



HAL
open science

Evolution décennale des zones côtières

Eric Goberville

► **To cite this version:**

Eric Goberville. Evolution décennale des zones côtières : Forçages climatiques / Forçages anthropiques. Milieux et Changements globaux. Université Bordeaux 1, 2010. Français. NNT: . tel-01135197

HAL Id: tel-01135197

<https://theses.hal.science/tel-01135197>

Submitted on 25 Mar 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre :



THÈSE

PRÉSENTÉE A

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

École Doctorale des Sciences du Vivant – Géosciences – Sciences de l'Environnement

Par Eric GOBERVILLE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : Océanographie

Evolution décennale des zones côtières

Forçages climatiques/Forçages anthropiques

Soutenue le :

Après avis de :

M. BLAIN, Stéphane	Professeur Université Paris VI	Rapporteur
M. CLOERN, James E.	Directeur de Recherche Établissement	Rapporteur

Devant la commission d'examen formée de :

M. BEAUGRAND, Grégory	Chargé de Recherche CNRS Université Lille1	Directeur de thèse
M. BERTRAND, Philippe	Directeur de Recherche Université Bordeaux 1	Examineur
M. LABAT, Jean-Philippe	Maître de Conférences Université Paris VI	Examineur
M. MORIN, Pascal	Chargé de Recherche CNRS Université de Bretagne	Examineur
M. SAUTOUR, Benoît	Professeur Université Bordeaux 1	Directeur de thèse
M. TREGUER, Paul	Professeur Emérite Université de Bretagne	Directeur de thèse
M. LUCZAK, Christophe	Maître de Conférences, Université d'Artois	Invité

N° d'ordre :



THÈSE

PRÉSENTÉE A

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

École Doctorale des Sciences du Vivant – Géosciences – Sciences de l'Environnement

Par Eric GOBERVILLE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : Océanographie

Evolution décennale des zones côtières

Forçages climatiques/Forçages anthropiques

Soutenue le :

Après avis de :

M. BLAIN, Stéphane

Professeur Université Paris VI

Rapporteur

M. CLOERN, James E.

Directeur de Recherche Établissement

Rapporteur

Devant la commission d'examen formée de :

M. BEAUGRAND, Grégory

Chargé de Recherche CNRS Université Lille1

Directeur de thèse

M. BERTRAND, Philippe

Directeur de Recherche Université Bordeaux 1

Examinateur

M. LABAT, Jean-Philippe

Maître de Conférences Université Paris VI

Examinateur

M. MORIN, Pascal

Chargé de Recherche CNRS Université de Bretagne

Examinateur

M. SAUTOUR, Benoît

Professeur Université Bordeaux 1

Directeur de thèse

M. TREGUER, Paul

Professeur Emérite Université de Bretagne

Directeur de thèse

M. LUCZAK, Christophe

Maître de Conférences, Université d'Artois

Invité

*Je dédie cette thèse à ma mère et à mon père, qui m'ont inculqué les valeurs indispensables pour être quelqu'un de bien, me pousser à me dépasser, et grâce à qui j'ai toutes les cartes en mains pour réussir dans la vie...
je sens, chaque jour qui passe, la présence de vos deux regards qui veillent, depuis là haut, sur votre fils...*

"Prends ton envol..."

Remerciements

Que cet exercice des remerciements est difficile !! Lorsque l'on débute ce long marathon qu'est la thèse, les premières phrases qui viennent à l'esprit sont celles où l'on pourra enfin remercier toutes les personnes ayant, de près ou de loin, assisté à ces trois années de dur labeur... mais le jour où l'on y est enfin confronté, la crainte de la page blanche s'installe... si seulement je pouvais repenser aujourd'hui à toutes les belles proses que je m'étais promis d'écrire ici, lorsque sous ma douche matinale, l'inspiration me venait...

Je commencerai donc de manière très formelle, même si cela n'enlève en rien toute la sincérité de mes propos.

Je tiens tout d'abord à remercier le Professeur Benoît Sautour, initiateur et directeur de cette thèse, qui m'a accordé sa confiance dès le début du projet. Je vous remercie de m'avoir offert la possibilité, dès le Master 2, de découvrir le monde de la recherche, m'avoir donné les moyens matériels de travailler dans de bonnes conditions et surtout m'avoir fait partager votre rigueur scientifique et surtout m'avoir poussé à m'ouvrir davantage à la communauté scientifique (et éviter cette tendance à l'isolement lorsque l'on fonce, tête baissée, dans son sujet...). Un grand merci également pour vos critiques constructives qui ont sans aucun doute contribué à améliorer ce travail de recherche.

Ensuite le Professeur Paul Tréguer. Ce fut un réel plaisir d'avoir pu vous compter parmi mes co-encadrants (même si trop de kilomètres nous ont séparés). Pouvoir échanger avec un "affreux déterministe" comme vous (*sic*, je ne me le serai jamais permis de moi-même !!) a été une vraie chance pour un jeune étudiant (ou apprenti chercheur comme j'aime bien souvent dire...), et je souhaite, si la chance m'est offerte de poursuivre dans la recherche, posséder un jour, ne serait-ce que la partie émergée de votre culture scientifique.

Enfin, je souhaite remercier le Docteur Grégory Beaugrand d'avoir réussi à me supporter au quotidien au cours de ces 3 années. Ma rencontre avec vous a été synonyme d'un profond changement dans ma conception de la recherche. Poussé par votre énergie sans limite, votre "don de soi", votre amour du travail, votre touchante humanité et une disponibilité de tous les instants (soirs, week-end, vacances... et j'en passe...), vous m'avez encouragé à essayer de donner, toujours, le meilleur de moi-même. Qu'il fut agréable de discuter avec vous de sujets aussi variés que la science (le plus souvent), le foot (vous êtes

sans conteste le meilleur joueur de l'équipe de la station marine de Wimereux), l'actualité, la politique, le jardinage,.... Au-delà d'un encadrant de thèse, j'ai trouvé en vous un "Maître Jedi" de la Science, et je souhaite n'avoir pas été un trop mauvais "Padawan"... en quelques mots plus brefs : Merci pour tout !

Je voudrais également remercier Stéphane Blain et Jim Cloern pour avoir accepté la lourde tâche de rapporteur, ainsi que Philippe Bertrand, Jean-Philippe Labat, Christophe Luczak (en "*guest star*") et Pascal Morin pour avoir accepté de faire partie de ce jury de thèse. Ainsi que Eva Bucciarelli, Arnaud Caillo, Jacques Guillou, Laure Mousseau, Ornella Passafiume, Patrick Raimbault et Renaud Vuillemin pour leurs précieux et judicieux conseils au cours de cette thèse, avec une mention très spéciale à Nicolas Savoye et ses explications, d'une clarté implacable, des mystères de la biogéochimie.

Merci à Jean-Marie Dewarumez et Sébastien Lefèvre directeurs de la station marine, et François Schmitt, directeur du LOG, de m'avoir accueilli au sein de la station marine de Wimereux.

Ce travail repose en majeure partie sur les données du programme SOMLIT acquises depuis 1997 par un nombre incalculable de membres de la communauté scientifique. Sans ce "travail de fourmis" de tous les techniciens, équipages, responsables et coordinateurs scientifiques, étudiants et j'en passe... ce travail n'aurait jamais pu prendre forme.

Si je devais résumer ces 3 ans de thèse, je dirais, sans hésiter, qu'elles constituent une vie à part entière. C'est en tout cas de cette façon que je l'ai ressentie.

La première année : une vraie naissance à la pratique quotidienne de la science, la découverte d'un nouveau monde, la nécessité d'apprendre à parler (mes balbutiements en langage de programmation m'entraînant dans les profondeurs de la nuit, pour arriver à la conclusion qu'il manquait une virgule...), une éducation à faire...

La deuxième année : l'enfance. Un début de raisonnement logique, les acquis se font plus denses, les actes et les idées sont un peu plus assurés, l'apprentissage de l'écriture (mais pourquoi faut-il absolument écrire en anglais, et pourquoi les traducteurs automatiques sont-ils si mauvais !!!). Mais il manque encore la cohérence nécessaire à une émancipation et heureusement que la bienveillance dirigeante est présente pour "recadrer".

Enfin la troisième année, celle de l'adolescence où l'on se sent parfois trop "âgé" pour recevoir encore des remontrances (scientifiques bien entendu !), mais où l'on est encore bien trop jeune pour "voler de ses propres ailes...". Pourtant, c'est à l'heure du rendu de manuscrit,

la majorité, que l'on s'aperçoit que le chemin de la connaissance est encore long et vaste avant de pouvoir décoller l'étiquette du "chercheur en formation".

Cette école de la vie est émaillée de rencontres, parfois brèves, parfois durables, mais le plus souvent agréables, voire heureuses. J'ai eu la chance de rencontrer des personnes formidables au cours de ces 3 ans et je souhaite vivement que ces amitiés durent encore longtemps.

A tout seigneur, tout honneur, difficile de commencer par quelqu'un d'autre que par mon coloc', collègue, mais avant tout ami : Sylvain, alias 20-20, Big Bro', el Negro, The Black... (trop de surnoms...). Je ne m'amuserai pas à ressortir une ou deux anecdotes dans ces quelques pages de remerciements, surtout que si je devais vraiment parler de tout, le contenu dépasserait amplement celui de ma thèse (par contre elle est où cette bouteille de Whisky ?)... Dans la catégorie coloc' je tiens aussi à remercier Juliette pour tous les moments de délires qui furent une bouffé d'oxygène après des journées bien trop chargées, et Maud que j'aurai appris à découvrir au fil du temps (mais quand même, vivre avec 2 bretonnes, c'est dur...). Merci aussi à Gabriel, le Petit, énervant à souhait, mais attachant comme pas deux, partenaire de nombreux épisodes de franches rigolades. Un vrai petit Bro'. Une dédicace à une habitante très spéciale de la coloc' qui refuse toujours de payer sa part de loyer, Pupsy, mais qui par sa seule présence féline, et malgré un caractère plus qu'entier, a su m'apporter un peu (beaucoup) de réconfort ("*C'est clair... !*")... et à Minus, la nouvelle, définitivement, arrivée. On s'attache à ces petites bêtes...

Merci à mes 2 collègues de bureau, qui ont eu le courage de me supporter pendant ces trois années (qu'il est loin le temps du petit sudiste timide qui ne parlait pas...) : Oliv, mon partenaire de chant, une fois la station dépeuplée, ou l'histoire de comment une colocation de bureau peut se transformer en vraie amitié; et Isa qui a bien fait de rappeler que : "O lè gas, c un buwo de wecheche" mais qui a eu la patience de tenir avec deux garçons comme nous, qui a eu la gentillesse de relire mon franglais et de le transformer en anglais et m'a fait profité de son sens scientifique aiguisé.

Ne pouvant me permettre, faute de temps et d'espace, de consacrer un paragraphe à chacun j'espère que les prochains cités ne m'en voudront pas de ne pas développer...mais un très très grand merci, tout d'abord, à ceux qui ont été mes plus proches (et le resteront !) et qui ont réussi à supporter mon "humour", jour après jour : Armonie, mon Mexicaing préféré Benj' (pari barbu, pari perdu...), Christophe (un MCF dans mes amis !), Grégoire (même depuis Amsterdam), Mikaël, Moâna, Sophie "la PDGère d'Oliv" et Stella (je précise que l'ordre est

alphabétique, sinon je sens qu'une Zutkerquoise va râler...). Un grand merci également aux anciens et actuels thésards de la station : Clément, Elo', Gaspard, Isil, Pierre, Sandrine, Sofiene et Sophie, mais également aux membres du personnel de la station : Christine, Josette, Michel et Thierry, qui ont contribué, chacun à leur façon, à la dynamique humaine de la station (et en dehors...) ainsi qu'aux bons moments, fussent-ils brefs, passés en leur compagnie.

Une petite pensée à mes collègues bordelais que j'ai "lâchement" abandonnés, dès le début de cette thèse, pour partir dans le Grand Nord ("*là où les pingouins et les ours polaires vivent*"), mais dont les nouvelles, même parfois trop sporadiques, m'ont toujours fait chaud au cœur : Flora, Gaëlle (tu reviens dans le Nord ?), Mélanie, Nico, Pierre, Thomas, Solange et Sophie. Une mention très spéciale à Nadège (une amitié commencée dans une autre vie, mais qui dure !!) pour toute l'aide et le soutien qu'elle a pu m'apporter dans une période "difficile".

The last but not the least, c'est bien plus qu'un merci que j'adresse à la plus belle rencontre faite durant cette thèse. Merci louloute pour la patience dont tu as su faire preuve, surtout dans les "rares..." moments où j'ai pu râler (si si ça m'arrive...) et où il fallait bien que ça retombe sur quelqu'un, pour avoir su me faire "décrocher" de temps en temps, me rassurer quand j'en avais besoin, et pour avoir consciencieusement chassé la coquille...s'il en reste, c'est de ta faute bien sûr...

*Si tu peux voir détruit l'ouvrage de ta vie
Et, sans dire un seul mot te remettre à bâtir
[...]*

*Si tu sais méditer, observer et connaître,
Sans jamais devenir sceptique ou destructeur,
[...]*

*Si tu peux rencontrer triomphe après défaite
Et recevoir ces deux menteurs d'un même front.
[...]*

Tu seras un homme, mon fils.

(Rudyard Kipling)

Table des matières

Chapitre I

Introduction

I. 1) La variabilité climatique naturelle	2
I. 2) Le réchauffement climatique et les fluctuations thermiques à long terme	6
I. 2. 1) Le contexte de réchauffement climatique	6
I. 2. 2) Les fluctuations thermiques à long terme	8
I. 3) Les répercussions du changement climatique sur les facteurs écologiques abiotiques	10
I. 3. 1) Impacts du changement climatique sur le système hydrologique global	10
I. 3. 1. 1) L'augmentation du niveau de la mer et la perturbation de la circulation thermohaline	10
I. 3. 1. 2) Le dérèglement du cycle hydrique	11
I. 3. 2) Impacts du changement climatique sur les cycles de la matière	11
I. 3. 2. 1) La perturbation des grands cycles biogéochimiques	11
I. 3. 2. 2) L'acidification des océans	12
I. 3. 2. 3) L'amplification des phénomènes d'eutrophisation	13
I. 4) Surveiller les systèmes pour caractériser et appréhender les conséquences du changement climatique	16
I. 4. 1) Postulats pour les suivis à long terme	19
I. 4. 2) Etablir des états de référence	20
I. 4. 3) L'évaluation de l'état des systèmes par les indicateurs environnementaux	21
I. 5) Problématique	23

Chapitre II

Matériels et Méthodes

II. 1) Contexte environnemental de l'étude : la particularité des systèmes littoraux	28
II. 1. 1) Définition historique du milieu littoral	28
II. 1. 2) Des systèmes productifs, anthropisés et vulnérables	29
II. 1. 2. 1) La productivité des systèmes littoraux	29
II. 1. 2. 2) La sensibilité des systèmes littoraux aux forçages	30
II. 1. 2. 3) Des systèmes complexes impliquant des échelles spatio-temporelles multiples.....	31
II. 2) La mise en place du Service d'Observation en Milieu LITtoral	33
II. 2. 1) Les objectifs du programme SOMLIT.....	34
II. 2. 2) La stratégie du SOMLIT	34
II. 2. 2. 1) Les sites de prélèvement.....	36
II. 2. 2. 2) L'acquisition des paramètres	36
II. 2. 2. 3) Les paramètres descripteurs de l'état du littoral français	38
II. 2. 2. 4) Mesures et analyses des paramètres suivis	38
II. 2. 2. 5) Les procédures de "contrôle-qualité" des paramètres	39
II. 2. 2. 6) L'archivage des données	39
II. 3) L'utilisation de données complémentaires	41
II. 3. 1) L'impact du climat sur la variabilité décennale des systèmes côtiers français .	41
II. 3. 1. 1) Les matrices climatiques NCEP/NCAR.....	41
II. 3. 1. 2) Les indices hydro-climatiques à grande échelle.....	42
II. 3. 2) Modulation climatique de la fertilisation anthropique.....	43
II. 3. 2. 1) Quantification de la fertilisation anthropique des systèmes côtiers : construction d'états de référence relatifs	43
II. 3. 2. 2) Evaluation de l'importance des phénomènes hydro-climatiques locaux sur la fertilisation en nutriment	45
II. 3. 2. 2. 1) Les durées d'insolation	45
II. 3. 2. 2. 2) Les débits de rivière	46
II. 3. 3) Procédures et indicateurs d'évaluation de la fertilisation anthropique des systèmes côtiers : Les données de la station DYFAMED	46

II. 4) Les outils méthodologiques	48
II. 4. 1) L'impact du climat sur la variabilité décennale des systèmes côtiers français..	48
II. 4. 1. 1) La variabilité spatio-temporelle décennale du milieu littoral français .	48
II. 4. 1. 1. 1) L'uniformisation des données d'observation du milieu littoral français.....	48
II. 4. 1. 1. 2) La désaisonnalisation des données par application d'une moyenne mobile simple	49
II. 4. 1. 1. 3) L'application de l'ACP à 3 modes	50
II. 4. 1. 2) Etude de l'influence climatique sur la variabilité du milieu littoral français	51
II. 4. 1. 2. 1) L'intensité de liaison entre les variables : les coefficients linéaires de Bravais-Pearson.....	51
II. 4. 1. 2. 2) La prise en compte du décalage temporelle entre les variables : les corrélations avec retard	52
II. 4. 1. 2. 3) La correction pour l'autocorrélation temporelle : l'ajustement du nombre de degrés de liberté.....	53
II. 4. 1. 2. 4) Le problème des tests multiples : la méthode de Hochberg....	54
II. 4. 2) Procédure d'identification d'un état de référence relatif	55
II. 4. 2. 1) Démarche de l'identification des états de références relatifs	55
II. 4. 2. 2) Description et adaptation du modèle de niche écologique : Non-Parametric Probabilistic Ecological Niche model	56
II. 4. 2. 2. 1) Principe de la procédure de permutation multiréponses	56
II. 4. 2. 2. 2) Calcul de la distance moyenne multivariée entre l'observation à tester et le groupe d'observations	57
II. 4. 2. 2. 2. 1) Préparation des données	57
II. 4. 2. 2. 2. 2) Calcul de la distance moyenne multivariée entre l'observation à tester et le groupe d'observations	57
II. 4. 2. 2. 2. 3) Calcul de la probabilité que l'observation appartienne à la matrice de référence	58
II. 4. 2. 5) La synthèse de la quantification de la sur-fertilisation côtière : le diagramme en box-plot	59
II. 4. 3) Création d'indices de concentrations anthropiques en nitrates et phosphates ...	60
II. 4. 3. 1) Définition de la régression linéaire multiple	60
II. 4. 3. 2) Calcul des coefficients de régression partielle	62
II. 4. 3. 3) Calcul du coefficient de détermination multiple R^2	63
II. 4. 3. 4) Test de significativité du modèle de régression	63

Chapitre IV

Modulation climatique de la fertilisation anthropique

IV. 1) Avant-propos	105
IV. 2) Publication : Climate modulation of the anthropogenic fertilisation.....	108
IV. 2. 1) Données utilisées	108
IV. 2. 2) Analyses numériques.....	108
IV. 2. 3) Principaux résultats obtenus	109
IV. 3) Introduction.....	111
IV. 4) Materials and Methods	112
IV. 4. 1) Data	112
IV. 4. 1. 1) Environmental Data	112
IV. 4. 1. 2) Climatological Data	113
IV. 4. 2) Rationale and description of the new numerical procedure	115
IV. 4. 2. 1) Step 1: identification of a relative reference state.....	116
IV. 4. 2. 2) Step 2: representation of the relative reference state	117
IV. 4. 2. 3) Step 3: representation of the probability of each year for a given site and month	117
IV. 4. 3) Synthesis of the results	118
IV. 4. 4) Influence of climate on the state of coastal systems: example of Brest and Marseille	118
IV. 5) Results.....	121
IV. 5. 1) Identification of relative reference state: example of Brest	121
IV. 5. 2) General analysis	121
IV. 5. 3) Influence of climate on the state of coastal systems: example of Brest and Marseille	122
IV. 6) Discussion.....	125

Chapitre V

Procédures et indicateurs d'évaluation de la fertilisation anthropique des systèmes côtiers

V. 1) Avant-Propos	132
V. 2) Publication : New procedures and indices to evaluate human fertilisation in coastal systems	135
V. 2. 1) Données utilisées	135
V. 2. 2) Analyses numériques	135
V. 2. 3) Principaux résultats obtenus	136
V. 3) Introduction	137
V. 4) Environmental Data	139
V. 5) Methods.....	141
V. 5. 1) Analyses 1: indices for both nitrate and phosphate anthropogenic concentrations	142
V. 5. 2) Analyses 2: mapping of the state of the systems and both spatial and temporal comparisons	145
V. 5. 3) Analyses 3: year-to-year changes in the human fertilisation.....	146
V. 6) Résultats	150
V. 6. 1) Analyses 1: indices for both nitrate and phosphate anthropogenic concentrations	150
V. 6. 2) Analyses 2: mapping of the state of the systems and both spatial and temporal comparisons	152
V. 6. 3) Analyses 3: year-to-year changes in human fertilisation.....	153
V. 7) Discussion and conclusion	157

Chapitre VI

Discussion générale

VI. 1) La variabilité décennale des systèmes littoraux français	164
VI. 1. 1) De la notion de variabilité naturelle des écosystèmes... ..	164
VI. 1. 2) ... à la détection de la variabilité décennale des systèmes côtiers français....	165
VI. 1. 3) La contribution des paramètres échantillonnés à la variabilité décennale des systèmes littoraux	167
VI. 2) Influence des fluctuations climatiques sur les systèmes littoraux français.....	168
VI. 2. 1) Le rôle majeur des températures de surface	169
VI. 2. 2) L'influence des fluctuations des variables hydro-climatiques	170
VI. 2. 3) La complexité de l'identification des forçages sur les systèmes côtiers.....	171
VI. 3) La modulation par le climat du phénomène de fertilisation côtière en nutriments	172
VI. 3. 1) La détection et la quantification de la fertilisation côtière par l'élaboration d'états de référence relatifs	173
VI. 3. 2) L'impact hydro-climatique local sur la fertilisation en nutriments	175
VI. 4) Procédures et indicateurs de la fertilisation anthropique des systèmes côtiers	177
VI. 4. 2) La déconvolution de la variabilité climatique naturelle	177
VI. 4. 3) Les indicateurs de la fertilisation anthropique du littoral français	179

Conclusion, limites et perspectives

Conclusions, limites et perspectives.....	182
---	-----

Références bibliographiques

Références bibliographiques	191
-----------------------------------	-----

Annexes

Annexe I : Conséquences des changements climatiques en milieu océanique (2010) Beaugrand G, Goberville E <i>in VertigO</i>	223
Annexe II : Histogrammes du pourcentage de données SOMLIT disponibles pour la période 1997-2009	250
Annexe III : Climate-driven changes in coastal marine systems of western Europe (2010) Goberville E, Beaugrand G, Sautour B, Tréguer P & The SOMLIT Team <i>in Marine Ecology Progress Series</i> 408:129-147	254
Annexe IV : Etats de référence relatifs des sites SOMLIT à partir des données de la World Ocean Database 05	275
Annexe V : Procédures et indicateurs de la fertilisation anthropique des systèmes côtiers (figures supplémentaires : régressions linéaires multiples et états de références relatifs des stations de Roscoff et Villefranche-sur-Mer)	284

Liste des figures

Figure I-1. Changements à long-terme des anomalies de température dans l'hémisphère Nord, les anomalies de la composition en phytoplancton, de l'abondance de *C. finmarchicus* et de la concentration en saumon adulte pour une zone située autour des îles britanniques.

.....Page 5

Figure I-2. Emplacement des changements significatifs relevés dans les séries de données sur les systèmes physiques (neige, glace et sol gelé; hydrologie; processus côtiers) et les systèmes biologiques (terrestres, marins et dulcicoles) et variations de la température de l'air en surface pendant la période 1970-2004.

.....Page 7

Figure I-3. Changements à long-terme (1880-2007) des températures de surface à l'échelle globale et cartographie mondiale des changements à long-terme (1880-2002) des températures de surface.

.....Page 9

Figure I-4. Cartographie mondiale des systèmes côtiers présentant des phénomènes d'eutrophisation majeurs, des zones à événements hypoxiques récurrents et des systèmes en voie de rétablissement.

.....Page 15

Figure I-5. Représentation schématique des interactions entre les facteurs humains de l'évolution du climat, les effets sur le changement climatique et les réponses apportées.

.....Page 17

Figure I-6. Exemples d'incidences planétaires anticipées des changements climatiques (et, le cas échéant, de l'élévation du niveau de la mer et de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère) selon l'ampleur de la hausse de la température moyenne à la surface du globe au XXI^e siècle.

.....Page 18

Figure II-1. Diagramme conceptuel des différentes interactions au niveau des systèmes côtiers.

.....Page 31

Figure II-2. Localisation des stations impliquées dans le programme SOMLIT.

.....Page 35

Figure II-3. Séries temporelles des trois indices hydro-climatiques à grande échelle qui ont été utilisés dans cette étude.	Page 44
Figure II-4. Localisation du site de prélèvement DYFAMED.	Page 47
Figure II-5. Représentation de l'hyperplan des moindres carrées d'une régression linéaire multiple dans le cas de 2 variables explicatives x_1 et x_2 .	Page 61
Figure III-1. Emplacement des sites du SOMLIT utilisés dans ce chapitre.	Page 73
Figure III-2. Analyses statistiques appliquées dans ce chapitre.	Page 81
Figure III-3. Résultats de la variabilité temporelle des systèmes côtiers français issus de l'analyse en composante principale appliquée sur les données SOMLIT.	Page 85
Figure III-4. Analyses sensibles sur les deux premières composantes principales calculées depuis une l'analyse en composante principale normalisée appliquée sur un nombre décroissant de paramètres et de sites.	Page 86
Figure III-5. Comparaison des premières et deuxièmes composantes principales issues des analyses en composantes principales normalisée appliquées sur les sites Mer du Nord et Atlantique et sur les sites de la Mer Méditerranée.	Page 87
Figure III-6. Analyse en composantes principales de la variabilité temporelle du vent zonal (1997-2006): cartographie des vecteurs propres et fluctuations temporelles des composantes principales.	Page 90
Figure III-7. Analyse en composantes principales de la variabilité temporelle du vent méridional (1997-2006): cartographie des vecteurs propres et fluctuations temporelles des composantes principales.	Page 90
Figure III-8. Analyse en composantes principales de la variabilité temporelle de l'intensité du vent (1997-2006): cartographie des vecteurs propres et fluctuations temporelles des composantes principales.	Page 91

Figure III-9. Analyse en composantes principales de la variabilité temporelle des champs de pression de l'océan (1997-2006): cartographie des vecteurs propres et fluctuations temporelles des composantes principales.

.....Page 91

Figure III-10. Analyse en composantes principales de la variabilité temporelle des températures de surface de l'océan (1997-2006): cartographie des vecteurs propres et fluctuations temporelles des composantes principales.

.....Page 92

Figure III-11. Analyse en composantes principales de la variabilité temporelle des précipitations moyennes (1997-2006): cartographie des vecteurs propres et fluctuations temporelles des composantes principales.

.....Page 92

Figure III-12. Variabilité temporelle des systèmes côtiers français en lien avec les forçages hydro-climatologiques.

.....Page 94

Figure III-13. Corrélations croisées entre la variabilité temporelle des systèmes côtiers français et la variabilité des variables hydro-climatologiques.

.....Page 96

Figure IV-1. Emplacement des sites du Service d'Observation en Milieu Littoral étudiés dans ce chapitre.

.....Page 114

Figure IV-2. Représentation des états de référence relatifs pour chaque mois: exemple de Brest.

.....Page 119

Figure IV-3. Synthèse de l'influence de la fertilisation anthropogénique en fonction des concentrations en nitrate et en phosphate pour chaque site SOMLIT.

.....Page 120

Figure IV-4. Représentation des états de référence relatifs pour chaque mois: exemple de Marseille.

.....Page 123

Figure IV-5. Variabilité temporelle de la probabilité qu'une observation appartienne aux états de référence relatifs en lien avec les conditions hydro-climatologiques locales. Cas de Brest et Marseille.

.....Page 124

Figure V-1. Emplacement des sites du Service d'Observation en Milieu Littoral (SOMLIT) utilisés dans ce chapitre.

.....Page 140

Figure V-2. Déconvolution de la variabilité climatique naturelle des concentrations en nitrate et phosphate pour la station de Wimereux.

.....Page 144

Figure V-3. Cartographie des états de référence relatifs pour la station de Wimereux en fonction des concentrations en nitrate et phosphate d'origine anthropogénique.

.....Page 147

Figure V-4. Examen des perturbations en nitrate et phosphate pour le site de Wimereux en Janvier.

.....Page 148

Figure V-5. Diagramme en contour de la variabilité temporelle de la distance d'une observation par rapport au centroïde des états de référence relatifs.

.....Page 155

Figure V-6. Cartographie de l'indicateur de fertilisation anthropique pour les sites de Wimereux, Roscoff et Villefranche-sur-Mer

.....Page 156

Liste des tables

Table II-1. Table récapitulative des caractéristiques des sites de prélèvement SOMLIT.	Page 37
Table II-2. Définitions des codes qualités attribués aux données des différents paramètres analysés.	Page 40
Table III-1. Pourcentages de données disponibles dans la base de données SOMLIT au cours de la période 1997-2006, pour chaque site.	Page 75
Table III-2. Données relatives aux sites étudiés.	Page 76
Table III-3. Origine et caractéristiques des données climatologiques utilisées dans ce chapitre.	Page 77
Table III-4. Corrélations entre les 2 premières composantes principales de l'analyse en composantes principales appliquée sur les données SOMLIT et les 2 premières composantes des ACP appliquées sur chaque variable hydro-climatologique.	Page 93
Table III-5. Corrélations entre les 2 premières composantes principales issue de l'analyse en composantes principales appliquée sur les données climatologiques et les données SOMLIT et les indices hydro-climatiques grande échelle.	Page 97
Table IV-1. Origine et caractéristiques des données utilisées dans ce chapitre au cours de la période 1997-2008.	Page 115
Table V-1. Caractéristiques principales des sites de Wimereux, Roscoff et Villefranche-sur-Mer.	Page 141
Table V-2. Résultats des corrélations linéaires partielles et des régressions linéaires multiples.	Page 151

Résumé

Ne couvrant que 8% de l'océan mondial mais offrant 85% des ressources marines exploitées, les systèmes côtiers sont d'importantes plaques tournantes d'échanges de matières et d'énergie, jouant un rôle capital dans les cycles biogéochimiques. De plus, ces milieux sont marqués par une forte hétérogénéité spatio-temporelle des facteurs environnementaux, contribuant ainsi à leur complexité. Au cours des dernières décennies, les changements globaux s'exerçant sur ces systèmes sont devenus si intenses, que la mise en place de réseaux d'observation à long-terme est devenue cruciale afin d'extraire les grandes tendances et de prédire les changements potentiels. La question de l'identification de la réponse spécifique de ces zones d'interfaces littorales reste cependant posée. En France, le suivi des paramètres physiques et chimiques des eaux côtières est assuré depuis 1997 par le programme SOMLIT (*Service d'Observation en Milieu LIToral*). L'objectif de cette thèse est donc de caractériser l'évolution physico-chimique, à l'échelle décennale, des systèmes côtiers français et d'estimer les parts respectives de la variabilité naturelle et de l'influence anthropique. Dans un premier temps, l'analyse de ces séries chronologiques montre que les systèmes côtiers français présentent une variabilité temporelle importante, liée en partie aux fluctuations hydro-climatiques à méso-échelle, mais également à des échelles plus régionales. Dans un deuxième temps, le développement d'une nouvelle procédure multivariée non paramétrique, aboutissant à la construction d'états de référence relatifs et à la détection rapide des changements, permet de quantifier le phénomène de fertilisation en nutriments. Il est montré que la fertilisation peut être fortement influencée par le forçage climatique. Dans un troisième temps, après soustraction de la part de variabilité climatique naturelle, des indicateurs de fertilisation anthropique sont proposés, permettant la quantification de l'impact des activités humaines sur les systèmes côtiers français. Ce travail propose une nouvelle approche qui permet de détecter dès que les données deviennent accessibles les perturbations potentielles dans tous types de systèmes, avec plus particulièrement pour objectif de répondre aux attentes, scientifiques et sociétales, d'une gestion adaptée des milieux côtiers.

Mots Clés: Systèmes côtiers – SOMLIT - suivis à long-terme - variabilité décennale - changement climatique - fertilisation anthropique - indicateurs anthropiques - états de référence relatifs - analyses statistiques multivariées

Abstract

Coastal systems play a crucial role in biogeochemical cycles and are important areas for marine resources, exchange of materials and energy. Moreover, these environments are marked by strong spatial and temporal heterogeneity of environmental factors, contributing to their complexity. Since global change has exerted intense pressure on these systems, the implementation of long-term monitoring programmes has become essential to extract major trends and predict potential changes. However, the identification of specific responses of these coastal systems remains unclear. Since 1997, monitoring of physical and chemical parameters of coastal waters in France is provided by the programme SOMLIT (*Service d'Observation en Milieu Littoral*). These comprehensive time series data from twelve stations around the French coasts were used 1) to characterize year-to-year variability in physico-chemical properties of the surface layer and 2) to evaluate the potential influences of natural and anthropogenic variability. Firstly, the analysis of the SOMLIT time series shows that the French coastal systems exhibit significant temporal variability caused by hydro-climatic fluctuations at regional and meso-scales. Secondly, a new nonparametric multivariate procedure was developed to identify relative reference states to allow the rapid detection of changes and to quantify the fertilization in nutrient concentrations. As a result, it is shown that fertilization can be strongly influenced by climate forcing. Thirdly, after the removal of natural climate variability, indicators of human fertilisation are proposed, allowing the quantification of the impact of human activities on French coastal systems. This study proposes a new approach to detect potential alterations in all types of systems as soon as data become available and could provide a baseline for the adaptive management of coastal environments.

Key Words: Coastal systems – SOMLIT - long-term monitoring - decadal change - climate change - human fertilization - anthropogenic indicators - relative reference states - multivariate analyses

Chapitre I :

Introduction

Gaïa [...] la Terre au large sein, residence à jamais inébranlable de tous les êtres

(Hésiode)

Variability is the law of life...

(William Osler)

Introduction

I. 1) La variabilité climatique naturelle

"Le froid et la chaleur eux-mêmes s'accroissent ou diminuent par le soleil, et par le mouvement de révolution ; et c'est par le chaud et le froid que les diverses régions de la terre prennent une propriété différente, pouvant, durant un certain temps, rester humides, puis se desséchant et vieillissant ensuite. D'autres lieux revivent et redeviennent par portions successivement humides. [...] Ce qui fait que ces phénomènes nous échappent, c'est que toute cette formation naturelle de la terre ne se fait que par additions successives et dans des temps immensément longs, si on les compare à notre existence ; des nations tout entières disparaissent et périssent avant qu'on ne puisse conserver le souvenir de ces grands changements, de l'origine jusqu'à la fin".

Aristote (384 av. J.-C. ; 322 av. J.-C.) – Météorologie. Traduction de J. Barthélemy Saint-Hilaire (1863).

Comme l'indique cette citation d'Aristote, le constat que le climat évolue constamment, à des échelles de temps parfois très longues, n'est pas nouvelle. Il est d'ailleurs étonnant de constater la justesse de cette analyse, et notamment le rôle imputé au Soleil comme moteur de la variabilité très basse fréquence. L'importance de cette source de variabilité est maintenant communément admise par la communauté scientifique (Le Roy Ladurie 1983, Lean & Rind 1998, Ghil 2002, Mann 2002). Néanmoins, le philosophe grec n'aurait sans doute jamais pu envisager qu'un jour l'homme aurait une influence majeure sur le climat observable à une échelle de temps humaine. Or depuis plus d'un siècle, l'activité humaine altère profondément la composition chimique de l'atmosphère terrestre (Vitousek et al. 1997b, Buddemeier et al. 2002). Dans ce contexte actuel de changement climatique, même si l'ensemble des scientifiques s'accorde sur la réalité d'une modification de climat et sur un réchauffement global à venir (IPCC Fourth Assessment Report 2007), il reste encore malaisé de faire la part

entre la variabilité naturelle du climat et le changement climatique. C'est pour répondre à cette problématique, que de récentes études ont listé les principales causes de la variabilité interannuelle naturelle du climat (Ghil 2002) :

- ***les variations de la constante solaire sur quasiment toutes les échelles de temps***

L'influence la mieux connue se produit aux échelles de 10 à 100 ans, et est liée à différents cycles (Lean et al. 1995, Haigh 1996, Rind 2002) : (1) le cycle des tâches solaires, d'une période de 11 ans, qui consiste en l'apparition et la disparition de ces tâches. Ce cycle entraîne de faibles variations de l'émission d'énergie par le soleil (modification de 1 W.m^2 environ), (2) un cycle plus lent, d'échelle séculaire (90 à 100 ans), entraînant des variations de l'énergie par le soleil de $3\text{-}4 \text{ W.m}^2$. Toutefois, ces modifications restent faibles et n'ont que peu de conséquences sur l'évolution des températures de surface, si ce n'est parfois dans le cas des cycles séculaires, le climat ayant le temps de réagir à la modification du rayonnement solaire.

- ***les paramètres orbitaux : obliquité¹, excentricité² et précession³***

Leurs variations ne modifient pas la quantité de rayonnement solaire qui arrive sur Terre en moyenne annuelle, mais elles modifient sa répartition spatiale et saisonnière, créant ainsi une alternance entre périodes glaciaires et interglaciaires (Beer et al. 2000). Le climat peut également être stabilisé dans une de ces deux périodes par l'effet de boucles de rétroaction fortes entre les processus qui affectent l'état de l'atmosphère, de l'océan, et de la Terre (e.g. la boucle de rétroaction positive de glace-albédo par lequel la neige de fonte expose la terre plus foncée, qui alternativement absorbe la chaleur et fait fondre plus de neige).

- ***les autres facteurs naturels de variation du climat***

Le volcanisme peut produire un important forçage radiatif dans le sens d'un refroidissement, mais très bref dans le temps (2 à 3 ans maximum). Un voile dans la stratosphère se développe, augmentant l'albédo planétaire et entraînant une baisse de la température d'environ -0.2 à -0.4°C en surface (Bertrand et al. 1999). Mais cette action est limitée dans le temps. Sur des échelles de temps beaucoup plus importantes (à l'échelle de millénaires), d'autres facteurs naturels peuvent modifier le climat, comme la tectonique des plaques, qui modifie la répartition des terres et des mers et peut

¹ Angle formé entre le plan équatorial et le plan de l'écliptique.

² L'orbite de la Terre autour du soleil se fait selon une ellipse dont le soleil est un des foyers.

³ Lent changement de direction de l'axe de rotation de la Terre.

fermer des bassins océaniques (Raymo & Ruddiman 1992), l'orogénèse qui peut agir sur l'écoulement de l'air et donc sur la circulation atmosphérique générale (Raymo & Ruddiman 1992), ou encore certains phénomènes cosmiques (e.g. collision avec un astéroïde, passage dans un nuage de poussières stellaires) qui peuvent modifier radicalement le climat (Pilmer 2009).

Ces différentes causes de la variabilité interannuelle naturelle du climat contribuent grandement à la modification des systèmes écologiques (Alheit 2009). La variabilité naturelle des forçages climatiques peut provoquer des changements de grande magnitude, rapides et souvent inattendus (Scheffer et al. 2001, DeYoung et al. 2008). Ces modifications de structure et de fonctionnement portent le nom de changement de régime ("regime shift" en anglais). Par exemple, le Pacifique Nord, au milieu de l'année 1977, et l'Atlantique Nord, après 1987, sous l'influence des fluctuations atmosphériques et océaniques balayant une vaste étendue spatio-temporelle (e.g. l'Oscillation Nord Atlantique en Hémisphère Nord ou encore les phénomènes El Niño et la Niña dans l'Océan Pacifique) ont connu de tels changements. En conséquence une profonde modification de l'équilibre de l'ensemble des biocénoses, du compartiment phytoplanctonique aux poissons est observée (Hare & Mantua 2000, Beaugrand et al. 2008 ; Figure I-1). Des enregistrements historiques de populations de poissons témoignent d'ailleurs de l'impact du forçage climatique sur les écosystèmes marins. Ainsi, dans la province du Bohuslän (sur la côte occidentale suédoise), la sévérité des hivers a été associée avec la présence en nombre considérable de harengs venus passer l'hiver (Corten 1999, Lehodey et al. 2006). Des changements dans d'autres écosystèmes ont été également détectés (ex. en Mer Baltique, Alheit et al. 2005 ; en Méditerranée, Conversi et al. 2010).

Bien que cet impact climatique soit plus clairement identifiable à grande échelle (Parmesan & Yohe 2003), il est plus pertinent de considérer les impacts à l'échelle locale. Attribuer les causes d'une modification de structure d'un système à la variabilité climatique naturelle n'est cependant pas une tâche aisée à l'échelle locale (Harley et al. 2006). Fruits de l'aléa et de la vulnérabilité des systèmes, les changements varient en fonction des caractéristiques hydro-climatiques (e.g. morphologie, hydrologie, météorologie ; Billen et al. 1991, Billen & Garnier 2007, Halpern et al. 2007) et de la forte variabilité physico-chimique de la zone géographique considérée, des phénomènes physiques tels que la marée, la turbulence ou encore des contraintes d'échantillonnage. Les interactions entre ces différents

phénomènes conduisent à complexifier l'identification de la composante naturelle du signal climatique (Mysterud et al. 2001, Kremer et al. 2005).

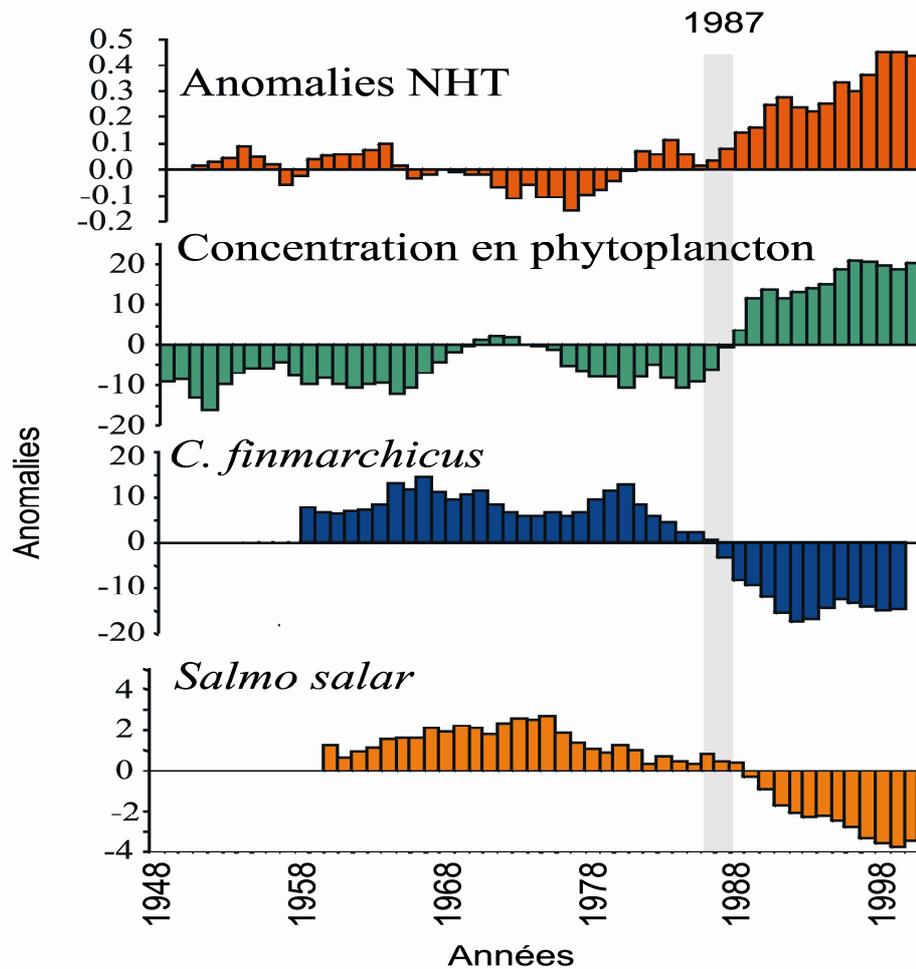


Figure I-1. Changements à long-terme des anomalies de température dans l'hémisphère Nord (NHT, en rouge), les anomalies de la composition en phytoplancton (en vert), de l'abondance de *C. finmarchicus* (copépode subarctique, en bleu) et de la concentration en saumon adulte (en orange) pour une zone située autour des îles britanniques. D'après Beaugrand et Goberville (2010).

I. 2) Le réchauffement climatique et les fluctuations thermiques à long terme

I. 2. 1) Le contexte de réchauffement climatique

Dès le 19^{ème} siècle, le suédois Svante Arrhénius (1896), attire l'attention sur le fait que l'homme est en train de modifier la composition de l'atmosphère en gaz carbonique à travers l'utilisation du charbon. A partir d'un calcul relativement simple, il estime que notre planète devrait se réchauffer de 5°C d'ici la fin du 20^{ème} siècle. Mais ce n'est qu'à partir de la fin des années 1970 que le problème de l'action potentielle des activités humaines sur le climat devient l'objet de toutes les attentions (la 1ère conférence mondiale sur le climat s'est tenue à Stockholm en 1979).

Une majorité de la communauté scientifique s'accorde aujourd'hui sur une intensification du signal climatique par la pression anthropique, accentuée depuis la révolution industrielle (Intergovernmental Panel on Climate Change 2007). Le Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC) définit ainsi que *"l'essentiel de l'accroissement de la température moyenne du globe au cours de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle est très probablement dû à l'augmentation observée des concentrations de gaz à effet de serre d'origine anthropique"*. Le changement est global et détecté dans tous les compartiments ou éléments fonctionnels du système Terre (Figure I-2). La signature du réchauffement climatique est ainsi identifiée dans l'océan (Beaugrand 2009), la cryosphère (Levitus et al. 2001), et la biosphère terrestre et aquatique (Graham & Grimm 1990, Beaugrand et al. 2002).

Modifications des systèmes physiques et biologiques et variations de la température en surface pendant la période 1970-2004

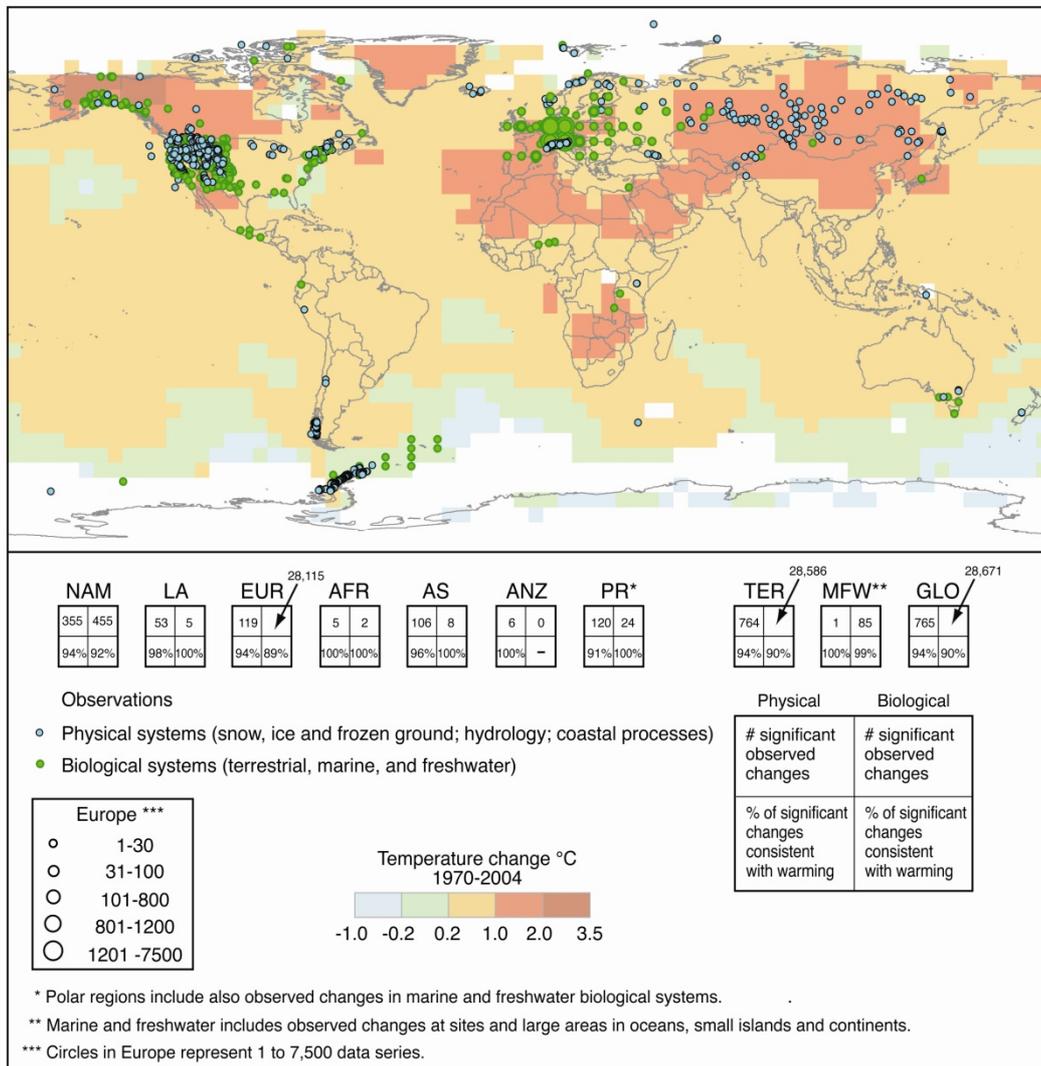


Figure I-2. Emplacement des changements significatifs relevés dans les séries de données sur les systèmes physiques (neige, glace et sol gelé ; hydrologie ; processus côtiers) et les systèmes biologiques (terrestres, marins et dulcicoles) et variations de la température de l'air en surface pendant la période 1970-2004. Quelque 29 000 séries de données ont été retenues sur les 80 000 publiées dans 577 études, sur la base des critères suivants : 1) se terminer en 1990 ou plus tard ; 2) s'étendre sur une période d'au moins 20 ans ; 3) présenter un changement significatif, dans un sens ou dans l'autre, ayant fait l'objet d'une évaluation dans certaines études. Les séries retenues proviennent de quelque 75 études, dont 70 environ ont été réalisées après la parution du TRE. Sur ces 29 000 séries de données, 28 000 environ sont tirées d'études européennes. Les zones laissées en blanc sont des zones où les données d'observation sont insuffisantes pour qu'il soit possible d'y définir une tendance de la température. Les cases 2x2 indiquent le nombre total de séries de données présentant des changements significatifs (rangée supérieure) et la proportion de celles qui concordent avec le réchauffement (rangée inférieure) pour i) les régions continentales : Amérique du Nord (NAM), Amérique latine (LA), Europe (EUR), Afrique (AFR), Asie (AS), Australie et Nouvelle-Zélande (ANZ), régions polaires (PR) ; ii) la planète entière : terres émergées (TER), zones marines et dulcicoles (MFW), globe dans son ensemble (GLO). La somme des différents nombres d'études figurant dans les sept cases des régions continentales (NAM, LA, EUR, AFR, AS, ANZ, PR) ne correspond pas au total de la case du globe dans son ensemble (GLO), parce que ces nombres (à l'exception de celui qui concerne les régions polaires) n'incluent pas les études sur les systèmes marins et dulcicoles (MFW). Les grandes zones marines affectées n'apparaissent pas sur la carte. {GT II figure RiD.1, figure 1.8, figure 1.9 ; GT I figure 3.9b}. D'après IPCC Fourth Assessment Report 2007.

