intensité d'une perturbation potentielle.

Remerciements

Nous remercions l'Institut national des sciences de l'Univers et toute l'équipe SOMLIT: techniciens, chercheurs, capitaines et équipages qui ont contribué à la collecte des données depuis 1997. Merci également au Dr. L. Coppola et au service d'observation Dyfamed pour la mise à disposition des données.

Références bibliographiques

Anderson D.M., Glibert P.M. & Burkholder J.M., 2002. Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries Coasts*, 25 :704-726.

Balmford A., Green R.E. & Jenkins M., 2003. Measuring the changing state of nature. *Trends Ecol. Evol.,* 18 :326-330.

Beaugrand G. & Helaouët P., 2008. Simple procedures to assess and compare the ecological niche of species. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 363 :29-37.

Beaugrand G., Lenoir S., Ibanez F. & Manté C., 2011. A new model to assess the probability of occurrence of a species based on presence-only data. . *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 424 :175-190.

Billen G. & Garnier J., 2007. River basin nutrient delivery to the coastal sea: Assessing its potential to sustain new production of non-siliceous algae. *Mar. Chem.*, 106 :148-160.

Borja A., Bricker S.B., Dauer D.M., Demetriades N.T., Ferreira J.G., Forbes A.T., Hutchings P., Jia X., Kenchington R., Marques J.C. & Zhu C. 2008. Overview of integrative tools and methods in assessing ecological integrity in estuarine and coastal systems worldwide. *Mar. Poll. Bull.* 56 :1519-1537.

Cloern J.E., 1996. Phytoplankton bloom dynamics in coastal ecosystems: A review with some general lessons from sustained investigation of San Francisco Bay, California. *Rev. Geophys.*, 34 :127-168.

Cloern J.E., 2001. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 210 :223-253.

Conley D.J., 2000. Biogeochemical nutrient cycles and nutrient management strategies. *Hydrobiologia*, 410 :87-96.

Constanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R., Paruelo J., Raskin R., Sutton P. & van den Belt M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387 :253-260.

Desalos D., 1999. Alexandrium minutum dans les estuaires nord-finistériens: Eaux colorées et toxicité des coquillages en relation avec quelques facteurs naturels, Ifremer (ed.), France.

Diaz R.J., 2001. Overview of hypoxia around the world. *J. Environ. Qual.*, 30 :275-281.

Dobson A.P., Bradshaw A.D. & Baker A.J.M., 1997. Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology. *Science*, 277 :515-522.

Dussauze, M. & Ménesguen, A., 2008. *Simulation de l'effet sur l'eutrophisation côtière bretonne de 3 scénarios de réduction des teneurs en nitrate et phosphate de chaque bassin versant breton et de la Loire*. Ifremer (ed.), France, 160 p.

Font J., Salat J. & Tintoré J., 1988. Permanent features of the circulation in the Catalan Sea. *Oceanol Acta*, 9 :51–57.

Gentilhomme V. & Lizon F., 1997. Seasonal cycle of nitrogen and phytoplankton biomass in a well-mixed coastal system (Eastern English Channel). *Hydrobiologia*, 361 :191-199.

Goberville E., Beaugrand G., Sautour B. & Tréguer P., 2011. Evaluation of coastal perturbations: a new mathematical procedure to detect changes in the reference state of coastal systems. *Ecol. Indic.*, 11 :1290-1300.

Guizien K., Charles F., Lantoine F. & Naudin J., 2007. Nearshore dynamics of nutrients and chlorophyll during Mediterranean-type flash-floods. *Aquat. Living Resour.*, 20 :3-14.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report, 2007. Climate change 2007: Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

Jickells T.D., 1998. Nutrient Biogeochemistry of the Coastal Zone. *Science*; 281 :217-222.

Kerhervé P., Minagawa M., Heussner S. & Monaco A., 2001. Stable isotopes (13C/12C and 15N/14N) in settling organic matter of the northwestern Mediterranean Sea: biogeochemical implications. *Oceanol Acta*, 24 :77-85.

Kremer H.H., Le Tissier M.D.A., Burbridge P.R., Talaue-McManus L., Rabalais N.N., Parslow J., Crossland C.J. & Young B., 2005. Land–ocean interactions in the coastal zone: science plan and implementation strategy. IGBP Report 51/IHDP Report 18. IGBP Secretariat, Stockholm.

Krom M.D., Kress N., Brenner S. & Gordon L.I. 1991. Phosphorus limitation of primary productivity in the eastern Mediterranean Sea. *Limnol. Oceanogr.*, 36 :424-432.

Legendre L. & Legendre P., 1998. Numerical ecology, 2nd edition. English. Elsevier (ed.), Amsterdam, 853 p.

Ludwig W., Dumont E., Meybeck M. & Heusser S, 2009. River discharges of water and nutrients to the Mediterranean and Black Sea: Major drivers for ecosystem changes during past and future decades? *Prog. Oceanogr.*, 80 :199-217.

Marty J.C. & Chiavérini J., 2002. Seasonal and interannual variations in phytoplankton

production at DYFAMED time-series station, northwestern Mediterranean Sea. *Deep Sea Res. Part II*, 49 :2017-2030.

Milliman J.D., Farnsworth K.L., Jones P.D., Xu K.H. & Smith L.C., 2008. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951–2000. *Glob. Planet. Change*, 62 :187–194.

Muylaert K., Sanchez-Pérez J.M., Teissier S., Sauvage S., Dauta A. & Vervier P., 2009. Eutrophication and its effect on dissolved Si concentrations in the Garonne River (France). *J. Limnol.*, 68: 368-374.

Niemeijer D., 2002. Developing indicators for environmental policy: data-driven and theory-driven approaches examined by example. *Environ. Sci. Policy*, 5 :91-103.

Nixon S., 1995. Coastal marine eutrophication: A definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*, 41 :199-219.

Rippeth T.P. & Jones K.J., 1997. The seasonal cycle of nitrate in the Clyde Sea. *J. Marine Syst.*, 12 :299-310.

Sokal R.R. & Rohlf F.J., 1995. Biometry. W.H. Freeman and Compagny, New York.

Valiela I., 1995. Marine Ecological Processes. 2nd edition. Springer-Verlag (ed.), New York, USA, 546 p.

Vermaat J.E., McQuatters-Gollop A., Eleveld M.A. & Gilbert A.J., 2008. Past, present and future nutrient loads of the North Sea: Causes and consequences. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 80 :53-59.

Vitousek P.M., Aber J.D., Howarth R.W., Likens G.E., Matson P.A., Schindler D.W., Schlesinger W.H. & Tilman D.G., 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecol. Appli*, 7 :737-750.

Wafar M.V.M., 1981. Nutrients, primary production and dissolved organic matter in well-mixed temperate coastal waters (Bay of Morlaix - western English Channel). PhD. Thesis, University of Paris, France.

Walne A.W., 1993. A modelling study of nitrogen cycling in the Firth of Clyde. University of Wales.