I. 2. 2) Les fluctuations thermiques à long terme

Au cours de la période 1995-2006, onze années figurent parmi les douze plus chaudes depuis 1850, date à laquelle ont débuté les relevés instrumentaux de la température à la surface du globe. Bien que les températures aient augmentées presque partout dans le monde, l'accroissement a principalement concerné les océans. En effet, l'augmentation de $14,5 \cdot 10^{22}$ Joules du contenu en chaleur de l'océan, quantifiée sur la période 1955-1998 par Levitus et ses collègues (2005), est largement supérieure à celle connue par la lithosphère continentale ($0,91 \cdot 10^{22}$ Joules entre 1950 et 2000 ; Beltrami et al. 2002). Au cours des 40 dernières années, le milieu océanique a ainsi absorbé 84% de la chaleur additionnée au système climatique (Levitus et al. 2001, Barnett et al. 2005, Levitus et al. 2005), causant une forte expansion thermique (augmentation de 25% depuis 1955 ; Antonov et al. 2005).

La tendance au réchauffement entre 1906 et 2005 fait apparaître une augmentation non linéaire de $0,74^{\circ}\text{C}$ avec deux phases d'accélération, durant la période 1920-1940 et depuis la fin des années 1970 (Figure I-3a ; IPCC Fourth Assessment Report 2007). Ce réchauffement, observé à l'échelle planétaire, est plus intense au niveau des latitudes élevées de l'Hémisphère Nord (Figure I-3b ; Harvell et al. 2002). Les estimations indiquent que le réchauffement a ainsi pénétré jusqu'à 700 m de profondeur dans certaines régions des hautes latitudes de l'Océan Atlantique Nord en raison de la convection profonde (IPCC Fourth Assessment Report 2007) alors qu'il est principalement localisé jusqu'à 100 m de profondeur dans les océans Pacifique et Indien (Barnett et al. 2005).

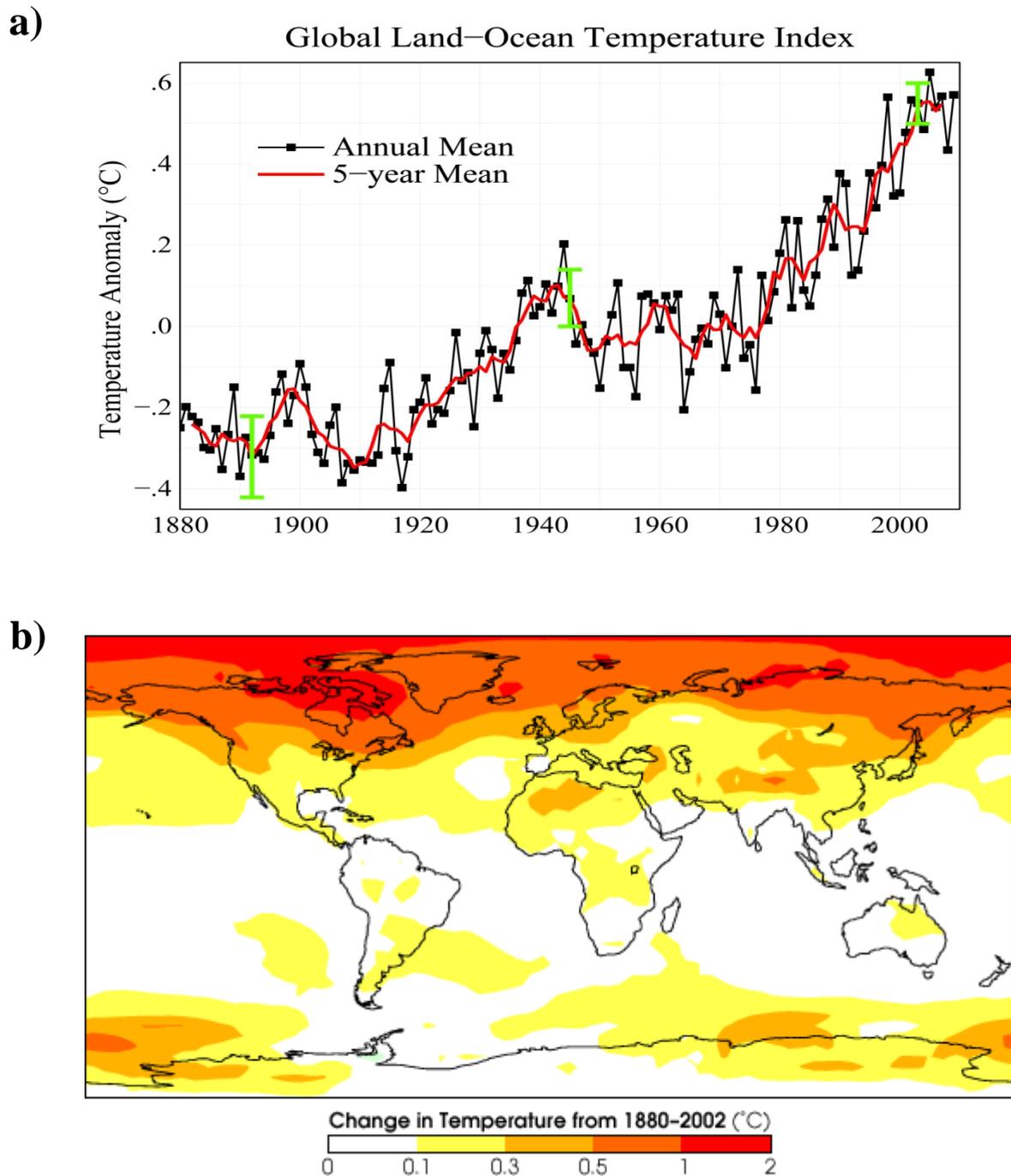


Figure I-3. (a) Changements à long-terme (1880-2007) des températures de surface à l'échelle globale (moyennes annuelles en noir, et données lissées en rouge). (b) Cartographie mondiale des changements à long-terme (1880-2002) des températures de surface témoignant d'un réchauffement plus intense aux latitudes élevées de l'Hémisphère Nord. Les données proviennent du "National Climatic Data Center" (NCDC : <http://www.ncdc.noaa.gov/>).

I. 3) Les répercussions du changement climatique sur les facteurs écologiques abiotiques

Le nombre d'études consacrées à l'évolution des écosystèmes en corrélation avec le réchauffement climatique a considérablement augmenté depuis la prise de conscience d'une réelle menace de l'équilibre de la planète Terre. Les récentes variations de températures ont ainsi eu diverses répercussions discernables sur la majorité des écosystèmes.

I. 3. 1) Impacts du changement climatique sur le système hydrologique global

I. 3. 1. 1) L'augmentation du niveau de la mer et la perturbation de la circulation thermohaline

Alors que les observations géologiques et archéologiques indiquent qu'au cours des derniers millénaires, le niveau de la mer a peu varié (pas plus de 0.1 mm par an globalement), les enregistrements marégraphiques disponibles depuis près d'un siècle témoignent d'une hausse significative au cours des dernières décennies en concordance avec le réchauffement climatique (Peltier & Tushingham 1989). Sur l'ensemble de la planète, le niveau moyen de la mer s'est élevé de 1,8 mm/an entre 1961 et 2003, et d'environ 3,1 mm/an depuis 1992 (Houghton et al. 2001). Cette vitesse d'élévation n'est pas uniforme et varie selon les régions de l'océan (Peltier & Tushingham 1989). Elle peut être causée par des facteurs multiples et complexes qui résultent conjointement des effets des apports en eau (des glaciers et calottes polaires), de l'expansion thermique de l'eau sous l'effet de sa température, et de la répartition des masses d'eau sous l'effet des grands courants et des vents (Church et al. 2001).

La circulation océanique est également impactée par le réchauffement planétaire. Les observations montrent que l'Atlantique Nord est devenu nettement moins salé ces 40 dernières années (Dickson et al. 2002). Cette dessalure, conséquence d'importants apports d'eau douce, est la résultante de la fonte des glaciers. Ce phénomène empêche l'eau de plonger en profondeur, causant un affaiblissement de la circulation thermohaline (Dickson et al. 2002).

I. 3. 1. 2) Le dérèglement du cycle hydrique

Les relations entre le système climatique et le cycle de l'eau sont nombreuses et complexes (Labat et al. 2004). L'augmentation des températures affecte simultanément différentes composantes des systèmes hydrologiques (Huntington 2006) : les précipitations (en quantité, intensité et fréquence) ; la fonte des neiges et glaces ; la teneur atmosphérique en vapeur d'eau ; l'évapotranspiration ; la force des ruissellements et le débit des cours d'eau. Ces phénomènes interagissent les uns avec les autres et leur variabilité spatio-temporelle naturelle est très marquée (Huntington 2006).

Il est cependant avéré que le réchauffement climatique a d'importantes conséquences sur les précipitations, premier facteur de variabilité du cycle hydrologique (Karl & Trenberth 2003, Labat et al. 2004). La répartition des précipitations s'est modifiée au cours du 20^{ème} siècle. Globalement, les précipitations, et avec elles le débit des rivières, ont fortement augmenté dans les hautes latitudes (par exemple en Europe du Nord et de l'Est) et dans certaines régions des tropiques (New et al. 2001). Dans ces régions, du fait de la montée du niveau des mers ou de la modification du débit des rivières, le risque d'inondations est de plus en plus important (New et al. 2001). A l'inverse, dans les latitudes plus basses, en particulier dans la région méditerranéenne et dans les zones subtropicales, les précipitations ont baissé (Ludwig et al. 2009). Cette diminution conduit à des épisodes de sécheresse plus longs, plus intenses et plus fréquents. Mais les données actuelles sont encore trop rares et incomplètes pour conclure avec certitude d'une tendance à la hausse ou à la baisse des précipitations sur des zones d'une telle ampleur.

I. 3. 2) Impacts du changement climatique sur les cycles de la matière

I. 3. 2. 1) La perturbation des grands cycles biogéochimiques

Les cycles biogéochimiques des différents éléments fonctionnent dans la nature à leur manière suivant les caractéristiques chimiques propres à chaque élément et selon le rôle que ceux-ci jouent au cours du développement de la biosphère. Il en a été ainsi jusqu'à l'apparition de l'homme qui a contribué à perturber les écosystèmes et les cycles de façon de plus en plus marquée avec le temps jusqu'à aboutir à des nuisances majeures. Depuis deux siècles, ces changements environnementaux sont à l'origine d'un profond déséquilibre des

cycles biogéochimiques globaux en modifiant en profondeur la géochimie et la dynamique des grands réservoirs (Vitousek et al. 1997a, Buddemeier et al. 2002). Les éléments sont extraits de leurs réservoirs et libérés dans les écosystèmes ce qui a pour conséquence une accélération des cycles de matière.

Par exemple, de grandes quantités de CO₂, en plus de la part liée aux rejets directs, ont été libérées par l'utilisation de combustibles fossiles (Houghton et al. 2001). Un affaiblissement du puits de carbone dans l'océan Atlantique, par l'action de la température sur la stratification de la colonne d'eau, est prévu par les modèles biogéochimiques actuels (Sarmiento 2004, Bopp et al. 2005). Cette stratification accrue de l'océan de surface va probablement conduire à une réduction des concentrations en éléments nutritifs dans la couche de surface et diminuer la productivité marine (Bopp et al. 2005).

D'autres cycles de la matière comme ceux de l'azote (Galloway et al. 1995, Vitousek et al. 1997a, Vitousek et al. 1997b) ou du phosphore (Schlesinger 1991) sont également perturbés par les forçages anthropogéniques. Les activités humaines ont ainsi provoqué un doublement du taux d'apports en nitrates dans le cycle biogéochimique de l'azote, et ce phénomène est en constante augmentation (Vitousek et al. 1997a). Ce dérèglement induit une sur-fertilisation des écosystèmes aquatiques (e.g. apports excessifs dus aux activités agricoles et industrielles ; Cloern 2001).

Fortement amplifiée par le contexte de changement climatique, la perturbation des cycles biogéochimiques entraîne l'émergence de multiples altérations des systèmes écologiques comme l'acidification ou la multiplication des phénomènes d'eutrophisation et des risques d'hypoxie et/ou anoxie (Diaz 2001). Cependant, les conséquences de ces changements sur les écosystèmes restent encore à évaluer et à quantifier (des faibles impacts jusqu'à l'irréversibilité).

I. 3. 2. 2) L'acidification des océans

L'augmentation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère influence plus directement les océans (Sabine et al. 2004). En effet, l'océan a absorbé près de la moitié des émissions de CO₂ depuis 1800 (118 milliards de tonnes de carbone). Cette absorption massive a permis d'atténuer les effets du changement climatique mais a provoqué un bouleversement de la chimie de l'eau, entraînant une réduction de 0,1 unité de pH. Cette diminution, qui peut

paraître faible, correspond à un triplement de la concentration en ions hydrogène. Cette situation est une première au cours de ces derniers 20 millions d'années (Orr et al. 2005, Gattuso 2007). Si les émissions de CO₂ continuent au rythme actuel, l'acidification pourrait correspondre à une réduction de pH de 0,4 unité d'ici à 2100 (Caldeira & Wickett 2003).

L'avenir de nombreux organismes marins clés est sérieusement menacé par ce phénomène d'acidification croissante des océans (Blackford 2010). Au dessous d'un certain seuil de pH, l'eau de mer devient corrosive vis-à-vis du calcaire et le processus de calcification de nombreux organismes marins risque d'être entravé (Orr et al. 2005). C'est le cas pour les coraux, constitués d'aragonite, qui présentent une sensibilité supérieure à l'acidification comparé aux foraminifères formés de calcite. Les conséquences environnementales de cette acidification sont encore mal connues, mais des programmes de recherches tels que EPOCA (European Project on Ocean Acidification) sont en train de se développer.

I. 3. 2. 3) L'amplification des phénomènes d'eutrophisation

Au cours des 50 dernières années, le phénomène d'eutrophisation - défini comme étant "*une augmentation des apports en matière organique à un écosystème*" (Nixon 1995) – a été défini comme l'une des plus sévère et répandue forme de perturbation affectant les systèmes marins côtiers et détériorant la qualité de l'eau (Gray et al. 2002). Cette définition met l'accent sur l'eutrophisation en tant que processus. Mais ce phénomène peut également être défini comme étant : "*L'enrichissement des eaux en nutriments, notamment en composés azotés et/ou phosphatés, provoquant un développement accéléré des algues et des formes supérieures de vie végétale et entraînant une perturbation indésirable de l'équilibre des organismes présents dans l'eau et de la qualité de l'eau en question*" (Commission Européenne, 1991). Cette définition implique que l'accent soit mis sur les éléments nutritifs et leurs effets sur la production primaire, plutôt que sur des sources externes de matière organique. La notion d'eutrophisation est donc difficile à manier, puisqu'elle ne désigne pas un état mais l'évolution du milieu vers un état, lui-même défini de manière subjective ("enrichi"). Le terme eutrophisation désigne donc "*à la fois les causes et les conséquences de la fertilisation du milieu*" (Lacaze 1996). Actuellement, le terme "eutrophisation" a évolué pour désigner non plus la progression de l'enrichissement d'un milieu, mais l'état enrichi lui-même, avec pour conséquence, une perturbation des systèmes.

Parmi les mécanismes conduisant à l'eutrophisation, les apports de nutriments terrigènes, en excès par rapport à la capacité d'évacuation ou de dilution du site, sont déterminants (Aminot et al. 2001). L'hydrodynamique règle le transport et la dilution des nutriments dissous, des particules et des algues en suspension, conditionnant le temps de résidence moyen de ces dernières dans les eaux enrichies par les apports terrigènes (Chapelle et al. 1994, Le Pape & Ménesguen 1997, Martins et al. 2001). L'influence du bassin versant (e.g. nature géologique et importance du soutien d'étiage par la nappe phréatique, occupation agricole des terres, rejets industriels et urbains ; Aminot et al. 2001) se fait dès lors sentir par la modulation climatique saisonnière des apports en nutriments.

Mais dans tous les cas, la notion d'eutrophisation insiste sur l'importance du rôle joué par les pressions anthropogéniques (Justic et al. 1995, Radach 1998, Cloern 2001, Vermaat et al. 2008). Lors des dernières décennies, l'augmentation des rejets anthropiques au niveau des bassins versants a conduit à un accroissement des apports en azote et en phosphore à la zone côtière. Les exemples les plus marquants sont ceux de Tolo Harbor (Hong Kong) et de Seto Inland Sea (Japon) où l'accroissement des rejets a entraîné l'apparition de plus en plus fréquente d'eaux colorées (Murakawa 1987, Lam & Ho 1989, Nakanishi et al. 1992). Sur ce dernier site, la réduction des rejets à la fin des années 70 a permis de diminuer la fréquence de ces eaux colorées. Dans le fjord d'Oslo, Dale et collaborateurs (1999) ont aussi mis en évidence que l'accroissement des rejets anthropiques, depuis le milieu des années 1800, a provoqué un développement de l'eutrophisation et un doublement de la concentration en kystes de dinoflagellés dans les sédiments. A partir des années 1980, la diminution des rejets a entraîné une décroissance des concentrations en kystes dans les niveaux supérieurs du sédiment.

De récentes études ont ainsi montré que près de 80% des zones côtières américaines et 65% des côtes Atlantiques européennes étaient sujettes à ce phénomène d'eutrophisation. Un récent rapport de la Commission Européenne (2007) a statué qu'un pourcentage élevé des eaux en Europe ne pourront pas répondre aux critères de "Bon Etat Ecologique" (Directive Cadre Européenne, 2004) d'ici à 2015 du fait de ces phénomènes d'eutrophisation majeurs (Zaldívar et al. 2008). Ce sont ainsi près de 415 zones de part le monde qui ont été identifiées comme eutrophiques, dont 169 présentant des événements hypoxiques récurrents, et seulement 13 étant classées comme des "*systèmes en voie de rétablissement*" (Figure I-4 ; Selman et al. 2008). L'intensification des pratiques agricoles (seulement une faible part des fertilisants agricoles étant directement assimilée par les plantes cultivées ; Smith et al. 1999),

la surconsommation d'énergie ainsi que l'accroissement de la population mondiale (Kremer et al. 2005) sont des facteurs indiquant que l'eutrophisation est un problème en constante augmentation.

La compréhension de l'ampleur de ces phénomènes d'eutrophisation et des risques associés pour la santé humaine s'améliore. Mais dans de nombreuses régions du monde, les informations sont encore insuffisantes pour établir une cartographie précise de l'étendue de ces perturbations, pour identifier clairement les sources en éléments nutritifs et pour évaluer l'impact sur les écosystèmes (notamment les risques d'hypoxie et anoxie des milieux ; Diaz 2001).

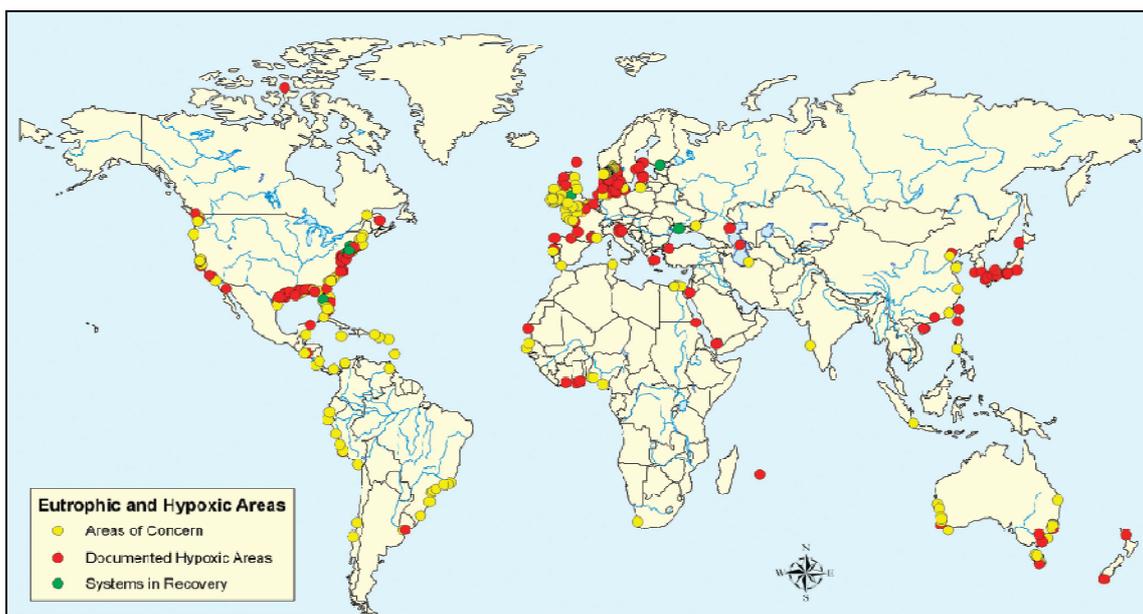


Figure I-4. Cartographie mondiale des systèmes côtiers présentant des phénomènes d'eutrophisation majeurs (en jaune), des zones à événements hypoxiques récurrents (en rouge), et des systèmes en voie de rétablissement (en vert). Les données sont disponibles sur : www.wri.org/project/water-quality et compilées depuis de nombreuses sources par R. Diaz, M. Selman et Z. Sugg. D'après Selman et al. 2008.

I. 4) Surveiller les systèmes pour caractériser et appréhender les conséquences du changement climatique

Il n'est pas nécessaire de multiplier les exemples d'impact sur les systèmes pour montrer que la mise en évidence des perturbations naturelles ou directement causées par l'homme n'est pas toujours simple. Les connaissances sur la réponse des systèmes aux changements environnementaux sont encore limitées. Bien qu'un certain nombre de mécanismes soient identifiés, il est encore difficile de prévoir la direction dans laquelle évolueront les systèmes. Si la diversité des écosystèmes est naturellement résistante ou résiliente à la variabilité naturelle des événements hydro-météorologiques, l'effet additionnel des processus anthropiques est encore peu rapporté et étudié (Conley 2000, Mysterud et al. 2001, Paerl 2006). L'identification des mécanismes intermédiaires entre la variabilité naturelle, les pressions liées aux activités humaines, la dynamique des biotopes et des biocénoses n'est pas encore clairement identifiée. Un des défis scientifiques actuels est donc de pouvoir séparer la part de variabilité liée aux processus naturels de celle liée aux effets anthropiques.

Depuis la fin des années 1970 et la modification de certaines écorégions dans le monde, le changement global apparaît ainsi comme un facteur supplémentaire impactant fortement les écosystèmes. La figure I.5 donne une représentation schématique des interactions entre les facteurs humains impactant l'évolution du climat, les effets du changement climatique et les réponses apportées. L'élévation récente des températures et les mécanismes qui en découlent influencent nettement la biosphère (Figure I-6). L'augmentation des températures globales est pourtant encore relativement faible comparée aux prédictions du groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (entre 1,4°C et 5,8 °C d'ici 2100 en fonction des différents scénarios établis, contre 0,8°C depuis le début du 20^{ème} siècle). Si cette augmentation est bien effective, des modifications brusques, inattendues et de grandes magnitudes ne sont pas à exclure conduisant à la multiplication des risques de perturbation des systèmes. Mais le fonctionnement de ces systèmes résultant de synergies et d'enchaînements de processus plus complexes que les connaissances disponibles ne le laissent supposer, il convient d'analyser, de caractériser et de comprendre leurs changements au cours du temps (Binet 1997).

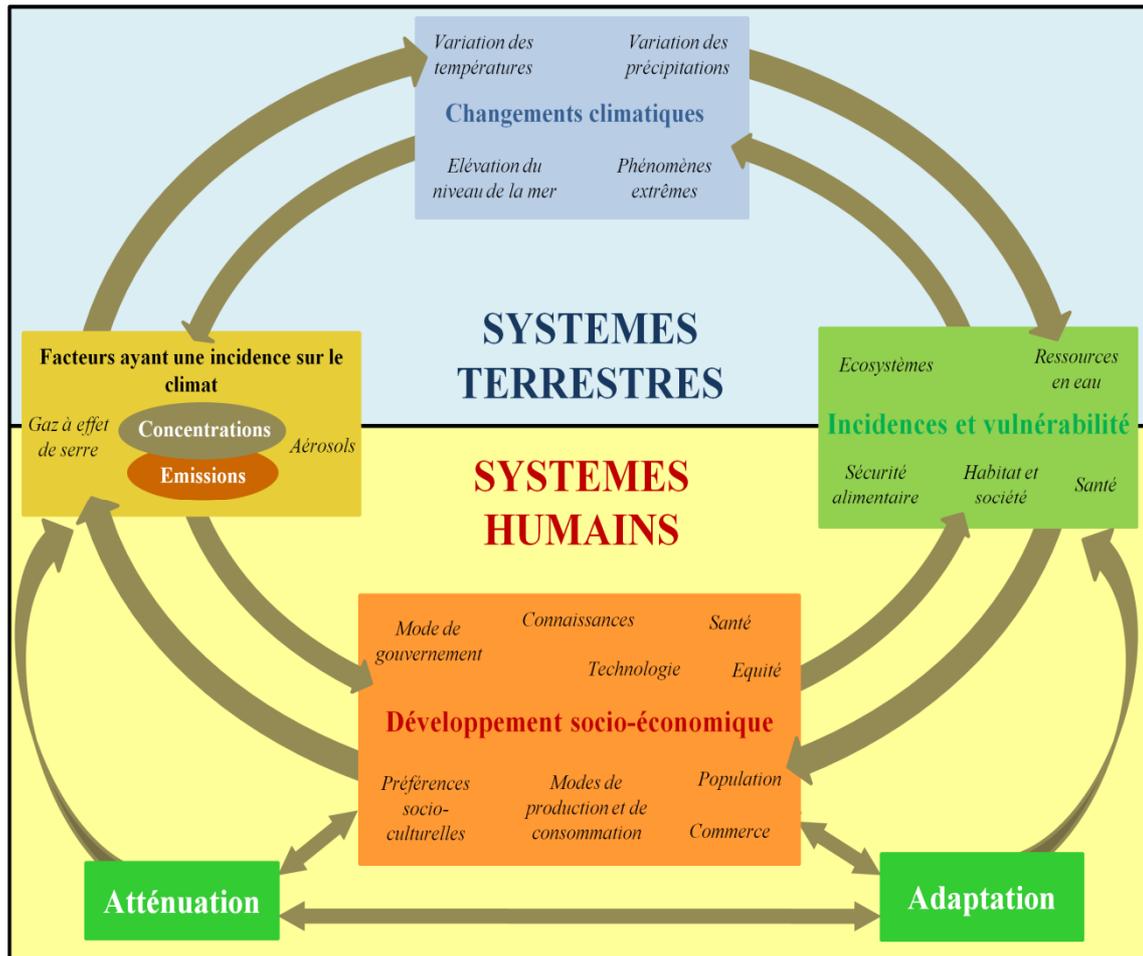
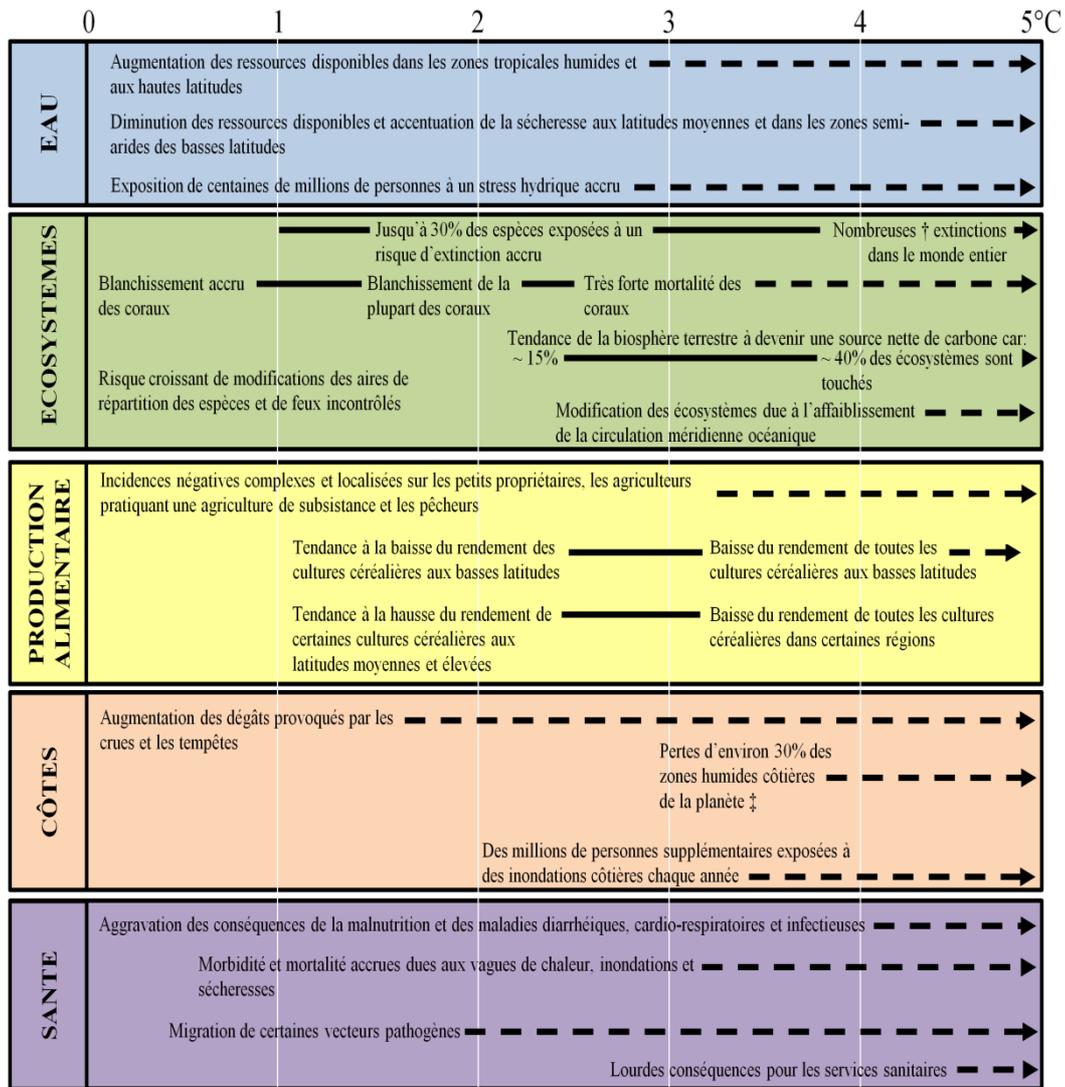


Figure I-5. Représentation schématique des interactions entre les facteurs humains de l'évolution du climat, les effets sur le changement climatique et les réponses apportées. D'après IPCC Fourth Assessment Report 2007.

Exemples d'incidences associées à la variation de la température moyenne à la surface du globe (Les incidences varieront selon le degré d'adaptation, le rythme du réchauffement et le mode de développement socio-économique)

Variation de la température annuelle moyenne à la surface du globe par rapport à 1980-1999 (°C)



† Plus de 40%

‡ Sur la base d'une élévation moyenne du niveau de la mer de 4,2 mm/an de 2000 à 2080

Figure I-6. Exemples d'incidences planétaires anticipées des changements climatiques (et, le cas échéant, de l'élévation du niveau de la mer et de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère) selon l'ampleur de la hausse de la température moyenne à la surface du globe au XXI^e siècle. Les traits noirs relient les diverses incidences entre elles, les flèches en pointillé indiquent que ces incidences se poursuivent avec le réchauffement. La disposition du texte permet de voir approximativement à quel niveau de réchauffement s'amorce l'effet mentionné. Les chiffres relatifs à la pénurie d'eau et aux inondations correspondent aux incidences supplémentaires des changements climatiques par rapport aux conditions anticipées dans les scénarios A1FI, A2, B1 et B2. Ces estimations ne tiennent pas compte de l'adaptation aux changements climatiques. Toutes ces incidences sont affectées d'un degré de confiance élevé. D'après IPCC Fourth Assessment Report 2007.

I. 4. 1) Postulats pour les suivis à long terme

L'écologie marine ne pouvant expérimenter, elle ne progresse que par observations et comparaisons (Binet 1997). Seules de longues séries d'observation biologiques et physico-chimiques permettent d'observer les variations autour de la réalisation des cycles naturels (journaliers, saisonniers, annuels...). Ainsi, Southward (1995) évoque la nécessité de suivre les écosystèmes sur de longues périodes de temps, afin d'extraire les grandes tendances et de prédire les changements potentiels. De nombreuses séries confirment ce besoin, comme les séries résultantes des réseaux IFREMER⁴ le long du littoral français ou les séries biologiques en Europe du Nord (e.g. le CPR⁵) qui montrent des changements majeurs pouvant se produire au cours de cycles de 11 à 45 ans (Southward et al. 1995) et des modifications abruptes au sein de la biocénose (Beaugrand et al. 2003). Une meilleure compréhension des variabilités naturelles et/ou induites par les activités anthropiques passe donc par la mise en place ou l'amélioration des réseaux d'observation des systèmes.

La décision d'entreprendre un suivi à long terme repose sur un certain nombre d'idées et notamment les suivantes :

- il existe une réponse écologique à une perturbation du milieu (climat, pollution) détectable au sein des systèmes aux fréquences et aux échelles spatiales étudiées.
- réciproquement, toute variabilité spécifique est la trace d'une variabilité écologique plus générale. Par exemple, les variations de nature et de quantité d'espèces pêchées reflètent des changements de l'ensemble de l'écosystème ; la prolifération d'un seul type d'algue est la marque d'une eutrophisation.
- il existe des facteurs structurants à grande échelle, probablement liés à des événements climatiques, comme : El Niño (Hare & Mantua 2000), la grande anomalie de salinité (Dickson et al. 1988), l'Oscillation Nord-Atlantique (Fromentin & Planque 1996).

En accord avec cette argumentation, de nombreux programmes d'observation ont ainsi été développés au cours de ces dernières années (Binet 1997) dans le but de répondre à une démarche scientifique précise, à savoir (1) observer les systèmes, (2) déceler les tendances, les cycles, les interactions entre les composantes de ces systèmes et les perturbations

⁴ Exemples : le Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin (RNO), le Réseau de suivi du phytoplancton et des phycotoxines (REPHY), ou le Réseau de contrôle microbiologique des zones de production (REMI).

⁵ Le Continuous Plankton Recorder conçu par Sir Alister Hardy dans les années 1920.

éventuelles, (3) proposer des hypothèses de fonctionnement des systèmes et (4) vérifier ces hypothèses grâce aux suivis à long terme. Il convient donc d'organiser un réseau d'observation écologique permanent (Hays et al. 2005, Richardson & Poloczanska 2008), le choix de l'échelle spatio-temporelle, de la fréquence d'échantillonnage et des paramètres variant énormément d'un programme, pouvant aboutir à des conclusions différentes en fonction de la stratégie utilisée.

Le principal facteur limitant la quantité de l'information potentielle étant la durée de récolte et d'analyse des échantillons, il est nécessaire d'optimiser l'effort d'échantillonnage, en sachant que le temps permet l'expression des potentialités biologiques tandis que l'espace joue le rôle de séparateur (Southward 1995, Hays et al. 2005). Il faut que les mesures soient assez fréquentes pour distinguer le signal recherché du bruit de fond, et assez longues pour montrer l'influence des tendances climatiques (Yoccoz et al. 2001, Balmford et al. 2003). L'intervalle séparant deux échantillons doit également tenir compte des durées de génération, des périodes de recrutement, de la mobilité des populations et éventuellement de la marée, la fréquence des observations dépendant du paramètre observé et de la précision souhaitée (Yoccoz et al. 2001, Bald et al. 2005). Yoccoz et collègues (2001) dressent ainsi une liste non exhaustive de recommandations à appliquer lors de la mise en place de réseaux d'observation afin de limiter les lacunes inhérentes à la majorité de ces programmes : absence de situation de normalité ou de référence, présence de nombreuses données manquantes, fréquences et techniques d'échantillonnage non adaptées ou encore non homogénéisation des protocoles.

I. 4. 2) Etablir des états de référence

Etablir un "état des lieux", décrire les biocénoses telles qu'elles sont aujourd'hui, en tenant compte de leur variabilité naturelle est un préalable indispensable pour mettre en évidence l'effet des perturbations ou montrer une évolution forcée par le climat (Binet 1997). C'est dans ce but que le concept d'état de référence est de plus en plus employé en écologie pour décrire une norme par rapport à laquelle l'état actuel d'un système peut être comparé (Zonneveld 1983, Dziocck et al. 2006). Il s'agit ainsi de se référer à la variabilité naturelle du système en ne se basant que sur : (1) le spectre de variabilité naturelle des conditions de structure, de composition et de fonction de l'écosystème (Kaufmann et al. 1994, Swanson et al. 1994, Kaufmann 1998, Moore et al. 1999), (2) un point de référence par rapport auquel il sera possible d'évaluer les changements de l'écosystème, et (3) un critère de mesure

permettant d'évaluer la réussite des plans de management et de restauration (Christensen et al. 1996).

Cet état de référence doit permettre un bilan de santé des biocénoses, et des descripteurs synthétiques doivent permettre de confirmer ce bilan. La caractérisation de l'état d'un système passe donc par l'évaluation des perturbations et/ou des effets (directs ou indirects) des activités humaines en comparaison des conditions naturelles, c'est-à-dire en l'absence de toutes perturbations ou modifications (état "vierge", non pollué ou encore non perturbé par des forçages anthropiques (Jackson & Davis 1994, Steedman 1994, Hughes 1995, Davies & Jackson 2006).

Cependant, ce concept reste encore aujourd'hui fortement débattu au sein de la communauté scientifique du fait des diverses interprétations de la notion "d'état de référence" : les conditions de l'écosystème à une certaine période dans le passé, les meilleures conditions actuelles d'un système, les conditions d'un système en l'absence de toute pression anthropogénique ou les conditions qu'un site actuel devrait présenter si sa gestion est optimale (Stoddard et al. 2006). Pour ces différentes raisons, il est ainsi courant de qualifier les états de référence comme étant "relatifs" car dépendant à la fois des conditions fixées pour leur élaboration, de l'échelle spatio-temporelle à laquelle on travaille ainsi que des paramètres suivis.

I. 4. 3) L'évaluation de l'état des systèmes par les indicateurs environnementaux

En 1992, lors de la convention de Rio de Janeiro, l'importance du rôle des indicateurs dans l'évaluation des perturbations subies par les systèmes écologiques a été mise en exergue. Bien que cette convention porte principalement sur la composante biologique de la diversité, un constat équivalent est transposable à l'ensemble des systèmes, tant pour les biotopes que les biocénoses. En effet, traduisant synthétiquement l'état des écosystèmes (en réduisant le nombre de mesures et de paramètres qui seraient normalement nécessaires pour rendre compte d'une situation avec exactitude), les indicateurs sont traditionnellement employés pour le suivi des systèmes ainsi que pour la prévision de modifications potentielles (Niemeijer 2002, Niemeijer & de Groot 2008), tout en étant adaptés aux spécificités des suivis à long terme.

Dans un souci d'harmonisation des efforts pour un développement durable des ressources écologiques, l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Economique ; 1994) a conseillé de développer un jeu d'indicateurs communs, régulièrement actualisés pouvant fournir une base solide pour l'aide à la décision à tous les niveaux (national, régional et international).

Sous la dénomination générale d'indicateurs environnementaux, trois grands types d'indicateurs sont distingués : *les indicateurs des conditions environnementales* (indicateurs d'état concernant la qualité de l'environnement), *les indicateurs des pressions environnementales* (indicateurs de pression exercée par les activités humaines) et *les indicateurs des réponses de la société* (indicateurs de réponse de la société aux mutations enregistrées dans l'environnement).

Afin de répondre aux attentes actuelles, aussi bien scientifiques que sociétales, de détection et de quantification des perturbations des systèmes, le développement d'indicateurs, pertinents et adaptés, est une vraie nécessité pour l'application de plans de gestion appropriés aux particularités des écosystèmes (Niemeijer 2002, Pereira & Cooper 2006, Richardson & Poloczanska 2008). Toutefois, dans la majorité des cas, le choix des indicateurs peut être considérablement amélioré. En effet, dans de nombreuses circonstances, ceux-ci sont sélectionnés de manière plus ou moins arbitraire, conduisant à traiter une même problématique à l'aide d'indicateurs très différents. Cette démarche peut ainsi entraîner des évaluations contraires de l'état de l'environnement étudié (Niemeijer & de Groot 2008). Il est donc indispensable que le choix de l'indicateur se fasse selon des critères de sélection adaptés à la problématique posée et aux systèmes suivis.

I. 5) Problématique

L'observation à moyen et long terme de l'évolution de l'environnement est clairement reconnue comme une nécessité impérative afin de caractériser, via l'étude des "séries à long terme", la réponse des écosystèmes terrestres ou marins au changement global. Parmi les différents biotopes de la planète, les milieux marins côtiers sont particulièrement contraints par la forte variabilité spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques. A ce phénomène s'ajoute une forte variabilité naturelle, elle-même exacerbée par une pression anthropogénique croissante. Dans un contexte avéré d'intenses modifications des écosystèmes, la question de l'identification de la réponse spécifique de ces zones d'interfaces littorales reste posée. C'est afin de répondre à cette problématique générale que le développement d'une démarche systématique d'observation des milieux littoraux a conduit à la mise en place du Service d'Observation en Milieu Littoral (SOMLIT) en 1995 et labellisé par l'INSU en 1996.

L'étude du littoral français dans son ensemble, rendue possible par le choix de sites à situation de normalité, d'un suivi de paramètres pertinents, d'un échantillonnage bimensuel et de la mise en place d'une charte qualité, permet une approche multi-paramètres et multi-sites. Le travail présenté s'inscrit dans le cadre de ce programme de suivi et se base sur l'étude des données acquises depuis 1997. L'objectif de ce sujet de recherche est de détecter les changements intervenant au sein des systèmes marins des côtes françaises à la suite des variations climatiques et/ou des activités anthropiques. Le fil conducteur de cette étude peut se résumer aux questions suivantes :

- Une variabilité des systèmes côtiers français est-elle observable au cours de la dernière décennie ? Si oui, cette variabilité se manifeste-t-elle uniformément le long des 3 façades littorales ?
- Est-il possible de quantifier l'influence potentielle de la variabilité climatique sur les côtes françaises ?
- Un état de référence, caractéristique des conditions naturelles et non influencé directement par l'homme, n'existant pas, est-il tout de même possible d'identifier les anomalies en concentrations de nutriments subies par les sites échantillonnés par le programme SOMLIT ?

- Les 3 façades littorales françaises répondent-elles avec une même intensité à une perturbation d'origine anthropique ? Si non, quel est l'impact des forçages hydro-climatiques locaux sur l'intensité de la fertilisation subie par ces zones côtières ?
- Une modulation hydro-climatique potentielle de la fertilisation côtière ayant été identifiée, est-il possible de s'affranchir de cette composante naturelle dans le but de quantifier, par l'utilisation d'indicateurs, la part exclusivement liée aux activités humaines ?

Afin de caractériser au mieux la variabilité décennale du littoral français tout en évaluant la contribution de chacun des paramètres à chaque point de prélèvement, une approche multi-sites et multi-paramètres a été privilégiée (*Chapitre III*).

La deuxième question a nécessité la description des fluctuations temporelles des principaux facteurs climatologiques (*Chapitre III*). Six principaux facteurs climatologiques ont été choisis pour caractériser cette variabilité à l'échelle de l'Europe de l'Ouest (les champs de pression, la direction et l'intensité des vents, les températures de surface de la mer et les précipitations moyennes). Dans le but de quantifier l'influence potentielle d'un forçage au niveau planétaire, trois indices hydro-climatiques à grande échelle ont été sélectionnés (la NAO pour "North Atlantic Oscillation" ; l'AMO pour "Atlantic Multidecal Oscillation" et les anomalies de températures de surface de l'Hémisphère Nord).

De manière à déterminer les conséquences des activités humaines sur le milieu côtier français, notre recherche a été plus spécialement axée sur l'étude des concentrations en nutriments (nitrates et phosphates). Caractériser le degré d'anthropisation des sites de prélèvement SOMLIT sous-entend comparer ces milieux littoraux à une situation non perturbée. Nous ne disposons malheureusement pas de ce type d'information. Afin de proposer une alternative à cette contrainte, la première étape de notre réflexion s'est donc portée sur l'élaboration d'une nouvelle procédure analytique dans le but de constituer des états de référence relatifs de ces milieux. La seconde étape de ce travail a ensuite consisté en la comparaison entre ces états de référence relatifs et les conditions de concentrations en nutriments des sites suivis par le programme SOMLIT. Cette méthode nous a ainsi permis de quantifier le phénomène de sur-fertilisation subi par le milieu littoral français (*Chapitre IV*).

Cette approche a montré un effet synergétique entre la sur-fertilisation en nutriments et le climat à l'échelle locale. L'effet de l'impact humain est amplifié au moment des forts débits

de rivière drainant les nutriments le long des bassins versants. A l'inverse, il est atténué lors des périodes de fortes insolation, témoignant d'une baisse de ces apports et d'une régulation par l'activité des organismes photosynthétiques. Dans le but de créer des indices témoignant uniquement d'un apport anthropique non impacté par le climat, une comparaison au sein d'une même station a été menée entre un site très proche de la côte et un site plus au large. L'impact du climat a été soustrait en tenant compte des concentrations en silicates, indicatrices des apports naturels en nutriments depuis le continent et relativement peu impactées par les activités anthropiques. L'effet de la température a également été considéré pour s'affranchir de l'effet de consommation par le compartiment biologique (*Chapitre V*).

Le texte qui suit est donc organisé autour de trois chapitres, la partie résultat de chaque chapitre étant constituée par une publication. La partie discussion générale établit le lien logique de la démarche scientifique menée au cours de ce travail de recherche. Cette partie reprend et discute les principaux résultats obtenus à la lumière de travaux de différents auteurs. Ce texte est focalisé essentiellement sur une problématique écologique. Aussi, la description des méthodes numériques employées a été volontairement concentrée dans un Chapitre Méthodologie (*Chapitre II*). Nous renvoyons également le lecteur particulièrement intéressé par l'aspect méthodologique, aux publications qui reprennent en détail une partie des méthodes utilisées dans le cadre de ce travail, originales ou peu appliquées en écologie marine.

En Annexe I

Conséquence des changements climatiques en milieu océanique

G. Beaugrand & E. Goberville

Vertigo, 2010

Chapitre II :

Matériel et Méthodes

Treat data with care, under duress they will tell you anything you want to hear...

(Dave Schoeman)

The process of preparing programs for a digital computer is especially attractive, not only because it can be economically and scientifically rewarding, but also because it can be aesthetic experience much like composing poetry or music

(Donald E. Knuth)

Matériel et Méthodes

II. 1) Contexte environnemental de l'étude : la particularité des systèmes littoraux

II. 1. 1) Définition historique du milieu littoral

Du Moyen Âge jusqu'au 17^{ème} siècle, les termes employés pour parler de la limite entre terre et mer sont bord, rive et rivage de la mer, ou encore grève, mot tombé depuis en désuétude, du moins dans son sens initial d'étendue constituée de sables et de graviers sis au bord de la mer ou d'un cours d'eau. C'est au 18^{ème} siècle qu'apparaît un nouveau mot, "**littoral**", dont le concept va évoluer au fil du temps. Etymologiquement, le littoral est ce qui appartient au rivage, à l'estran, au bord de la mer. Cet adjectif apparaît tardivement, en 1760, et est alors employé pour ce "*qui vit dans les eaux proches du rivage*" (Bertrand 1760). A partir de 1793, il prend son sens moderne pour qualifier ce "*qui est situé au bord de la mer*" (Aulard 1793). En 1828, il est substantivé avec le sens voisin de côte (Mozin et al. 1828).

Aujourd'hui, ce mot est employé autant comme nom que comme adjectif, en tant que synonyme de côte et de côtier (Houdart 2003). Comme souvent, différentes disciplines se le sont appropriées en lui donnant des valeurs différentes. Le littoral a donc un sens et une emprise différente selon qu'il s'agit d'une approche scientifique, réglementaire ou d'aménagement. Dans les années 1960, les océanographes et géomorphologues, alors que leur science était surtout descriptive, l'employèrent pour préciser des formes topographiques ou pour formuler l'étagement des peuplements marins. En géomorphologie sont ainsi définies les flèches littorales, les cordons littoraux, les dunes littorales, la dérive littorale...

Pour les biologistes marins, le système littoral (appelé également système phytal) dépend de la pénétration de la lumière dans la mer (Houdart 2003). Il a ainsi été défini par Jean-Marie Pérès (1961) comme : "*l'ensemble des fonds marins (domaine benthique) du plateau continental, depuis le niveau le plus élevé, où peuvent vivre les espèces marines qui*

se contentent d'une humectation par les embruns ou d'immersions exceptionnelles, jusqu'à la profondeur limite correspondant aux possibilités de vie des algues multicellulaires les plus tolérantes". Subdivisé en mésolittoral, supralittoral et infralittoral, il s'étend de la laisse de haute mer jusqu'à des profondeurs d'une trentaine de mètres dans des eaux riches en matières en suspension, et pouvant atteindre plus de 100 mètres dans des eaux très transparentes. Afin de clarifier la notion de littoral, le programme LOICZ (Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone) a proposé de délimiter ce territoire comme étant la zone comprise entre plus ou moins 200 mètres par rapport au niveau de la mer.

Ecotone, zone de rencontre et d'échanges entre la mer, l'atmosphère, et le continent avec ses apports en eaux douces, le littoral regroupe des systèmes écologiques variés, complexes et très productifs largement utilisés par l'homme tels que marais, estuaires, lagunes, mangroves, salins, lagons. Son extension géographique varie selon les spécificités hydrologiques, océanographiques et géomorphologiques locales. Dans cette bande côtière, les formes, les réalités naturelles physiques ou biologiques, l'économie et même les mentalités des habitants sont modelées par la proximité de l'océan et par le jeu des relations entre la mer, l'atmosphère et la terre sans oublier ses apports en eaux continentales. Les délimitations du littoral varient selon que l'on s'intéresse aux formes, aux écosystèmes, ou à la littoralité des activités économiques et des hommes. Dans le cas général, en France, les zonages les plus appropriés pour se conformer à la législation, tout en incluant les écosystèmes, sont, en mer, la limite des eaux territoriales, et, à terre, une bande de 15 kilomètres minimum incorporant l'arrière pays.

II. 1. 2) Des systèmes productifs, anthropisés et vulnérables

II. 1. 2. 1) La productivité des systèmes littoraux

Bien que ne couvrant que 8% de l'océan mondial (Constanza et al. 1997), les systèmes littoraux produisent près d'un tiers des biens d'origine écologique de notre planète, c'est-à-dire autant que les écosystèmes terrestres ou que les écosystèmes marins hauturiers. Même si ces estimations ne représentent qu'un ordre de grandeur, elles montrent bien le rôle prépondérant tenu par les zones côtières dans le fonctionnement de notre planète. De par leur position, les systèmes littoraux sont d'importantes plaques d'échanges de matière et d'énergie entre le continent et l'océan ouvert, jouant un rôle capital dans les cycles biogéochimiques et notamment ceux de l'azote et du phosphore (Cloern 2001). Ils contribuent à au moins 25% de

la production primaire mondiale, 90% des activités de pêche mondiale, 60% de la valeur économique des écosystèmes marins, 80% de la sédimentation de la matière organique et 50% de la dénitrification globale (Mantoura et al. 1991, Pauly & Christensen 1995, Pernetta & Milliman 1995, Constanza et al. 1997).

II. 1. 2. 2) La sensibilité des systèmes littoraux aux forçages

La position d'interface entre continent et océan induit que ces milieux littoraux subissent et subiront d'importants forçages à la fois dans leur intensité mais aussi dans leur multiplicité (Dobson et al. 1997). Les systèmes littoraux sont contraints à une forte variabilité spatio-temporelle des paramètres physiques, chimiques et biologiques, induite par leur sensibilité face aux pressions d'origine naturelle, comme l'influence climatique (Harley et al. 2006). De plus, cette variabilité est exacerbée par les forçages d'origine anthropique (Cloern 2001), conduisant à une modification des cycles biogéochimiques et de la diversité biologique (Vitousek et al. 1997). En effet, selon de récentes estimations, près de 60% de la population mondiale vit à proximité des côtes et cette tendance est en constante augmentation (Kremer et al. 2005). Les activités humaines, résultant de cette occupation des zones littorales, présentent des évolutions lentes et rapides, à des échelles de temps analogues à celles des variations naturelles. La déconvolution des signaux climatiques et anthropiques, dans les bouleversements du fonctionnement des écosystèmes côtiers, est donc une tâche délicate et constitue une priorité de la communauté scientifique internationale. Selon l'origine des pressions susceptibles de modifier l'état des systèmes littoraux, trois catégories sont déterminées : (1) les pressions liées aux changements globaux, (2) les pressions liées aux activités continentales et (3) les pressions liées aux activités marines.

Plusieurs programmes internationaux ou études prospectives font ainsi état de la vulnérabilité des systèmes littoraux en relation avec leur rôle d'interface, les pressions anthropiques et la variabilité climatique (e.g. Ocean Sciences at the new millenium, NSF, 2001 ; Ecological forecasting, NOAA, 2003 ; LOICZ Science Plan and Implementation Strategy, 2005). Cette vulnérabilité aura des conséquences importantes pour l'évolution de ces systèmes mais également pour l'ensemble des biens qu'ils fournissent (au sens écosystémique : production de matières premières, régulation du climat, valeur économique et patrimoniale – Chapin III et al. 2010).

II. 1. 2. 3) Des systèmes complexes impliquant des échelles spatio-temporelles multiples

Plaquette tournante des échanges entre continent, océan et atmosphère, le littoral est un système à interactions complexes contrôlé par des processus à dynamique rapide (e.g. crues, tempêtes), saisonnière (e.g. marées, étiage, rayonnement solaire), et des processus à dynamique lente (sédimentation, surexploitation des ressources, modification des niveaux et réchauffement global). Ceci sous-entend de fortes interactions entre toutes les composantes du système à différentes échelles spatio-temporelles (Figure II-1).

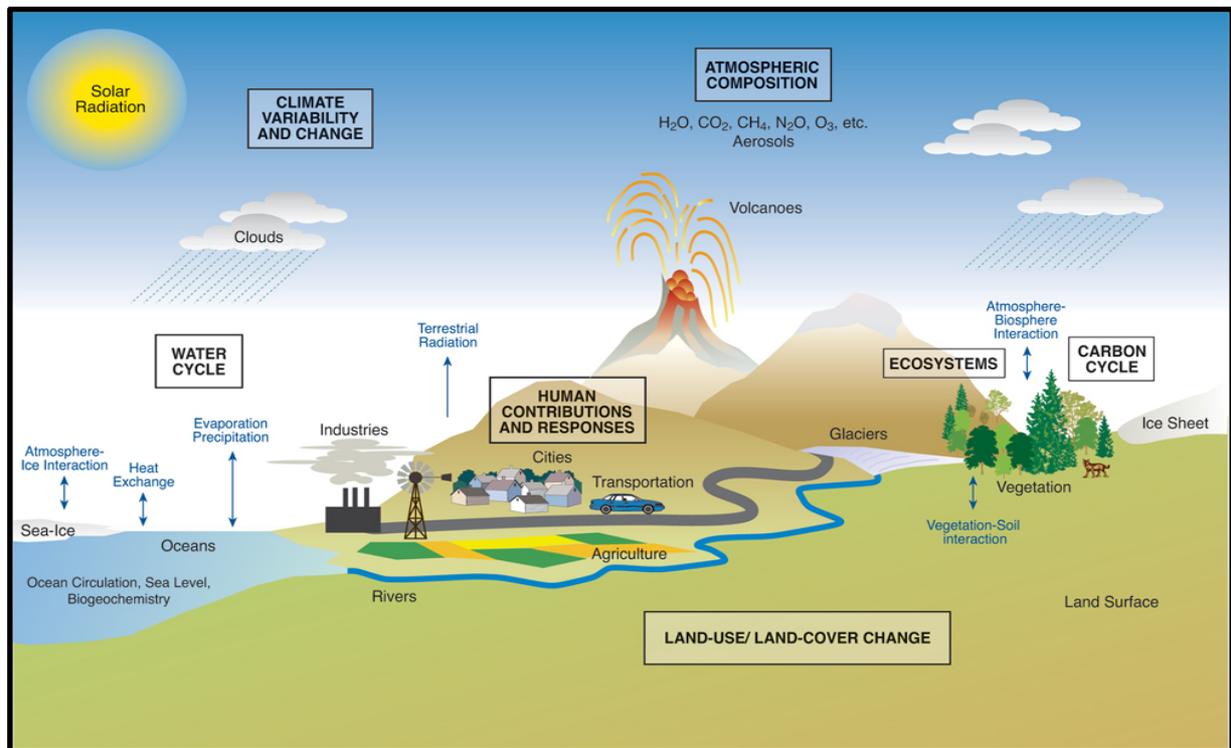


Figure II-1. Diagramme conceptuel des différentes interactions au niveau des systèmes côtiers.
Source : <http://www.climatescience.gov>.

Déjà mentionnée dans le contexte de perturbations à l'échelle de tous les systèmes naturels (cf. *Introduction*), la complexité des interactions à l'échelle des systèmes côtiers est particulièrement exacerbée. Cette complexité s'explique à plusieurs niveaux par :

- la multiplicité des interactions non-linéaires (Mysterud et al. 2001, Labat et al. 2004, Breton et al. 2006) qui ne peuvent plus être étudiées sous l'angle d'un élément unique, ni comme répondant à une unique perturbation. Cela oblige à prendre en compte les effets de cascade et les effets directs et indirects des interactions (interactions entre populations, couplage physique/biologique).
- l'hétérogénéité, la variabilité spatiale et temporelle des systèmes. Cet aspect implique la nécessité de se poser des questions sur l'échelle la plus adaptée à la compréhension des systèmes littoraux, sur la meilleure façon de les représenter dans les modèles, et sur la méthode adaptée pour quantifier leur rôle dans les cycles globaux.
- des structures spatiales et temporelles liées à la fois aux forçages globaux et/ou locaux (e.g. panaches de fleuves, périodicité d'un certain nombre de facteurs impactant). L'étude des perturbations des systèmes côtiers nécessite l'association de disciplines très différentes comme l'hydrologie, l'hydrodynamique, la sédimentologie, la géochimie, la météorologie, la climatologie, la biologie, la microbiologie, la modélisation des écosystèmes (e.g. Billen & Garnier 2007).
- les effets d'emboîtement, d'interface, de discontinuités, de seuils et de rupture entre les différentes échelles et les différents processus (e.g. l'intermittence des apports depuis les bassins versants, les effets de retard dus au stockage ou relargage des composés, le rôle des événements ou périodes exceptionnelles).

Sans réduire l'intérêt et l'importance des études de processus individualisés, la compréhension de ces particularités repose sur l'étude des propriétés caractéristiques des systèmes complexes (Cloern 2001). Un certain nombre de propriétés ne peuvent pas être déconnectées de tout ou partie du fonctionnement global du système qui les concerne (Pereira & Cooper 2006). La compréhension de la réponse des milieux littoraux aux contraintes naturelles de l'environnement et aux effets anthropiques doit ainsi s'appuyer sur la mise en place de réseaux d'observation (Alley et al. 2003). L'étude de l'évolution de l'environnement s'inscrivant dans la durée, l'analyse des variations des descripteurs, doit s'établir à moyen et long terme (Pereira & Cooper 2006). Elle est contrainte par le temps de réaction des systèmes naturels et la fréquence des événements à observer. Pour établir des modèles fiables

d'évolution des systèmes vivants, il est indispensable de disposer de données fiables, répétées régulièrement sur de longues durées.

II. 2) La mise en place du Service d'Observation en Milieu Littoral (SOMLIT)

Le constat de la nécessité d'un réseau d'observation des milieux littoraux a conduit au développement d'une démarche systématique d'observation des systèmes côtiers français, issue d'initiatives locales, fondées soit sur des opportunités, soit sur une tradition de culture scientifique propre à chaque station marine. La fédération de ces efforts a conduit à la mise en place du Service d'Observation en Milieu Littoral (SOMLIT), labellisé par l'INSU (Institut National des Sciences de l'Univers) en 1996. Aux quatre stations marines fédérées dès le départ (Roscoff, Arcachon, Marseille et Villefranche-sur-Mer) sont venues s'ajouter Banyuls (1997), Brest et Wimereux (1998) et Luc-sur-Mer (2007), permettant de couvrir l'ensemble des façades maritimes françaises (Figure II-2).

Certaines contraintes sont cependant inhérentes à l'observation à moyen et long terme de l'environnement littoral :

- la définition de sites d'études considérés comme représentatifs d'une situation de normalité pour une zone côtière définie.
- la diversité des sites, nécessaire pour permettre, au travers de la diversité des situations appréhendées, de définir des tendances globales d'évolution à l'échelle de temps considérée.
- la définition d'un ensemble de paramètres descriptifs pertinents et la définition d'un protocole commun de mesure, d'analyse et de contrôle.
- une périodicité d'échantillonnage permettant d'étudier les variations saisonnières et interannuelles, tout en garantissant l'acquisition d'une information pertinente et fiable par tous les partenaires du Service.
- une mise à disposition des données tant pour répondre à la demande scientifique que sociétale.

- une analyse et une interprétation des données, qui pour le long terme se situe à l'échelle décennale.

II. 2. 1) Les objectifs du programme SOMLIT

L'objectif général du SOMLIT n'est pas d'étudier le fonctionnement de l'écosystème en chaque site retenu. Cette problématique relève de programmes de recherche spécifiques à chaque station. Le programme SOMLIT a pour but, via l'observation systématique et coordonnée au niveau national, d'homogénéiser l'acquisition d'un corps de paramètres (hydro-climatiques, chimiques et biologiques) communs à tous les sites, afin de permettre une étude comparée de séries à long terme sur les trois façades du littoral français.

Au travers de la stratégie mise en place, cette observation a différents objectifs secondaires en fonction de l'échelle de temps d'étude à laquelle on se place. Ainsi, à long terme, le but est :

- de définir pour chaque site une situation de "normalité" à partir de laquelle toute perturbation accidentelle (tempête, crue, épisode de pollution...) pourra être étudiée.
- d'établir les fluctuations saisonnières et inter-annuelles intra-sites et inter-sites.
- d'établir les fluctuations communes aux différents sites afin de mettre en évidence les réponses du littoral à des forçages climatiques ou anthropiques globaux et de distinguer ces deux sources de variabilité.

Pour une échelle d'étude à court terme, l'objectif est d'établir un cadre spatio-temporel pour les actions de recherche ayant en outre pour but d'expliquer la variabilité observée.

II. 2. 2) La stratégie du SOMLIT

Afin de répondre aux objectifs fixés, une stratégie commune a été mise en place pour l'ensemble des stations marines concernant l'échantillonnage (sites et acquisition), les variables descriptives du milieu littoral français (les paramètres), les mesures et analyses et enfin la gestion des données récoltées.



Figure II-2. Localisation des stations impliquées dans le programme SOMLIT. Les sites de Wimereux et Roscoff possèdent 2 sites de prélèvements (définis comme site côte et site large) ; les prélèvements de l'Estuaire de la Gironde sont effectués à 3 sites : en amont (point kilométrique 30), en zone intermédiaire (pK 52) et en aval (pK 86).

II. 2. 2. 1) Les sites de prélèvement (Figure II-2 et Table II-1)

La stratégie du SOMLIT diffère de celle d'un réseau de surveillance de l'environnement. La majeure partie des points d'appui correspond, non pas à des emplacements choisis pour leur sensibilité vis-à-vis de contaminants identifiés, mais, au contraire, à une situation réputée de normalité, c'est-à-dire représentative de la zone côtière considérée, supposée se trouver sous l'influence de causes naturelles de variabilité. Ceci peut se résumer en disant que le SOMLIT s'intéresse à des phénomènes de durée au moins pluri-décennale (dont les variations à faible ou moyenne échelle de temps se traduisent par des modifications de faible amplitude à une échelle de temps décennale) et qui concernent donc des phénomènes globaux. Le choix des sites a donc été principalement dicté par :

- leur intérêt environnemental au niveau local ou régional.
- l'existence d'un passé de suivi hydro-climatique et biologique.
- l'accessibilité permettant une visite régulière et, pour l'avenir, l'automatisation de la mesure de certains des paramètres.

II. 2. 2. 2) L'acquisition des paramètres

La situation commune de prélèvement choisie par l'ensemble des stations est une situation de prélèvement :

- en sub-surface (voir Table II-1).
- à haute mer (pour les mers à marée ; voir Table II-1).
- de périodicité de 15 jours.

Les conditions de prélèvements en fonction du coefficient de marée ont été choisies à partir de la connaissance locale des contextes écologiques, afin d'assurer les prélèvements dans des masses d'eau représentatives de la normalité pour la zone côtière considérée. Par exemple, les prélèvements effectués en Manche orientale, au sud de Boulogne-sur-mer (pour la station marine de Wimereux), en vives eaux et à pleine mer, permettent, du fait de la dérive sud/nord des courants, de prélever à proximité du port en (1) s'affranchissant de l'influence des eaux du port et (2) en prélevant à la côte dans des eaux dessalées du fleuve côtier. Les

conditions de prélèvement permettent ainsi de caractériser des eaux typiquement côtières et des eaux "du large".

STATION	SITE	LONGITUDE	LATITUDE	DISTANCE COTE (km)	BATHYMETRIE (m)	PROFONDEUR DE PRELEVEMENT	CONDITION DE MAREE
Wimereux	Point C	1°31'17" E	50°40'75" N	1.85	53	1	PM - VE Coef 95 +/-25
Wimereux	Point L	1°24'60" E	50°40'75" N	9.26	26	1	PM - VE Coef 95 +/-25
Luc-sur-Mer	Luc-sur-Mer	0°20'48" W	49°19'78" N	0.17	6.5	1	PM - VE Coef 95 +/-25
Roscoff	Astan	3°56'15" W	48°46'40" N	3.50	60	1	PM - ME
Roscoff	Estacade	3°58'58" W	48°43'56" N	0.05	3	1	PM - ME
Brest	Portzic	4°33'07" W	48°21'60" N	0.25	10	2	PM - Coef. 70 +/-10
Gironde	pk 86	0°57'00" W	45°31'00" N	2	8.2	1	PM, mi jusant, BM, mi-flot - ME
Gironde	pk 52	0°43'50" W	45°14'80" N	1	7	1	PM, mi jusant, BM, mi-flot - ME
Gironde	pk 30	0°40'54" W	45°06'04" N	0.5	8	1	PM, mi jusant, BM, mi-flot - ME
Arcachon	Eyrac	1°10'00" W	44°40'00" N	0.05	6	3	PM
Banyuls	Sola	03°08'70" E	42°29'30" N	0.92	27	3	---
Marseille	Frioul	05°17'30" E	43°14'30" N	6.48	60	1	---
Villefranche-sur-Mer	Point B	7°19'00" E	43°41'00" N	1.85	95	1	---

Table II-1. Table récapitulative des caractéristiques des sites de prélèvement SOMLIT. Le tableau recense les noms des sites de prélèvements, les coordonnées géographiques, la distance à la côte et la bathymétrie de chacun des sites ainsi que la profondeur de prélèvement. Les caractéristiques hydrodynamiques des sites sont également présentées succinctement. Voir la Figure II. 2 pour une localisation des stations marines SOMLIT. Source : <http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr/fr/>.

II. 2. 2. 3) Les paramètres descripteurs de l'état du littoral français

L'un des intérêts majeurs des milieux littoraux suivis dans le cadre du SOMLIT est la variété de situations existantes. Malgré cette diversité, les paramètres choisis sont pertinents, tant pour les aspects de la physico-chimie des eaux que pour la biologie. Ils représentent un compromis entre le "coût" de la mesure et sa charge d'information. Les 13 paramètres suivants ont été sélectionnés comme constituant le corps des mesures partagées en commun par tous les points d'appui SOMLIT¹ :

Température, salinité, oxygène dissous, pH, nitrate, nitrite, azote ammoniacal, phosphate, silicate, matière en suspension (MES), carbone organique particulaire (COP), azote organique particulaire (NOP), chlorophylle a.

II. 2. 2. 4) Mesures et analyses des paramètres suivis

Un protocole commun d'échantillonnage et d'analyses² a été adopté par l'ensemble des stations marines du réseau SOMLIT. Ce protocole commun a été établi à partir de méthodes éprouvées en milieu côtier et à partir des acquis des spécialistes locaux des paramètres pris en compte. Ces protocoles ont déjà fait l'objet de normes par des réseaux existants (RNO ; Réseau National d'Observation de la qualité chimique du milieu marin, 1974), et/ou ont été choisis par des programmes nationaux ou internationaux (JGOFS ; Joint Global Ocean Flux Study ; Knap et al. 1996), et/ou sont reconnus comme protocoles standards par des manuels d'un usage répandu (Strickland & Parsons 1972, Aminot & Kérouel 2004, Aminot & Kérouel 2007). L'évolution de ces protocoles tient compte des avancées faites sur l'acquisition et les analyses de ces différents paramètres, tout en garantissant la continuité temporelle des séries acquises.

¹ La visualisation des séries temporelles et des histogrammes des valeurs de chaque paramètre à chaque site pour la période 1997-2009 a constitué une étape préliminaire essentielle lors de la familiarisation avec la base de données SOMLIT. Cependant, du fait de l'approche choisie (en multi-sites et multi-paramètres), les séries temporelles et les histogrammes n'ont pas été annexés à ce manuscrit, mais sont disponibles via le site : <http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr/fr/>. Le lecteur trouvera néanmoins en annexe les histogrammes des pourcentages de données disponibles pour chaque paramètre et chaque station pour la période 1997-2009 (Figures A-II-1 et A-II-2).

² Les descriptions complètes des protocoles communs sont disponibles via le lien internet: <http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr/fr/spip.php?rubrique15>.

II. 2. 2. 5) Les procédures de "contrôle-qualité" des paramètres

L'un des objectifs du SOMLIT est de mettre à la disposition de la communauté scientifique les données acquises, en garantissant aux utilisateurs la qualité des données et du service. Pour atteindre cet objectif les acteurs des stations marines du réseau SOMLIT se sont lancés depuis 2006 dans la formalisation d'une démarche qualité en utilisant la norme ISO/CEI 17025 : "*Prescriptions générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnage et d'essai*", comme référentiel qualité. Différents outils qui couvrent à la fois l'aspect organisationnel et l'aspect technique sont en cours d'élaboration afin d'améliorer la qualité des données et du service. Afin de mener à bien cette tâche, un responsable qualité a été nommé dans chacune des stations participant au SOMLIT³, ainsi qu'au niveau national⁴, et une cellule qualité a été formée.

Les données acquises par chaque station SOMLIT sont "validées". Cette validation consiste en l'attribution d'un code qualité à chacune des données acquises de façon discrète. Ces codes qualités (Table II-2) sont inspirés du code WOCE (World Ocean Circulation Experiment) et adaptés au SOMLIT⁵. L'application d'un code qualité à chacune des données est réalisée de manière conjointe par les personnels ayant réalisé le prélèvement, l'analyse et ayant l'expertise scientifique ; elle est sous la responsabilité des responsables scientifiques des stations marines.

II. 2. 2. 6) L'archivage des données

L'harmonisation des banques de données dans les différentes stations, l'archivage et l'accès à ces données sur un site commun, sont apparus comme une priorité du programme SOMLIT dès sa création. Les données sont stockées et sauvegardées sur le site internet SOMLIT (<http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr/fr/>) permettant à la fois (1) la mise à disposition, d'une façon publique, des données acquises pour les différents paramètres en les affichant en mode dégradé et (2) la récupération des données à l'état brut via une demande en ligne.

³ En 2010, les responsables qualités des stations participant au SOMLIT sont: Elsa Breton (Wimereux), Juliette Fauchot (Luc-sur-Mer), Pascal Morin (Roscoff), Peggy Rimmel-Maury (Brest), Sophie Ferreira (Arcachon), Louise Oriol (Banyuls), Nicole Garcia (Marseille), Laure Mousseau (Villefranche-Sur-Mer).

⁴ En 2010, le responsable national de la cellule qualité du programme SOMLIT est Nicolas Savoye.

⁵ Un descriptif complet des codes qualités est disponible via le lien internet: <http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr/fr/spip.php?rubrique10>.

Définitions des Codes Qualités: mesures discrètes

Les codes ci-dessous sont inspirés du code WOCE et adaptés au SOMLIT

0 ➡ Donnée en dessous de la limite de détection

Mesure en dessous de la limite de détection de l'appareil de mesure; la valeur indiquée est celle de la limite de détection

1 ➡ Prélèvement effectué, mais mesure non réalisée

Le prélèvement a été effectué mais la mesure n'a pas été possible car échantillon perdu (e.g. flacon cassé, égaré, mauvaise conservation de l'échantillon). Valeur manquante indiquée par 999 999

2 ➡ Mesure bonne, échantillon non répliqué

Mesure qui a été effectuée dans les meilleures conditions aussi bien de prélèvement que d'analyse et qui ne paraît pas scientifiquement aberrante

3 ➡ Mesure douteuse

Mesure unique ou moyenne de répliqués sur laquelle un doute existe (e.g. problème rencontré lors de l'analyse ou de l'étalonnage, valeur différant très notablement de celles habituellement rencontrées, hors limites précisions, répliqués dispersés sans raison...). Il est conseillé aux futurs utilisateurs de se méfier de l'utilisation de cette valeur

4 ➡ Mesure mauvaise

Mesure manifestement mauvaise. La valeur est cependant conservée dans la base de données car la mesure a été réalisée. Il est conseillé aux futurs utilisateurs de ne pas utiliser cette valeur

5 ➡ Prélèvement effectué, mais valeur pas encore reportée

Prélèvement effectué mais mesure pas encore disponible (e.g. délai d'analyse). Valeur par défaut : 999 999

6 ➡ Mesure bonne (moyenne de plusieurs répliqués)

Valeur moyennée à partir de plusieurs répliqués réalisés sur le même échantillon. La valeur est bonne

7 ➡ Mesure bonne (valeur acquise hors protocoles SOMLIT)

Prélèvement et/ou mesure et/ou analyse effectués selon un protocole différent de celui recommandé par SOMLIT. La valeur est bonne mais contacter le responsable scientifique de la station pour plus d'informations

8 ➡ Donnée non validée

La valeur est indiquée mais n'a pas encore été validée

9 ➡ Echantillon non prélevé

L'échantillon n'a pas été prélevé, rendant impossible la mesure pour ce paramètre (e.g. état de la mer ne permettant pas le prélèvement...)

Table II-2. Définitions des codes qualités attribués aux données des différents paramètres analysés. Ces codes sont inspirés du code WOCE et adaptés au SOMLIT. Ils représentent un outil essentiel lors des travaux d'analyse statistique des données.

II. 3) L'utilisation de données complémentaires

Le travail présenté s'inscrit dans le cadre du programme SOMLIT en se basant sur l'étude des données acquises depuis 1997 dans l'ensemble des stations participant à l'observation du littoral français. L'approche choisie dans le traitement des données des sites côtiers français a néanmoins nécessité l'utilisation de données complémentaires. Celles-ci s'étendent selon un large panel spatial, de l'échelle locale à l'échelle globale, afin de tenir compte à la fois des différents degrés d'évaluation de l'évolution du littoral, mais aussi des caractéristiques locales des sites suivis. Dans un souci de clarté, les données complémentaires utilisées ont été ordonnées en fonction des problématiques soulevées et des questions scientifiques posées. Le fil conducteur de présentation des données est donc conforme aux *Chapitres III, IV et V* correspondant chacun à une publication scientifique.

II. 3. 1) L'impact du climat sur la variabilité décennale des systèmes côtiers français (cf. *Chapitre III*)

II. 3. 1. 1) Les matrices climatiques NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction, USA/National Center for Atmospheric Research, USA)

Dans le but de déceler l'existence d'un forçage d'origine climatique sur la variabilité décennale littorale, il était impératif de disposer d'informations sur les fluctuations climatiques à l'échelle de la France. Ce ne fut malheureusement pas le cas. Notre stratégie d'étude nous a confronté à certains obstacles tels que le peu de références bibliographiques traitant de la variabilité climatique observée sur les milieux suivis par le SOMLIT ou encore l'inadéquation entre les problématiques traitées par les météorologistes et celles soulevées par les écologistes marins. Un travail préliminaire de description des fluctuations temporelles du climat s'exerçant sur les systèmes côtiers français entre 1997 et 2006 a permis de résoudre ces contraintes. Au total, six variables climatologiques ont été sélectionnées : les champs de pression, la direction (composantes zonale et méridionale) et l'intensité des vents, les températures de surface de la mer et les précipitations moyennes. Les données utilisées ont été interpolées selon une grille de 1° longitude x 1° latitude, excepté pour les précipitations moyennes (résolution de 2.5° longitude x 2.5° latitude). La partie *Variables climatologiques*

(cf. *Chapitre III.4.2*) discute plus en détail du raisonnement suivi pour la sélection de ces variables.

Les six variables climatologiques proviennent de réanalyses⁶ issues du centre NCEP/NCAR⁷. Ces données sont obtenues à partir de modèles ayant été lancés sur plusieurs années en mode assimilation de données. La méthode d'assimilation est fondée sur la prise en compte des diverses observations (par exemple, des données satellites, des mesures effectuées par bateau ou par avion ; Talagrand 1997). La procédure d'assimilation permet d'insérer dans le modèle cette masse souvent importante d'informations non intégrées dans le lancement initial des calculs. Des comparaisons sont effectuées à des intervalles de temps réguliers entre les valeurs provenant des données asynchrones d'une part et les valeurs correspondantes qu'aurait prévu le modèle sur ce court intervalle de temps d'autre part. A partir des différences entre l'estimation fournie par le modèle et les nouvelles observations, l'évolution du modèle est rectifiée. Ces résultats ajustés deviennent pour la suite les nouvelles données initiales pour le pas de temps suivant.

II. 3. 1. 2) Les indices hydro-climatiques à grande échelle

Cependant, le forçage climatique sur les écosystèmes s'exerce sur une multitude d'échelles spatiales (Dobson et al. 1997). Pour quantifier l'influence de la variabilité climatique globale, trois indices hydro-climatiques à grande échelle ont été sélectionnés du fait de leur importance potentielle sur la zone géographique comprenant le milieu littoral français (Marshall et al. 2001, Beaugrand 2009) et étudiés sur la période temporelle correspondant à celle du SOMLIT (voir Figure II-3 pour la représentation des séries temporelles) :

- l'indice "North Atlantic Oscillation" d'hiver (NAO ; Hurrell 1995), phénomène d'alternance des masses atmosphériques à grande échelle en Atlantique Nord (Dickson & Turrell 2000). L'indice se calcule par la différence de pression d'une station météorologique proche de l'anticyclone des Açores et d'une station proche de la dépression d'Islande. Issue de l'interaction entre océan et atmosphère, son activité est

⁶ Les réanalyses sont des bases de données originales, disponibles sur une certaine période de temps, combinant des données d'observations et des sorties de modèles climatologiques et qui permettent d'appréhender la dynamique climatologique à l'échelle globale.

⁷ "NCEP/NCAR Reanalysis Project" est un projet commun entre les NCEP et le NCAR (Kalnay et al. 1996). Le but de ce projet était de fournir de nouvelles réanalyses atmosphériques en utilisant les données historiques et ainsi produire l'analyse de l'état de l'atmosphère actuelle. Elles sont disponibles toutes les 6 heures depuis 1948 (Kistler et al. 2000). De plus amples informations sur les données peuvent être trouvées via le site www.cru.uea.ac.uk/cru/data/ncep.

plus marquée en hiver. Cet indice est disponible sur :

<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/nao/>

- les anomalies de températures de surface de l'hémisphère Nord ou Northern Hemisphere Temperature anomalies (NHT anomalies) calculées entre 1958 et 2006 (Beaugrand 2009), indice issu du Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Meteorological Office (Exeter, UK).
- l'indice "Atlantic Multidecadal Oscillation" (AMO ; Enfield et al. 2001), variation cyclique naturelle du système océan-atmosphère dans l'Océan Atlantique Nord qui se traduit par une variation de la température de surface de l'océan d'environ 0.4°C sur une période de 20 à 40 ans (Enfield et al. 2001). L'indice de l'AMO est calculé en faisant la moyenne de la température de surface (Sea Surface Temperature) du nord de l'Océan Atlantique à l'équateur de l'Océan Atlantique, entre 0°N et 60°N, puis entre 75°W et 7.5°W. Cet indice, issu du National Climate Data Center (NCDC, USA), est disponible via : <http://climexp.knmi.nl/>.

Le paragraphe intitulé : *Indices hydro-climatiques grande échelle* (cf. *Chapitre III.4.3*) donne des explications complémentaires sur les forçages exercés par ces indices sur les écosystèmes.

II. 3. 2) Modulation climatique de la fertilisation anthropique (cf. *Chapitre IV*)

II. 3. 2. 1) Quantification de la fertilisation anthropique des systèmes côtiers : construction d'états de référence relatifs

Quantifier le phénomène de fertilisation des milieux littoraux, conséquence des forçages anthropiques, sous-entend comparer les sites de prélèvements côtiers à une situation peu ou pas perturbée par les activités humaines. Etablir un "état des lieux" des systèmes naturels est un préalable indispensable pour mettre en évidence les perturbations potentielles (Binet 1997). Ne disposant malheureusement pas de conditions de référence, la démarche choisie a conduit à la création d'états de référence relatifs à partir des climatologies⁸ utilisées à l'échelle de l'Hémisphère Nord et extraites du World Ocean Atlas 2005 (WOA05, Locarnini

⁸ Les climatologies sont des moyennes, sur de longues périodes, de paramètres climatiques classiques, selon une base mensuelle dans le cadre de notre étude.

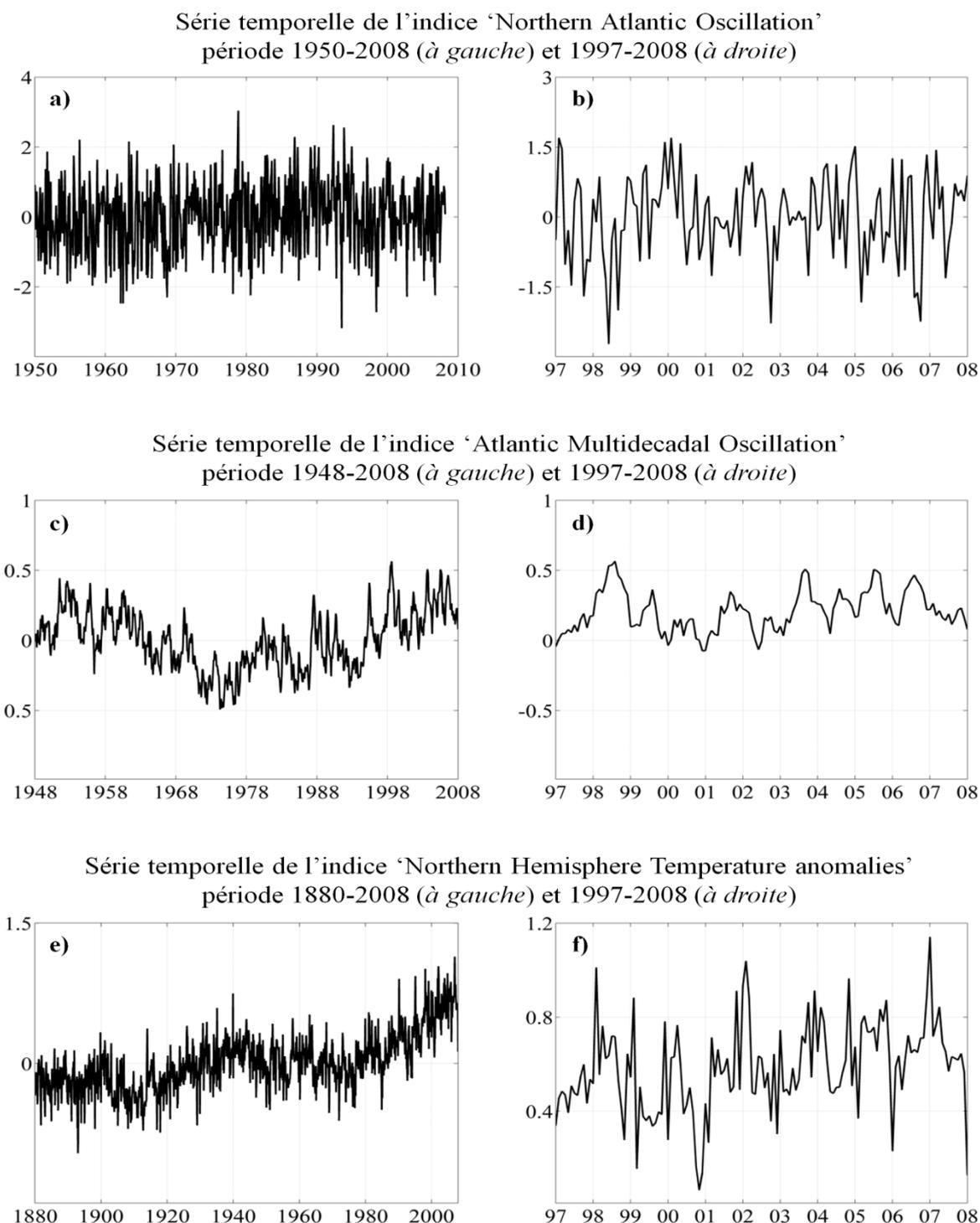


Figure II-3. Séries temporelles des trois indices hydro-climatiques à grande échelle qui ont été utilisés dans cette étude. Série temporelle de la "Northern Atlantic Oscillation" pour (a) la période 1950-2008 et (b) la période 1997-2008. Série temporelle de la "Atlantic Multidecadal Oscillation" pour (c) la période 1948-2008 et (d) la période 1997-2008. Série temporelle de la "Northern Hemisphere Temperature anomalies" pour (e) la période 1880-2008 et (f) la période 1997-2008.

et al. 2006). En accord avec des études récentes (e.g. Cloern 2001, Billen & Garnier 2007, Ludwig et al. 2009), trois paramètres ont été sélectionnés : la température de surface de l'océan, les concentrations en nitrates et les concentrations en phosphates.

L'objectif des climatologies extraites du World Ocean Atlas 2005 est de rassembler et d'étudier, de manière statistique, un grand nombre d'observation physiques et biogéochimiques. Les informations sont regroupées sur le plus grand nombre possible de sites géographiques et d'années pour chacun des sites. C'est à l'aide des statistiques obtenues que la climatologie étudie l'état physique et biogéochimique moyen de l'océan mondial sur une grille régulière de mailles de 1° longitude x 1° latitude. Plus d'information sur les données sont disponibles à <http://www.nodc.noaa.gov>.

II. 3. 2. 2) Evaluation de l'importance des phénomènes hydro-climatiques locaux sur la fertilisation en nutriments

L'étude de la variabilité décennale du littoral français a révélé que le milieu littoral français n'est pas insensible aux forçages du climat. En tenant compte de ce résultat, l'impact hydroclimatique local sur le phénomène de fertilisation en nutriments, résultant des pressions anthropogéniques sur les systèmes, a été considéré. En accord avec de nombreuses études sur cette problématique (Valiela 1995, Cloern 2001, Labat et al. 2004, Harley et al. 2006), un indice de l'alternance de périodes humides et sèches a été créé à partir de deux paramètres hydroclimatiques reconnus comme ayant une influence sur l'état des systèmes littoraux : les durées d'insolation, témoignant de l'activité biologique des organismes photosynthétiques, et les débits des rivières, modulant les apports en sels nutritifs (notamment les concentrations en nitrates, phosphates et silicates).

II. 3. 2. 2. 1) Les durées d'insolation (données Météo-France)

L'insolation est, au sens météorologique, l'exposition au rayonnement solaire direct. Il y a insolation si l'éclairement reçu par une portion de la surface terrestre est supérieure à 120 watts par mètre carré. Cet éclairement doit correspondre à un rayonnement solaire direct, c'est-à-dire des rayons qui n'ont pas subi de diffusion en traversant l'atmosphère.

La durée d'insolation est mesurée en dixièmes d'heures par des héliographes qui permettent des relevés instantanés dans les stations météorologiques. La durée d'insolation est

variable suivant des critères astronomiques (levers et couchers de soleil) ou des critères météorologiques (nébulosité de la voute céleste).

Afin de prendre en considération le phénomène de régulation des concentrations en nutriments par la production primaire, la variabilité de la durée d'insolation a donc été examinée en parallèle de la quantification de la fertilisation anthropogénique du littoral français. Les données mensuelles d'insolation issues des stations météorologiques les plus proches de chaque site de prélèvement SOMLIT ont été collectées via la climathèque Météo-France disponible via le lien : <http://climatheque.meteo.fr/>.

II. 3. 2. 2) Les débits de rivière (données banque Hydro-France)

L'impact de l'hydrologie locale apparaît comme l'un des forçages majeurs des systèmes côtiers. Les caractéristiques hydrologiques des bassins versants jouent sur les concentrations en nutriments tels que les nitrates, les phosphates et les silicates (Cloern 2001). L'évaluation des apports des rivières les plus proches des sites de prélèvements SOMLIT s'est ainsi avérée comme essentielle à la compréhension du phénomène de fertilisation de la façade littorale française.

La modulation potentielle de l'effet de fertilisation en nutriments a été estimée par l'étude de la contribution des rivières sur les sites de prélèvement SOMLIT. Les données mensuelles des débits des rivières les plus proches des sites de prélèvement SOMLIT ont été collectées via la banque de données HYDRO, gérée par Le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (service du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable ; <http://www.hydro.eaufrance.fr/>)

II. 3. 3) Procédures et indicateurs d'évaluation de la fertilisation anthropique des systèmes côtiers (cf. Chapitre V) : Les données de la station DYFAMED (DYnamique des Flux Atmosphériques en MEDiterranée)

Pour évaluer la fertilisation en nutriments des systèmes littoraux français, au travers d'indicateurs anthropiques, après soustraction de la variabilité naturelle, une étude comparative a été réalisée entre un site de prélèvement très proche de la côte (le plus soumis aux perturbations anthropiques) et un site plus éloigné ("large"), pour une même zone suivie.

Au sein du SOMLIT, seules les stations de Roscoff et Wimereux présentent ces deux sites. L'existence de la station d'échantillonnage DYFAMED, géographiquement proche de la station de Villefranche-sur-Mer, nous a permis d'intégrer la façade Méditerranéenne à notre réflexion. En effet, cette zone de prélèvement peut être considérée comme une zone de référence d'eaux représentatives de larges zones de l'océan mondial sans influence marquée des eaux continentales et donc du phénomène de fertilisation anthropogénique (http://www.obs-vlfr.fr/sodyf/MainFrameset_fr.htm).

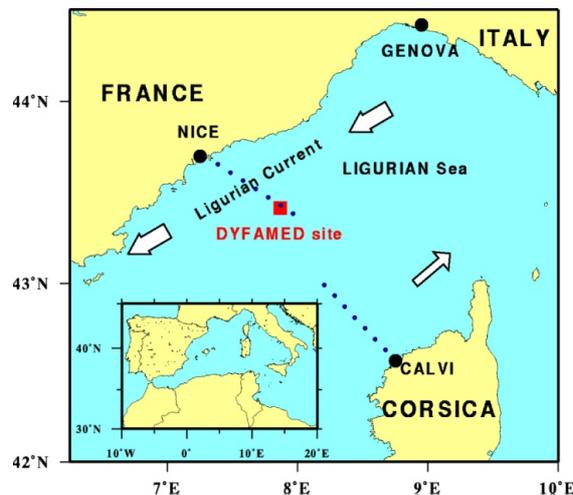


Figure II-4. Localisation du site de prélèvement DYFAMED.

Source : <http://www.somas.stonybrook.edu/MedFlux/>

Le site d'observation DYFAMED est situé dans la zone centrale de la mer Ligure à environ 50 km sur la radiale Nice-Calvi (position : 43°25N, 07°52E ; Figure II-3) par 2350m de profondeur. En mer Ligure la bande côtière est alimentée par le courant liguro-provençal qui isole complètement la zone du large. Le site présente donc des caractéristiques hauturières. Dans cette zone centrale la production primaire dépend des apports profonds de sel nutritifs mais aussi, pour une part encore mal déterminée, d'apports atmosphériques (Marty et al. 2002, Marty & Chiavérini 2002). Les cycles biogéochimiques dans la colonne d'eau et la vie benthique dépendent des flux verticaux passifs ou actifs, le transfert vertical étant très rapide lors d'épisodes brefs mais intenses (e.g. floraison printanière de diatomées).

La série temporelle DYFAMED fait partie des séries à long terme initiées dans le cadre du programme JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study) sur le modèle des stations BATS (Bermuda Atlantic Time-Series) et HOT (Hawai Ocean Time-series) (Karl et al. 2003). Parmi les variables physiques et biogéochimiques de base de cette série (les "core parameters" JGOFS définis à l'échelle internationale, Knap et al. 1996), quatre paramètres suivis en subsurface ont été sélectionnés pour l'étude comparative avec le site de Villefranche-sur-Mer : la température de surface, les concentrations en nitrates, silicates et phosphates. Un descriptif complet du service d'observation DYFAMED est disponible sur le site internet : <http://www.obs-vlfr.fr/sodyf/>.

II. 4) Les outils méthodologiques

Dans un souci de clarté de présentation, les outils méthodologiques, utilisés au cours de ce travail de recherche, sont décrits d'après leur ordre d'utilisation dans les chapitres suivants (*Chapitres III, IV et V*). Chaque outil méthodologique est accompagné d'un court commentaire afin de décrire l'intérêt de la méthode en rapport avec la problématique traitée.

II. 4. 1) L'impact du climat sur la variabilité décennale des systèmes côtiers français

II. 4. 1. 1) La variabilité spatio-temporelle décennale du milieu littoral français

II. 4. 1. 1. 1) L'uniformisation des données d'observation du milieu littoral français

La base de données SOMLIT, structurée dans le temps (i.e. l'observation correspondant au paramètre échantillonné) et dans l'espace (i.e. les sites de prélèvements), présente une grande quantité d'informations sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de la colonne d'eau. Cependant, les prélèvements ne s'opèrent pas à la même date à chaque site. De plus, conformément au protocole défini par le SOMLIT, la fréquence d'échantillonnage est bimensuelle, mais pour certains sites, les prélèvements sont effectués en hebdomadaire (à Brest, Villefranche-sur-Mer et Banyuls).

L'application d'une analyse multi-sites, permettant l'étude de l'évolution du système littoral français, a contraint à une étape d'uniformisation des dates de prélèvement. La résultante consiste en un cube de données, comprenant tous les paramètres et tous les sites, de dimensions : 13 paramètres x observations x 12 sites de prélèvements. Deux pas de temps ont été définis pour l'uniformisation des dates :

- une fréquence bimensuelle, en accord avec la périodicité d'acquisition du SOMLIT. Le cube de données se présentant sous la forme : 13 paramètres x 312 observations (deux prélèvements par mois sur la période 1997-2009) x 12 sites de prélèvements.
- une fréquence mensuelle, pour la période 1997-2006, en accord avec la périodicité des variables climatiques NCEP/NCAR utilisées dans l'étude de la quantification du forçage climatique sur les systèmes côtiers. Le cube de données se présente alors sous la forme : 13 paramètres x 120 observations (un prélèvement par mois sur la période 1997-2006) x 12 sites de prélèvements.

II. 4. 1. 1. 2) La désaisonnalisation des données par application d'une moyenne mobile simple

Une série temporelle est définie comme une suite d'observations indexées par un ensemble ordonné. Elle se définit comme une série statistique bidimensionnelle (t, y_t) , où la première composante du couple t est le temps et la deuxième composante est une variable numérique y_t prenant ses valeurs aux instants t .

Cette série temporelle (y_t) est la résultante de différentes composantes fondamentales :

- la tendance (f_t) qui représente l'évolution à long terme de la série (y_t) étudiée : elle traduit le comportement "moyen" de la série.
- la composante saisonnière ou saisonnalité (s_t) qui correspond à un phénomène qui se répète à intervalles de temps réguliers (périodique). Cette composante saisonnière est donc périodique de période p .
- la composante résiduelle ou bruit ou résidu (e_t) , fluctuations irrégulières, en général de faible intensité mais de nature aléatoire.

Lorsqu'une tendance caractérise l'évolution de la série, il importe de l'extraire des données. La méthode des moyennes mobiles, à classer dans les méthodes de lissage non-paramétriques, est fréquemment utilisée pour extraire cette tendance. Elle consiste à effectuer, en se déplaçant le long de la série, les moyennes arithmétiques successives de $(2m + 1)$ données contiguës selon la formule :

$$y_i = \frac{1}{2m+1} \sum_{i-m}^{i+m} x_i \quad (\text{II. 1})$$

où y_i est la moyenne mobile simple à l'observation i , m le nombre de mois, $2m+1$ la fenêtre temporelle de lissage, avec $m + 1 \leq i \leq n - m$, pour une série de n observations.

Par exemple, dans notre cas, $m = 6$. On effectue donc la moyenne des 13 premières valeurs, puis celles des valeurs 2 à 14, etc. Chaque moyenne est rapportée au centre de l'intervalle des $(2m + 1)$ données et on ne peut calculer que $(n - 2m)$ moyennes mobiles pour une série de n observations (Legendre & Legendre 1998).

II. 4. 1. 1. 3) L'application de l'ACP à 3 modes

La nécessité d'une meilleure compréhension de l'évolution physique, chimique et biologique de la façade littorale française a conduit au suivi plurisystémique mis en place par le SOMLIT. Comme décrit précédemment, les données recueillies constituent un cube trois dimensions : paramètres x temps x sites. Cependant, peu de techniques existent pour analyser ce type de données complexes : l'analyse de co-inertie (Dolédéc & Chessel 1994) ou l'analyse en composantes principales (ACP) à trois modes (Hohn 1993).

Afin d'analyser la covariation spatio-temporelle des variables descriptives du fonctionnement des systèmes côtiers français le choix méthodologique s'est porté sur l'ACP à trois modes : temps (1^{er} mode) x paramètres (2^{ème} mode) x sites (3^{ème} mode) (Kroonenberg 1989, Beaugrand et al. 2000), et plus particulièrement sur la première étape d'analyse. Cette étape, appelée d'initialisation, consiste en la réalisation d'une ACP classique sur chacune des trois matrices symétriques générées pour chaque mode. Le calcul de l'ACP se fait sur une matrice de corrélation. Souhaitant étudier l'évolution temporelle des sites suivis par le SOMLIT, le mode temporel a été retenu, et une seule ACP a été calculée sur la matrice cubique déployée : observations x (paramètres x sites). Dans le cas traité ici, bien que le nombre de variables soit plus important que le nombre d'observations, l'analyse reste valable,

le focus ne se faisant que sur les 2 premières composantes principales (Legendre & Legendre 1998).

Il est également important de préciser que des variables supplémentaires peuvent être incluses dans l'analyse (e.g. la température dans l'étude présentée dans le *Chapitre III*). Dès lors, les variables n'ont pas de poids dans le calcul des composantes principales.

Les vecteurs propres sont calculés suivant la formule :

$$\mathbf{U}_n = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda}^{1/2} \quad (\text{II. 2})$$

où \mathbf{U}_n est la matrice des vecteurs propres normalisés, \mathbf{U} la matrice des vecteurs propres et $\mathbf{\Lambda}$ la matrice diagonale des valeurs propres. Par conséquent, les variables dans l'espace des vecteurs propres sont corrélés linéairement avec les première et deuxième composantes principales (Legendre & Legendre 1998).

L'application de cette technique permet, en une seule analyse, de caractériser les changements temporels, l'identification des paramètres qui contribuent à ces changements et la localisation des sites les plus influencés par l'évolution temporelle.

II. 4. 1. 2) Etude de l'influence climatique sur la variabilité du milieu littoral français

II. 4. 1. 2. 1) L'intensité de liaison entre les variables : les coefficients linéaires de Bravais-Pearson

Etudier la corrélation entre deux ou plusieurs variables équivaut à étudier l'intensité de la liaison qui peut exister entre ces variables. Une mesure de cette corrélation est obtenue par le calcul du coefficient de corrélation linéaire. Ce coefficient est égal au rapport de leur covariance et du produit non nul de leurs écarts type. Le coefficient de corrélation est compris entre -1 et 1 (Legendre & Legendre 1998). Pour deux séries de longueur (N) équivalente, si l'on suppose les deux tableaux de valeurs suivant : $X(x_1, \dots, x_n)$ et $Y(y_1, \dots, y_n)$ pour chacune des deux séries, alors le coefficient de corrélation (r_p) liant les deux séries se calcule selon la formule suivante :

$$r_p = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{II. 3})$$

Si les deux séries ne sont pas corrélées, r vaut 0. Les séries sont d'autant mieux corrélées que r est loin de 0 (proche de -1 ou 1).

Dans notre étude les analyses de corrélations ont été utilisées dans différents cas de figure, et notamment (1) lors des analyses préliminaires de familiarisation avec les données, afin d'étudier les relations pouvant exister entre les différents paramètres relevés par le SOMLIT (analyses non retranscrites dans ce manuscrit) ; (2) déceler les liens entre la variabilité du littoral français, le climat à l'échelle de l'Europe de l'Ouest et l'influence des indices hydro-climatiques à l'échelle globale (*Chapitre III*) ; (3) étudier la relation entre le climat à l'échelle régionale et le phénomène de fertilisation des systèmes côtiers consécutif aux apports anthropogéniques (*Chapitre IV*).

II. 4. 1. 2. 2) La prise en compte du décalage temporelle entre les variables : les corrélations avec retard

Dans le cas de l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur celle du système littoral français, l'intensité de la liaison existant entre les variables a donc été obtenue par le calcul des coefficients de corrélation linéaire (*Chapitre III*). Il a cependant été important de tester si les relations entre les variables étaient directes ou si les systèmes côtiers réagissaient à l'effet climatique avec un certain retard. Une méthode existe afin de déterminer l'existence d'un décalage potentiel : la corrélation avec retard (Legendre & Legendre 1998) :

$$r_p(k) = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (x_{i+k} - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N-k} (x_{i+k} - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^{N-k} (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{II. 4})$$

La série y est progressivement décalée suivant le pas de temps k (positif dans le cas de notre étude). Plus le pas de temps de décalage augmente plus la zone de chevauchement entre les deux séries est courte. Le nombre de degrés de liberté est ajusté en fonction du pas de

temps appliqué. Cette méthode est importante pour interpréter les fluctuations d'une série de données en termes des variations de séries associées (Legendre & Legendre 1998).

*II. 4. 1. 2. 3) La correction pour l'autocorrélation temporelle :
l'ajustement du nombre de degrés de liberté*

La présence de structure temporelle implique souvent l'absence d'indépendance entre les séries, même lorsque les observations ont été réalisées de façon indépendante : l'autocorrélation entre les séries peut ainsi compliquer l'inférence statistique. Dans la comparaison des séries temporelles, notamment par des analyses de corrélation, deux méthodes existent pour prendre en compte cette autocorrélation :

- transformer le test statistique, afin qu'il prenne en compte l'autocorrélation présente dans les données, notamment en ajustant les méthodes de vérifications des hypothèses (ajustement des degrés de liberté).
- transformer les données, afin que les séries ne soient plus autocorrélées (introduction d'un bruit blanc, élimination des tendances, calcul des différences premières...). Mais une partie du signal est perdue, le plus souvent sur les basses fréquences.

Dans notre étude, les analyses de corrélation effectuées (linéaires et avec retard) ont été menées en modifiant le test de corrélation de Bravais-Pearson pour ajuster le nombre de degrés de liberté et compenser ainsi l'autocorrélation. La méthode utilisée est celle proposée par Chelton (1984) et modifiée par Pyper et Peterman (1998) qui permet de calculer le nombre théorique d'observations indépendantes :

$$\frac{1}{N^*} = \frac{1}{N} + \frac{2}{N} \sum_j r_{xx}(j)r_{yy}(j) \quad (\text{II. 5})$$

où N^* est le nombre d'observations indépendantes dans les séries X et Y , N est la taille de l'échantillon (nombre total d'observations) et $r_{xx}(j)$ et $r_{yy}(j)$ représentent les autocorrélations des séries X et Y .

II. 4. 1. 2. 4) Le problème des tests multiples : la méthode de Hochberg

Plus on réalise de tests statistiques et plus on a de chance de rejeter à tort l'hypothèse nulle d'égalité des ratios au seuil α : la probabilité d'obtenir un faux positif augmente. Le risque de première espèce α étant généralement fixé à 5%, on accepte de rejeter à tort l'hypothèse nulle 5 fois sur 100. Pour pallier à ce problème, des méthodes de correction des tests multiples existent qui corrigent cette dérive (voir Wright (1992), pour une présentation de ces méthodes). Les *p-values* sont recalculées pour prendre en compte le nombre de tests réalisés. Une méthode de correction largement répandue est celle de Bonferroni (de α on passe à α/n , n étant le nombre de tests effectués ; Legendre & Legendre 1998). Cette méthode a pour objectif de s'assurer que le rejet de l'hypothèse nulle est valide au seuil initialement fixé quel que soit le nombre de tests effectués. Mais d'autres méthodes de corrections, dérivées de celle de Bonferroni, sont plus performantes (Wright 1992, Legendre & Legendre 1998).

Dans le cadre de notre étude, afin de corriger ce biais potentiel, c'est la procédure de Hochberg (qualifiée de "séquentielle ascendante" ; Hochberg 1988) qui a été appliquée, avec un $\alpha = 0.05$, lors des analyses de corrélations entre la variabilité du système littoral, les variables climatologiques et les indices hydro-climatiques à grande échelle. Cette procédure a été choisie, après comparaison entre les différentes méthodes de correction (e.g. Holm 1979, Bonferroni), car considérée comme plus robuste et moins conservatrice (Legendre & Legendre 1998). La procédure suivie est la suivante :

- les degrés de signification sont ordonnés tels que : $p_{(1)} < \dots < p_{(m)}$, avec m le nombre d'hypothèses et p les degrés de signification.
- l'hypothèse ayant le plus grand degré de signification au seuil $\alpha^*_{(m)} = \alpha$ est testée. Si cette hypothèse est rejetée, toutes les hypothèses sont rejetées et la procédure s'arrête. Si elle n'est pas rejetée, l'hypothèse suivante ayant le plus grand degré de signification au seuil $\alpha^*_{(m-1)} = \alpha/3$ est testée. Si cette hypothèse est rejetée, les $(m-1)$ hypothèses restantes sont rejetées et la procédure s'arrête. Si elle n'est pas rejetée, l'hypothèse suivante ayant le plus grand degré de signification au seuil $\alpha^*_{(m-2)} = \alpha/4$ est testée et ainsi de suite jusqu'à ce qu'une hypothèse soit rejetée ou jusqu'à ce qu'aucune des hypothèses ne soient rejetées.

Pour illustrer cette procédure, un exemple simple est proposé :

Test de 3 hypothèses nulles H_1 , H_2 et H_3 , telles que $H_1=0$, $H_2=1$ et $H_3=0$, et dont les degrés de signification sont :

$p_1 = 0,06$	$p_2 = 0,02$	$p_3 = 0,03$
$p_{(1)} = p_2 = 0,02$	$p_{(2)} = p_3 = 0,03$	$p_{(3)} = p_1 = 0,06$

p-values ajustées :

$p_{(3)}^* = p_{(3)} = 0,06$
$p_{(2)}^* = \min(p_{(3)}^*, 2p_{(2)}) = \min(0,06; 0,054) = 0,054$
$p_{(1)}^* = \min(p_{(2)}^*, 3p_{(1)}) = \min(0,054; 0,06) = 0,054$

Résultat : aucune hypothèse rejetée au seuil de 5%

II. 4. 2) Procédure d'identification d'un état de référence relatif

II. 4. 2. 1) Démarche de l'identification des états de référence relatifs

Quantifier l'intensité de la perturbation anthropique sur le milieu côtier nécessite, tout d'abord, de comparer l'état actuel des systèmes à une situation de référence, qui peut-être considérée comme non perturbée. Malheureusement, ce type d'information pour les sites de prélèvement SOMLIT n'existe pas. Afin de proposer une alternative à cette contrainte, notre réflexion s'est portée sur l'élaboration d'une nouvelle procédure analytique dans le but de constituer des états de référence relatifs des sites suivis. C'est ensuite grâce à la comparaison entre ces états de référence relatifs et les observations du SOMLIT que le phénomène de sur-fertilisation en nutriments des systèmes, conséquence des activités humaines, est évalué (*Chapitre IV*).

Dans notre étude, nous nous sommes focalisés sur trois paramètres : la température, les concentrations en nitrates et les concentrations en phosphates, ces deux nutriments pouvant être considérés comme témoins des activités anthropiques (Cloern 2001, Selman et al. 2008). A partir de ces trois paramètres, un état de référence relatif a été déterminé à partir des données du WOA05 pour chaque site et chaque mois de l'année. Les états de référence relatifs obtenus, contraint à une influence anthropique minimale, se caractérisent par des températures et des concentrations en nitrates et en phosphates statistiquement non différentes

du site de prélèvement SOMLIT sélectionné pour un mois donné. Pour déterminer ces états de référence relatifs, la procédure analytique se base sur l'adaptation d'un modèle de niche écologique récemment développé par Beaugrand et collaborateurs (sous presse) et appliqué par Lenoir et collègues (2010).

II. 4. 2. 2) Description et adaptation du modèle de niche écologique : Non-Parametric Probabilistic Ecological Niche model (NPPEN)

Le modèle NPPEN repose sur l'application d'une version simplifiée de la procédure de permutation multi-réponses (Multiple Response Permutation Procedures ; MRPP) proposé par Mielke et collaborateurs (1981).

II. 4. 2. 2. 1) Principe de la procédure de permutation multiréponses

Le test MRPP est un test non-paramétrique permettant de tester l'hypothèse de l'absence de différence entre deux ou plusieurs groupes (Mielke et al. 1981, McCune & Mefford 1999). Les groupes doivent être prédéterminés. Le test mesure la capacité d'une classification à maximiser la similarité à l'intérieur d'un groupe et à minimiser la similarité entre les groupes en calculant la statistique d'agrément (statistique A) à l'intérieur d'un groupe et la valeur de signification p associée (Mielke & Berry 1982). La statistique A donne une description de l'homogénéité à l'intérieur d'un groupe par rapport à ce qui peut être attendu par le hasard. La valeur de A varie entre 0 (pas de similarité entre les membres du groupe) et 1 (tous les membres du groupe sont identiques). La signification statistique (valeur de p) est toutefois influencée par la taille de l'échantillon (McCune & Mefford 1999). Une bonne introduction à la méthode est disponible dans l'annexe de Biondini et collaborateurs (1985).

La version simplifiée diffère légèrement dans le sens où au lieu de comparer deux groupes d'observations, l'analyse teste si une observation appartient à un groupe d'observations. L'adaptation de cette procédure a été récemment appliquée pour comparer un site à un groupe de sites (Beaugrand & Helaouët 2008).

II. 4. 2. 2. 2) Calcul de la distance moyenne multivariée entre l'observation à tester et le groupe d'observations

II. 4. 2. 2. 2. 1) Préparation des données

Afin de déterminer les états de référence relatifs, chaque cellule de la grille géographique de 1° de longitude x 1° de latitude issue de la WOA05 (matrice $\mathbf{X}_{n,p}$; n observations and p variables) est testée par rapport aux groupes d'observations de la station SOMLIT considérée pour le mois choisi (matrice $\mathbf{Y}_{m,p}$; m observations et p variables), en prenant en compte conjointement : les températures de surface de l'océan, les concentrations en nitrates et en phosphates (p = 3).

Une matrice appelée $\mathbf{Z}_{n+1,p}$ est créée pour chaque observation de \mathbf{Y} à tester par rapport à \mathbf{X} . Pour la première observation, la matrice suivante est construite :

$$\mathbf{Z}_{n+1,p} = \begin{bmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & \cdot & \cdot & y_{1,p} \\ x_{1,1} & x_{1,2} & \cdot & \cdot & x_{1,p} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \cdot & \cdot & x_{n,p} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 6})$$

avec $x_{i,j}$, les observations contenues dans la matrice \mathbf{X} et $y_{i,j}$, une observation de la matrice \mathbf{Y} . La construction de cette matrice \mathbf{Z} est répétée m fois, en fonction du nombre m d'observations dans \mathbf{Y} .

II. 4. 2. 2. 2. 2) Calcul de la distance moyenne multivariée entre l'observation à tester et le groupe d'observations (matrice de référence)

Initialement, le test MRPP utilise une distance Euclidienne, une distance Euclidienne au carrée ou une distance de corde (Mielke et al. 1981). Mais dans le contexte de notre étude, c'est la distance généralisée de Mahalanobis (1936) qui a été privilégiée. Elle diffère de la distance Euclidienne par le fait qu'elle prend en compte la covariance (ou la corrélation) entre

les descripteurs (Ibañez 1981). Ainsi, à la différence de la distance Euclidienne où toutes les composantes des vecteurs sont traitées de la même façon, la distance de Mahalanobis accorde un poids moins important aux composantes les plus bruitées.

Pour chaque station et chaque mois la distance généralisée de Mahalanobis, entre chaque cellule de la grille (WOD05) et chaque groupe d'observations SOMLIT, est calculée selon une forme particulière de la distance généralisée, donnant la distance entre une observation et le centroïde d'un unique groupe (Dagnelie 1975) :

$$D_{Z_1, Z_{n,p}}^2 = k' R^{-1} k \quad (\text{II. 7})$$

où $R_{p,p}$ est la matrice de corrélation de la matrice Z , $k_{1,p}$ est le vecteur des différences entre les valeurs des p variables à Z_1 de la matrice Z et la moyenne $\bar{Z}_{i \neq 1, j}$ des p variables de la matrice Z . La distance moyenne observée ε_o est ensuite calculée :

$$\varepsilon_o = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (\text{II. 8})$$

avec n le nombre total de distances, égal au nombre d'observations contenues dans X .

II. 4. 2. 2. 2. 3) Calcul de la probabilité que l'observation appartienne à la matrice de référence

La distance moyenne généralisée de Mahalanobis est testée en remplaçant chaque observation de X par y dans Z . Le nombre maximal de permutations est égal à n . Après chaque permutation, la moyenne de la distance généralisée ε_s est recalculée, avec $1 \leq s \leq n$. Une probabilité p peut être attribuée en regardant le nombre de fois où une distance généralisée moyenne simulée est supérieure ou égale à la distance généralisée moyenne observée entre l'observation et la matrice de référence X .

$$p = \frac{q_{\varepsilon_s \geq \varepsilon_o}}{n} \quad (\text{II. 9})$$

où la probabilité p est le nombre de fois où la distance généralisée moyenne est supérieure ou égale à la distance généralisée moyenne. Cette procédure, appliquée à chaque observation de $Y_{m,p}$, conduit à une matrice $P_{m,1}$ de probabilités.

Dans notre étude, les cellules de la grille géographique issues de la WOA05 sont conservées dès que la probabilité (que l'observation appartienne aux groupes d'observations) est supérieure ou égale à 0.1. Cette valeur indique que les cellules de la WOA05 choisies ne diffèrent pas statistiquement du groupe d'observation de la station SOMLIT choisie et pour le mois donné. La répétition de cette procédure pour tous les sites SOMLIT à chaque mois de l'année permet l'obtention de 144 états de référence relatifs (12 sites x 12 mois).

II. 4. 2. 5) La synthèse de la quantification de la sur-fertilisation côtière : le diagramme en box-plot

La quantification du phénomène de sur-fertilisation des sites côtiers français a été rendue possible par la comparaison entre les concentrations en nitrates et phosphates relevées par le SOMLIT et celles déterminées par les états de référence relatifs. Plus les concentrations en nitrates et phosphates de référence et les concentrations relevées par le SOMLIT sont similaires, plus la valeur de probabilité obtenue est proche de 1 ; à l'inverse, plus les concentrations relevées par le SOMLIT sont éloignées des concentrations de référence, plus la valeur de probabilité obtenue est proche de 0. La procédure, répétée pour toutes les observations SOMLIT a permis d'obtenir 12 séries temporelles de probabilités (1 par site de prélèvement). Afin de synthétiser ces résultats, la représentation en box-plot a été choisie.

Le diagramme en box-plot, invention de Tukey (1977), permet, schématiquement, de résumer les informations d'une distribution : degré de dispersion et asymétrie dans les données, identification des valeurs aberrantes. La distribution est représentée par une boîte rectangulaire dont le haut et le bas représentent les premiers et troisièmes quartiles. La boîte comporte un trait horizontal symbolisant la médiane de la distribution. La longueur de la boîte constitue l'intervalle interquartile. Les observations au-delà des limites de la boîte sont représentées individuellement ; il s'agit des valeurs atypiques de la distribution ("outliers") (Sokal & Rohlf 1995). Cette représentation permet de visualiser les différences entre

distributions sans faire de suppositions de leur distribution statistique ; les box-plot sont non-paramétriques.

II. 4. 3) Création d'indices de concentrations anthropiques en nitrates et phosphates

De nombreuses études ont montré l'existence d'interactions entre le climat et les activités humaines (Cloern 2001, Labat et al. 2004). Par exemple, les phénomènes de fertilisation des systèmes littoraux peuvent être modulés par l'effet des précipitations (entraînant une augmentation de cette fertilisation) ou par des températures plus élevées (atténuant ces phénomènes). Notre recherche s'est donc axée sur la nécessité de déconvoluer le signal climatique du signal anthropique, afin de déterminer des indicateurs de la perturbation causée par les activités humaines. Pour soustraire l'effet du climat, les indices de fertilisation anthropogénique ont été créés en calculant des séries temporelles de résidus, issues de l'application de régressions linéaires multiples.

II. 4. 3. 1) Définition de la régression linéaire multiple

La régression linéaire multiple consiste en une complexification de la régression linéaire simple. La régression linéaire simple cherche à "expliquer" les valeurs prises par une variable y par les valeurs prises par une autre variable x , ces deux variables étant supposées avoir entre elles une relation linéaire (Sokal & Rohlf 1995) :

$$\hat{Y} = ax + b \quad (\text{II. 10})$$

où la droite obtenue, dite des moindres carrés, est caractérisée par une pente b et une ordonnée à l'origine a . La distinction est faite entre les valeurs estimées (\hat{Y}) et les valeurs observées (y). La régression linéaire simple cherche à faire passer une droite "au mieux" (c'est à dire au sens des moindres carrés) à travers le nuage de points représentant les données dans le plan (x, y).

Le problème traité par la régression linéaire multiple est le même, si ce n'est que l'on cherche à "expliquer" les valeurs de y non pas par une seule variable x , mais par plusieurs variables $\{x_j\}$, dites "variables explicatives". En changeant légèrement les notations précédentes, on suppose donc que \hat{Y} et les $\{x_j\}$ sont liés par une relation linéaire (Sokal & Rohlf 1995) :

$$\hat{Y} = a + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p \quad (\text{II. 11})$$

Cette équation est celle d'un hyperplan à p dimensions (avec p le nombre de variables explicatives). La régression linéaire multiple cherche à faire passer "au mieux" un plan à travers le nuage de points représentant les données dans l'espace où a est "l'intercept" (valeur moyenne de \hat{Y} quand les variables explicatives sont nulles) et les paramètres β_1, \dots, β_p sont les pentes de l'hyperplan appelées "coefficients de régression". La représentation visuelle ne reste bien sur possible que lorsqu'il n'y a que deux variables explicatives x_1 et x_2 (Figure II-5).

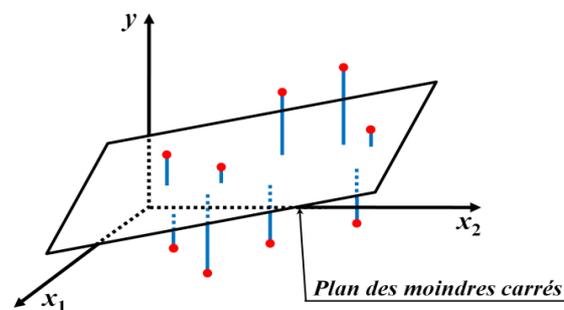


Figure II-5. Représentation de l'hyperplan des moindres carrés d'une régression linéaire multiple dans le cas de 2 variables explicatives x_1 et x_2 . Les points rouges représentent les observations. Les segments bleus symbolisent les résidus de la régression linéaire multiple.

Les données peuvent alors être représentées dans l'espace (x_1, x_2, y) et la relation s'écrit (Sokal & Rohlf 1995) :

$$\hat{Y} = a + b \cdot x_1 + c \cdot x_2 \quad (\text{II. 12})$$

Dans l'illustration ci-dessus, le plan des moindres carrés est celui qui minimise la somme des carrés des longueurs des segments bleus parallèles à l'axe y . Ces longueurs (signées) s'appellent les résidus du modèle. Le plan des moindres carrés est donc celui qui minimise la somme des carrés des résidus. En dimension supérieure, il faut se contenter de dire que la régression linéaire multiple détermine l'hyperplan de dimension p minimisant la somme des carrés des écarts (mesurés parallèlement à l'axe y) entre les points représentant les données et l'hyperplan. Les résidus de la régression linéaire multiple sont obtenus par le calcul de la différence entre les valeurs observées et les valeurs prédites.

II. 4. 3. 2) Calcul des coefficients de régression partielle

Les coefficients de régression obtenus par régression multiple sont en fait des coefficients de régression partielle. Chacun mesure l'effet de la variable explicative concernée sur la variable dépendante, lorsque la ou les autres variables explicatives sont tenues constantes. Dans l'exemple où deux variables explicatives sont traitées (*Formule II.12*), le coefficient b tient compte de l'effet de la variable x_2 sur la variable dépendante y . Il mesure l'effet de x_1 lorsque l'on a enlevé l'effet de x_2 . Ces coefficients sont calculés de la manière suivante (Sokal & Rohlf 1995) :

$$r_{y, x_1 \cdot x_2} = \frac{r_{y, x_1} - r_{y, x_2} r_{x_1, x_2}}{\sqrt{(1 - r_{y, x_2}^2)(1 - r_{x_1, x_2}^2)}} \quad (\text{II. 13})$$

où r_{y, x_1} , r_{y, x_2} , et r_{x_1, x_2} , sont les coefficients de corrélation simple entre les variables y et x_1 , y et x_2 et x_1 et x_2 , respectivement.

La signification individuelle de chaque coefficient de régression peut-être testée (par un test t de Student). Lorsque la probabilité de la statistique atteint ou dépasse le seuil α choisi, la variable explicative considérée a un effet partiel significatif sur la variable dépendante.

II. 4. 3. 3) Calcul du coefficient de détermination multiple R^2

La variation expliquée par la régression est mesurée par le coefficient de détermination multiple R^2 , rapport entre la dispersion expliquée par la régression (SCR) et la dispersion totale (SCT). Dans le cas de 2 variables explicatives, la formule est la suivante (Sokal & Rohlf 1995) :

$$R^2_{y.x_1,x_2} = b.r_{y,x_1} + c.r_{y,x_2} \quad (\text{II. 14})$$

La racine carrée de ce coefficient est le coefficient de corrélation multiple. Il mesure la liaison entre la variable à expliquer y et l'ensemble des variables explicatives.

II. 4. 3. 4) Test de significativité du modèle de régression

Les hypothèses du test sont :

- H_0 : la variable y est linéairement indépendante des variables x_j .
- H_1 : la variable y est expliquée linéairement par au moins une des variables x_j .

La signification du modèle de régression multiple peut être testée par une variable auxiliaire F_{RM_c} :

$$F_{RM_c} = \frac{R^2(n-p-1)}{p(1-R^2)} = \frac{CMR}{CME} \quad (\text{II. 15})$$

où n = nombre d'observations et p = nombre de variables explicatives.

De la même façon que pour une analyse de variance, ce test compare la variance expliquée avec celle des résidus. On rejette H_0 au seuil α lorsque $F_{RMc} \geq F_{(\alpha, p, n-p-1)}$. Si H_0 est vraie, ces deux valeurs devraient être à peu près semblables, et la statistique-test F_{RMc} suivra une distribution F de Fisher-Snedecor à p et $(n-p-1)$ degrés de liberté.

Dans notre étude, quatre paramètres ont été sélectionnés : les températures de surface (SST), les concentrations en silicates, nitrates et phosphates. La démarche choisie est d'établir des indices de concentrations anthropogéniques en nitrates et phosphates (*Chapitre V*). Les SST ont été choisies car elles témoignent d'une influence importante du climat sur les systèmes physiques, chimiques et biologiques (Cloern 1996). Les silicates ont été sélectionnés car ils témoignent des apports depuis le continent et ne sont pas directement influencés par les activités humaines, contrairement aux concentrations en nitrates et phosphates (Muylaert et al. 2009). Du fait du nombre restreint de variables incluses dans l'analyse, le comportement de ces variables a été étudié par une procédure incrémentale (forward-backward multiple regression).

Chapitre III :

L'impact du climat sur la variabilité décennale des systèmes côtiers français

Climate is what we expect; weather is what we get

(Mark Twain)

Luttons contre le réchauffement de la planète. Ouvrons notre frigo!

(Anonyme)

L'impact du climat sur la variabilité décennale des systèmes côtiers français

III. 1) Avant-propos

De nombreuses études ont montré que la variabilité climatique influençait les écosystèmes marins, du compartiment benthique (Kroncke et al. 1998, Warwick et al. 2002) au compartiment pélagique (Ohman & Hirche 2001), aussi bien en domaine océanique (Hare & Mantua 2000) qu'en domaine côtier (Attrill & Power 2002). A l'interface entre continent, océan et atmosphère, les milieux littoraux sont d'importantes zones d'échanges de matière et d'énergie et jouent un rôle capital dans les cycles biogéochimiques (Kremer et al. 2005). Cette position accentue la forte variabilité spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques. La première étape de ce travail consistait donc à caractériser cette variabilité des systèmes marins côtiers français au cours de la période 1997-2006. La démarche exploratoire multi-sites et multi-paramètres choisie a permis d'évaluer la fluctuation du système littoral français, tout en examinant la contribution de chacune des variables suivies et ce, à chaque point d'échantillonnage.

L'influence climatique sur les systèmes naturels est visible au travers de multiples processus physiques et chimiques (Kirby et al. 2009). Le climat impacte la biodiversité des systèmes côtiers ainsi que leurs fluctuations temporelles (Harley et al. 2006) et s'étend à toutes les unités fonctionnelles ne se limitant pas simplement à un rôle sur le compartiment biologique (Drinkwater et al. 2003). Bien que cet impact soit largement avéré, peu d'études ont tenté de quantifier l'influence potentielle de la variabilité climatique sur le milieu littoral français. Dans un premier temps il a donc été nécessaire de décrire les fluctuations

temporelles des principaux facteurs climatiques au cours de la période d'échantillonnage 1997-2006. Cependant, les renseignements sur la climatologie des côtes françaises n'étaient disponibles ni dans la bibliographie ni auprès des météorologistes. En effet, la bibliographie se rapporte essentiellement à des changements climatiques à grande échelle spatio-temporelle alors que notre problématique se situe à méso-échelle et que la période de temps est relativement courte dans le domaine de l'analyse temporelle. Quant aux météorologistes étudiant la variabilité climatique, leurs problématiques ne rejoignent pas forcément celles des écologistes marins.

Il était donc nécessaire de consacrer une partie de notre étude à la description des fluctuations temporelles du climat à l'échelle de la France. Au total, six variables climatiques ont été sélectionnées : les champs de pression de l'océan, les vents (composantes méridionales, zonales et leur intensité), les températures de surface de l'océan et les précipitations moyennes. Ce travail, essentiellement descriptif, nous a servi par la suite à mettre en lien la variabilité climatique à l'échelle de l'Europe de l'Ouest et la variabilité du milieu littoral français, issue de l'analyse multi-sites et multi-paramètres. Puis, afin d'étendre notre réflexion sur l'influence du forçage climatique, trois indices hydro-climatiques grande échelle ont été sélectionnés afin de discerner une éventuelle empreinte climatique à l'échelle globale.

Cette étude tente de répondre aux questions suivantes : une variabilité des systèmes côtiers français est-elle observable au cours de la période d'échantillonnage 1997-2006 ? Si cette variabilité existe, est-elle uniforme sur tous les sites de prélèvement et quels sont les paramètres y contribuant le plus ? Quelle est la part de l'influence des fluctuations climatiques à méso-échelle sur le littoral français ? Peut-on identifier un forçage climatique à grande échelle sur ces systèmes ?

III. 2) Publication: Climate-driven changes in coastal marine systems of Western Europe

Climate-driven changes in coastal marine systems of Western Europe

E. Goberville, G. Beaugrand, B. Sautour, P. Tréguer & the SOMLIT Team

Marine Ecology Progress Series, 2010. 408:129-147

III. 2. 1) Données utilisées

- *Séries temporelles pour 13 paramètres physiques, chimiques et biologiques des 12 stations SOMLIT pour la période 1997-2006.*
- *Séries temporelles pour les six variables climatologiques pour la période 1997-2006 issues du National Centers for Environmental Prediction (NCEP, USA) et du National Center for Atmospheric Research (NCAR, USA).*
- *Séries temporelles des trois indices hydro-climatiques à grande échelle issues du National Climate Data Center aux USA (pour la NAO et l'AMO) et du Hadley Centre for Climate Prediction and Research au Royaume-Uni (pour les anomalies de température en Hémisphère Nord).*

III. 2. 2) Analyses numériques

- *lissage par moyenne mobile d'ordre 6.*
- *première étape de l'analyse en composante principale 3-modes (étape d'initialisation).*
- *corrélation linéaire de Pearson.*
- *corrélations croisées.*

- méthode de Pyper & Peterman pour la prise en compte de l'autocorrélation temporelle.
- ajustement des probabilités par la procédure séquentielle ascendante d'Hochberg.

III. 2. 3) Principaux résultats obtenus

- Une variabilité des systèmes côtiers français est observable au cours de la dernière décennie, avec une période relativement stable jusqu'en 2001, suivie d'une modification abrupte jusqu'en 2005.
- Les milieux littoraux ont été affectés par la variabilité climatique entre 1997 et 2006 comme en témoignent les fortes corrélations entre le changement observé, le climat à méso-échelle et les indices hydro-climatiques grande échelle, mais le signal semble plus difficile à détecter après 2005.
- La température contribue fortement à cette variabilité des systèmes côtiers.
- Consécutivement à l'action conjuguée de ces facteurs hydro-climatologiques à méso et grande échelle, on observe une diminution des concentrations en sels nutritifs et du matériel particulaire pour les sites les plus au nord après 2001 (Wimereux, Roscoff et Brest) ; à l'inverse, sur la même période, une augmentation de la salinité est constatée.
- Parallèlement à ces diminutions, un impact sur les concentrations en chlorophylle a, et par conséquent sur le compartiment biologique est visible, entraînant des risques de changements du comportement des espèces, de leurs abondances et de la composition des biocénoses.

III. 3) Introduction

Many studies have shown that climate variability influences marine systems ranging from benthic (Kroncke et al. 1998, Warwick et al. 2002) to pelagic (Ohman & Hirche 2001) and from oceanic (Hare & Mantua 2000) to coastal (Attrill & Power 2002). The impact of climate on marine systems is not limited to a particular biological component but generally extends to all ecosystem functional units (Drinkwater et al. 2003). Some studies have documented potential links from phytoplankton to zooplankton to higher trophic levels (Aebischer et al. 1990, Frank et al. 2005, Lehodey et al. 2006). Climate also impacts the biodiversity of marine systems and their spatial and temporal fluctuations, modulating the phenology of many organisms (i.e. their rhythm of reproduction, Edwards & Richardson 2004) as well as their response at both year-to-year and decadal scales (Cury et al. 2002).

Climate influences systems through a number of physical and chemical processes and pathways (Kirby et al. 2009). In coastal systems, in addition to the well-documented direct effects of temperature on organism (Beaugrand & Ibanez 2004), temperature has an impact on water stratification, which in turn modulates vertical nutrient and oxygen inputs (Sarmiento & Gruber 2006). For example, climate warming is likely to increase the frequency of hypoxia or anoxia events (Diaz 2001, Selman et al. 2008). Atmospheric circulation (sea level pressure and wind direction and intensity), by its action on oceanic currents, also contributes to the horizontal inputs of nutrients and di-oxygen in coastal systems (Cloern 2001, Reid et al. 2003). Wind-induced and/or tidal-induced turbulent mixing are important as they control the onset of the spring phytoplankton bloom (Sverdrup 1953, Legendre & Demers 1984, Cloern 1996, Ragueneau et al. 1996, Gaedke et al. 1998) and the contact between prey and predators (Gaedke et al. 1998, Lewis & Pedley 2001, Lewis & Bala 2006). Coastal systems are also strongly influenced by the continent. Precipitation, by its effect on the volume of river discharge, is among the major mechanisms by which the strength of the interaction between land and the ocean can be modulated (Harley et al. 2006).

The impact of humans on marine ecosystems occurs on a variety of temporal and spatial scales (Dobson et al. 1997). Biodiversity of marine systems is being altered by many human-induced factors including over-exploitation of marine resources (e.g. Omori et al. 1994, Jennings & Kaiser 1998), destruction of wetlands and habitat loss (Cloern 2001) and invasion of exotic species (Carlton & Geller 1993, Steneck 1998, Edwards et al. 2001). For decades,

this has also included eutrophication as a result of increasing nutrient inputs (e.g. Howarth 1988, North Sea Task Force 1993, Cloern 2001). And perturbation due to dispersion of chemical pollutants in estuarine and coastal waters (e.g. Norse 1993). Fisheries have affected the marine environment both directly and indirectly (Omori et al. 1994, Omori & Norman 1998, Jennings et al. 2001). Teasing out the respective influence of natural and anthropogenic forcing on ecosystems represents perhaps one of the biggest challenges of this century.

Marine coastal systems of western Europe have been monitored since 1997 by Service d'Observation en Milieu Littoral (SOMLIT). Since 1997 this monitoring programme has gathered a database of physical, chemical and biological parameters at 12 sites located along the coasts of France, from the Mediterranean sea (42°30'N) to the English channel (51°N) on a bimonthly basis (i.e. twice a month). The 12 studies sites have specific hydrographic features. The Atlantic, and especially the English Channel, coastal stations are under the direct influence of Atlantic ocean waters and are characterised by strong tidal forcing (e.g. the Ushant Front; Sournia et al. 1990); however, freshwater inputs can impact their physical and chemical characteristics locally, especially in the English Channel (the river Seine) and in the Bay of Biscay (the Gironde estuary). In the Mediterranean Sea, stations experience weak tidal forcing. The water circulation patterns are typically driven by the Liguro-provencal current and surface currents flowing in a roughly NE-SW direction, almost parallel to the shoreline (Font et al. 1988). The Rhône River strongly influences freshwater inputs in the north-western part of the Mediterranean Sea.

The main objectives of our study were (1) to examine year-to-year changes in coastal systems monitored by SOMLIT and (2) to quantify the potential influence of climate variability on coastal systems. Both the regional climatic and coastal variability were first characterised and then related to large-scale hydro-climatic forcing. Our analyses suggest a clear influence of climate variability on coastal systems.

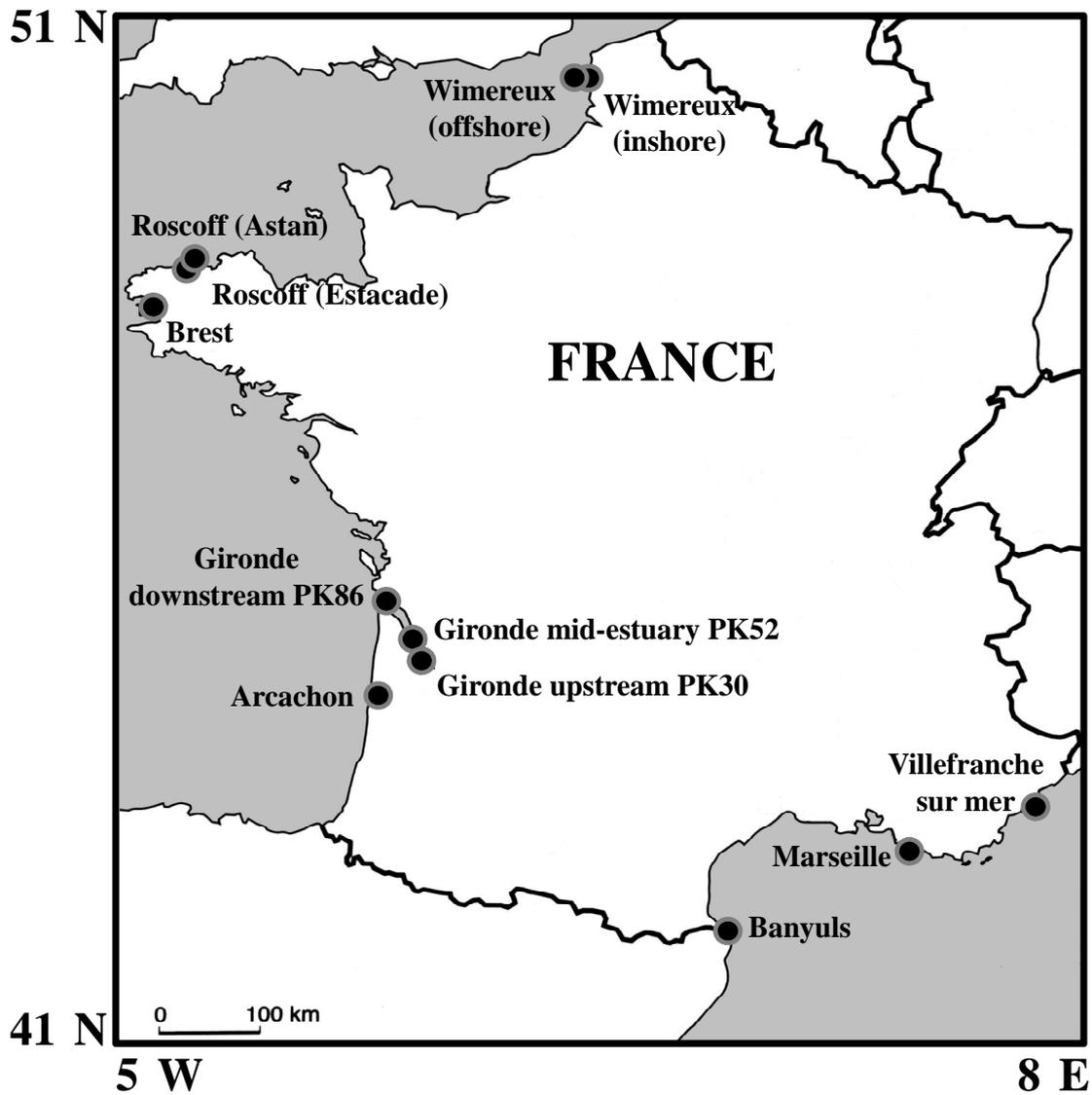


Figure III-1. Emplacement des sites du Service d'Observation en Milieu Littoral(SOMLIT) utilisés dans cette étude

III. 4) Materials and Methods

III. 4. 1) Environmental database: SOMLIT

SOMLIT is a French marine monitoring programme, created by a national institute, the Institut National des Sciences de l'Univers (INSU), which has coordinated activities of a number of marine stations along the French coasts since 1997 (Figure III-1). This programme currently comprises seven marine laboratories which monitor sampling sites in the English Channel, the Atlantic Ocean and the Mediterranean Sea. At the beginning of the programme, the sampling sites were chosen because they reflected the diversity of systems along the French coasts (e.g. marine, estuarine and mixed systems). In practical terms, the choice of sampling sites was driven by (1) their local or regional environmental benefits, (2) the existence of historical biological or hydro-climatic monitoring and (3) the accessibility for regular sampling and for possible automation in the measurement of some parameters. Coastal systems studied under this programme have a variety of hydro-climatic characteristics ranging from the non-tidal Mediterranean Sea (e.g. Marseille) to the mega-tidal English Channel (Wimereux, see Figure III-1). Sampling has been carried out at least twice a month since 1997.

A protocol has been established so that sampling is carried out at all stations at sub-surface and at high tide (for the tidal seas). More details on the monitoring are available at <http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr/fr>. All data gathered by this programme were considered in this study. It is important to note that because of dependency on meteorological conditions during sampling, the percentage of available data is not always the optimum (Table III-1 & III-2).

Site	Temp. (°C)	Salinity (‰)	Oxygen (ml l ⁻¹)	pH	Ammonium (µmol l ⁻¹)	Nitrate (µmol l ⁻¹)	Nitrite (µmol l ⁻¹)	Phosphate (µmol l ⁻¹)	Silicate (µmol l ⁻¹)	Particulate organic nitrogen (µg l ⁻¹)	Particulate organic carbon (µg l ⁻¹)	Suspended matter (µg l ⁻¹)	Chl a (µg l ⁻¹)
Wimereux offshore	80.13	78.21	89.74	85.26	83.97	85.26	85.26	84.62	88.46	87.82	86.54	87.18	89.74
Wimereux inshore	90.06	87.58	95.65	91.93	90.06	93.79	93.79	93.17	96.27	93.79	93.17	93.79	96.89
Roscoff Astan	96.79	97.33	97.33	86.63	96.79	98.40	98.40	98.40	98.40	73.80	73.80	85.56	97.86
Roscoff Estacade	97.19	97.99	97.59	90.76	98.39	97.99	97.99	97.99	91.57	55.02	55.02	83.53	97.19
Brest	99.79	98.73	98.31	58.05	97.88	98.73	96.61	98.52	98.73	89.83	90.04	58.26	98.73
Downstream estuary	95.51	95.51	86.89	86.89	61.05	65.92	66.29	66.29	50.94	64.04	20.60	87.27	69.66
Mid-estuary	98.63	98.63	93.84	91.44	59.93	66.78	67.47	67.12	53.08	66.44	18.15	91.10	71.92
Upstream estuary	100	100.00	94.37	90.85	60.92	66.90	67.96	67.96	53.52	66.20	19.72	91.55	72.18
Arcachon	99.73	98.92	85.71	86.52	61.99	85.18	81.67	83.29	68.19	83.83	22.37	94.61	95.42
Villefranche-sur-Mer	98.51	97.91	37.16	4.63	0.00	85.82	86.72	84.03	83.88	40.00	36.27	5.37	95.52
Marseille	99.15	93.62	94.47	0.00	94.04	97.02	97.02	96.60	96.60	82.98	82.98	77.87	96.60
Banyuls	79.58	79.58	67.11	44.61	83.55	87.90	58.79	63.71	66.16	26.47	23.82	42.72	87.90

Table III-1. Pourcentages de données disponibles dans la base de données SOMLIT au cours de la période 1997-2006, pour chaque site. Pour l'emplacement des stations, voir la Figure III-1.

Site	Latitude	Longitude	Period (mm/yy)	Depth sampling (m)	Distance to coast (km)	Bathymetry (m)	River close to site	River flow (m ³ s ⁻¹)
Wimereux offshore	50° 40' 75" N	1° 24' 60" E	11/97–12/06	1	9.26	53	Liane	3
Wimereux inshore	50° 40' 75" N	1° 31' 17" E	11/97–12/06	1	1.85	26	Liane	3
Roscoff Astan	48° 46' 40" N	3° 56' 15" W	02/00–12/06	1	3.5	60	Penzé	4
Roscoff Estacade	48° 43' 56" N	3° 58' 58" W	01/97–12/06	1	0.05	3	Penzé	4
Brest	48° 21' 60" N	4° 33' 38" W	03/98–12/06	2	0.25	10	Auline	30
Downstream estuary	45° 31' 00" N	1° 57' 00" W	03/97–12/06	1	2	8.2	Garonne	631
Mid-estuary	45° 14' 80" N	0° 43' 50" W	01/97–12/06	1	1	7	Garonne	631
Upstream estuary	45° 04' 10" N	0° 38' 30" W	01/97–12/06	1	0.5	8	Garonne	631
Arcahon	44° 40' 00" N	1° 10' 00" W	01/97–12/06	3	0.05	6	Eyre	18.8
Villefranche-sur-Mer	43° 41' 00" N	7° 19' 00" E	01/97–12/06	1	1.85	95	–	0
Marseille	43° 14' 30" N	5° 17' 30" E	01/97–12/06	1	6.48	60	Rhône	1700
Banyuls	42° 29' 30" N	3° 8' 70" E	03/97–12/06	3	0.92	27	Baillaury	4

Table III-2. Données relatives aux sites étudiés. Pour l'emplacement des sites, voir la Figure III-1

III. 4. 2) Climatological variables

In this paper, gridded data on sea level pressure (SLP), wind intensity and its zonal (i.e. the west to east component of the wind) and meridional (i.e. the south to north component of the wind) components were used (Table III-3). The wind intensity can be considered as a surface pressure gradient (Henderson-Sellers & Robinson 1986). Defined in this way, when combined, the information on both zonal and meridional wind enables the true average direction and strength of the wind to be calculated from the Pythagorean formula. These data were obtained from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP, USA) and the National Center for Atmospheric Research (NCAR, USA). The methodology of the NCEP-NCAR reanalysis data assimilation was discussed in detail by Kalnay et al. (1996) and Kistler et al. (2000), and more information on the numerical procedure was provided by Betts et al. (1996) and Kalnay et al. (1996).

Sea-surface temperatures (SST) were used as they can have a large influence on coastal processes (Harley et al. 2006). The data set is based on methods that used high-frequency SST anomalies interpolated in such a way that interpolated temperatures fit spatial modes. The technique takes into account sea-ice concentration to better assess SST at high latitudes and a modified historical bias correction for the period 1939 to 1941 as well as an improved error estimate. The optimum interpolation (OI) SST analysis is produced weekly on a 1° grid, so SST over land and island lakes is filled by interpolation. A full description of the OI analysis

can be found in Reynolds & Smith (1994). In the present study, data were interpolated on a grid of 1° longitude x 1° latitude from December 1981 to December 2006 (Table III-3).

Precipitation data were used, as this parameter impacts both the input of freshwater and nutrients from land to ocean. Data consisted of monthly values from January 1979 to December 2006, with a spatial resolution of 2.5° longitude x 2.5° latitude. More information on the data can be found at www.cru.uea.ac.uk/cru/data/ncep. All gridded climatological data were analysed between 1997 and 2006.

Data	Units	Spatial range	Years	n ($\times 10^5$)
Sea level pressure	hPa	11.5° W to 11.5° E 60.5° to 28.5° N	1948–2006	5.60
Zonal wind	m s ⁻¹	11.5° W to 11.5° E 60.5° to 28.5° N	1948–2006	5.60
Meridional wind	m s ⁻¹	11.5° W to 11.5° E 60.5° to 28.5° N	1948–2006	5.60
Wind intensity	m s ⁻¹	11.5° W to 11.5° E 60.5° to 28.5° N	1948–2006	5.60
Sea surface temperature	°C	11.5° W to 11.5° E 60.5° to 28.5° N	1982–2006	2.37
Mean precipitation	mm d ⁻¹	13.75° W to 11.25° E 56.25° to 28.75° N	1979–2006	0.44

Table III-3. Origine et caractéristiques des données climatologiques utilisées dans cette étude. Source: National Centers for Environmental Protection/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR). N: nombre de données. Pour toutes les variables climatologiques la résolution spatiale de la grille est de 1°, à l'exception des précipitations moyennes pour lesquelles elle est de 2.5°. Les données sont mensualisées.

III. 4. 3) Large-scale hydro-climatic indices

Three large scale hydro-climatic indices were selected because of their potential importance in the studied area (Marshall et al. 2001, Beaugrand 2009).

The winter North Atlantic Oscillation index (NAO; Hurrell 1995a) is a basin-scale alternation of atmospheric masses between the subtropical and the Arctic Atlantic (Dickson & Turrell 2000). This oscillation has been correlated with a large range of physical and biological indicators or phenomena, e.g. the paths of Atlantic storms and their intensity (Hurrell 1995b), precipitation patterns (Hurrell 1995a), abundances of zooplankton species (Fromentin & Planque 1996, Beaugrand et al. 2000), or fluctuations in the productivity of some fish and invertebrate species (Alheit & Hagen 1997, Anderson 2000).

An index of Northern Hemisphere temperature (NHT) anomalies from 1958 to 2006 was used (Beaugrand 2009). Data were provided by the Hadley Centre for climate Prediction and Research, Meteorological Office (Exeter, UK).

The Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) is a large scale oceanic phenomenon, the source of natural variability in the range of 0.4°C in many oceanic regions (Enfield et al. 2001). We used the index constructed from extended Reconstruction SST (ERSST) data and averaged in the area of 25 to 60°N and 7 to 75°W, minus regression (i.e. detrending is intended to remove the North Atlantic SST anomaly data from the analysis) on global mean temperature (National Climate Data Center, USA: NCDC). This index was downloaded from <http://climexp.knmi.nl/>. Previous studies have shown that this oceanic oscillation might have a large influence on SST changes (Enfield et al. 2001, Keenlyside et al. 2008).

III. 4. 4) Analyses

III. 4. 4. 1) Analysis 1: long-term spatial and temporal changes in coastal systems

SOMLIT data gather information on physical, biological and chemical properties of the water column structured in space and time. The original 3-way data matrix was therefore composed of 13 parameters x 120 mo (period 1997 to 2006) x 12 stations.

Prior to the analysis, data were averaged per month, and a simple moving average of order 6 was used to remove the effect of seasonality (Legendre & Legendre 1998).

$$y_i = \frac{1}{2m + 1} \sum_{i-m}^{i+m} x_i \quad (1)$$

Where y_i is the simple moving average at observation i , m is the number of months, $2m+1$ is the time window with $m+1 \leq i \leq n-m$, with n being the length of the time series.

Only a few statistical techniques exist to analyse such complex tables, e.g. co-inertia analysis (Dolédec & Chessel 1994) and 3-mode principal component analysis (PCA; Hohn 1993). The 3-mode PCA, used by Beaugrand et al. (2000), first calculates 3 classical PCAs on 2-dimensional tables after having transformed one table to ensure that the total inertia is identical in each mode (Beaugrand et al. 2000). In the present study, we only calculated one standardised PCA (i.e. subtracting the mean and dividing by the standard deviation to give all parameters the same variation) on the deployed 3-way matrix 120 mo x (12 parameters x 12 stations) (Figure III-2), which represents the first stage performed in a 3-mode PCA. This PCA was performed on a correlation matrix. Although the number of variables is greater than the number of observations, our analysis remains valid because we only focused on a limited number of principal components (PCs; a total of two here) (Legendre & Legendre 1998). It should also be noted that temperature was not included directly in the analysis but as supplementary variable, so that it does not contribute to PCs. Eigenvectors were normalised as follows:

$$\mathbf{U}_n = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda}^{1/2} \quad (2)$$

Where \mathbf{U}_n is the matrix of normalised eigenvectors, \mathbf{U} is the matrix of eigenvectors and $\mathbf{\Lambda}$ is the diagonal matrix of eigenvalues.

Thus, the variables in the space of eigenvectors represented the linear correlation with the first and the second PCs (Legendre & Legendre 1998). We used this mathematical property to add temperature as a supplementary variable, simply by calculating the linear correlation (Pearson correlation coefficient) between temperature and the first two PCs. Thus, temperature had no weight in the calculation of the PCs. The use of this statistical technique allowed in a single analysis the characterisation of temporal changes, the identification of parameters that contribute to the change and the recognition of locations mainly influenced by the temporal patterns. Prior to the mapping of each eigenvector (12 stations x 13 parameters), the order of each parameter was sorted by performing a PCA on the matrix of eigenvectors acquired after PCA on SOMLIT data. The PCA of eigenvectors identifies parameters that are close to each other in a Euclidean distance sense (Elmore & Richman 2001), thereby providing a new similarity matrix choice.

To examine the influence of each environmental parameter on the first and second PC, we did a sensitivity analysis by re-performing the standardised PCA on a decreasing number of parameters from 12 to 1. It should be noted that even with 1 parameter, there were still 12 sites; therefore, the dimension of the matrix was 120 observations x 12 sites when only 1 parameter remained. The sensitivity analysis was also performed by removing each site from 12 sites to only 1. In such a case, when only 1 site remained, the dimension of the matrix was 120 observations x 12 parameters. Two separate standardised PCAs were also conducted for Mediterranean (matrix 120 observations 36 parameters and sites) and Atlantic sites (matrix 120 observations x 108 parameters and sites).

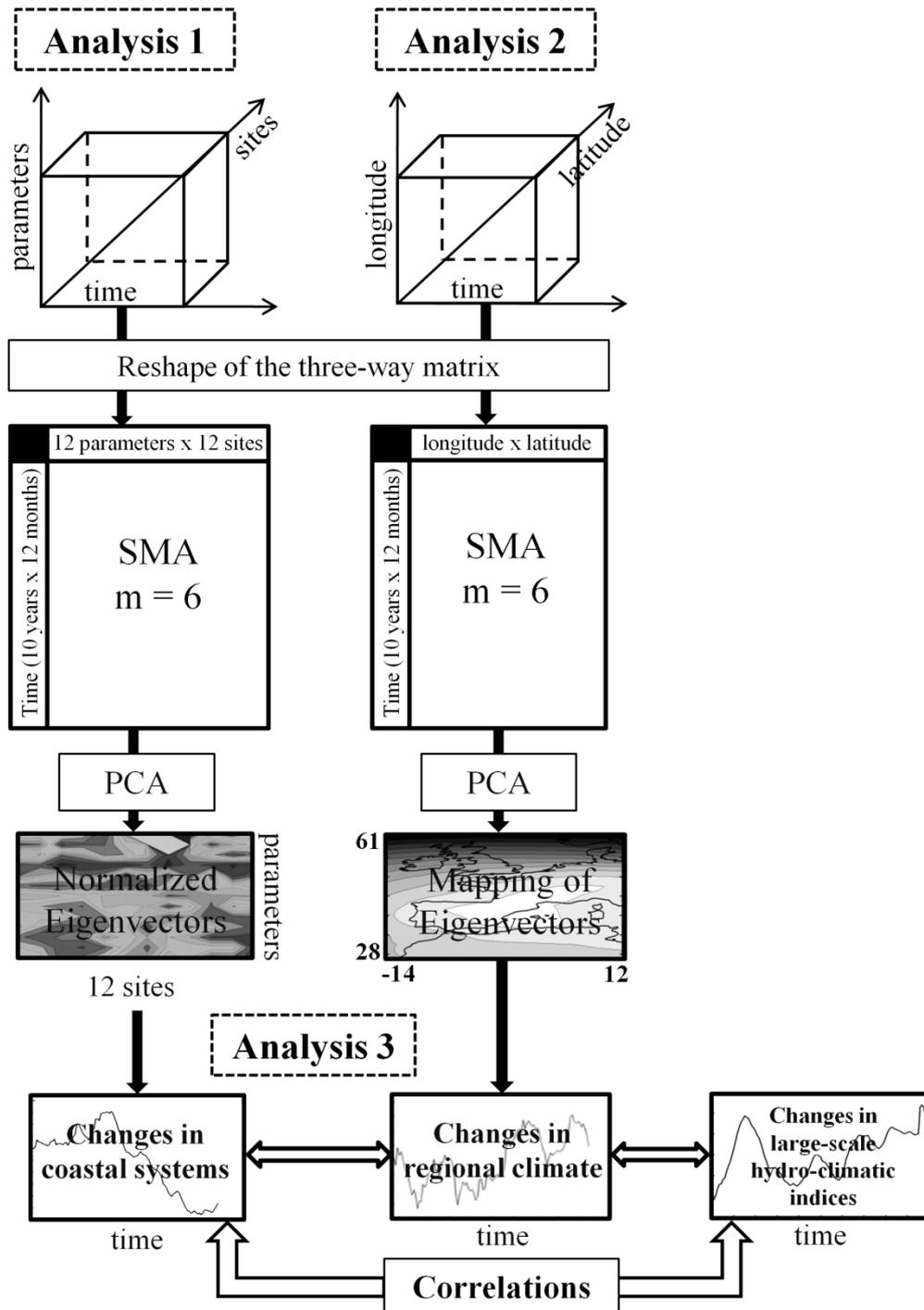


Figure III-2. Analyses statistiques appliquées dans cette étude. *SMA*: moyenne mobile simple d'ordre 6 (simple moving average); *PCA*: Analyse en composante principale (Principal Component Analysis); *m*: nombre de mois.

III. 4. 4. 2) Analysis 2: long-term spatial and temporal changes in some climatological variables

Long-term climatological changes were investigated by standardised PCA (Jolliffe 1986). The PCA was performed on a correlation matrix with the double objective of identifying major long-term changes in climatological variables (examination of PCs) and locating their geographical patterns (mapping of eigenvectors, Beaugrand 2009). A total of 6 PCAs was performed on the climatological data (Table III-3). The analyses were applied in the spatial domain ranging from 14°W to 12°E and from 28° to 61°N (Table III-3). For all climatological variables, except precipitation (Table III-3), the spatial grid had a spatial resolution of 1° latitude x 1° longitude. As with SOMLIT data, a simple moving average of order 6 was used to remove the effect of seasonality.

III. 4. 4. 3) Analysis 3: correlation analysis

Correlation analysis were performed between the first PCs obtained from analysis 1 (year-to-year changes in the coastal environment) and the first PCs from the PCAs performed on (regional) climatological variables (Analysis 2), and all PCs were correlated to large-scale hydro-climatic indices (see Figures. III-2 & III-8, see Tables III-4 & III-5). Probabilities were corrected to account for temporal autocorrelation. A Box-Jenkins (1976) autocorrelation function modified by Chatfield (1996) was used to assess the temporal dependence of years. The Chelton formula (1984) was applied to adjust the degree of freedom. This procedure was recommended by Pyper & Peterman (1998).

When ordinary correlations between year-to-year changes in the coastal systems and hydro-climatic variability were greater than 0.5, cross-correlation analyses were performed to examine whether these relationships were direct or occurred with a certain lag. The analyses were performed by lagging months from 1 to 60 (5 years). To assess the probability of the cross-correlogram, we adjusted the degrees of freedom for each lag and also for temporal autocorrelation. As a result of this procedure, an identical value of correlation for two successive lags can have different values of probability, independently of the degrees of freedom lost by the lag itself.

Multiple testing increases the probability of a type I error (i.e. finding too many significant correlations). To correct for this potential bias, the Hochberg method (1988) was

applied with $\alpha = 0.05$ for correlations with large-scale hydro-climatic indices. This nonparametric correction is considered more robust and less conservative than the Bonferroni technique (Legendre & Legendre 1998).

All methods used in the present study were programmed using MATLAB language.

III. 5) Results

III. 5. 1) Year-to-year changes in French coastal systems

A PCA was performed on the 2-way table (120 mo x 12 stations – 12 parameters) with temperature as a supplementary variable. Year-to-year changes in the first PC (24.16% of the total variability) exhibited a period of relative stability until 2001, followed by a pronounced decrease in the trend until 2005 (Figure III-3a, left). Mapping of the first eigenvector indicated that the trend detected by the component is especially strong for sites located in the English Channel, the Celtic Sea and to a lesser extent Arcachon, Banyuls and Marseille (Figure III-3a, right). Parameters that contributed to the changes were mainly nutrients, particulate organic carbon (POC) and to a lesser extent particulate organic nitrogen (PON). The nutrients and POC were positively correlated to the first component so that the reduction observed in the component after 2001 corresponded to a decrease in nutrient concentration for sites located mainly in the English Channel. Salinity was strongly negatively correlated with the first PC for all stations, indicating an increase in salinity after the shift of 2001. The Gironde estuary differed from the other sites, showing a tendency toward an increase in phosphate, silicic acid, particulate matter (PON and suspended particulate matter, SPM) and chlorophyll (chl) *a*.

Year-to-year changes in the second PC (14.13% of the total variability) exhibited a pseudo-cyclical variability of 6 to 7 years (Figure III-3b, left). Pronounced negative values were observed in the second PC between 2001 and 2005 at the time the first component diminished (Figure III-3a). Mapping of the sorted second eigenvector (Figure III-3b, right) showed that POC, PON, SPM, pH and to a lesser extent chl *a* were negatively related to the second PC in stations located in Arcachon and northwards, indicating an increase in the values of these parameters between 2001 and 2005. There was a distinct difference between the western coasts and the Mediterranean Sea. Dissolved di-oxygen was strongly positively

correlated with the second component for all the stations, indicating a low-amplitude tendency toward a decrease in di-oxygen concentration everywhere during the period 2001 to 2005.

Environmental temperature was added in the analysis as a supplementary variable because we then calculated correlations between changes in both regional temperature and the first PC. If environmental temperature was included directly in the PCA, the two variables (PC1 SOMLIT and regional SST) would not be entirely independent (an important assumption in correlation analysis, see (Sokal & Rohlf 1995). Thereby, the variable was removed from the analysis. However, as the eigenvectors show (Figure III-3), the environmental temperature is highly correlated to the first component and therefore the removal of this variable did not affect the first PC.

Results from the sensitivity analysis showed that our conclusions were not greatly affected by removing an increasing number of parameters or sites (Figure III-4). Indeed, the correlation of the first component decreased from 0.994 ($p < 0.05$) when based on 11 parameters to 0.458 ($p < 0.05$) when based on only one parameter. Despite the decrease observed in the percentage of variance explained by the analysis, the significant positive correlation suggested that results were still positively correlated based on only one variable. For the second PC, this correlation decreased from 0.996 to 0.637. Our conclusion was also not affected by the removal of sites. The correlation of the first component decreased from 0.998 when based on 11 sites to 0.657 when based on only one site; the correlation of the second PC decreased from 0.996 to 0.389.

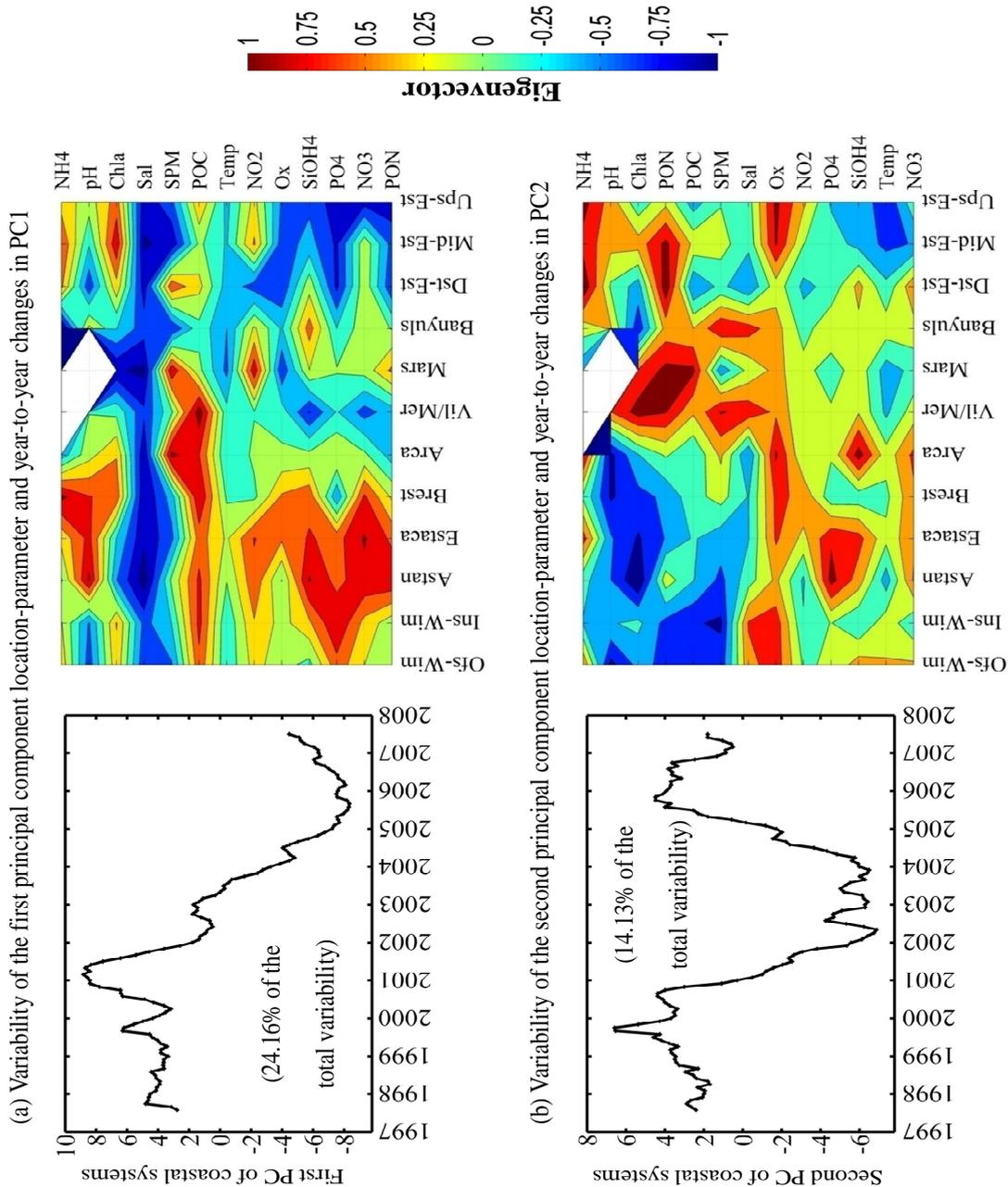


Figure III-3. Résultats de la variabilité temporelle des systèmes côtiers français issus de l'analyse en composante principale appliquée sur les données SOMLIT pour (a) la première et (b) la deuxième composante principale (PC; **graphiques de gauche**) et cartographie des vecteurs propres (à **droite**). La température est placée en variable supplémentaire. Les sites sont ordonnés du nord au sud, et les 3 sites de l'estuaire de la Gironde ont été positionnés à leur suite sur l'axe des abscisses.

Ofs-Wim: Wimereux large; Ins-Wim: Wimereux côte; Astan: Roscoff Astan; Estaca: Roscoff Estacade; Brest; Arca: Arcachon; Vil/Mer: Villefranche-sur-Mer; Mars: Marseille; Banyuls; Dst-Est: PK86 (estuaire de la Gironde); Mid-Est: PK52 (estuaire de la Gironde); Ups-Est: PK30 (estuaire de la Gironde); Sal: Salinité; Ox: Oxygène; NH4: ammonium; NO₃: nitrate; NO₂: nitrite; PO₄: phosphate; SIOH₄: silicate; POC: carbone organique particulaire; PON: azote organique particulaire; SPM: matière en suspension; Chl a: chlorophylle a; Temp: température.

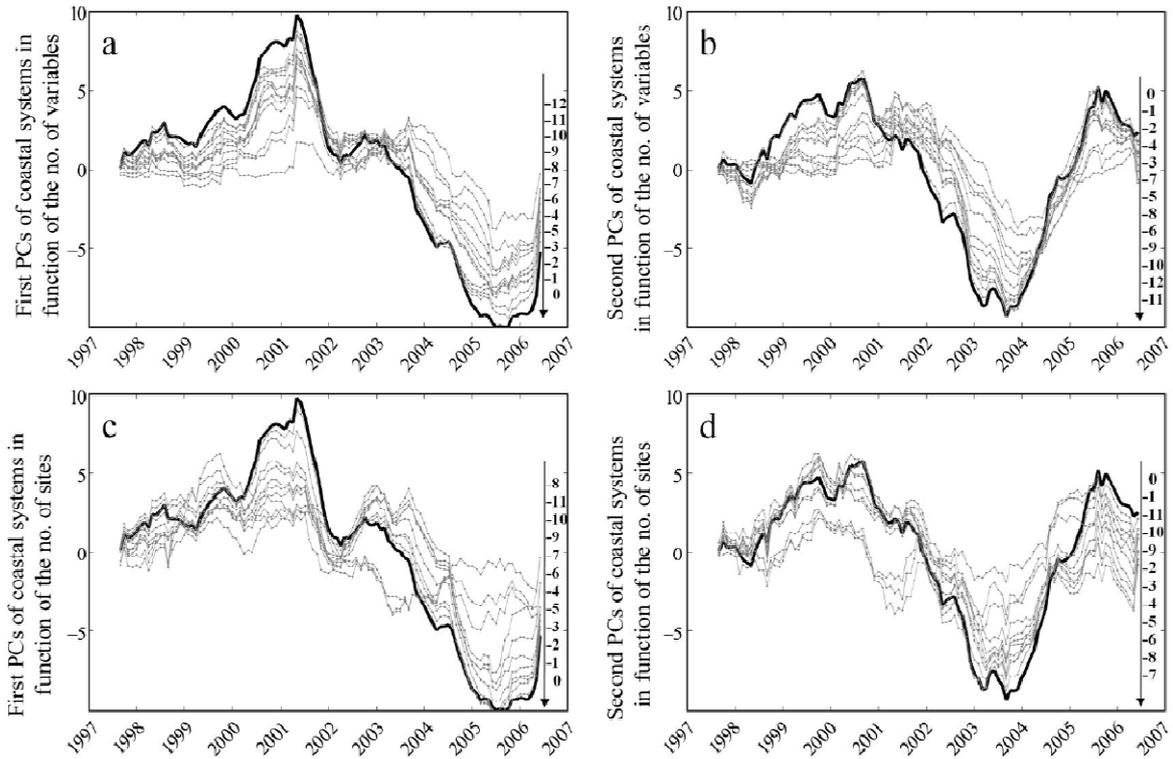


Figure III-4. Analyses sensibles sur les deux premières composantes principales calculées depuis une l'analyse en composante principale normalisée appliquée sur un nombre décroissant de paramètres et de sites. La courbe en noir représente les composantes principales lorsque tous les paramètres ou sites sont conservés. (a) Première et (b) deuxième composante principale de l'ACP appliquée sur le tableau de données: temps x (observations – paramètres) basé sur un nombre décroissant de paramètres de 12 à 1. (c) Première et (d) deuxième composante principale de l'ACP appliquée sur le tableau de données: temps x (observations – paramètres) basé sur un nombre décroissant de sites de 12 à 1. "0" indique qu'aucun paramètre ou site n'est retiré; les valeurs négatives sur les graphiques indiquent le nombre de sites ou de paramètres retirés de l'ACP.

The two separate standardised PCAs confirmed the average correlation between the year-to-year changes in Atlantic and Mediterranean sites observed in Figure III-3 (mapping of eigenvectors). The correlation between the 2 first PCs (Atlantic: 28.47% of the total variance; Mediterranean Sea: 33.10% of the total variance) were high ($r = 0.69$) although at the limit of significance ($p = 0.12$) when the temporal autocorrelation was taken into account (Figure III-5a). The correlation was low ($r = 0.08$) and not significant ($p = 0.78$) when the two second PCs (Atlantic: 16.82% of the total variance; Mediterranean Sea: 17.20% of the total variance) were examined (Figure III-5b).

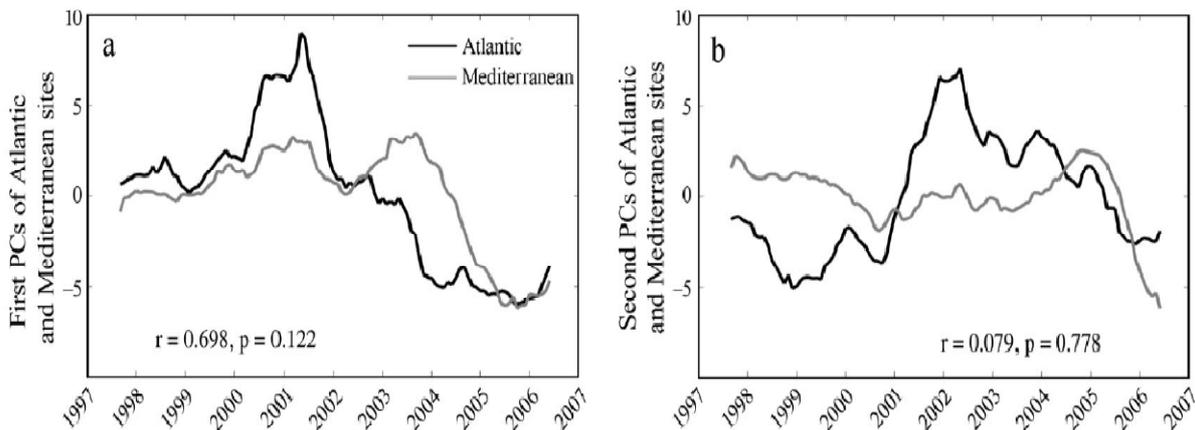


Figure III-5. Comparaison des premières (a) et deuxièmes (b) composantes principales issues des analyses en composantes principales normalisée appliquées sur les sites Mer du Nord et Atlantique (Wimereux, Roscoff, Brest et Arcachon; en noir) et sur les sites de la Mer Méditerranée (Banyuls, Marseille et Villefranche-sur-Mer), montrant la variabilité temporelle des systèmes côtiers français. Les probabilités sont corrigées pour prendre en compte l'autocorrélation temporelle en appliquant la méthode recommandée par Pyper et Peterman (1998).

III. 5. 2) Year-to-year changes in regional climate

Six PCAs were performed on the 2-way table (time x space) of each climatological variable to characterise the spatial and temporal changes in regional climate during the period of sampling by SOMLIT. We only describe four analyses in detail (zonal and meridional wind, temperature and precipitation), as results obtained on SLP and wind intensity can be deduced from the analyses performed on directional wind.

Changes in atmospheric circulation may strongly affect coastal systems. The examination of the first principal component (42.65% of the total variability) of the PCA performed on zonal winds showed, for all regions covering the French coast, a stepwise increase in zonal wind in 2001 and the occurrence of two minima around 1999 and 2005 (Figure III-6a). Between 2001 and 2005, an irregular reduction in zonal wind was observed. As the eigenvectors were positive, an increase in the value of the PC should be interpreted as an increase in zonal wind and vice versa. The second component (20.56% of the total variability) showed a pseudo-cyclical variability of about four years (Figure III-6b). For regions mainly located in the eastern part of the English Channel and Villefranche-sur-Mer where eigenvectors are negative, the component indicated higher zonal winds between 1998 and 2001 and lower winds between 2001 and 2005. Locations of high values in the first and second eigenvectors are obviously related to the boundary between regions of lower and higher SLP (Figure III-9).

The examination of the first eigenvectors (45.35% of the total variability) of the PCA performed on meridional winds showed a clear bi-polar pattern (Figure III-7a). Values of the eigenvectors were strongly positive around Spain and negative north of France. Therefore, the first component was not considered to explain year-to-year changes in the French coastal systems. The second eigenvectors (31.62% of the total variability) had a great negative values centred around France (Figure III-7b, left). The second component therefore revealed a continued decrease in meridional winds with a superimposed pseudo-cyclical variability. Minima in meridional winds were observed during 1998, 2003 and 2006, and a maximum in 1999. The information gained from both zonal and meridional winds was in general also found in the examination of the PCA performed on wind intensity (Figure III-8).

Change in atmospheric circulation influences SST. The examination of year-to-year changes in the PC (71.26% of the total variability) showed high values in 1998 and 2003-

2004, and minima in 1999 and 2005-2006 (Figure III-10a). As the first eigenvector was positive, a positive value of the component indicated warmer SST (and vice versa). The component exhibited a cyclical variability, close but slightly greater than an annual cycle and despite the use of the order-6 simple moving average. The second PC (10.35% of the total variance) detected an anomaly in SST in 2002 (Figure III-10b).

Atmospheric circulation changes also influence precipitation patterns that affect coastal systems through river run-off. Year-to-year changes in the first PC (36.99% of the total variability) showed an abrupt increase in the value of the component that started at the end of 1998 and ended in 2002 (Figure III-11a). This phenomenon was particularly pronounced in the Mediterranean Sea but also reflected changes occurring over the western coasts of France (see high values in the first eigenvector, Figure III-11b). The second PC (19.92% of the total variance) exhibited a pseudo-cyclical variability of about three years with opposite consequences in southern and northern regions.

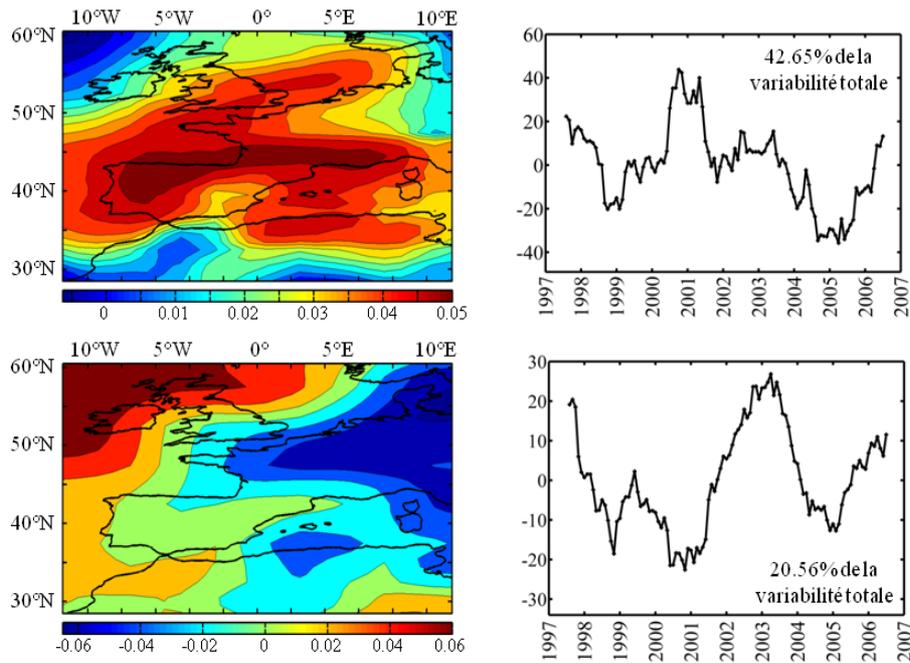


Figure III-6. Analyse en composantes principales de la variabilité temporelle du vent zonal (1997-2006). (a) Cartographie des premiers vecteurs propres (gauche) et fluctuations temporelles de la première composante principale (PC; droite; 42.65% de la variabilité totale) et (b) cartographie des deuxièmes vecteurs propres (gauche) et fluctuations temporelles de la deuxième composante principale (PC; droite; 20.56% de la variabilité totale).

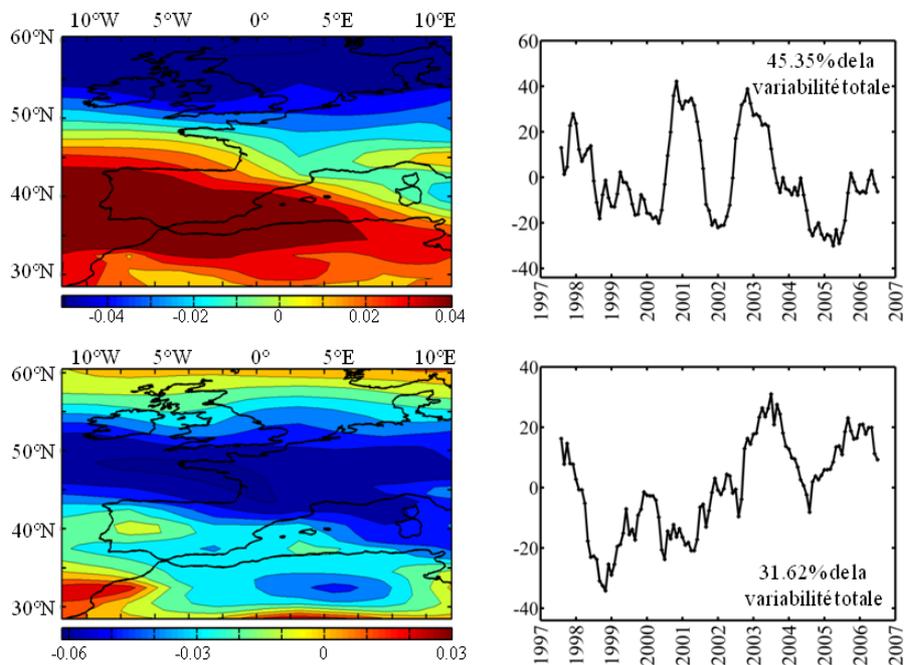


Figure III-7. Analyse en composantes principales de la variabilité temporelle du vent méridional (1997-2006). (a) Cartographie des premiers vecteurs propres (gauche) et fluctuations temporelles de la première composante principale (PC; droite; 45.35% de la variabilité totale) et (b) cartographie des deuxièmes vecteurs propres (gauche) et fluctuations temporelles de la deuxième composante principale (PC; droite; 31.62% de la variabilité totale).

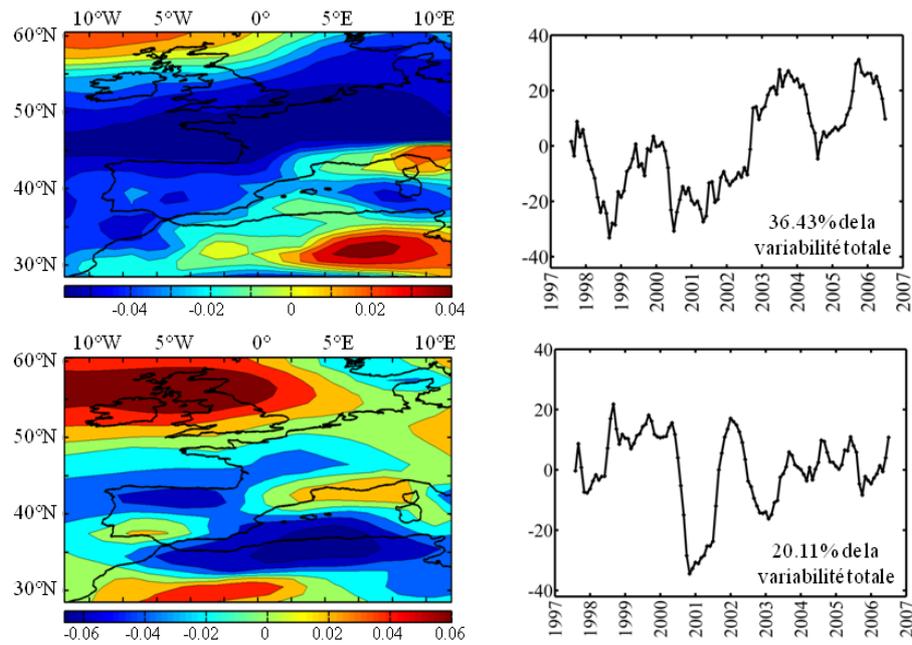


Figure III-8. Analyse en composantes principales de la variabilité temporelle de l'intensité du vent (1997-2006). (a) Cartographie des premiers vecteurs propres (gauche) et fluctuations temporelles de la première composante principale (PC; droite; 36.43% de la variabilité totale) et (b) cartographie des deuxièmes vecteurs propres (gauche) et fluctuations temporelles de la deuxième composante principale (PC; droite; 20.11% de la variabilité totale).

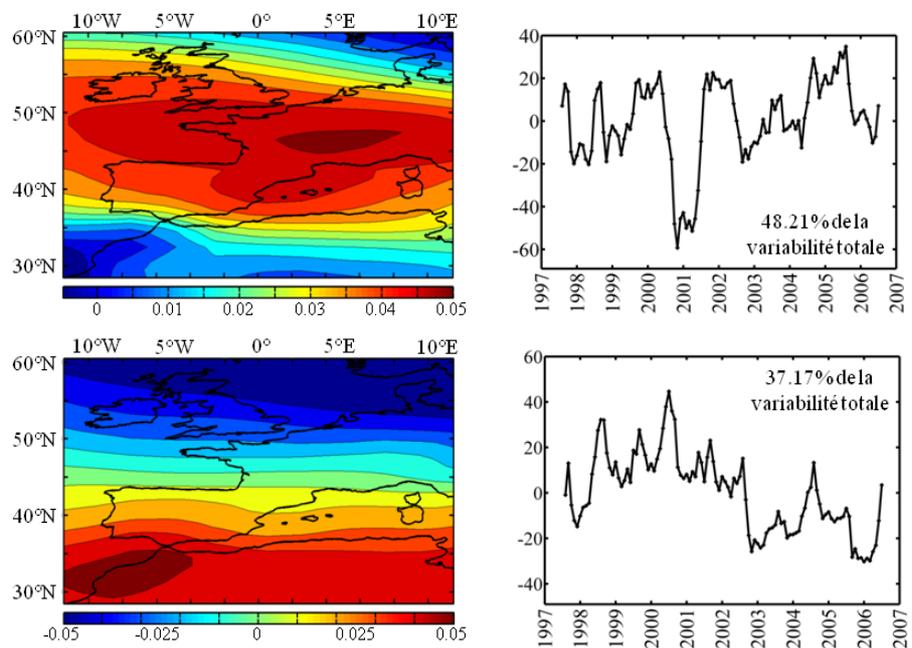


Figure III-9. Analyse en composantes principales de la variabilité temporelle des champs de pression de l'océan (1997-2006). (a) Cartographie des premiers vecteurs propres (gauche) et fluctuations temporelles de la première composante principale (PC; droite; 48.21% de la variabilité totale) et (b) cartographie des deuxièmes vecteurs propres (gauche) et fluctuations temporelles de la deuxième composante principale (PC; droite; 37.17% de la variabilité totale).

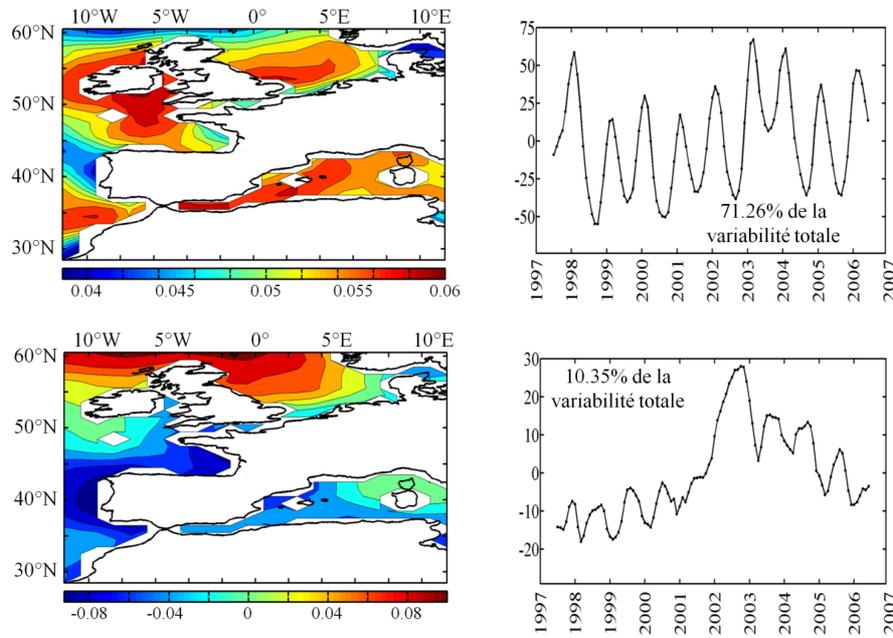


Figure III-10. Analyse en composantes principales de la variabilité temporelle des températures de surface de l'océan (1997-2006). (a) Cartographie des premiers vecteurs propres (gauche) et fluctuations temporelles de la première composante principale (PC; droite; 71.26% de la variabilité totale) et (b) cartographie des deuxièmes vecteurs propres (gauche) et fluctuations temporelles de la deuxième composante principale (PC; droite; 10.35% de la variabilité totale).

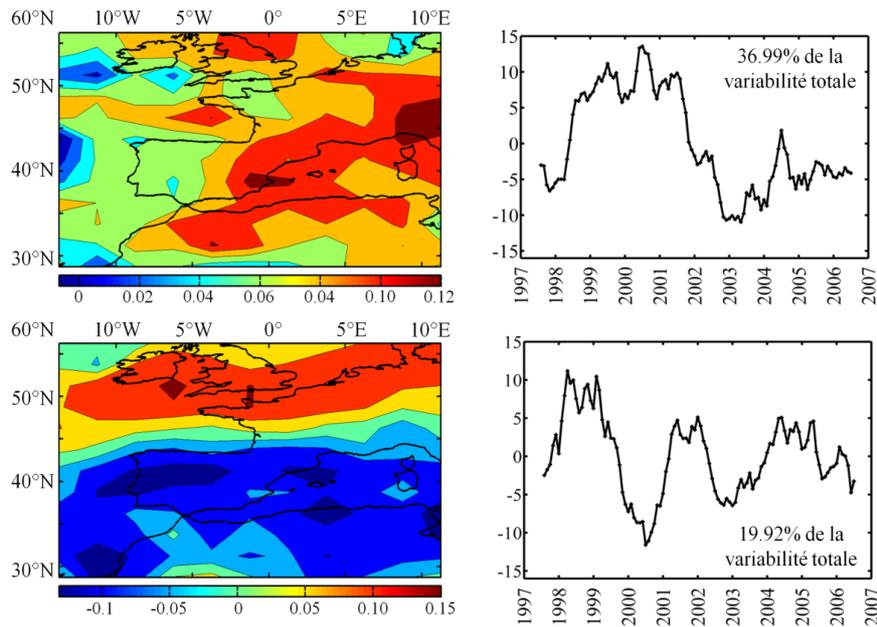


Figure III-11. Analyse en composantes principales de la variabilité temporelle des précipitations moyennes (1997-2006). (a) Cartographie des premiers vecteurs propres (gauche) et fluctuations temporelles de la première composante principale (PC; droite; 36.99% de la variabilité totale) et (b) cartographie des deuxièmes vecteurs propres (gauche) et fluctuations temporelles de la deuxième composante principale (PC; droite; 19.92% de la variabilité totale).

III. 5. 3) Relationships between year-to-year changes in coastal systems, regional climate and large-scale hydro-climatic indices

Linear correlations between the first two PCs that originated from the six PCAs and the first two components from the PCA performed to investigate year-to-year changes in coastal systems were calculated to test whether such changes were related to changes in regional climate (Table III-4).

Variable	PC	SOMLIT PC			
		1		2	
		r	p	r	p
SLP	1	0.462	0.012	0.046	0.809
	2	-0.692	0.128	0.333	0.420
UWIND	1	-0.704	0.034	-0.064	0.870
	2	0.295	0.409	-0.512	0.195
VWIND	1	-0.451	0.031	-0.233	0.336
	2	0.658	0.156	-0.375	0.407
IWIND	1	0.751	0.086	-0.193	0.678
	2	0.224	0.218	0.233	0.285
SST	1	0.320	0.137	-0.405	0.045
	2	0.315	0.606	-0.709	0.114
MP	1	-0.657	0.229	0.574	0.233
	2	0.094	0.592	0.019	0.952

Table III-4. Corrélations entre les 2 premières composantes principales (PCs) de l'analyse en composantes principales (ACP) appliquée sur les données du Service d'Observation en Milieu Littoral (SOMLIT) et les 2 premières PCs des ACP appliquées sur chaque variable hydro-climatologique (SLP: sea level pressure [champs de pression océanique]; UWIND: zonal wind [vent zonal]; VWIND: meridional wind [vent méridional]; IWIND: wind intensity [intensité du vent]; SST: sea surface temperature [températures de surface de l'océan]; MP: mean precipitation [précipitations moyennes]). Les probabilités sont corrigées pour la prise en compte de l'autocorrélation temporelle selon la méthode recommandée par Pyper & Peterman (1998); ddl = 106. Les valeurs de probabilités ont été ajustées selon la procédure de Hochberg (1988) et $\alpha = 0.05$. Les corrélations significatives ($r > 0.5$) sont en gras.

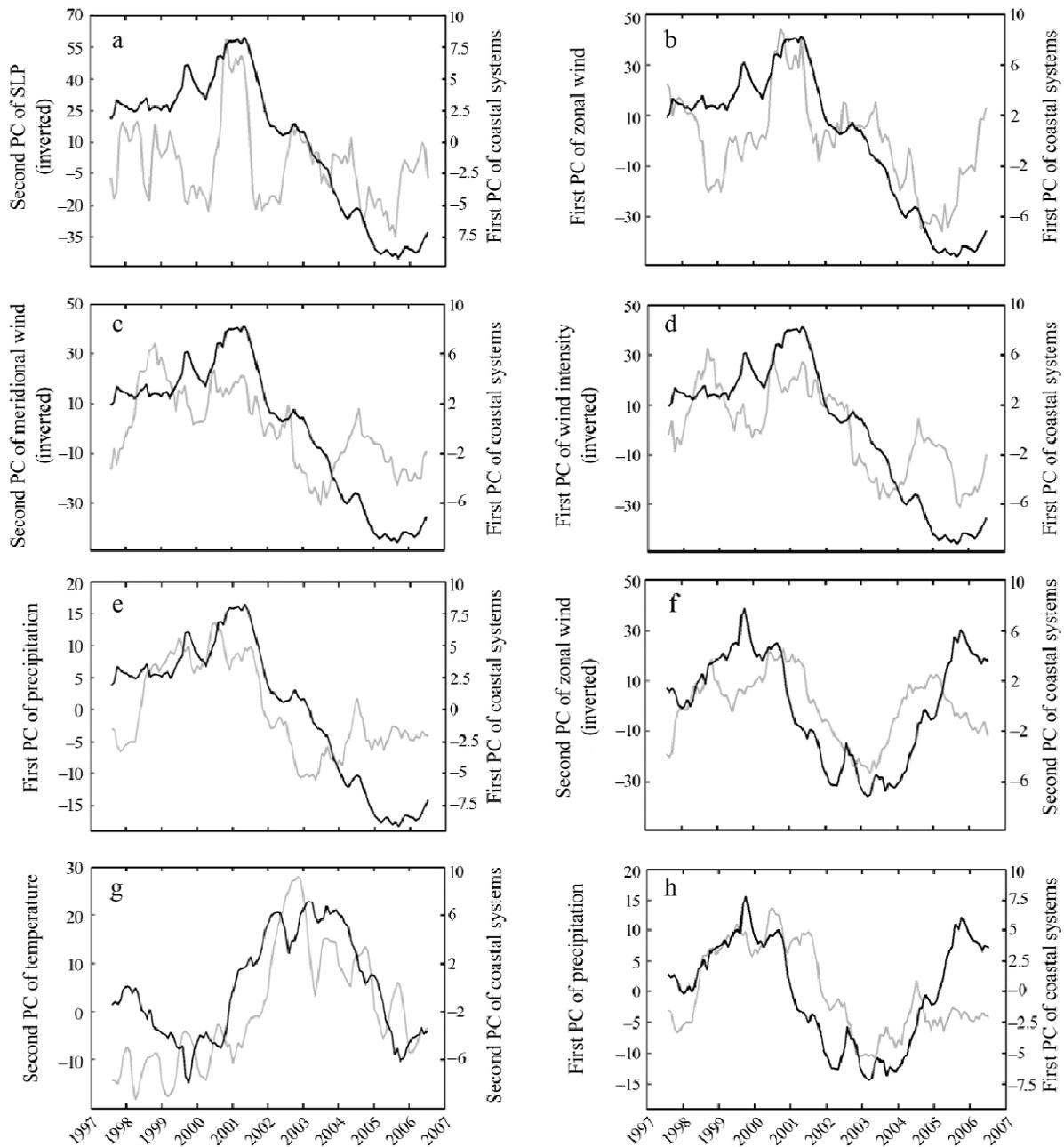


Figure III-12. Variabilité temporelle des systèmes côtiers français en lien avec les forçages hydro-climatologiques. Variabilité temporelle des systèmes côtiers (1^{ère} composante principale [PC1] de l'analyse en composantes principales [ACP] appliquée sur les données SOMLIT; en noir) et (a) champs de pression de l'océan (SLP; PC2 de l'ACP sur les SLP; en gris); (b) vent zonal (PC1 de l'ACP sur le vent zonal, en gris); (c) vent méridional (PC2 de l'ACP sur le vent méridional; en gris); (d) intensité du vent (PCA de l'ACP sur l'intensité du vent; en gris); (e) précipitations moyennes (PC1 de l'ACP sur les précipitations moyennes; en gris). Variabilité temporelle des systèmes côtiers (2^{ème} composante principale [PC2] de l'analyse en composantes principales [ACP] appliquée sur les données SOMLIT; en noir) et (f) vent zonal (PC2 de l'ACP sur le vent zonal; en gris); (g) températures de surface de l'océan (SST; ACP sur les SST; en gris); (h) précipitations moyennes (PC1 de l'ACP sur les précipitations moyennes; en gris). Voir le Table III-4 pour les valeurs de corrélations. Les probabilités ont été corrigées pour prendre en compte l'autocorrélation temporelle en utilisant la méthode recommandée par Pyper & Peterman (1998), les valeurs de probabilités sont également ajustées par la procédure de Hochberg (1988) et $\alpha = 0.05$.

Results from correlation analyses suggested a concomitant change in coastal systems (as inferred from the first component of the PCA performed on environmental parameters) and atmospheric circulation, temperature and precipitation (Table III-4). The link between the changes in the coastal systems and climate was patent. However, a graphical examination of the correlation showed that the link with climate occurred when the forcing was markedly low or high (Figure III-12). For example, high values observed in 2001 of the first component from the PCA performed on coastal environment coincided with high values of zonal wind and vice versa (Figure III-12b), lower temperatures and higher precipitation (Figure III-12e). Taking into consideration interpretations of the PCAs (see Figures III-6 to III-11), this analysis indicated that the changes observed in nutrients, di-oxygen, chl *a* and particulate matter in the Atlantic Ocean and the English Channel were positively related to temperature. The link between environmental and climate change seemed more difficult to detect after 2005.

The second PC originating from the PCA performed on environmental parameters (SOMLIT) was in general less related to climatological parameters (Table III-4). A weak but significant link was detected with zonal wind (Figure 12f) and precipitation (Figure 12h). However, analysis of the graphs showed that the link was detected for substantial changes in climatological variables and seemed less obvious at the end of the time series.

Examination of potential lags was carried out by cross-correlation analysis for pairs of variables that showed correlations > 0.5 (see Table III-4). Examination of all cross-correlograms (Figure III-13) suggests that no lag existed between the year-to-year variability in coastal systems and hydroclimate. The slight increase in the value of the correlation was too small (maximum range of correlation between $r = 0.704$ and $r = 0.752$ for the cross-correlogram between PC1 SOMLIT data and PC1 zonal wind; Figure III-13b) to be related to a significant lag. This was more influenced by the decrease in the degrees of freedom. However, the present analysis is influenced by the application of the order-6 moving average.

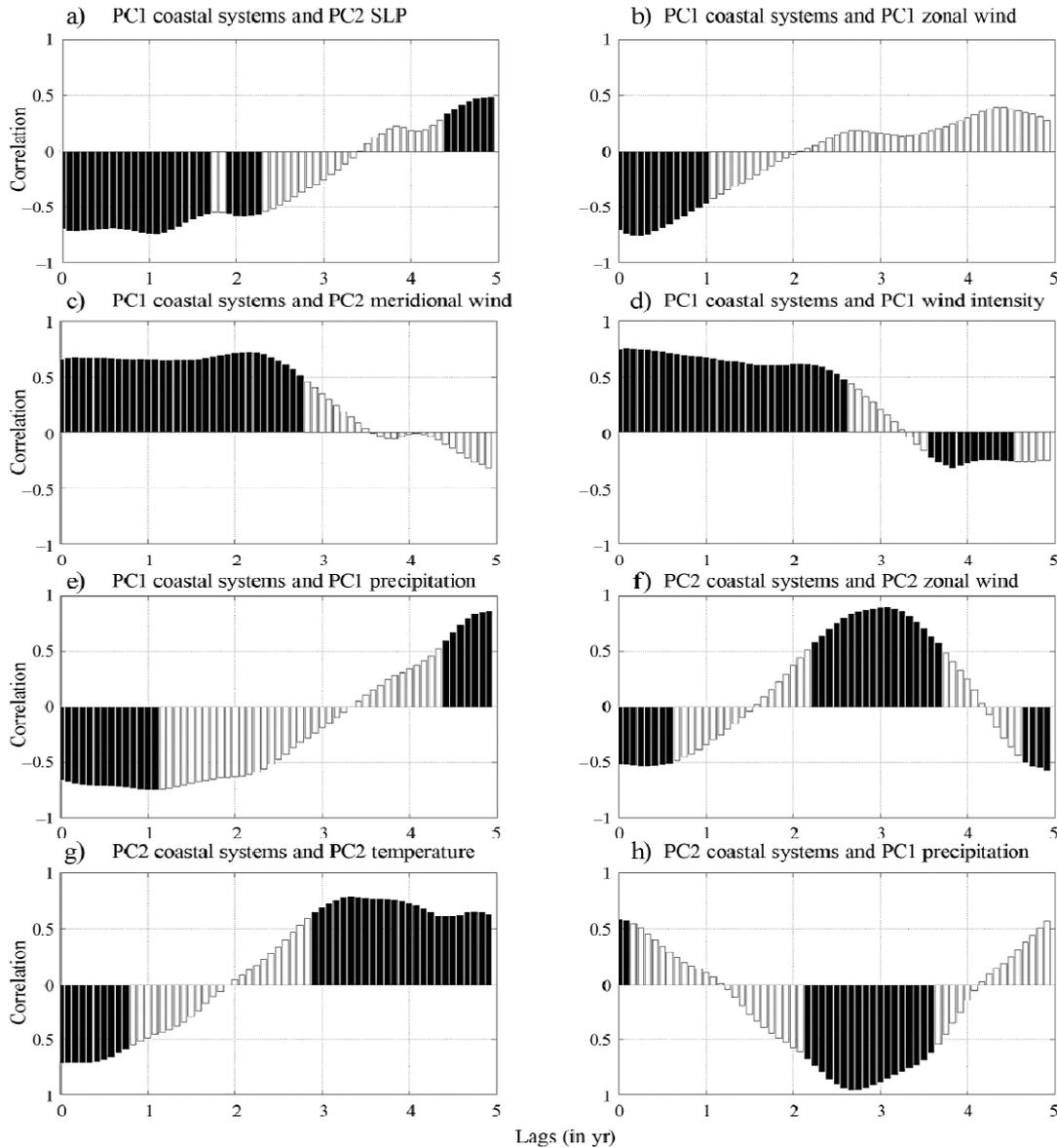


Figure III-13. Corrélations croisées entre la variabilité temporelle des systèmes côtiers français et la variabilité des variables hydro-climatologiques (ne sont représentés que les cas où les corrélations linéaires simples sont > 0.5 ; voir Table III-4). (a) 1^{ère} composante principale (PC1) sur les données SOMLIT et PC2 des champs de pression de l'océan (SLP); (b) PC1 SOMLIT et PC1 du vent zonal; (c) PC1 SOMLIT et PC2 du vent méridional; (d) PC1 SOMLIT et PCA de l'intensité du vent; (e) PC1 SOMLIT et PC1 des précipitations moyennes; (f) PC2 SOMLIT et PC2 du vent zonal; (g) PC2 SOMLIT et PC2 des température de surface de l'océan; (h) PC2 SOMLIT et PC1 des précipitations moyennes. Les histogrammes en blanc correspondent aux corrélations non significatives; en noir, les corrélations sont significatives. Le degré de significativité est fixé à $p = 0.25$ après la prise en compte de la réduction des degrés de liberté due au décalage appliqué ainsi qu'à la correction pour l'autocorrélation temporelle.

Correlations between coastal environment and regional climatological changes (annual mean) and large-scale hydro-climatic indices (NHT, AMO and NAO) were calculated between 1997 and 2006 (Table III-5). Only NHT anomalies were correlated with changes in the coastal environment. High correlations were found between regional climate and this index, but only SLP was correlated significantly with NHT anomalies after adjusting the probability of considering multiple tests of correlation. Correlations between the state of the NAO and regional climate and changes in the coastal environment were low and insignificant, suggesting a weak impact of the NAO in our region (Table III-5). High correlations were found between the AMO and the first PC that originated from the analysis on SOMLIT data. However, after correction to account for multiple testing, the probability of the correlation (i.e. the p-value) exceeded 0.05 (Table III-5).

Variable	PC	North Atlantic Oscillation		Atlantic Multidecadal Oscillation		Northern Hemisphere temperature	
		r	p	r	p	r	p
SLP	1	0.276	0.440	-0.566	0.088	-0.783	0.007
	2	-0.279	0.434	-0.294	0.410	-0.055	0.880
UWIND	1	0.063	0.928	-0.716	0.020	-0.641	0.046
	2	-0.215	0.551	0.115	0.752	0.462	0.179
VWIND	1	-0.152	0.676	0.308	0.386	0.630	0.051
	2	-0.064	0.860	-0.610	0.061	-0.380	0.279
IWIND	1	-0.100	0.783	0.460	0.181	0.635	0.048
	2	-0.018	0.961	0.253	0.481	0.432	0.212
SST	1	-0.135	0.710	0.338	0.340	0.419	0.228
	2	0.269	0.453	-0.064	0.860	0.494	0.146
MP	1	0.349	0.323	-0.356	0.313	-0.693	0.026
	2	0.425	0.221	-0.519	0.124	-0.231	0.521
SOMLIT	1	-0.344	0.330	0.708	0.022	0.871	0.001
	2	-0.275	0.442	0.063	0.862	-0.150	0.679

Table III-5. Corrélations ($ddl = 8$) entre les 2 premières composantes principales (PCs) issue de l'analyse en composantes principales (ACP) appliquée sur les données climatologiques et les données SOMLIT et les indices hydro-climatiques grande échelle (voir les abréviations dans Table III-4). Les séries temporelles étant trop courtes, les corrélations ne sont pas corrigées pour tenir compte de l'autocorrélation temporelle. Cependant les valeurs de probabilités sont ajustées par la procédure d'Hochberg (1988) et $\alpha = 0.05$. Les corrélations significatives ($r > 0.5$) sont en gras.

III. 6) Discussion

Results suggest that coastal systems of western Europe located in the 42 to 51°N latitude range were affected by climate variability during the period 1997 to 2006. Strong correlations were found between regional climate and changes observed in the coastal environment, suggesting a substantial impact of climate on the coastal systems of western Europe. Both regional hydro-climatic and coastal changes were influenced by NHT, a large-scale climatological index. However, our study covers a short time period. According to Southward (1995), long periods of monitoring are required to unambiguously separate the main drivers of changes that can affect a marine system (Hawkins et al. 2003). For example, Fromentin & Planque (1996) detected a strong negative correlation between the state of the NAO and the abundance of *Calanus finmarchicus* in the North Sea for the period 1962 to 1992. As the relationship was highly significant, they attempted to forecast the abundance of the species for a given value of the NAO. However, the correlation broke down after 1996 (Planque & Reid 1998). This example suggests that the relationships between a large-scale climatic phenomenon and some coastal systems may not be constant through time. Such a result also reveals the nonlinearity of the system.

When analysing the effects of climate on marine systems, it is often relevant to separate natural changes from those caused by the confounding influence of human activity (Harley et al. 2006). Long-term monitoring is also preferable to establish a baseline against which perturbations can be better identified. However, most environmental coastal time series are short (e.g. Lindahl et al. 1998, Marty et al. 2002, Fernandez de Puelles et al. 2004). The SOMLIT programme, implemented in 1997, also suffers from lack of background. However, the spatial extent of the programme and the number of parameters measured are unique, compensating in part the short temporal coverage. The large spatial extent of the programme reduces the noise inherent to a sampling site (e.g. local disturbance and forcing), the influence of local hydro-dynamical forcing (e.g. tide, turbulence, frontal structures) and thereby increases the signal to noise ratio that enables the effect of climate to be better detected (Taylor et al. 2002, Beaugrand & Ibanez 2004).

In the regions where changes in nutrients, dissolved di-oxygen and salinity were observed, the positive correlations between chl *a* and the first PC from the analysis performed on SOMLIT data (Figure III-3) also revealed a decrease after 2001. These changes, led by

regional climate forcing, are likely to have affected biological systems. Lotze & Worm (2002) and Nielsen (2003) have suggested that variations in nutrients may have subsequent effects on primary production, which can eventually cascade or be amplified through trophodynamics (Frank et al. 2005, Kirby et al. 2009). Many biological changes such as a modification in the grazing rates of zooplankton, a shift in species composition and phenological or biogeographical shifts (Richardson & Schoeman 2004, Winder & Schindler 2004) have been attributed to rising water temperature or changes in physico-chemical characteristics of the water column, at least in temperate coastal systems (Harley et al. 2006, Kirby et al. 2009).

SST appears to be a master parameter governing the changes in the coastal environment (Scavia et al. 2002, Beaugrand 2009). The increase in SST observed after 2001 and particularly pronounced in 2003 (during the summer heat wave of 2003; Figure III-10) might have exacerbated the decrease in nutrients observed mainly along the western coast of France. This phenomenon, combined with the reduction in zonal wind and precipitation, which is likely to have reduced horizontal inputs, could have contributed to the diminution of nutrients observed in these coastal regions. The effect of SST in the water column would be to increase the vertical stratification in the coastal non-tidal regions monitored by the SOMLIT programme and in offshore areas (Diaz & Rosenberg 1995, Bopp et al. 2002), but this phenomenon is not likely to occur in tidal regions because of the mixing by currents. Another impact of temperature is through the amount of di-oxygen that water can hold (i.e. warmer water holds less di-oxygen than cooler water; Beaugrand et al. 2008). Furthermore, warming increases bacterial production and the metabolism of organisms, augmenting di-oxygen consumption (Najjar et al. 2000). Our study has revealed a small reduction in the concentration of dissolved di-oxygen. This event, observed between 2001 and 2005, is currently too weak to lead to hypoxia or anoxia events, but reveals a possible tendency for the future as suggested by some authors such as Chan et al. (2008). The projected increase in temperature (Intergovernmental Panel on Climate Change 2007) may also place further stress on coastal systems already affected by eutrophication, pollution and harmful algal blooms and exacerbate phenomena of anoxia or hypoxia (Diaz & Rosenberg 1995, Justic et al. 1997, Najjar et al. 2000, Peperzak 2003, Selman et al. 2008).

While many studies to date have focused exclusively on the impact of temperature as an indicator of climate change (e.g. Edwards & Richardson 2004), our results suggest that atmospheric circulation is also an important parameter, as shown by the strong correlations between both zonal circulation and wind intensity and the state of coastal systems (see Figure III-10 & Table III-4). After a period of relative stability, the decreases in nutrients, PON, POC and chl *a* in regions located in western France and the reduction in dissolved di-oxygen at all sites (Figure III-3) observed during the period 2001 to 2005 coincided with the decrease observed in the intensity of zonal wind during the same period. Changes in atmospheric circulation influence the Atlantic storm track (e.g. Dickson & Turrell 2000) and affect precipitation patterns (Rogers 1997). Precipitation was also highly related to changes in the state of the coastal systems (Figure III-12, Table III-4), a result also found by Harley et al. (2006) for other coastal systems. The reduction in nutrients observed during 2001 to 2005 may have been reinforced by the decrease in precipitation and its influence on drainage and river runoff. In a study of 137 representative rivers around the world, Milliman et al. (2008) suggested that river discharge generally reflected precipitation patterns, themselves a climatic response to oceanic/atmospheric drivers such as El Niño and Southern Oscillation (ENSO) or NAO and AMO (New et al. 2001). Direct human impacts (damming, irrigation and interbasin water transfers) could be superimposed to the river flow pattern (Ludwig et al. 2009) and thereby also influence these concentrations in nutrients and particulate matters (e.g. damming in the Ebro River in Spain, Ibáñez et al. 1996). Contrary to Livingston et al. (1997), who showed a reduced nutrient input after drought periods in an estuary located in the Gulf of Mexico, our results (Figure III-3) revealed a particularity of the Gironde that presents a conservative behaviour, except in downstream areas (Irigoién & Castel 1997). This conservative behaviour suggests the absence of intense biogeochemical processes in this estuary (Cabeçadas et al. 1999).

Changes in ocean circulation can affect the regional circulation of shelf and coastal seas (Scavia et al. 2002, Harley et al. 2006). Although reduced wind might also alter physical mixing, the examination of bottom and surface samples for some sites monitored by SOMLIT shows that the system is more likely influenced by horizontal inputs from offshore. In the North Sea, the atmospheric circulation influences the hydrodynamics that modulate the nature of sea water entering from the North Atlantic and the English Channel (Reid et al. 2003). Jickells (1998) stressed that the oceanic inflow had a strong impact on the concentration of nutrients in this sea and that a percentage of 82.68% of nitrogen input originated from this

phenomenon. In contrast to the sites of the Atlantic and adjacent seas considered in this study, Mediterranean waters export a great amount of nutrients to the Atlantic Ocean because of its negative water balance and the resulting water circulation (Hopkins 1985).

Substantial correlations were generally observed between the state of the coastal environment and large-scale climatological indices (Table III-5), although not all correlations were significant after correction for temporal autocorrelation and for multiple testing. Beaugrand & Reid (2003) showed that NHT anomalies and SST covaried positively for many months in the eastern part of the North Atlantic, around the British Isles and the North Sea, the influence of which was stronger than that of the NAO. No influence of the NAO on the state of coastal systems was detected, probably because this oscillation only has a modest influence on the regional climatological parameters of the region (Marshall et al. 2001).

The effect of climate depended upon the intensity of the climate anomalies. The scale, the rhythm and the intensity of physical forcing indeed influence biological production (e.g. the theory of ergoclines; Legendre & Demers 1984). Our results showed that both substantial negative or positive forcing were related to changes in the state of the coastal systems, while moderate forcing had no effect (Figure III-12). Such threshold effects are beginning to be widely documented for systems ranging from physical (Rahmstorf 1995, Paillard 2001) to biological and ecological systems (Scheffer et al. 2001, Carpenter & Brock 2006) and reflect a pronounced non-linearity (e.g. the strength of the correlation may vary locally and temporally) and thereby sensitivity of the response of most natural systems to climate change.

Coastal regions, located at the interface between oceanic and terrestrial systems, play a crucial role in earth system functioning (Le Tissier et al. 2006). It is assumed that currently more than 60% of the world's population live less than 60km from the sea, increasing the human pressure on these systems at the same time as we are experiencing a period of rapid climate change (IPCC Fourth Assessment Report 2007). The spatial and temporal heterogeneity of coastal systems is considerable (Vafeidis et al. 2004), leading to methodological problems in developing global perspectives on the role and scale of the coastal domain in earth system functioning (Kremer et al. 2005, Harley et al. 2006). The acquisition of data by coordinated sampling programmes enables a robust comparison of the heterogeneity between sites to be made and relationships between contrasting coastal systems of western Europe and climate variability to be outlined. Although it is well known that coastal

systems are locally impacted by human activities, it remains difficult to disentangle climatic from anthropogenic forcing (Behrenfeld et al. 2006, Le Tissier et al. 2006).

In summary, our results suggest that (1) regional climate through its influence on local atmospheric and ocean circulation and temperature substantially influences coastal systems of Europe in the 42 to 51°N latitudinal range, and that (2) regional climate variability is correlated to an index of global temperature change (NHT anomalies). Our analysis shows that changes observed in nutrients are also detected in chl *a* and indicate that climatic signal may propagate through the trophodynamics. Monitoring such as SOMLIT should be pursued and perhaps extended, as it represents the only way forward to robustly detect potential alterations of coastal systems in the future.

Acknowledgments

We thank the National Institute for the Sciences of the Universe and the entire SOMLIT team – technicians, researchers, captains and crews – who have contributed to the collection of the SOMLIT samples since 1997. Thanks also to Dr I. Rombouts for reading the manuscript. The database is available at: <http://somalit.epoc.u-bordeaux1.fr/fr>. This project was funded by a French grant BDI-CNRS.

Chapitre IV :

Modulation climatique de la fertilisation anthropique

On engendre les conflits en fertilisant les petites erreurs

(Gérard Lescarbeault)

Modulation climatique de la fertilisation anthropique

IV. 1) Avant-propos

Il est maintenant largement admis par la communauté scientifique que le changement global exerce une influence grandissante sur l'ensemble des compartiments et des éléments fonctionnels de l'écosphère. Il est très probable, au sens communément admis par le groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC Fourth Assessment Report 2007) que l'élévation globale des températures, qui s'accélère depuis la fin des années 1970, soit le résultat de l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère tels que le dioxyde de carbone et le méthane. L'augmentation continue de l'occupation de la façade littorale (près de 60% de la population mondiale vit à moins de 60km des côtes ; Kremer et al. 2004) et des activités humaines qui en résulte, a conduit à une profonde altération de la structure et du fonctionnement des systèmes vivants (Halpern et al. 2008). Cependant, la mise en évidence de ce forçage anthropique est d'autant plus complexe qu'il se produit à diverses échelles de temps et d'espace (Dobson et al. 1997). Le comportement de ces zones littorales à ce forçage anthropique, et notamment de celles situées au débouché des fleuves, est moins contraint au niveau global qu'au niveau local. Le développement de l'agriculture, associé à l'apport de fertilisants, la déforestation, ainsi que la perturbation du cycle naturel de l'eau, par la mise en place de retenues et barrages, ont des conséquences notables pour le fonctionnement des cycles biogéochimiques (Conley 1999, Cloern 2001). Ces perturbations modifient fortement les termes des bilans chimiques et fragilisent ces écosystèmes.

Ainsi, les systèmes côtiers sont impactés par la fragmentation ou la destruction des habitats (Sherman et Duda 1999, Cloern 2001), l'invasion d'espèces exotiques (Steneck 1998, Edwards et al. 2001) et la surexploitation des ressources marines (Pauly et al. 1998, Pauly

2003), entraînant d'importantes modifications des écosystèmes marins (Omori et al. 1994, Frank et al. 2005). Environ 80% de la pollution marine trouve son origine dans le transfert de contaminants depuis le continent (Norse 1993, Kremer et al. 2004). Les activités humaines (e.g. l'agriculture, les apports en eaux usées et le développement urbain) contribuent à l'altération des concentrations en nutriments, bouleversant l'équilibre naturel des systèmes côtiers et estuariens (Cloern 2001, Selman et al. 2008). Une augmentation des concentrations en éléments nutritifs (sur-fertilisation) peut avoir d'importants effets sur la productivité biologique et sur la santé des écosystèmes (North Sea Task Force 1993, Cloern 2001). Cette sur-fertilisation peut ainsi conduire à des efflorescences algales nuisibles et/ou toxiques (Anderson et al. 2002), des événements d'anoxie ou d'hypoxie (Diaz 2001) ou encore des changements de dominance des espèces (e.g. une augmentation d'espèces non-siliceuses à la suite d'une augmentation des concentrations de nitrates, d'ammonium et/ou de phosphates ; Richardson et al. 1997).

Cette évidente accumulation d'altérations des systèmes a conduit les décisionnaires et les scientifiques à encourager le développement d'une démarche systématique d'observation des milieux littoraux. Mais, tandis que les données s'accumulent, les procédures mathématiques classiques ne sont généralement pas adaptées à l'identification, la détection et la quantification des modifications brusques ou progressives des écosystèmes. Ainsi, les changements abrupts, observés dans plusieurs grands écosystèmes marins, ont été détectés au moins 10 ans après qu'ils aient réellement eu lieu (Hare et de Mantua 2000, Reid et al. 2001). Un des défis actuel majeur est donc d'être capable de détecter rapidement ces changements majeurs de l'état des écosystèmes côtiers (Beaugrand et al. 2008). Cependant un des principaux problèmes est l'absence de situations de normalité, ou états de référence, permettant d'établir une typologie des fluctuations. Cette limitation rend difficile la quantification de l'impact anthropogénique.

Afin de répondre à cette problématique, il était donc essentiel de mettre au point une procédure nous permettant de définir des états de références dans le but de quantifier l'intensité du forçage humain sur le milieu littoral français. L'intérêt étant de pouvoir détecter rapidement (dès la mise à disposition des données) un écart à une situation de référence défini empiriquement ou, dans le meilleur des cas, à partir d'une connaissance approfondie des systèmes suivis. Dans un premier temps, la démarche choisie a donc été d'établir des états de référence relatifs. Tout d'abord, en accord avec des études récentes (Cloern 2001, Billen and Garnier 2007, Ludwig et al. 2009) nous avons choisi de nous focaliser sur l'étude de la

variabilité des concentrations en phosphates et en nitrates pour témoigner de la perturbation anthropique. De plus, les états de références relatifs sont construits à partir de données de type océaniques. Ainsi, malgré que la procédure numérique sélectionne des régions avec le même régime thermique et des concentrations en sels nutritifs statistiquement non différentes, la différence naturelle des cycles biogéochimiques des nitrates et des phosphates entre systèmes océaniques et côtiers n'a pu être totalement prise en compte.

Dans ce chapitre nous tenterons ainsi de répondre aux questions suivantes : est-il possible de définir une situation de normalité relative des systèmes côtiers français, c'est-à-dire un état non perturbé par les apports excessifs résultant des activités humaines ? Peut-on quantifier l'effet de fertilisation en sels nutritifs résultant du forçage anthropogénique sur le milieu littoral ? Si oui, les forçages à l'échelle locale (e.g. hydrologie, météorologie), ainsi que les propriétés intrinsèques des sites (e.g. typologie des bassins versants, localisation des points de prélèvements), ont-ils une influence notable sur les perturbations anthropogéniques conduisant à cette fertilisation exacerbée en sels nutritifs ?

IV. 2) Publication: Climate modulation of the anthropogenic fertilisation

Climate modulation of the anthropogenic fertilisation

E. Goberville, G. Beaugrand, B. Sautour, P. Tréguer

Soumis à Ecological Indicators

IV. 2. 1) Données utilisées

- *Données mensuelles des températures, des concentrations en nitrates et en phosphates des 12 stations SOMLIT pour la période 1997-2008.*
- *Climatologies mensuelles des températures, concentrations en nitrates et phosphates à l'échelle de l'Hémisphère Nord issues du Word Ocean Atlas 2005 (WOA05).*
- *Séries temporelles mensuelles de durée d'insolation pour les 12 stations SOMLIT pour la période 1997-2008 issues de Météo-France.*
- *Données mensuelles sur la période 1997-2008 du débit des rivières les plus à proximité des sites de prélèvement SOMLIT issues de la banque HYDRO (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable).*

IV. 2. 2) Analyses numériques

- *application d'une version modifiée (par l'utilisation de la distance généralisée de Mahalanobis) de la procédure de permutation multiréponses (Multiple Response Permutation Procedure ; MRPP) dans le but de comparer une observation à un groupe d'observations.*

- utilisation de la représentation en boîte à moustache selon Tukey (boxplot) pour la synthèse des résultats obtenus.
- lissage par moyenne mobile d'ordre 6.
- corrélation linéaire de Pearson.
- corrélations croisées.
- méthode de Pyper & Peterman pour la prise en compte de l'autocorrélation temporelle.

IV. 2. 3) Principaux résultats obtenus

- La nouvelle procédure numérique développée permet de surmonter les difficultés inhérentes à la majorité des programmes de suivi actuels telles que le manque de situations de référence auxquelles comparer les forçages actuels ou encore la présence de données manquantes.
- Cette procédure permet la comparaison quasi instantanée (i.e. dès que la donnée est disponible) à un état de référence relatif. De plus, cet outil peut être implémenté à tout type de systèmes (marin ou terrestre) et de paramètres (physiques, chimiques ou biologiques), sans limitation en nombre.
- L'application de notre procédure sur les systèmes côtiers du littoral français a permis de déceler un effet de fertilisation anthropogénique au cours de la période 1997-2008, consécutif à des apports excessifs en nutriments dus à l'intensification des activités humaines.
- Ce forçage humain présente une forte variabilité à l'échelle spatiale, révélant des sites plus soumis à la fertilisation (e.g. Brest) que d'autres (e.g. Marseille), ainsi qu'à l'échelle temporelle, avec des périodes plus intenses d'apports anthropogéniques en nutriments (e.g. en 2001 à Brest).
- Des interactions entre le climat et la fertilisation des milieux côtiers ont été mises en évidence. Les précipitations et leurs conséquences sur les débits des rivières et le lessivage des sols amplifient ce phénomène de fertilisation. A l'inverse, une augmentation de l'insolation (et donc de la température) conduit à une atténuation de

la manifestation de l'activité humaine, notamment par l'effet de consommation de l'excès en nutriments par l'activité photosynthétique du compartiment biologique.

- *La forte hétérogénéité spatiale des valeurs de fertilisation côtière obtenues démontre l'importance des facteurs hydro-climatologiques locaux ainsi que de la typologie des sites étudiés.*
- *La quantification de l'intensité de la fertilisation des systèmes côtiers est un élément indispensable dans l'aide à la mise en place de plans de managements adaptés.*

IV. 3) Introduction

Human impacts occur on a variety of temporal and spatial scales (Dobson et al. 1997), but in more recent time, particularly during the last century, anthropogenic activities have exerted huge pressures on living systems, causing alterations in the structure and functioning of all types of systems (Halpern et al. 2008). Current climate change represents a further pressure, which could exacerbate the human fingerprint on the biosphere (Alley et al. 2003).

About 50% of the population lives within 60 km of the shoreline (Kremer et al. 2004). Coastal systems are being impacted by fragmentation or destruction of habitat (Sherman and Duda 1999; Cloern 2001), invasion of exotic species (Steneck 1998; Edwards et al. 2001) and overexploitation of marine resources (e.g. Pauly et al. 1998; Pauly 2003), resulting in major alterations of marine ecosystems (Omori et al. 1994; Frank et al. 2005). Transfer of pollutants from continents provides 80% of all marine pollution and contamination (e.g. Norse 1993; Kremer et al. 2004). Human activities (e.g. agriculture, sewage and urban development) contribute to alter nutrient concentrations resulting in dramatic disruptions of coastal and estuarine systems (Cloern 2001; Selman et al. 2008). An increase in nutrients (i.e. over-fertilisation) can have profound effects on the biological productivity and the health of ecosystems (North Sea Task Force 1993; Cloern 2001) and lead to toxic or harmful algal blooms (Anderson et al. 2002), anoxia or hypoxia (Diaz 2001) and shifts in species dominance (e.g. an increase in non-siliceous species as a result of a raise in nitrate, ammonium and/or phosphate, Richardson et al. 1997). The worldwide accumulation of evidence of the alteration of marine systems has led policymakers (e.g. National Research Council) and scientists (e.g. [Institut National des Sciences de l'Univers](#)) to encourage the implementation of monitoring projects. For example, French marine coastal ecosystems have been monitored since 1997 by a programme called SOMLIT ("Service d'Observation du Milieu Littoral"). This network of observations has gathered together a database of physical, chemical and biological parameters at 12 sites around France on a bi-monthly basis. However, while data are accumulating, classical mathematical procedures generally fail to detect rapid modifications in these systems. This might explain why abrupt shifts observed in several Large Marine Ecosystems have been detected at least 10 years after they had actually occurred (e.g. Hare and Mantua 2000; Reid et al. 2001). A current challenge is to be able to

detect rapidly major shifts in the state of coastal systems because of their biological, social and economical consequences (Beaugrand et al. 2008).

Here, we use data from SOMLIT to present a new numerical procedure that enables (1) the identification of a relative reference state against which changes in marine coastal systems can be instantaneously detected and (2) the quantification of the anthropogenic fertilisation in nutrient concentrations of coastal systems. Our study reveals how climate may interact with anthropogenic pressures to alter coastal marine systems.

IV. 4) Materials and Methods

IV. 4. 1) Data

IV. 4. 1. 1) Environmental Data

Our analysis on coastal marine systems was based on data collected by the French sampling programme SOMLIT, which has coordinated activities of marine laboratories along the French coasts since 1997. This programme currently federates seven marine stations at 12 sampling sites that monitor all seas surrounding France such as the English Channel, the Atlantic Ocean and the Mediterranean Sea marine stations. Coastal systems studied by this project have distinctive hydro-climatic characteristics ranging from the weak-tidal Mediterranean Sea (e.g. Marseille) to the mega-tidal English Channel (e.g. Wimereux) (Figure IV-1). More details on the monitoring programme can be found in (Goberville et al. 2010). In this study, we focussed on three parameters, temperature, nitrate and phosphate concentrations (Table IV-1), collected from 1997 onwards on a bi-monthly basis (i.e. twice a month) in the twelve sites along the French coast (Figure IV-1).

We used the large-scale data set of the World Ocean Atlas 2005 (WOA05) (Locarnini et al. 2006) to create a reference matrix of temperature, nitrate and phosphate concentrations against which SOMLIT data were tested. Monthly surface climatology data of these three parameters are organised on a virtual grid of 1° longitude and 1° latitude for the whole Northern Hemisphere (Table IV-1; Antonov et al. 2006; Garcia et al. 2006a; Garcia et al. 2006b).

To evaluate the impact of river discharge on coastal marine systems, data on monthly mean river discharge were used (Table IV-1). These data originated from the project HYDRO (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable; <http://www.hydro.eaufrance.fr/>).

IV. 4. 1. 2) Climatological Data

Data on insolation duration (Table IV-1), provided by Meteo-France (<http://france.meteofrance.com>), were also used to examine the potential influence of local environmental conditions, resulting from climate variability on a larger scale, on the level of nutrients regulated by primary production. Insolation duration and river discharge were normalised so that their interval of variation ranged between 0 and 1 and the difference between insolation duration and river discharge was then calculated. A negative value therefore indicated that river discharge was higher than insolation duration, and a positive value reflected the opposite. Negative values, prevalence of wettest periods, are expected to increase nitrate and phosphate loadings from terrestrial runoff to coastal waters while positive values, exhibiting driest and sunniest periods, tend to decrease nutrient concentrations. We used exclusively these local hydro-climatological parameters because of their potential and more direct influence on the state of coastal systems in comparison to other indices of large-scale variability such as the North Atlantic Oscillation. The influence of large-scale hydroclimatic variability (e.g. North Atlantic Oscillation, Atlantic Multidecadal Oscillation) or direct spatial and temporal fluctuations in climate (sea level pressure, precipitation, atmospheric circulation and temperature) were recently quantified on French coastal systems (Goberville et al. 2010).

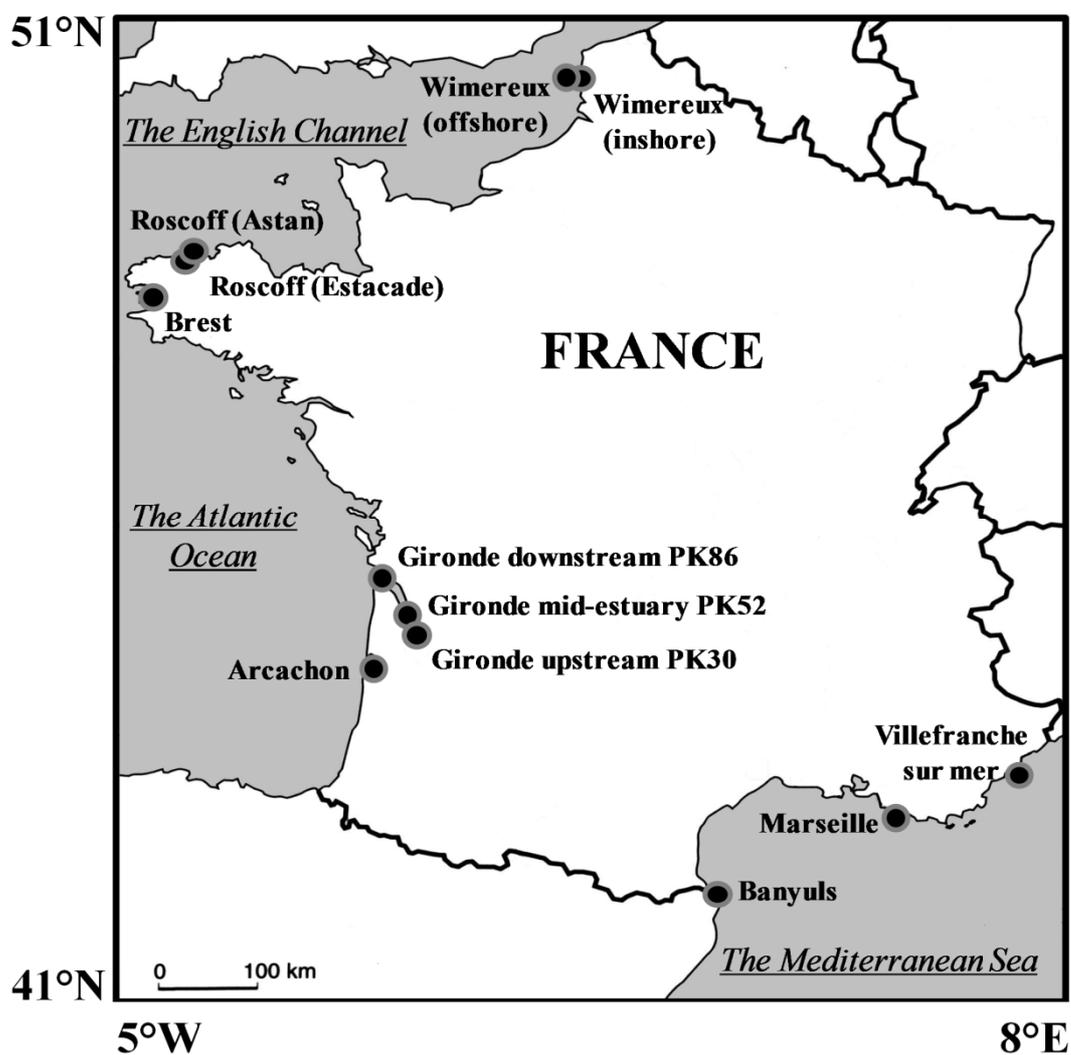


Figure IV-1. Emplacement des sites du Service d'Observation en Milieu Littoral(SOMLIT) étudiés dans cette étude.

Data	Units	Spatial Resolution	Type	Source
Sea surface temperature	°C	sampling sites (no grid)	Monthly mean for 1997-2008	SOMLIT programme
Phosphate	μmol l ⁻¹	sampling sites (no grid)	Monthly mean for 1997-2008	SOMLIT programme
Nitrate	μmol l ⁻¹	sampling sites (no grid)	Monthly mean for 1997-2008	SOMLIT programme
Sea surface temperature	°C	180° W to 180° E 89.5N to 0° (each 1°)	Monthly mean (climatology)	World Ocean Atlas (2005)
Phosphate	μmol l ⁻¹	180° W to 180° E 89.5N to 0° (each 1°)	Monthly mean (climatology)	World Ocean Atlas (2005)
Nitrate	μmol l ⁻¹	180° W to 180° E 89.5N to 0° (each 1°)	Monthly mean (climatology)	World Ocean Atlas (2005)
Rivers discharges	m ³ s ⁻¹	sampling site (no grid)	Monthly mean for 1997-2008	EauFrance
Insolation	mm	sampling sites (no grid)	Each month for 1997-2008	Meteo-France

Table IV-1. Origine et caractéristiques des données utilisées dans cette étude au cours de la période 1997-2008.

IV. 4. 2) Rationale and description of the new numerical procedure

Both the management and conservation of coastal systems require a substantial knowledge on their current dynamic equilibrium (Kremer et al. 2004). However, one of the main problems scientists face when monitoring a living system is the absence of a reference state against which fluctuations can be detected. This limitation makes it difficult to determine the extent to which marine systems are being impacted by human activities or natural environmental fluctuations. This restriction does not exist in statistical quality control because the engineer uses a training set to have an idea on the natural variability of the process under control (Montgomery 1991).

IV. 4. 2. 1) Step 1: identification of a relative reference state

In our case, we were interested in monitoring the state of the French coastal systems based on the concentration of nitrate, phosphate and temperature. Taken together, both nitrate and phosphate are indicative of anthropogenic activities (Cloern 2001; Selman et al. 2008). We could not use the annual ratio nitrate: phosphate = 16 as a reference (Redfield 1934) because this ratio varies strongly in space and time (Justic et al. 1995).

Because the actual reference states, we call here a relative reference state, of coastal systems monitored by SOMLIT were unknown, we determined a proxy by selecting data of nitrate and phosphate concentrations from offshore regions having the same thermal regime than the SOMLIT sites and for a given month. A relative reference state was therefore defined as an environment of similar thermal regime that tends to have minimal human influence with respect to nitrate and phosphate concentrations. To achieve this, we used the large data set of nitrate and phosphate concentrations from the World Ocean Database 2005. To determine the relative reference state, we applied a technique based on a numerical procedure recently proposed by Beaugrand et al. (in press) and used in Lenoir et al. (2010). For a given month, each geographical cell of 1° longitude x 1° latitude for the World Ocean Database 2005 data (matrix $\mathbf{X}_{n,p}$; n observations and p variables) was tested against all SOMLIT samplings (matrix $\mathbf{Y}_{m,p}$; m observations and p variables) using sea surface temperature, nitrate and phosphate concentrations (p = 3). To calculate the distance of each geographic cell and each group of observations corresponding to each SOMLIT site for a given month, the Mahalanobis generalised distance was calculated as follows:

$$D_{x,Y}^2 = \mathbf{z}' \mathbf{R}^{-1} \mathbf{z} \quad (1)$$

With $\mathbf{R}_{p,p}$ the correlation matrix of table $\mathbf{Y}_{m,p}$, z the vector of the differences (of length p) between the average value of the p variables in table $\mathbf{Y}_{m,p}$ and the values of the p variables of the site (or geographical cells) to be compared. Probability of the generalised Mahalanobis distance was then assessed by using a simplified version of the Multiple Response Permutation Procedure (MRPP; Mielke et al. 1981) recently adapted to compare a single site to a group (Beaugrand and Helaouët 2008). We kept the geographical cells of the World

Ocean Database when the probability p was superior or equal to 0.1. This indicates that all World Ocean Database chosen cells were not significantly different from the SOMLIT site for a given month. The procedure was repeated for all SOMLIT sites (12) and all months (12), giving a total of 144 reference matrices. The reference states remained conservative because they were directly based on ocean concentration of nitrate and phosphate and therefore did not incorporate the natural continental influence that occurs in a coastal system (Cloern 2001). We therefore stress that the reference state should be seen as a relative reference state against which the equilibrium of the system can be evaluated.

IV. 4. 2. 2) Step 2: representation of the relative reference state

The position of the relative reference state was calculated for each station and each month in an Euclidian space of two dimensions, the first dimension being represented by the phosphate concentration and the second dimension being represented by the nitrate concentration. Probabilities were calculated by using the generalised Mahalanobis distance tested by the simplified MRPP on each reference matrix (i.e. World Ocean Database geographical cells kept when $p \geq 0.1$) obtained from the previous step 1. The position of the relative reference state was indicated in this space by high probabilities.

IV. 4. 2. 3) Step 3: representation of the probability of each year for a given site and month

To determine the position of coastal marine systems on the grid of probability, the procedure described in step 1 was repeated. The probability of each year of the period 1997-2008 was calculated for a given month and site by calculating the generalised Mahalanobis distance and its probability. These probabilities were then superimposed on the Euclidian space for the given month and site. The distance between a given year and the centre of high probabilities was directly given by the probability of the year (see Figure IV-2, Figure IV-4 and Figures A-IV-1 to 8).

IV. 4. 3) Synthesis of the results

The probabilities were calculated for each site at both monthly and year-to-year scales. Probabilities were represented on a contour diagram where sites were plotted as a function of months (Figure IV-3a) or years (Figure IV-3b). Sites were sorted by applying a principal component analysis (PCA) on two tables: (1) 9 sites x 12 months and (2) 9 sites x 12 years. The sorting was used to facilitate the reading of the contour diagram.

Another type of synthesis of the results was undertaken by using boxplots representing the median, the first and third quartiles and the range (i.e. minimum and maximum) of probabilities for each site (Tukey 1977). This analysis was performed to summarise the influence of anthropogenic fertilisation for each site (Figure IV-3c).

IV. 4. 4) Influence of climate on the state of coastal systems: example of Brest and Marseille

To evaluate the potential influence of climate on the year-to-year changes in the state of French coastal systems, we focused on the two sites Brest and Marseille. These sites were chosen for their distinct hydrodynamic features and freshwater loading (Goberville et al. 2010). Year-to-year fluctuations in the probability of the two sites were examined for the period 1997-2008. A simple order-6 moving average was used to remove the effect of seasonality (Legendre and Legendre 1998).

Correlation analyses were performed between the probabilities and the difference between normalised insolation duration and normalised river discharge (see Data). Probabilities were calculated after accounting for temporal autocorrelation by adjusting the degrees of freedom using the modified Box-Jenkins autocorrelation function (Chelton 1984) (Box and Jenkins 1976). Cross-correlation analyses were also performed to search for any potential lags. To assess the probability of the cross-correlogram, we adjusted the degrees of freedom of each lag, accounting for temporal autocorrelation.

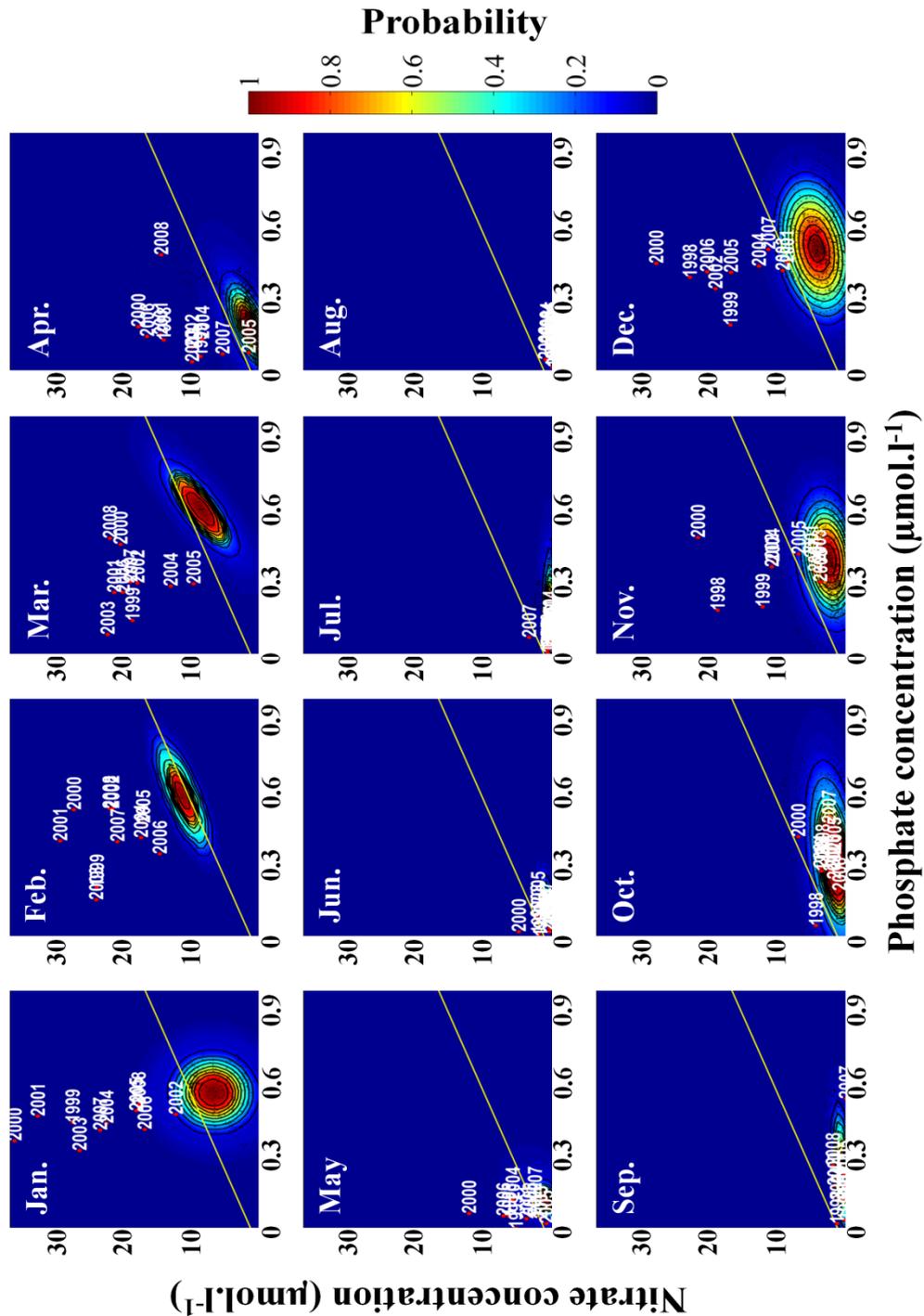


Figure IV-2. Représentation des états de référence relatifs et de la probabilité pour chaque année qu'une observation appartienne aux états de référence relatifs pour un mois donné de Janvier (Jan.) à Décembre (Dec.): **exemple de Brest.**

La position des états de référence est calculée dans un espace euclidien à 2 dimensions; la 1^{ère} dimension (x) correspond à la concentration en phosphate et la 2^{ème} (y) à la concentration en nitrate. La probabilité qu'une observation appartienne aux états de références relatifs pour chaque année (de 1997 à 2008) est calculée et positionnée dans l'espace euclidien pour chaque mois.

La distance entre une année donnée et le centroïde des hautes probabilités est directement donnée par la probabilité de l'année. La ligne en jaune représente le rapport de Redfield (N/P = 16).

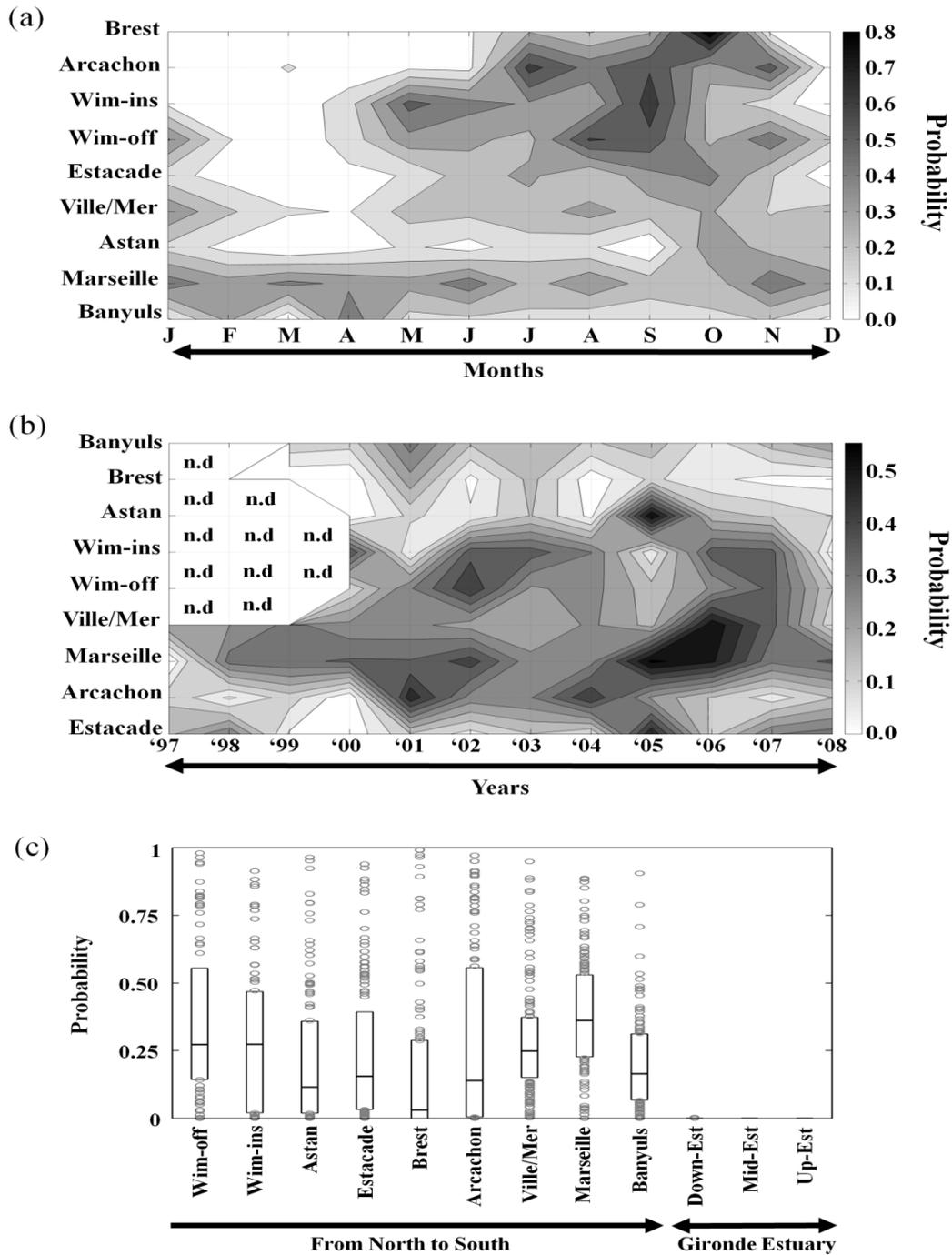


Figure IV-3. Synthèse de l'influence de la fertilisation anthropogénique en fonction des concentrations en nitrate et en phosphate pour chaque site SOMLIT. (a) Diagramme en contour de la variabilité mensuelle de la probabilité qu'une observation appartienne aux états de référence pour chaque site SOMLIT. (b) Diagramme en contour de l'évolution annuelle de la probabilité qu'une observation appartienne aux états de référence pour chaque site SOMLIT. (c) Quantification de l'influence de la fertilisation anthropogénique par une représentation en box-plots.

En abscisse, les sites sont classés du plus au nord au plus au sud, suivis des 3 sites de l'estuaire de la Gironde. Wim-off: Wimereux (offshore); Wim-ins: Wimereux (inshore); Astan: Roscoff Astan; Estacade: Roscoff Estacade; Brest; Arcachon; Ville/Mer: Villefranche-sur-Mer; Marseille; Banyuls; Down-Est: Gironde downstream PK86; Mid-Est: Gironde mid-estuary PK52; Up-Est: Gironde upstream PK30.

IV. 5) Results

IV. 5. 1) Identification of relative reference state: example of Brest

In Brest, our new procedure identified the relative reference state (i.e. probability > 0.05) inferred from nitrate and phosphate concentrations particularly close to the Redfield ratio in winter but slightly below the ratio for other months of the year (Figure IV-2). We recall here that the probability is a measure of the distance between the observation and the centroid of the relative reference state. While the relative reference state expanded in winter, it strongly contracted in summer. Years, reported on the scatter plots (Figure IV-2), were far from the relative reference state during winter months. Years were closer to the relative reference state in spring and most years but 2007 belonged to the relative reference state in summer. In autumn, some years started to differ significantly to the relative reference state (e.g. 1998-2000, 2002, 2004 in November). Results suggested that nutrient (nitrate and phosphate) concentrations were closer to the relative reference state for recent observations.

IV. 5. 2) General analysis

The probability of each observation to belong to the relative reference state was therefore calculated for all sites, months and years (Figure IV-3). Overall on a monthly basis, the probability of an observation to belong to the relative reference state was low in winter and early spring for all Atlantic sites and Villefranche-sur-Mer (Figure IV-3a). The highest probabilities were reached for these sites in summer and the beginning of autumn. In Marseille and Banyuls, probabilities remained high for all months of the year.

On a year-to-year basis, probabilities of each observation to belong to the relative reference state increased through time for all sites during the period 1997-2008 (Figure IV-3b). Two periods of high probability occurred in 2001 and 2005-2006. This positive trend was however not observed in Banyuls and Villefranche-sur-Mer.

Using a boxplot diagram, we quantified the influence of anthropogenic fertilisation with respect to nitrate and phosphate concentrations for each SOMLIT site (Figure IV-3c). The sites that have the highest probabilities of belonging to the relative reference state were Marseille followed by Wimereux and to a lesser extent Villefranche-sur-Mer and Banyuls.

Sites that were characterised by the lowest probabilities were sites of the Gironde estuary, followed by sites of the Celtic Sea and to a lesser extent Arcachon. The null values observed for estuarine systems can be explained by the fact that these systems could not be compared to oceanic conditions in nitrate and phosphate concentrations.

IV. 5. 3) Influence of climate on the state of coastal systems: example of Brest and Marseille

The year-to-year changes in the probability in relation to local hydro-climatological factors (here, normalised insolation duration and normalised river discharge) were studied in the two contrasting sites: Brest and Marseille. The two systems differed by their nitrate and phosphate concentrations (Figure IV-2 versus Figure IV-4), Brest (e.g. mean nitrate concentration = $23.7\mu\text{mol.l}^{-1}$, phosphate concentration = $0.43\mu\text{mol.l}^{-1}$ in January and a Redfield ratio nitrate: phosphate = 55) being richer in nutrient than Marseille (e.g. mean nitrate concentration = $1.6\mu\text{mol.l}^{-1}$, phosphate concentration = $0.20\mu\text{mol.l}^{-1}$ in January and a Redfield ratio nitrate: phosphate = 8).

The examination of year-to-year changes in the probability that the site belongs to the relative reference state in Brest revealed the presence of three periods: 1998-2000 characterised by lower probability; 2002-2006 identified by higher probabilities; 2007-2008 distinguished by lower probabilities remaining in general higher than probabilities observed during the first period (Figure IV-5a). Correlation analyses were calculated to test whether year-to-year changes in the probabilities in Brest were related to the influence in local hydro-climatological conditions (i.e. the difference between normalised insolation and normalised river discharge). There was a positive and significant relationship between probabilities and this hydro-climatological index ($r = 0.732$, $p = 0.01$; probability after correcting for autocorrelation).

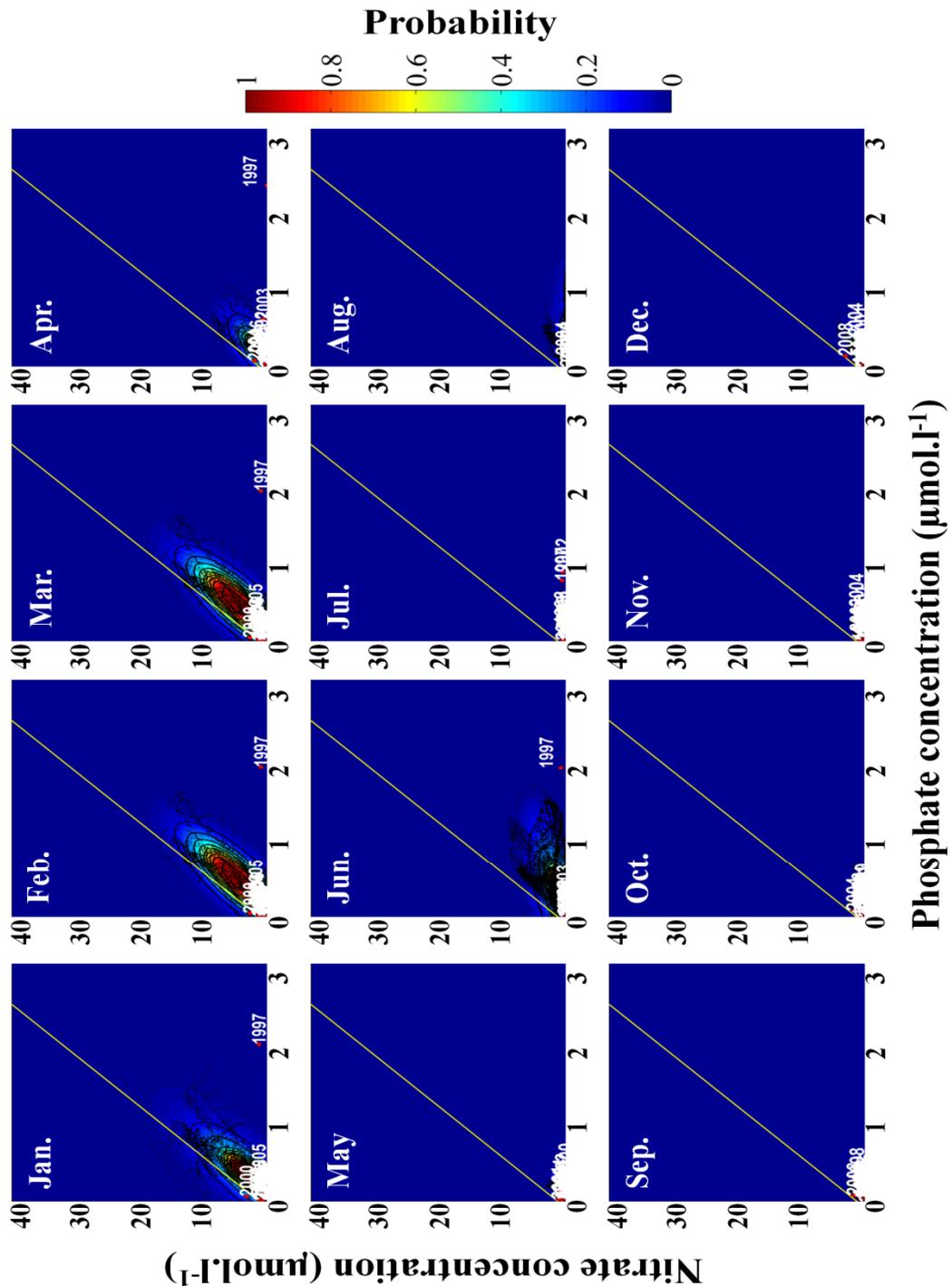


Figure IV-4. Représentation des états de référence relatifs et de la probabilité pour chaque année qu'une observation appartienne aux états de référence relatifs pour un mois donné de Janvier (Jan.) à Décembre (Dec.): exemple de Marseille.

La position des états de référence est calculée dans un espace euclidien à 2 dimensions; la 1^{ère} dimension (x) correspond à la concentration en phosphate et la 2^{ème} (y) à la concentration en nitrate. La probabilité qu'une observation appartienne aux états de références relatifs pour chaque année (de 1997 à 2008) est calculée et positionnée dans l'espace euclidien pour chaque mois. La distance entre une année donnée et le centroïde des hautes probabilités est directement donnée par la probabilité de l'année. La ligne en jaune représente le rapport de Redfield (N/P = 16).

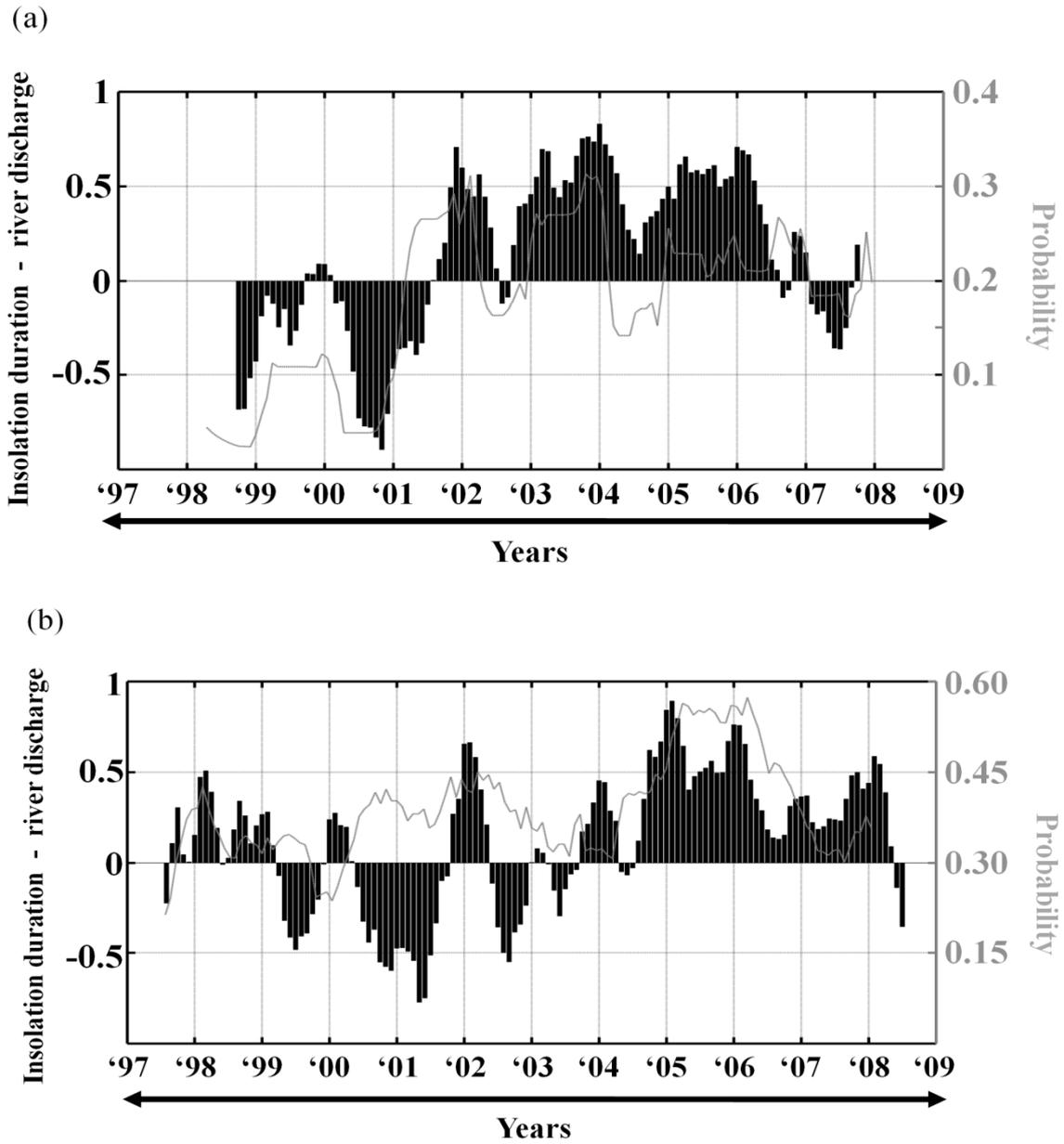


Figure IV-5. Variabilité temporelle de la probabilité qu'une observation appartienne aux états de référence relatifs en lien avec les conditions hydro-climatologiques locales (différence entre la durée d'insolation et le débit du fleuve après normalisation des données). (a) variabilité temporelle de la probabilité qu'une observation appartienne aux états de référence relatifs à Brest. (b) variabilité temporelle de la probabilité qu'une observation appartienne aux états de référence relatifs à Marseille.

The examination of year-to-year changes in probabilities in Marseille revealed a continued increase in the probability up to 2006 followed by a reduction to the present (Figure IV-5b). Correlation between year-to-year changes in the probabilities and the difference between normalised insolation duration and normalised river discharge was low and not significant ($r = 0.271$, $p = 0.33$; probability corrected for autocorrelation).

Cross-correlation analyses were also applied between year-to-year changes of the probabilities and the difference between normalised insolation duration and normalised river discharge for the two studied cases with a moving window of 12 months. Examination of the two cross-correlograms (not shown here) indicated that no lag existed between the year-to-year changes in probabilities and the influence in local hydro-climatological conditions.

IV. 6) Discussion

Both the last and current century have been periods of rapid and pronounced environmental changes (Omori et al. 1994). The recent awareness that the oceanic biodiversity is vulnerable to human threats such as exploitation, eutrophication, habitat destruction, pollution and species introduction (Halpern et al. 2008) has reinforced to the development of ecological monitoring. As a result, global monitoring has become part of many long-term scientific strategies (Pereira and Cooper 2006). Long-term monitoring enables us to establish a baseline against which perturbations can be better identified (Southward 1995). However, what is less obvious in the literature devoted to this subject is the equally important issue on developing new numerical procedures, adapted to the specificity of sampling of the marine biosphere. The majority of monitoring programmes (such as SOMLIT), suffers from lack of background and the presence in the time series of many missing data that prevent the use of conventional time series analyses (Goberville et al. 2010). Indeed, few marine monitoring programmes exist with a full coverage in space and time, except the California Cooperative Oceanic Fisheries and Investigations (CalCOFI) (Chelton et al. 1982) and Continuous Plankton Recorder (CPR) (Reid et al. 2003).

Some methods have been designed for evaluating the status of coastal waters focusing on different issues such as impacts on human health and/or ecosystem function (Borja and Dauer 2008). Nevertheless, past efforts to identify changes in marine coastal systems used either coarse categorical or perhaps too specific numerical tools (Vander Schaaf et al. 2006;

Ban and Alder 2008; Halpern et al. 2008). Furthermore, few classical statistical techniques are able to identify and detect abrupt or progressive modifications in nutrient concentrations. While most of the algorithms cannot cope with missing values and associated biases (e.g. weighted or simple moving average, moving median, principal component analysis), our technique is insensitive to missing data and is not influenced by the temporal autocorrelation. The technique uses a relative reference state determined empirically or alternatively fixed by expert knowledge, against which each observation is then tested. There is no limitation on the number of variables although a too high number may increase the risk of multicollinearity when the Mahalanobis distance is calculated.

We show how the new numerical procedure can be implemented on a regular basis with a data set (here SOMLIT) to provide a rapid evaluation of the state of the system. This technique can easily be transposed to any data sets or parameters be it marine or terrestrial. Here, the structured framework provides a way of quantifying the changes in human-induced fertilisation of French coast. The new numerical procedure presented in our study suggests that coastal systems of West Europe located between 42°N and 51°N of latitude have been altered by human activities during the period 1997-2008 and that this anthropogenic influence has been modulated by climatic variability.

Two potential caveats must be considered before interpreting our results. Firstly, the reference state was too conservative because we did not incorporate the natural difference in the biogeochemical cycling of nitrate and phosphate in fresh and marine waters despite selecting offshore regions with the same thermal regime than studied SOMLIT sites. We therefore repeat that the reference state should be seen as a relative reference state against which the dynamic regime of the system can be evaluated. Secondly, in agreement with recent studies (e.g. Cloern 2001; Billen and Garnier 2007; Ludwig et al. 2009), we chose to only focus on both nitrate and phosphate concentrations to examine the current states of coastal systems, putting forward the alteration of some biogeochemical cycles in West Europe during the period 1997-2008. Despite these possible caveats, a reliable anthropogenic disturbance on coastal marine systems of West Europe was detected and results suggest that in some areas (e.g. Brest), the anthropogenic influence acts synergistically with climatic variability.

In spite of the pronounced spatial and temporal heterogeneity in the probability (Figure IV-3), our technique revealed that all areas monitored by SOMLIT were affected to some extent by fertilisation. Understanding the intensity in which each site was affected can aid in

prioritisation of the management for specific locations (Halpern et al. 2007). Our technique provides a way to quantify the respective influence of human activities on coastal systems. It is also evident from our results that while winter is a period of increase in nutrient concentrations due to higher river runoff and decrease in primary production, summer is characterised by a minor nutrient enrichment caused by the reduction in precipitation and the action of photosynthetic organisms in both the terrestrial and marine realms. Since the twelve monitored sites have specific hydrographic characteristics (Goberville et al. 2010) the range of the values of the coastal fertilisation (and the associated anthropogenic forcing) could therefore be largely attributed to the local peculiarities of a given coastal zone (i.e. particular morphology, hydrology and meteorology; Billen et al. 1991; Billen and Garnier 2007; Halpern et al. 2007). Sites with lower coastal fertilisation were more characteristic of oligotrophic conditions (except for Wimereux) as illustrated by the study site Marseille (Lefèvre et al. 1997). Conversely, Brest, the most fertilised site, showed emergence of eutrophic conditions related to nutrient enrichment more pronounced from autumn to winter (Le Pape et al. 1996).

Even if the range of variability in both nitrate and phosphate concentrations was the same through time, the highest values of nitrate reported on the scatter plots were further from the relative reference state than those of phosphate (Figure IV-2). The large difference observed in the probability between Brest (lower probability) and Wimereux (higher probability) can be explained by the three-fold increase in nitrate concentration measured from the site of the Celtic Sea to the Channel during winter (Ragueneau et al. 1996). This large difference is mainly related to the high seasonal allochthonous inputs from the two nutrient-rich rivers, the Aulne River with a mean annual specific flux of $5,000 \text{ kg.km}^{-2} \text{ yr}^{-1} \text{ N}$ and the Elorn River with a mean annual specific flux of $7,200 \text{ kg.km}^{-2} \text{ yr}^{-1} \text{ N}$ (Aurousseau 2001). Inlets in nutrients from the plumes of Loire River also extend to the Brest site (e.g. inputs in nitrates are diluted between 100 and 200 times for an average flow; Dussauze and Ménesguen 2008).

Marseille, due to the influence of Coriolis force on Liguro-Provençal current circulation (i.e. flowing in a roughly NE-SW direction; Font et al. 1988), is less impacted. Its western location from the river mouth of the Rhone River makes it more protected from the freshwater inputs of this river (Ludwig et al. 2009). Furthermore, nitrate pollution does not appear to represent a major problem in the Mediterranean rivers (e.g. 1.44 mg.l^{-1} of N for the Rhone

River; Ludwig et al. 2009) as opposed to the North Sea coastal systems (e.g. between 3 to 6-fold of N pollution in the Netherlands; Crouzet 1999).

Human activities that modify riverine hydrology and riverine material fluxes to the coastal zone have increased in both scale and rate of change over the last 200 years (Le Tissier et al. 2006). However, our findings reveal that climate can modulate the anthropogenic fertilisation of systems at the land-sea interface. Even so, two antagonist effects are shown. The first occurs through the effect of precipitation on river discharges, which amplify the influence of human activities on marine nutrient concentrations (Vermaat et al. 2008; Ludwig et al. 2009). As reported in the North Sea (Vermaat et al. 2008) or in the Mississippi basin (Donner et al. 2002), our results showed that the balance between storage of nutrients or their leaching co-vary strongly with direct freshwater inputs and insolation duration in Brest (positive relationship between probabilities and the hydro-climatological index, Figure IV-5a). The minimum of the probabilities observed in the mid 2000s, during the more negative values of the difference, corresponded to the exceptionally rainy year 2000 (with a maximum annual specific flux of $9,500 \text{ kg.km}^{-2} \text{ yr}^{-1} \text{ N}$ for the Elorn River; Aourousseau 2001). This nutrient delivery was therefore influenced by precipitation (Scavia et al. 2002); themselves related to atmospheric circulation changes (Harley et al. 2006; Goberville et al. 2010). Hydrological alteration related to climate change may perturb the water cycle (Huntington 2006). Some authors suggested that the global runoff increases by 4% when global temperature rises by 1°C (Labat et al. 2004). The second effect of climate modulation on marine nutrient concentrations occurs when insolation increases, since insolation reduces the level of nutrient concentrations by its positive influence on primary production (Valiela 1995).

Our findings showed that the link between direct anthropogenic forcing and climate change is complex and that these interactions vary in space and time. The strong correlation detected between the probabilities and our hydro-climatological index (normalised insolation duration – normalised river discharge) in Brest did not hold in Marseille (Figure IV-5). Year-to-year variability in probabilities in Marseille was not correlated with the hydro-climatological index. This result supports the low anthropogenic influence and is indicative of a non-impacted river discharge site. The two contrasting sites suggest that anthropogenic over-fertilisation might be difficult to evaluate and anticipate because of local particularities of coastal zones (Breton et al. 2006), the high nonlinearity of the hydrological cycle response

to climate change (Labat et al. 2004) and/or the potentially nonlinear response of coastal systems to local climatic variability (Mysterud et al. 2001; Breton et al. 2006).

Both multiple and pronounced alterations of natural systems of the planet have recently triggered reflections on the inception of a global network of monitoring (Pereira and Cooper 2003; Richardson and Poloczanska 2008). However, it is as important to develop new statistical procedures to detect as soon as data become available potential alteration of natural systems. For example, it took about a decade to detect and document the abrupt ecosystem shifts of the Pacific Ocean and the North Sea (Hare and Mantua 2000; Beaugrand 2004). Furthermore, the procedure enabled the quantification of the anthropogenic influence on marine nutrient concentrations even if it remains difficult to decipher the actual human impacts from the background of natural biogeochemical cycling variability. Our findings provide evidence that climate can interact with human activities in a different way, depending upon the local geoclimatology of the sites. These interactions can amplify the anthropogenic influence through the effect of precipitation on river runoff or attenuate it through the effect of insolation (and probably temperature) on both marine and terrestrial primary production. This confounding result might impede the anticipation of the effect of global change on coastal systems.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank the National Institute for the Sciences of the Universe and the whole SOMLIT team: technicians, researchers, captains and crews who have contributed to the collection of the SOMLIT samples since 1997. Thanks you also to Dr I. Rombouts for reading and correcting the manuscript and S. Lenoir for his precious advices. Database is available on Internet site: <http://www.insu.cnrs.fr/co/services-nationaux-labellises/ocean-atmosphere-climat/surveillance-ocean/somlit-service-d-observatio>. This project was funded by a French grant BDI-CNRS.

Chapitre V :

Procédures et indicateurs d'évaluation de la fertilisation anthropique des systèmes côtiers

Un fait hors de l'ordinaire est plutôt un indice qu'un embarras

(Arthur Conan Doyle)

Procédures et indicateurs d'évaluation de la fertilisation anthropique des systèmes côtiers

V. 1) Avant-Propos

L'ensemble de la communauté scientifique internationale s'accorde aujourd'hui pour dire que les activités anthropiques ont, ou auront, des conséquences sur le fonctionnement de l'ensemble des systèmes de la planète (McCarthy et al. 2001). 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 Fourth Assessment Report 2007). Les zones côtières de l'océan mondial comptent notamment parmi les milieux soumis aux plus fortes pressions anthropiques (Kremer et al. 2005). En effet, ces systèmes, de fait d'une richesse biologique estimée supérieure à celle de l'océan ouvert ou de l'écosystème terrestre global (Constanza et al. 1997) et de leur attractivité tant du point de vue des activités industrielles et touristiques, que du point de vue du cadre de vie, présentent un flux migratoire de population extrêmement élevé : actuellement, plus de 60% de la population mondiale vivent à moins de 60 km des côtes (Kremer et al. 2005). De plus, ces interventions humaines impactent les systèmes et la variabilité naturelle des cycles de la matière à différentes échelles de temps et d'espace (Dobson et al. 1997, Halpern et al. 2008).

Le détournement d'eau douce et son stockage derrière des barrages, le bétonnage du littoral, le transport maritime, l'exploitation des ressources renouvelables et non renouvelables (Burkett et al. 2001, Kremer et al. 2005), sont quelques uns des changements les plus considérables au niveau des zones côtières. Au sein des écosystèmes terrestres, plus de la moitié des terres initialement occupées par de nombreux types de prairies et de forêts ont été

converties en terres agricoles (Conley 2000). Globalement, l'homme utilise un peu plus de 10% des réserves renouvelables d'eau potable disponibles (Millennium Ecosystem Assessment General Synthesis : "Ecosystems and Human Well-being", 2005). La conséquence de ces activités humaines (e.g. l'irrigation, les usages urbains et les applications industrielles) ont doublé entre 1960 et 2000, modifiant les écosystèmes d'eau douce (Conley 2000) et entraînant une profonde perturbation du débit de bon nombre de grandes rivières (Milliman et al. 2008).

Ces perturbations ont notamment modifiées la dynamique naturelle des éléments nutritifs, augmentant les apports depuis le continent (Vitousek et al. 1997, Buddemeier et al. 2002). En conséquence, des modifications du fonctionnement de ces écosystèmes littoraux sont observées (Cloern 2001, Selman et al. 2008) entraînant la multiplication des floraisons d'algues (dont des floraisons d'algues nuisibles voire toxiques ; (Anderson et al. 2002), des phénomènes d'anoxie ou hypoxie (Diaz 2001, Paerl 2006, Vaquer-Sunyer et Duarte 2008, Selman et al. 2008) et des altérations de la biodiversité (Richardson et al. 1997).

Alors que les influences des activités humaines sur les écosystèmes terrestres sont peut-être plus facilement quantifiables et plus largement documentées (e.g. Vitousek et al. 1997, Smith et al. 1999, Vorosmarty & Sahagian 2000), les interactions, au niveau des systèmes marins, entre apports en nutriments, eutrophisation et apparition de phénomènes d'hypoxie ou anoxie restent encore complexes (Conley 2000, Mysterud et al. 2001, Paerl 2006). L'évidente accumulation, à l'échelle globale, de ces diverses altérations des systèmes côtiers a conduit les scientifiques et les décideurs à encourager l'implémentation de programmes de suivis à long-terme des écosystèmes marins (Buddemeier et al. 2002, Kremer et al. 2005).

Cependant, dès lors que l'évolution d'un système est étudiée, il est nécessaire de développer des indicateurs environnementaux pour mesurer les changements d'états potentiels (Balmford et al. 2003) et caractériser les différents forçages pouvant l'affecter, dans le but d'établir des plans de gestion adaptés (McQuatters-Gollop et al. 2009). Bien que les indicateurs actuellement disponibles 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 dans la modification du fonctionnement de ces écosystèmes, reste un vrai challenge scientifique (IMBER 2005, Borja & Dauer 2008). Pour quantifier correctement l'intensité des perturbations subies par les systèmes côtiers, une approche comparative entre la situation actuelle et les conditions historiques apparait comme

la démarche la plus appropriée (état primitif, non anthropisé, non pollué; Hugues 1994, Davies & Jackson 2006). Cependant, de tels états de référence existent rarement (Binet 1997).

Dans le contexte actuel du changement global et afin de répondre aux attentes scientifiques et sociétales d'une gestion adaptée des systèmes naturels, il devient impératif de développer des indicateurs de la perturbation anthropogénique conjointement à la mise en place de programmes de suivis à long-terme. Afin de répondre à cette problématique de nouvelles procédures ont été appliquées afin de (1) s'affranchir de la variabilité climatique naturelle des nutriments, apportés depuis le continent au milieu côtier, (2) définir des états de référence relatifs, caractéristiques des conditions des sites du large, considérés comme moins directement impactés par les activités humaines auxquels sont comparées les observations de sites plus proches de la côte.

Par l'étude comparative des sites larges et côtiers de trois environnements suivis par le SOMLIT (i.e. Wimereux, Roscoff et Villefranche-sur-Mer), cette étude présente de nouvelles procédures numériques permettant la détection d'une perturbation potentielle, dès que la donnée est disponible (temps quasi-réel). En complément, de nouveaux indicateurs de la fertilisation anthropique en nutriments sont proposés, dans le but d'optimiser les programmes de suivis à long-terme. L'application de ces procédures et indicateurs, pour une aide à l'élaboration des plans de gestion, est également discutée.

V. 2) Publication: New procedures and indices to evaluate human fertilisation in coastal systems

New procedures and indices to evaluate human fertilisation in coastal systems

E. Goberville, G. Beaugrand, B. Sautour, P. Tréguer

Soumis à Estuarine, Coastal and Shelf Science

V. 2. 1) Données utilisées

- *Données mensuelles côte/large de température, concentrations en nitrates, phosphates et silicates des stations SOMLIT de Wimereux (large et côte), Roscoff (Astan et Estacade) et Villefranche-sur-Mer pour la période 1997-2009 et de la station DYFAMED pour la période 1991-2007.*

V. 2. 2) Analyses numériques

- *application des techniques d'interpolations linéaire et cubique (de Boor ; 1978).*
- *utilisation du modèle de régression linéaire multiple.*
- *application d'une version modifiée (par l'utilisation de la distance généralisée de Mahalanobis) de la procédure de permutation multiréponses (Multiple Response Permutation Procedure ; MRPP) dans le but de comparer une observation à un groupe d'observations.*
- *utilisation de la représentation boxplot (Tukey) pour la validation des données interpolées.*

V. 2. 3) Principaux résultats obtenus

- *L'application du modèle de régression linéaire multiple permet de définir un nouvel indice de la fertilisation anthropique des systèmes côtiers, en s'affranchissant de la part de variabilité climatique naturelle.*
- *Cette procédure permet la comparaison quasi instantanée (i.e. dès que la donnée est disponible) des données d'un site très côtier à un site plus au large (considéré comme l'état de référence relatif), pour une station sélectionnée. De plus, cet outil analytique est facilement transposable à tous les types de système et/ou de paramètres, et n'est pas sensible à la présence de données manquantes.*
- *L'application de la procédure sur les 3 environnements étudiés (Roscoff, Wimereux et Villefranche-sur-Mer) a permis de quantifier l'intensité du phénomène de fertilisation anthropique. La différence de fonctionnement entre les systèmes de type eutrophe et ceux de type oligotrophe a clairement été identifiée.*
- *Les résultats ont montré la forte variabilité spatio-temporelle du phénomène de fertilisation peut notamment s'expliquer par les propriétés naturelles des sites (e.g. morphologie, hydrodynamisme) ou encore par les particularités locales d'utilisation des sols (e.g. les activités agricoles).*
- *La quantification des perturbations d'origine anthropique est au cœur des préoccupations scientifiques actuelles. Afin de répondre à ces attentes, et dans un but de management des systèmes côtiers, le développement d'outils adaptés se révèle essentiel. En ce sens, les indicateurs proposés ici constituent un outil pertinent de la quantification des perturbations.*

V. 3) Introduction

Currently more than 60% of human beings live less than 60km from the sea, increasing the human pressure on marine systems (Kremer et al. 2005). The anthropogenic use of more than half of all accessible surface freshwater and land surface transformation have greatly increased over time (Conley 2000), altering marine systems at an unprecedented rate on a variety of temporal and spatial scales (Dobson et al. 1997, Halpern et al. 2008). These perturbations have resulted in an increase in nutrient input from the continent to the sea, which have altered both the structure and the functioning of coastal systems with potential implications for some natural biogeochemical cycles (Vitousek et al. 1997a, Buddemeier et al. 2002). As a consequence, dramatic disruptions of coastal systems have been observed (Cloern 2001, Selman et al. 2008) leading sometimes to toxic or harmful algal blooms (Anderson et al. 2002), depletion or increase in dissolved oxygen (Diaz 2001, Paerl, 2006, Vaquer-Sunyer and Duarte 2008) and alterations in species diversity (Richardson et al. 1997).

While anthropogenic influences on terrestrial ecosystems are perhaps more easily quantified and documented (e.g. Vitousek et al. 1997b, Smith et al. 1999, Vorosmarty and Sahagian 2000), the relationships between nutrient inputs, eutrophication, and hypoxia/anoxia dynamics in marine ecosystems (Cloern 2001, Halpern et al. 2008) remain difficult to understand (Conley 2000, Mysterud et al. 2001, Paerl 2006). The worldwide accumulation of evidence of the alterations in coastal systems has led scientists and policymakers to encourage the implementation of monitoring programmes. However, once a system is under monitoring, there is also a need to develop indicators to measure the changing state of the system (Balmford et al. 2003), to decipher the multiple causes that may affect it and to establish both management strategies and plans (McQuatters-Gollop et al. 2009). Indicators provide insights on the state and dynamics of the environment (Niemeijer 2002). However, creating some indicators remains challenging. For example, it is still difficult to create indicators that separate well the influence of climate change to the more direct impact of human activities (Borja et al. 2008). The quantification of the degree of perturbation of coastal systems should be based on the comparison with natural conditions in the absence of human disturbance or alteration (i.e. a pristine, unpolluted, or anthropogenically undisturbed state; Hughes 1994 Davies and Jackson 2006). However, such reference states rarely exist (Goberville et al. submitted).

The main objectives of this study were (1) to propose new numerical procedures that enable the identification and the quantification, as soon as data become available, of a potential perturbation and (2) to offer new indices of human fertilisation for better monitoring coastal systems. Our procedures enable the quantification of the human fertilisation from 1997 onwards on three French sites monitored by the programme SOMLIT: Wimereux; Roscoff and Villefranche-sur-Mer. Implications for the elaboration of management plans are discussed.

V. 4) Environmental Data

Our analyses were based on data collected at least twice a month by the French sampling programme SOMLIT. This programme has coordinated activities of a number of marine stations along the French coasts. It currently comprises seven marine stations at twelve sampling sites and monitors all seas surrounding France such as the English Channel, the Atlantic Ocean and the Mediterranean Sea. Coastal systems monitored by this programme have distinctive hydro-climatic characteristics ranging from the weak-tidal Mediterranean Sea (e.g. Villefranche-sur-Mer) to the mega-tidal English Channel (e.g. Wimereux) (Figure V-1). More details on the monitoring programme are available at <http://www.insu.cnrs.fr/co/services-nationaux-labellises/ocean-atmosphere-climat/surveillance-ocean/>.

On the seven stations and 12 sites monitored by SOMLIT, we focussed our analyses on three stations for which both inshore and offshore information were available: Wimereux, Roscoff and Villefranche-sur-Mer (Figure V-1 and Table V-1). In Villefranche-sur-Mer, the offshore site was not a component of the programme SOMLIT but was part of the programme DYFAMED ("DYnamique des Flux Atmosphériques en MEDiterranée"), a long-term time-series investigation performed in the context of the programme JGOFS ("Joint Global Ocean Flux Study"). The DYFAMED site was located in the central zone of the Ligurian Sea (Figure V-1), and was a homogeneous system too remote to be influenced by direct coastal inputs by the rivers. From January 1991 to July 2007, monthly cruises were conducted and most of the JGOFS core parameters recorded (Knap et al. 1996). All data are available through the DYFAMED Observatory data base (<http://www.obs-vlfr.fr/sodyf/>).

In this study, we focussed on four parameters: Sea Surface Temperature (SST), nitrate, phosphate and silicate concentrations for all sites. All data were collected at subsurface. Because of the dependency on meteorological conditions during sampling, there were some missing data in the matrices (Marty et al. 2002, Goberville et al. 2010).

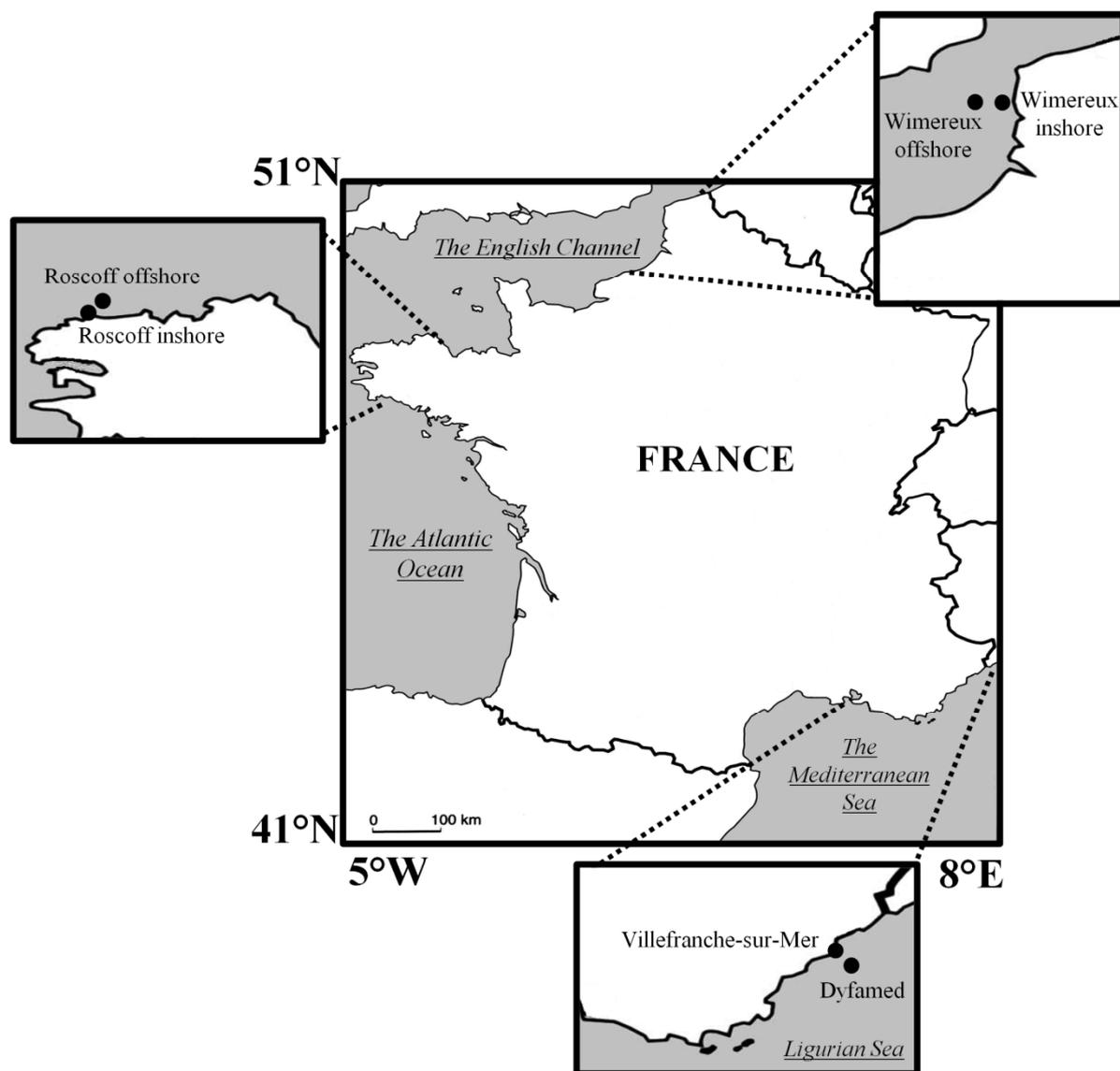


Figure V-1. Emplacement des sites du Service d'Observation en Milieu Littoral(SOMLIT) utilisés dans cette étude.

	WIMEREUX		ROSCOFF		VILLEFRANCHE-SUR-MER	
Site	inshore	offshore	Inshore (Estacade)	Offshore (Astan)	inshore (SOMLIT site)	offshore (DYFAMED site)
Longitude	1° 31' 17 E	1° 24' 60 E	3° 58' 58 W	3° 56' 15 W	7° 19' 00 E	7° 52' 00 E
Latitude	50° 40' 75 N	50° 40' 75 N	48° 43' 56 N	48° 46' 40 N	43° 41' 00 N	43° 25' 00 N
Time series	Nov. 1997 to Dec. 2009	Nov. 1997 to Dec. 2009	Jan. 1997 to Dec.2009	Feb. 2000 to Dec. 2009	Jan. 1993 to Dec. 2009	Jan. 1991 to July 2007
Tide condition	HT - ST Coef 95 +/-25	HT - ST Coef 95 +/-25	HT - NT	HT - NT	--	--
Distance to coast (in m)	1850	9260	500	3500	500	5200
Water depth (in m)	26	53	3	60	95	2350
Marling (in m)	S.T. mean (Coef : 95) : 7.7	S.T. mean (Coef : 95) : 7.7	S.T. mean (Coef : 95) : 7.5	S.T. mean (Coef : 95) : 7.5	Barometric : 0.2	Barometric : 0.2
River runoff influence	Somme and Liane Rivers	negligible	Penzé River and stormwater	negligible	negligible	negligible

Table V-1. Caractéristiques principales des sites de Wimereux, Roscoff et Villefranche-sur-Mer. Pour la localisation des sites, voir la **Figure V-1**. HT: High Tides; ST: Spring Tides, NT: Neap Tides, Coef: Tidal Coefficient.

V. 5) Methods

Previous results have shown that the concentration of both nitrate and phosphate along the French Coast was highly influenced by the climatic regime (Goberville et al. 2010). The relationship was detected at a seasonal scale. The basic pattern is that winter is the season during which the concentration in nutrient increases whereas summer is characterised by a reduction in nutrient (e.g. Gentilhomme and Lizon 1997). In addition to this well-known feature, year-to-year changes in nutrient concentration were also strongly affected by both SST and precipitation, which reflected large-scale variability in atmospheric circulation (Goberville et al. 2010). Interaction occurred between climate and human activities, the anthropogenic fertilisation being either amplified by increased precipitation or attenuated by rising temperature and conversely. We produced new indices of anthropogenic fertilisation with the aim of removing the influence of climatic variability.

V. 5. 1) Analyses 1: indices for both nitrate and phosphate anthropogenic concentrations

To remove the confounding effect of climate, indices of anthropogenic fertilisation were created by calculating the residuals of both nitrate and phosphate concentrations after having applied a Multiple Linear Regression (MLR) using as explanatory variables both SST and silicates. The MLR was performed on data merging information on inshore and offshore sampling site for three stations: Wimereux, Roscoff and Villefranche-sur-Mer. Prior to the analysis, data were averaged per month. SST was selected because it reflects a major influence of climate on biological and chemical systems (Cloern 1996). Silicates were chosen because they are not directly influenced by human activities contrary to nitrate and phosphate concentrations (Muylaert et al. 2009). At a given site, their concentration increases with precipitation and river runoff, another important influence of climate (Labat et al. 2004). Therefore for each station (Wimereux, Roscoff and Villefranche-sur-Mer), two MLRs were applied with nitrates (first MLR) and phosphates (second MLR) as the predictive variable and both SST and silicates as explanatory variables (first and second MLR; Figure V-2 and Annexes V-1 and V-2). The general model applied was therefore as follows (Sokal and Rohlf 1995):

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

Where the dependent variable \hat{Y} (also called prediction of the model, i.e. nitrate or phosphate concentrations) was a function of the two explanatory variables x_1 (SST) and x_2 (silicate concentrations), a the intercept, b and c the partial regression coefficients. Residuals of nitrate and phosphate concentrations were then obtained by calculating the difference between the observed and predicted value for a given observation in the time series and for each station. A total of six MLRs was thereby applied, giving indices for both nitrate and phosphate anthropogenic concentration for each of the three stations under investigation.

Partial correlation coefficients were examined to evaluate the influence of each variable (SST and silicates) on nitrate and phosphate concentrations. The (first-order) partial correlation coefficient between variable y_1 (nitrate concentrations) or y_2 (phosphate concentrations) and the two explanatory variables x_1 (SST) and x_2 (silicates) was assessed while keeping either x_1 or x_2 constant. For example, the partial correlation coefficient between the two variables y_1 and x_1 with x_2 held constant was calculated as follows:

$$r_{y_1, x_1 \cdot x_2} = \frac{r_{y_1, x_1} - r_{y_1, x_2} r_{x_1, x_2}}{\sqrt{(1 - r_{y_1, x_2}^2) (1 - r_{x_1, x_2}^2)}} \quad (2)$$

Where r_{y_1, x_1} , r_{y_1, x_2} and r_{x_1, x_2} is the simple correlation coefficient between variables y_1 and x_1 , y_1 and x_2 and x_1 and x_2 , respectively. The coefficient of multiple determination was tested by analysis of variance (Sokal and Rohlf 1995). A test for additional independent variables by analysis of variance was performed when a second variable was added to the regression. Because of the restricted number of variables included in the analysis, we performed both a stepward and a backward multiple regression.

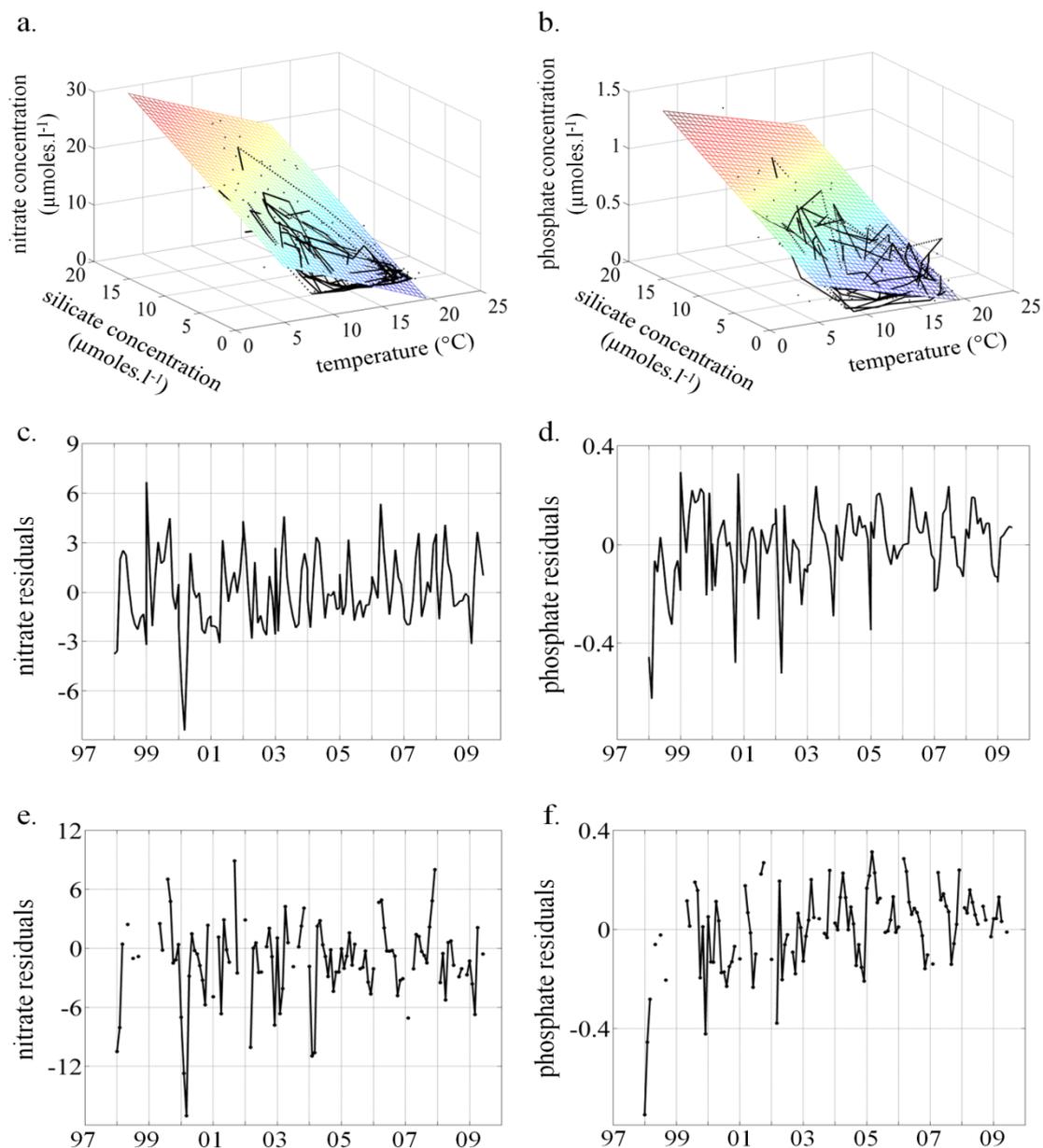


Figure V-2. Déconvolution de la variabilité climatique naturelle des concentrations en nitrate et phosphate pour la station de Wimereux. Modèle de régression linéaire multiple en utilisant (a) les concentrations en nitrate ou (b) les concentrations en phosphate comme variables expliquées et la température et les concentrations en silicate comme variables explicatives. Variabilité temporelle des concentrations en nitrate anthropogénique (c) pour le site du large et (e) pour le site côtier. Variabilité temporelle des concentrations en phosphate anthropogénique (d) pour le site du large et (f) pour le site côtier.

V. 5. 2) Analyses 2: mapping of the state of the systems and both spatial and temporal comparisons

To measure a system, it is important to evaluate its current state and to compare it to some reference values incorporating some measure of natural variability (García et al. 2010). We therefore needed what can be called a relative reference state (Goberville et al. submitted). By relative reference state, we meant here a system that is not significantly affected by human activities. This concept of relative reference state was attended to be operational as it is obvious that it is to some extent affected by human activities. Inshore sites (potentially strongly affected by continental human influence) were thereby compared to offshore sites (relative reference states; less affected) to evaluate the human fertilisation on three selected coastal systems (inshore sites). To do so, we constructed two data matrices (one for inshore sites and the second for offshore sites) for each of the three stations (Wimereux, Roscoff and Villefranche-sur-Mer). The resulting 2-dimensional tables were composed of the two indices for both nitrate and phosphate anthropogenic concentration (with the influence of climate removed; see Analyses 1).

While for the inshore sites data were kept unchanged, this was not so for each data matrix of all offshore sites. A cubic or linear interpolation procedure (de Boor 1978) was performed for each parameter to fill in some missing values. The interpolation was used to establish more robust training sets to create the offshore reference states for the three stations. The two interpolation procedures were due to the fact that when a large number of data were missing, applying only linear or cubic functions returned some unrealistic results. Potential biases related to the use of the interpolation procedures were checked by the use of boxplots for each parameter.

A total of 36 reference matrices was therefore defined for each month and each studied station (12 months x 3 offshore sites = 36 reference matrices). They all represented the relative reference states against which inshore sites were compared. To quantify the degree to which an observation (i.e. a given year) of the inshore site belonged to the relative reference state (i.e. the offshore site), we applied a technique based on the one recently proposed by Beaugrand et al. (in press) and applied in Goberville et al. (submitted). This technique calculates the probability for an observation to belong to a relative reference state. The

procedure has two main steps. First, the generalised Mahalanobis distance is calculated between each observation x_i to be tested and the relative reference state (matrix $\mathbf{Y}_{m,p}$), as follows (Beaugrand et al. in press):

$$D_{x_i, Y}^2 = \mathbf{z}' \mathbf{R}^{-1} \mathbf{z} \quad (3)$$

With $\mathbf{R}_{p,p}$ the correlation matrix of table $\mathbf{Y}_{m,p}$, \mathbf{z} the vector of the differences (of length p) between the values of the p variables of observation x_i and the average values of the p variables of the offshore reference site contained in table $\mathbf{Y}_{m,p}$. Second, the distance is tested by a simplified version of the Multiple Response Permutation Procedure (MRPP, Mielke et al. 1981, Beaugrand and Helaouët 2008) performed on each offshore data set (Wimereux, Roscoff and Villefranche-sur-Mer). Mathematically, the simplified MRPP tests whether one observation belongs to a group of (reference) observations. The position of the offshore reference state was indicated in this space by high probabilities (see Figure V-3 and Figure V-5). The probability of each year of the period 1997-2009 for Wimereux and Roscoff and 1993-2009 for Villefranche-sur-Mer was calculated for a given month (from January to December) by calculating the generalised Mahalanobis distance and its probability as shown above. These probabilities were then superimposed on the 2-D Euclidean space represented by the indices for both nitrate and phosphate anthropogenic concentrations (Figure V-3 and Figure V-4; Annexes V-3 and V-4).

V. 5. 3) Analyses 3: year-to-year changes in the human fertilisation

The new indices proposed here enabled us to evaluate the state of the three coastal systems, focusing on both the rapid detection of anomalies and the intensity of human fertilisation. The distance d between a given year and the centre of high probabilities characterising the relative reference state was calculated as follows:

$$d = 1 - p \quad (4)$$

With p the probability of a given year. The distance d reflected the human fertilisation of the inshore site (Figure V-4 to Figure V-6).

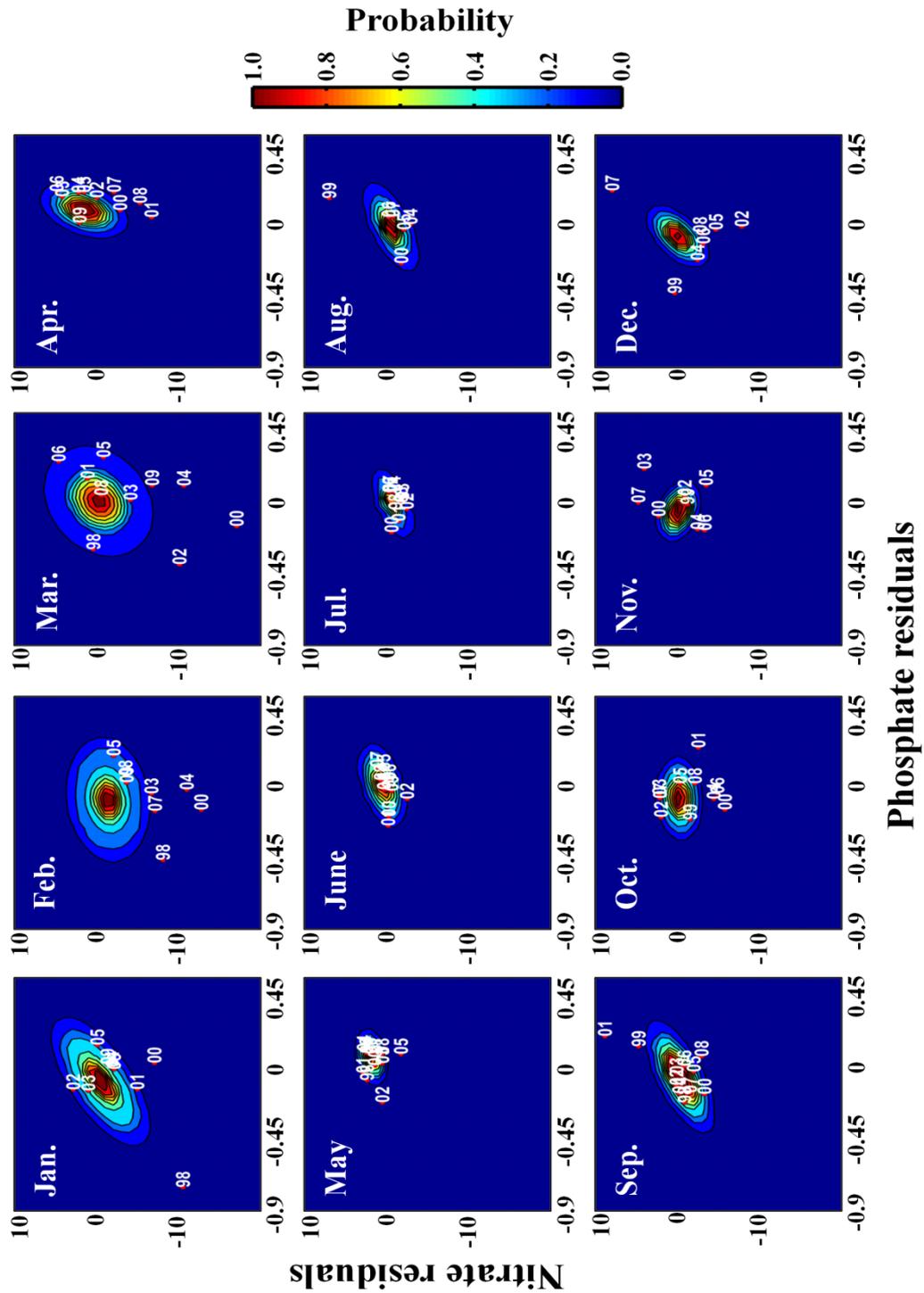


Figure V-3. Cartographie des états de référence relatifs pour la station de Wimereux en fonction des concentrations en nitrate et phosphate d'origine anthropogénique (résidus des analyses de multirégression linéaire multiple, voir Figure V-2) de Janvier (Jan.) à Décembre (Dec.). La couleur symbolise la probabilité qu'une observation appartienne à l'état de référence relatif. Chaque année, de 1997 à 2009 sont superposées à l'espace Euclidien pour le mois donné. La distance entre une année donnée et le centroïde de plus forte probabilités est directement donnée par la probabilité de l'année ($d=1-p$, voir méthodes). Les années manquantes sont dues à l'absence d'échantillonnage lors de conditions météorologiques défavorables.

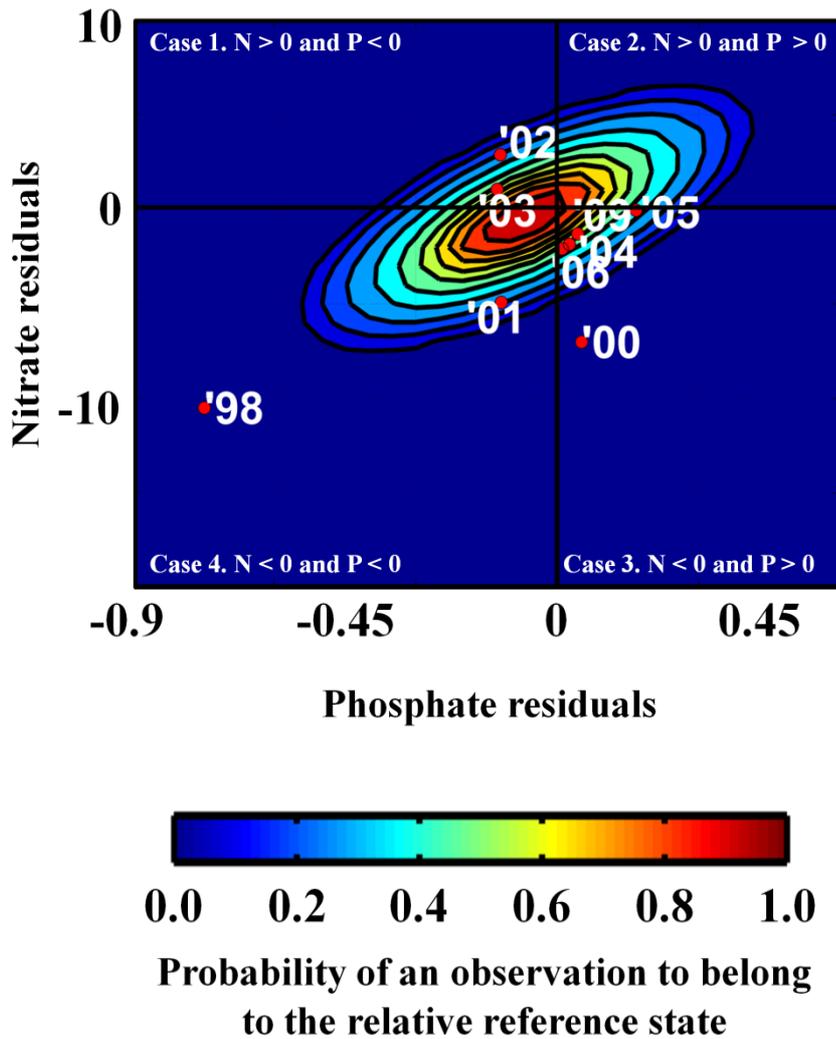


Figure V-4. Examen des perturbations en nitrate et phosphate pour le site de Wimereux en Janvier (Agrandissement du mois de Janvier de la **Figure V-3**). Quatre cas sont déterminés. Cas 1: indices pour les situations où la concentration en nitrate d'origine anthropique est strictement supérieure à 0 et où la concentration en phosphate d'origine anthropique est strictement inférieure à 0; Cas 2: indices pour les situations où les concentrations en nitrate et phosphate d'origine anthropique sont strictement supérieures à 0; Cas 3: indices pour les situations où la concentration en nitrate d'origine anthropique est strictement inférieure à 0 et où la concentration en phosphate d'origine anthropique est strictement supérieure à 0; Cas 4: indices pour les situations où les concentrations en nitrate et phosphate d'origine anthropique sont strictement inférieures à 0. La couleur symbolise la probabilité qu'une observation appartienne à l'état de référence relatif. La distance entre une année donnée et le centroïde de plus forte probabilités est directement donnée par la probabilité de l'année ($d=1-p$, voir méthodes). Les années manquantes sont dues à l'absence d'échantillonnage lors de conditions météorologiques défavorables.

The 2-D Euclidean space centred on (0, 0) was defined with x being represented by the residuals in phosphates and y being represented by the residuals in nitrates (see Figure V-4). According to the indices for both nitrate and phosphate anthropogenic concentrations, four cases were examined (Figure V-4, Cases 1-4). The first case was characterised by an index of nitrate concentration > 0 and an index of phosphate concentration < 0 (Figure V-4, Case 1). The second case was characterised by an index of nitrate concentration > 0 and an index of phosphate concentration > 0 (Figure V-4, Case 2). The third case was characterised by an index of nitrate concentration < 0 and an index of phosphate concentration > 0 (Figure V-4, Case 3). The last case was characterised by an index of nitrate concentration < 0 and an index of phosphate concentration < 0 (Figure V-4, Case 4).

For each station, year-to-year changes in human fertilisation were examined by contour diagrams with months as a function of years. The distance d varied between 0 and 1. A value close to 0 indicated low disturbance whereas a value close to 1 reflected high fertilisation (i.e. a high departure from the relative reference state). The different cases were investigated for the three stations (Figure V-5). Then, we proposed a new index of human fertilisation that encompasses cases 1, 2 and 3 (Figure V-6).

V. 6) Résultats

V. 6. 1) Analyses 1: indices for both nitrate and phosphate anthropogenic concentrations

Partial correlation coefficients were analysed to evaluate the influence of each variable (SST and silicates; keeping one of the explanatory variables constant to its mean) on nitrate and phosphate concentrations. All partial correlation coefficients calculated as part of the MLRs were significant with the exception of the correlation between phosphates and SST (keeping silicates constant) in Villefranche-sur-Mer ($r = -0.063$, $p = 0.287$; Table V-2). Nitrate concentrations showed the strongest correlations with the two explanatory variables in all cases. For the three stations, the coefficients obtained with silicate concentrations were positive (from $r = 0.325$ to $r = 0.840$) while they were negative and generally weaker with SST (from $r = -0.063$ to $r = -0.748$). The coefficient of multiple determination was significant for all multiregressive models (Table V-2). Addition of the second explanatory variable improved significantly the model in almost all cases ($p < 0.001$) with the exception of phosphate concentrations in Villefranche-sur-Mer when SST was added to the model after silicate concentrations (p of F-test = 0.322).

A visual inspection of the models showed that the linear models explained well the variations in both nitrate and phosphate concentrations at both inshore and offshore sites in Wimereux (Figure V-2a-b). The residuals of the multiregressive models enabled us to remove the influence of climate and led to the indices for both nitrate and phosphate anthropogenic concentrations (Figure V-2c-f). Positive residuals should therefore be interpreted as a result of increasing nutrient concentration from continent due to anthropogenic fertilisation. The year-to-year changes in the indices for both nitrate and phosphate anthropogenic concentrations were examined in both offshore and inshore sites for the three studied stations: Wimereux, Roscoff and Villefranche-sur-Mer.

In Wimereux at offshore and inshore sites, more pronounced variability in the index of nutrient anthropogenic concentration was detected prior to 2001 for nitrates and before 2003 for phosphates (Figure V-2c-f). An increasing trend was then observed excepting for nitrates at the inshore site, which remained relatively stable through time. A similar analysis was conducted for Roscoff and Villefranche-sur-Mer (see Annexes V-1 and V-2). They also led to indices for both nitrate and phosphate anthropogenic concentrations that were then used to characterise the state of the coastal systems in Wimereux, Roscoff and Villefranche-sur-Mer.

		Partial correlations				Multi-regression		
		Temperature		Silicate concentrations		Temperature & Silicate concentrations		
		<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	R	<i>p</i>	<i>df</i>
WIMEREUX	Nitrate concentrations	-0.748	< 0.001	0.726	< 0.001	0.861	< 0.001	208
	Phosphate concentrations	-0.492	< 0.001	0.667	< 0.001	0.755	< 0.001	208
ROSCOFF	Nitrate concentrations	-0.759	< 0.001	0.840	< 0.001	0.942	< 0.001	233
	Phosphate concentrations	-0.226	< 0.001	0.636	< 0.001	0.751	< 0.001	233
VILLEFRANCHE -SUR-MER	Nitrate concentrations	-0.418	< 0.001	0.390	< 0.001	0.586	< 0.001	287
	Phosphate concentrations	-0.063	0.287	0.325	< 0.001	0.353	< 0.001	287

Table V-2. Résultats des corrélations linéaires partielles et des régressions linéaires multiples. *r*: valeurs des corrélations, *p*: probabilités, *R*: coefficients de corrélation multiple, *df*: degrés de libertés.

V. 6. 2) Analyses 2: mapping of the state of the systems and both spatial and temporal comparisons

The numerical procedure enabled mapping of the state of the three monitored stations by the comparison of the indices in both nitrate and phosphate anthropogenic concentrations between reference offshore sites and inshore observations (Figure V-3, Annexes V-3 and V-4). While the relative reference states were larger from January to April in Wimereux and Roscoff (Figure V-3 and Annexes V-3) and from December to March in Villefranche-sur-Mer (Annexes V-4), they contracted the following months. On a year-to-year basis, probabilities of each observation to belong to the relative reference state increased through time for the two sites in the English Channel. Year-to-year changes exhibited a period of low probability until 2002 in Roscoff and 2003 in Wimereux followed by an increase upwards 2009. This result suggested that in both northern inshore sites, the anthropogenic part of the nutrient inputs was closer recently in average to the offshore relative reference state in contrast to the first years of the time period.

For the sites in Villefranche-sur-Mer, pursuant to the residuals time series, probabilities also revealed seasonal cycles with an increasing probability during the winter months. Years reported on the scatter plots were more or less close to the relative reference state except for a few observations (e.g. March 1997 and 1998). Moreover the year 2008 from May to October and the observation in May 2006 uncommonly diverged from the relative reference state (Annexes V-4).

V. 6. 3) Analyses 3: year-to-year changes in human fertilisation

The 2-D Euclidean space was divided into four squares (we call cases hereafter) to separate the respective influence of nitrates and phosphates on the distance ($d = 1 - p$; see methods) of an observation to the relative reference state. We present an example for Wimereux in January (Figure V-4; see the contour diagram performed for January in Figure V-3).

Case 1 (Figure V-4) presents the situation where the index in anthropogenic nitrate concentration was strictly superior to 0 (i.e. more concentration in nitrate inshore than offshore) and the index in anthropogenic phosphate concentration was strictly inferior to 0 (i.e. more concentration in phosphate offshore than inshore). Although we could observe the effects of some episodic events, no clear pattern was observed in the three sites for this case (Figure V-5; Case 1).

Case 2 (Figure V-4) presents the situation where both indices in anthropogenic nitrate and phosphate concentrations were strictly superior to 0 (i.e. more concentration inshore than offshore). In Wimereux, an increase in nutrient was observed in spring from 2001 (Figure V-5 Case 2). In Roscoff, the increase in nutrient concerned all months from March to October. Since 2004, the intensity of the positive anomalies in nutrients has decreased (Figure V-5 Case 2). In Villefranche-sur-Mer, the increase in nutrient concentration seemed to remain driven by the seasonal climatic variability with maximal nutrient concentrations occurring during winter and spring (Figure V-5 Case 2).

Case 3 (Figure V-4) presents the situation where the index in anthropogenic nitrate concentration was strictly inferior to 0 (i.e. more concentration in nitrate offshore than inshore) and the index in anthropogenic phosphate concentration was strictly superior to 0 (i.e. more concentration in phosphate inshore than offshore). Contrary to nitrate, the increase in phosphate concentration was more widespread for all sites (Figure V-5 Case 3). In Wimereux, an increase in phosphate concentration was frequently observed since 2003. In Roscoff, some episodic events occurred mainly in winter between 2000 and 2007 (Figure V-5 Case 3). In Villefranche-sur-Mer, inshore positive anomalies in phosphate concentration were mainly detected in February (between 2003 and 2007), June and September (Figure V-5 Case 3).

Case 4 (Figure V-4) presents a perhaps unexpected situation where indices in both nitrate and phosphate anthropogenic concentrations were strictly inferior to 0 (i.e. more concentration in both nitrate and phosphate offshore than inshore; Figure V-4). A strong value in the distance reflected here a strong negative anomaly in inshore nutrient concentration. While the inshore site in Villefranche-sur-Mer displayed a pronounced seasonal pattern characterised by a deficit from June to October in both phosphate and nitrate concentrations (Figure V-5; case 4), the examination of Atlantic inshore sites revealed some depletions more difficult to interpret. In Wimereux (Figure V-5; case 4), year-to-year fluctuations in negative inshore anomalies were more pronounced in summer from 2000 to 2003, in autumn between 2004 and 2007 and to a lesser extent in winter for some years (e.g. 1998, 2000; see Figure V-5; case 4). No clear pattern was observed for Roscoff (Figure V-5; case 4).

An index was then designed, resulting from the combination of cases 1, 2 and 3, to provide a measure of human fertilisation in inshore coastal systems (Figure V-6). In Wimereux (Figure V-6a), we observed a clear increase in nutrient concentrations caused by both nitrate and phosphate whereas the increasing anomalies for the rest of the period were mainly the result of an increase in phosphate inputs since 2003 (see Figure V-5; case 3). In Roscoff, human fertilisation was more widespread and mainly detected from summer to winter (Figure V-6b). A decrease in the anomalies in nitrate and phosphates inshore concentrations was detected after 2004. As seen earlier, the index of human fertilisation was more driven by seasonal climatic variability in Villefranche-sur-Mer (Figure V-6c).

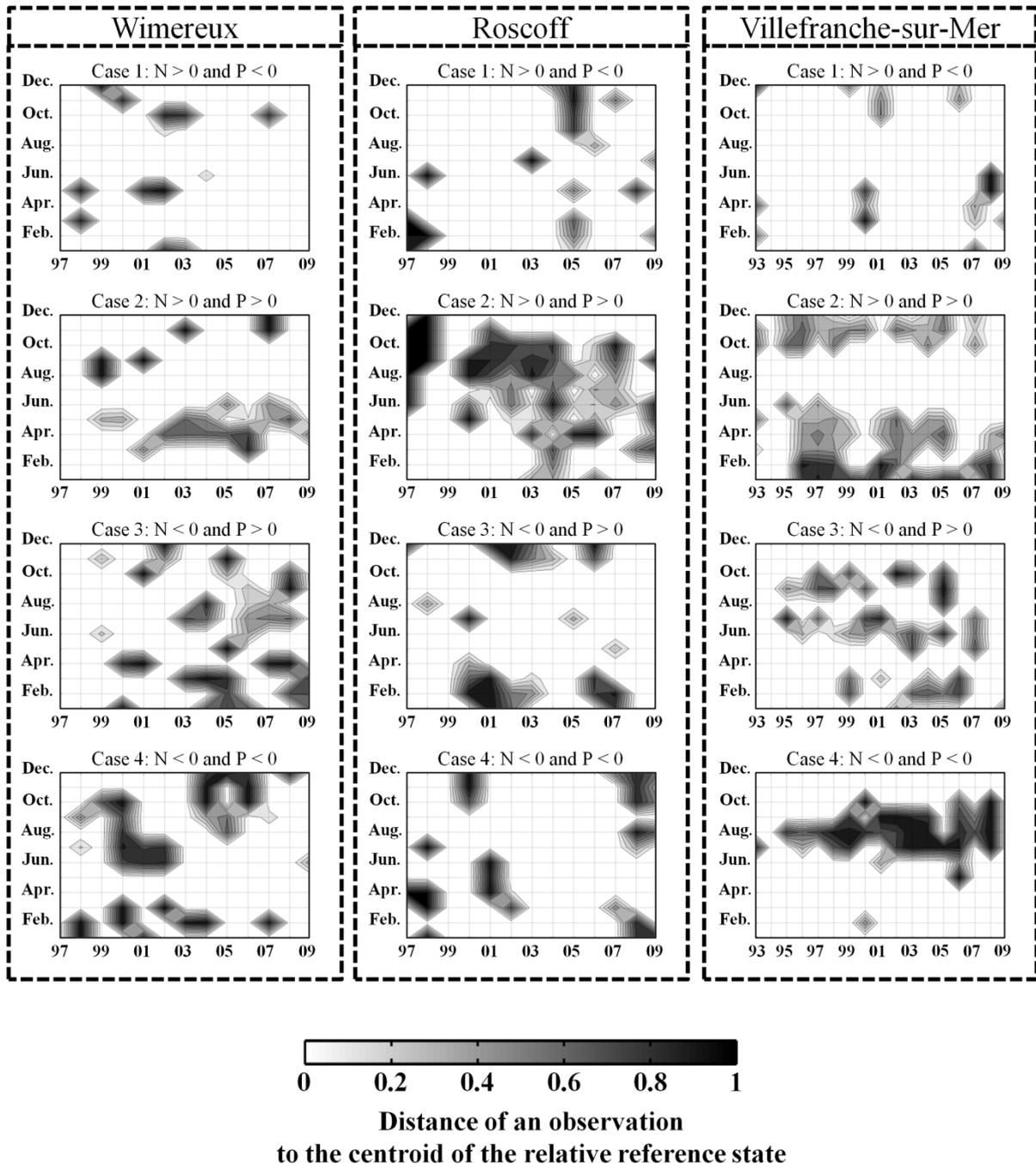


Figure V-5. Diagramme en contour de la variabilité temporelle de la distance d'une observation par rapport au centroïde des états de référence relatifs ($d=1-p$; voir Méthodes). La cartographie de la distance est représentée pour les quatre cas (voir **Figure V-4**) en fonction des années, pour les 3 stations étudiées de 1997 à 2009 pour Wimereux (à gauche) et Roscoff (au centre) et de 1993 à 2009 pour Villefranche-sur-Mer (à droite). Le niveau de gris représente la distance d'une observation au centroïde de l'état de référence. Voir la **Figure V-4** pour la description des différents cas.

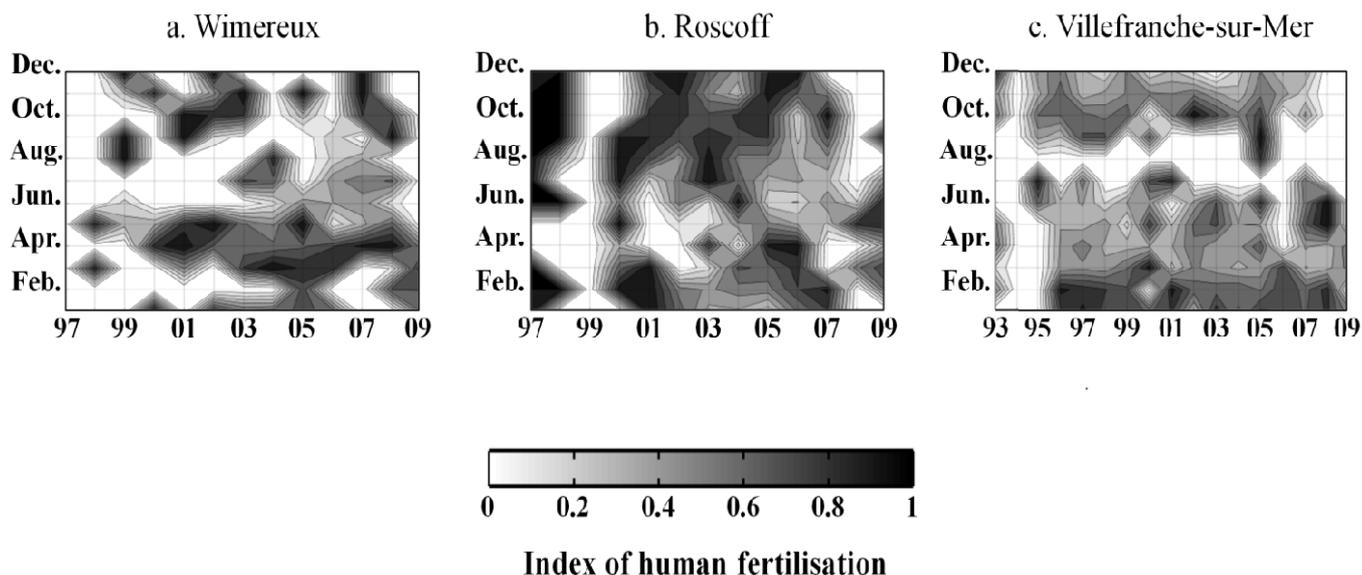


Figure V-6. Cartographie de l'indicateur de fertilisation anthropique pour les trois sites suivis en fonction des mois et des années. a. pour la station de Wimereux de 1997 à 2009; b. pour la station de Roscoff de 1997 à 2009; c. pour la station de Villefranche-sur-Mer de 1993 à 2009. Les indicateurs de fertilisation anthropique correspondent aux situations pour lesquelles les concentrations en nitrate et/ou phosphate d'origine anthropique sont supérieures à 0.

V. 7) Discussion and conclusion

It is now widely accepted that the last 200 years have been periods of particularly rapid and pronounced environmental changes (e.g. Omori et al. 1994, Kremer et al. 2005). Among all systems of the biosphere, coastal systems are one of the most valuable and vulnerable of Earth's habitats (Jickells 1998). Historically, developing human civilisations has often been concentrated in coastal areas where access to water promoted trade, commerce, or use of wastes (e.g. Van Andel 1981, Vitousek et al. 1997b). This tendency has significantly increased through time (Small and Nicholls 2003). On a worldwide-scale, both coastal and estuarine waters have thereby been affected by anthropogenic activities causing strong alterations of some natural biogeochemical cycles (Cloern 2001; Borja and Dauer 2008). Comparing a hypothetical undisturbed system (as that defined by Billen and Garnier 2007) to various present conditions, disproportionate nutrient loadings into coastal waters have been noticed with a 6-50 times increase for nitrate loading and a 18-180 times increase for phosphate loading for systems such as the Baltic Sea, the Chesapeake Bay and the Eden Bight (Conley 2000). These human perturbations have resulted in detrimental effects on the health of coastal systems (e.g. Sherman and Duda 1999, Smith et al. 2003). For example, eutrophication and its related consequences (e.g. hypoxia and anoxia) are considered as major issues in coastal seas (Diaz 2001, Gray et al. 2002, Selman et al. 2008).

Not a single coastal system remains unaffected by human activities (Richardson and Poloczanska 2008). But it is still challenging to tease apart the influence of anthropogenic forcing to that related to climate variability (Alley et al. 2003). Although modern day nutrient budgets are available for some estuarine and coastal systems (e.g. Nixon 1995), few estimates are available to compare present day nutrient loading to those under undisturbed conditions (Conley 2000). Furthermore, few classical statistical techniques are able to identify, detect and quantify abrupt or progressive modifications in nutrient concentrations. Most attempts to quantify the impact of human activities on nature have focused on the development of ecological indicators (García et al. 2010). Some methods have also been designed for evaluating the status of coastal waters focussing on different issues such as impacts on human health and/or ecosystem function (e.g. Luck et al. 2003, Borja and Dauer 2008). While most of the algorithms cannot cope with missing values and associated biases, the technique presented in this study is insensitive to missing data and is unlikely to be influenced

significantly by temporal autocorrelation (Goberville et al. submitted). This technique allows the building of relative reference states, which in turn enable each observation to be compared. The resulting probability directly quantifies the intensity of the perturbation and provides indices of human fertilisation on coastal systems.

Through the proposed indices of human fertilisation, our results present a new way to quantify a perturbation in natural systems. After disentangling the influence of natural variability on nutrients, residuals in both nitrate and phosphate concentrations were used to monitor the potential influence of human activities on nutrient concentration. However, two limitations must be considered before interpreting our results. First, both offshore and inshore sites have probably been altered by anthropogenic activities. The anthropogenic influence on surface waters has greatly affected global biogeochemical cycles, increasing natural nutrient levels even offshore (Meybeck 1982, Vitousek et al. 1997a). In this study, we assumed that the offshore site can be considered as a relative reference state, even if it has probably been impacted by human fertilisation. The implication is that our quantification of human fertilisation is probably conservative. Second, as some recent studies did (e.g. Cloern 2001, Billen and Garnier 2007, Ludwig et al. 2009), we chose to focus exclusively on both nitrate and phosphate anthropogenic concentrations to evaluate the human fertilisation and to detect potential alteration of the current states of French coastal systems for the period 1997-2009. Despite the use of a limited number of parameters (a total of 13 parameters are currently available in SOMLIT), a consistent anthropogenic signal emerged from our indices of human fertilisation.

The three stations we studied showed two distinctive seasonal periods in nitrate, phosphate and silicate concentrations. During winter, nutrients behave as conservative elements. In contrast during summer, they are consumed by phytoplankton in the surface layer (Rippeth and Jones 1997). Nutrient concentrations were not similar in all stations. Nitrates were between 3 and 6 times more concentrated and phosphates between 2 and 4 times superior in the sites of the English Channel than in the Mediterranean site. In the eutrophic areas, phytoplankton growth might be light-limited amplifying the conservative behaviour in nutrients in winter (Walne 1993). This is corroborated by the high partial correlations between nitrates or phosphates and temperature or silicates (Table V-2, Figure V-2 and Annexes V-1). Phytoplankton was more nutrient-limited in the oligotrophic site, temperature limitation not being relevant as the temperature ranges from 12°C to 28°C are sufficient for primary

production (Guizien et al. 2007). In this site, surface waters are depleted in phosphates, nitrates and silicates due to anti-estuarine water circulation (Béthoux et al. 2002), scarcity in freshwater inputs and the influence of Coriolis force on the Liguro-provencal current circulation (Font et al. 1988). Furthermore, as shown by the weak partial correlations in Villefranche-sur-Mer, dissolved nutrients are not directly transported in flood waters and can be released at coastal waters through reactive processes of suspended matters (Guizien et al. 2007). Conversely, the two eutrophic sites are clearly impacted by inlets in freshwater from the closest rivers (see Table V-1) and intensive oceanic inflow from the North Atlantic (e.g. 82.68% of nitrogen input in the English Channel originated from this phenomenon; Jickells 1998).

The removal of the climatic influence on the oligotrophic site was less efficient than for eutrophic sites because we found a clear seasonal variability in the index of human fertilisation for this region (Figure V-6c). The persistent seasonal variability suggests that human fertilisation in this Mediterranean site was not predominantly modulated by temperature and continental influence. Furthermore, peculiar mechanisms such as precipitation of phosphate with iron containing dust from Sahara (Krom et al. 1991) and nitrogen fixation (Béthoux et al. 1998) make it more complex the biogeochemistry in this area. An excess in phosphate anthropogenic concentration occurred during algal blooms (April-June and September-October; Figure V-5; Case 3), a result in agreement with the strong limitations in nitrate already observed in the upper photic zone (Krom et al. 1991, Thingstad et al. 1998).

In contrast to the Mediterranean site, no climatic influence remained from the indices of human fertilisation in the sites of the English Channel (Figure V-2 and Annexes V-1). External loadings from the adjacent open sea and from continents are a major component of the budget in nitrates and phosphates (Jickells 1998, De Galan et al. 2004, Halpern et al. 2008, Vermaat et al. 2008). In Roscoff, the indices of human fertilisation exhibited recurrent nutrient loadings (Figure V-6b) whereas in Wimereux, they occurred mainly from March to June (Figure V-6a). The variation in human fertilisation in both sites could be explained by local peculiarities. By its runoff near the inshore site in Roscoff, the Penzé River provides high loading of nutrients in estuaries because of the intense use of fertilisers by agriculture in Brittany (Desalos 1999). In this area, strong and constant loadings have occurred throughout the year (generally greater than $400\mu\text{mol.L}^{-1}$ for nitrates even in summer; Wafar 1981). In

Wimereux, the human fertilisation has rather occurred predominantly in spring, during the period of agricultural activity.

In many countries, legislation mandates assessment of the water chemistry, biota, and physical environment of ecosystems, many of which have been highly impacted by human activities (Gergel et al. 2002). Severe actions have been undertaken to reduce the nutrient loadings from rivers (e.g. the Clean Water Act of the United States, the Water framework Directive of the European Union) but such actions have not always been successful. Despite the many conferences on the issue, such as the 4th North Sea Conference Progress Report (1995) where management plans were elaborated, nitrate and phosphate concentrations in the water of the two stations in the English Channel did not exhibit significant decreasing trends between 1997 and 2009. Similar results have also been observed along the Belgian coast (De Galan et al. 2004).

Past efforts to identify changes in marine coastal systems used either coarse categorical or perhaps too specific numerical tools (Ban and Alder 2008, Halpern et al. 2008). The library of empirical studies that relate anthropogenic impacts on coastal systems is increasing. The development of methods and indices is crucial to detect more rapidly potential human-induced alterations and to quantify their intensity. Considering this issue, the method and the indices of human fertilisation proposed in this study attempt to deal with these actual scientific requirements. These new indices enabled the quantification of the anthropogenic influence on nutrient concentrations and allow us to test immediately an observation by the knowledge of a relative reference state determined empirically or alternatively fixed by expertise. Developing statistical procedures to detect perturbations as soon as data become available, implementation of monitoring network and relevant indices of human fertilisation all appear to be important for more appropriate management strategies in the future (Niemeijer 2002, Pereira and Cooper 2006, Richardson and Poloczanska 2008). The technique can easily be transposed to any data sets, parameters or ecosystems, be it marine or terrestrial.

Acknowledgments

We thank the national Institute for the Sciences of the Universe and the whole SOMLIT team: technicians, researchers, captain and crews who have contributed to the collection of the SOMLIT samples since 1997. Database is available on Internet site: <http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr/fr/>. Thanks you also to Dr L. Coppola and the whole Dyfamed Observation Service. Database is available on Internet site: <http://www.obs-vlfr.fr/sodyf/>. This project was funded by a French grant BDI-CNRS.

Chapitre VI :

Discussion générale

Discussion générale

Les différents résultats acquis au cours de cette thèse ont permis de mieux comprendre les processus s'exerçant dans les eaux côtières du milieu littoral français. Ce travail puise son originalité dans la diversité des données mises à disposition par le programme SOMLIT. Le développement d'une telle démarche systématique d'observation sur l'ensemble des sites côtiers, offrant une vision multi-sites des processus physico-chimiques, a permis la première quantification de l'impact hydro-climatique à cette échelle, en conjonction directe avec l'étude de la variabilité spatio-temporelle des paramètres échantillonnés. La principale difficulté s'est posée lors de la nécessité de caractériser les forçages anthropiques. En effet, il nous manquait une information fondamentale : un "état des lieux" des systèmes côtiers, préalable indispensable pour mettre en évidence les effets de perturbation liés aux activités humaines et ainsi permettre un bilan de santé des systèmes. Cet obstacle a été résolu grâce à l'élaboration de procédures numériques et d'indicateurs anthropogéniques novateurs, présentant l'avantage de ne pas être influencés par la présence de données manquantes, caractéristique intrinsèque de la majorité des bases de données écologiques, et pouvant, de plus, être transposable à tout type de systèmes naturels.

VI. 1) La variabilité décennale des systèmes littoraux français

VI. 1. 1) De la notion de variabilité naturelle des écosystèmes...

Avant d'étudier en détail l'influence des fluctuations climatiques sur les milieux littoraux, une étape, cruciale, consiste à mieux comprendre la variabilité des processus physiques et chimiques des masses d'eaux côtières. Intrinsèquement, les écosystèmes sont des systèmes stochastiques. Toutes les variables que l'on y mesure possèdent une variabilité naturelle. Cette variabilité se manifeste à la fois, dans les données d'inventaire recueillies à

l'aide de plans d'échantillonnage, qui conduisent à prélever et mesurer en différents sites (variabilité spatiale), ou à différents moments (variabilité temporelle), et dans les résultats des expériences de terrain, dans lesquelles la source principale de variabilité est générée par l'expérimentateur (Legendre & Borcard 2006). Une variable (ou un ensemble de variables) peut présenter différents types d'évolutions au cours du temps : (1) les tendances générales, (2) les tendances cycliques, (3) un bruit de fond aléatoire (Frontier et al. 2008). Cependant, nos connaissances, sur la réponse des milieux à cette variabilité environnementale, sont encore limitées. Avant de s'intéresser aux différents forçages s'exerçant sur le milieu littoral, fussent-ils climatiques et/ou anthropiques, il convenait donc de se poser une question simple mais pourtant loin d'être triviale, à savoir :

***Cette variabilité est-elle perceptible pour les milieux côtiers français
à l'échelle de la dernière décennie ?***

Il est maintenant largement admis que seules de longues séries d'observation permettent d'évaluer les variations autour de la réalisation des cycles naturels (Southward 1995) et donc de démêler "l'écheveau des causalités" (Binet 1997). Mais le problème méthodologique qui se pose est que la majorité des séries temporelles, et notamment en milieu côtier, sont relativement courtes (e.g. Lindahl et al. 1998, Marty et al. 2002, Fernandez de Puellas et al. 2004). Les données utilisées dans notre étude n'échappent pas à cette "règle", le Service d'Observation en Milieu LITtoral, mis en place en 1997, souffrant également de ce court recul historique. Mais ce programme présente une originalité forte : une large couverture spatiale (12 sites de prélèvement)¹ et un grand nombre de paramètres suivis (13 paramètres)² qui permettent ainsi de compenser, en partie, cette limite temporelle.

**VI. 1. 2) ... à la détection de la variabilité décennale des systèmes
côtiers français**

Mais paradoxalement, cette originalité du suivi plurisystémique de la façade littorale française et de la diversité des données acquises par le SOMLIT a aussi constitué la première

¹ Dans le cadre de notre étude, 12 sites de prélèvement ont été considérés, la station de Luc-sur-Mer n'ayant intégré le SOMLIT qu'en janvier 2007.

² Les isotopes stables du carbone et de l'azote organique particulaire, également mesurés, n'ont pas été pris en compte dans ce travail, les séries temporelles étant encore trop récentes.

difficulté à laquelle nous avons été confrontés. Peu de techniques numériques existent pour analyser ce type de données complexes. L'alternative couramment adoptée est alors de s'attarder sur un paramètre particulier (généralement la température) ou bien encore d'initier une étude pour chaque site puis de comparer leur variabilité spécifique (e.g. Fromentin 1995). Mais nous souhaitons pouvoir exploiter la richesse des données à disposition sans en altérer leur complexité :

***Comment rendre compte de la variabilité décennale du littoral
tout en conservant une vision de la dynamique spatio-temporelle des paramètres,
condition nécessaire pour comprendre
l'évolution physique, chimique et biologique des masses d'eaux côtières ?***

Notre choix s'est donc porté sur l'analyse en composante principale à 3 modes, appliquée sur l'intégralité des données, tous paramètres et tous sites confondus. En amont de cette analyse, le traitement préliminaire de lissage a permis de s'affranchir de la variabilité saisonnière (Legendre & Legendre 1998). L'ACP 3 modes, quant à elle, présente l'avantage d'augmenter le ratio signal/bruit (Taylor et al. 2002, Beaugrand & Ibanez 2004), ce qui a réduit le bruit de fond aléatoire inhérent à l'analyse d'un seul site de prélèvement (e.g. forçages et/ou perturbations locales), tout en limitant l'influence des forçages hydro-climatiques locaux (e.g. marées, turbulence, structure de front). Ainsi, par cette approche, la tendance générale et les événements abrupts potentiels peuvent être décelés, nous permettant de caractériser l'évolution temporelle du littoral français dans son ensemble.

Le résultat de notre analyse atteste d'une fluctuation temporelle des propriétés physico-chimiques des masses d'eaux côtières françaises. Cette observation est en parfaite concordance avec le fonctionnement des écosystèmes à l'échelle planétaire (Intergovernmental Panel on Climate Change 2007), à savoir que le changement est global et est détecté dans tous les compartiments ou éléments fonctionnels (Beaugrand & Goberville 2010). La variabilité décennale de la façade littorale française, révélée par l'étude des deux premières composantes principales issues de l'ACP, apporte deux informations capitales : (1) la première composante principale (24.16% de la variabilité totale), montre une période de relative stabilité jusqu'en 2001, suivie par une abrupte diminution de la tendance jusqu'en 2005 ; (2) la deuxième composante principale (14.13% de la variabilité totale), indique quant

à elle l'existence d'une pseudo-cyclicité de six à sept ans ; les analyses de sensibilité menées sur un nombre décroissant de sites ou de paramètres confirmant que l'expression de cette variabilité est observable pour chacune des variables et à chaque point de prélèvement.

VI. 1. 3) La contribution des paramètres échantillonnés à la variabilité décennale des systèmes littoraux

*La variabilité des systèmes côtiers français étant avérée,
il est également important de caractériser
la contribution spatio-temporelle des paramètres échantillonnés*

L'analyse de covariation spatio-temporelle des variables descriptives du fonctionnement du littoral français apporte de précieux renseignements sur les évolutions dans le temps de chacun des paramètres, et cela, à chaque site. Cette étape de notre analyse, nous renseigne sur les paramètres et les sites contribuant le plus à la variabilité du littoral français et est clairement représentée par la cartographie des premiers et deuxièmes vecteurs propres. Ce sont les nutriments et le matériel organique particulière qui contribuent le plus fortement à la variabilité pour les sites localisés les plus au nord et dans une moindre mesure à Arcachon, Banyuls et Marseille. Une diminution abrupte des concentrations en nutriments après 2001 est observable, phénomène associé à une augmentation de la salinité après 2001. La période 2001-2005 est quant à elle marquée par une diminution de la concentration en dioxygène, commune à tous les sites SOMLIT. Bien que cette diminution soit encore insuffisante pour statuer sur un éventuel risque d'hypoxie, voire d'anoxie, du littoral français, ce phénomène peut être envisageable dans le futur, comme le suggèrent Chan et collègues (2008).

Ainsi, deux principaux constats peuvent être faits à partir de ces résultats. Tout d'abord le littoral français offre deux systèmes fortement contrastés : les sites localisés le long de la façade Atlantique et en Manche (Arcachon, Brest, Roscoff et Wimereux) et les sites méditerranéens (Banyuls, Marseille et Villefranche-sur-Mer). Ensuite, les paramètres les plus "impliqués" dans l'expression de la variabilité décennale du littoral sont également ceux considérés comme les plus "sensibles" dans la majorité des études s'intéressant aux fluctuations des systèmes côtiers : les nutriments (e.g. hypothèse d'un dérèglement des cycles de la matière ; Schlesinger 1991, Vitousek et al. 1997, Cloern 2001), l'oxygène (e.g.

multiplication des phénomènes d'hypoxie et d'anoxie des milieux côtiers ; Diaz 2001, Selman et al. 2008) ou encore la salinité (e.g. rendant compte d'une élévation du niveau de la mer ou à l'inverse d'une augmentation des apports continentaux ; Intergovernmental Panel on Climate Change 2007).

VI. 2) Influence des fluctuations climatiques sur les systèmes littoraux français

L'existence d'une variabilité des systèmes côtiers français étant clairement mise en évidence et les différents paramètres impliqués dans cette fluctuation ayant été identifiés, nous sommes efforcés de caractériser et quantifier l'impact climatique s'exerçant sur les milieux côtiers afin de répondre à la problématique suivante :

*Une influence de la variabilité climatique est-elle observable
sur les milieux côtiers français ?
Si oui, peut-on quantifier cet impact climatique ?*

Etudier l'influence de la variabilité climatique sous-entend, dans la majorité des cas, s'intéresser principalement à l'évaluation de l'influence du changement des températures sur les compartiments physiques, chimiques et biologiques (e.g. Edwards & Richardson 2004, Sarmiento & Gruber 2006, Rombouts et al. 2009). Mais de récentes études (e.g. Breton et al. 2006, Harley et al. 2006) montrent également un impact non négligeable d'autres paramètres climatiques. Conformément à ce type d'approche, nous avons donc décidé de nous intéresser à (1) l'analyse de six variables hydro-climatologiques à méso-échelle : la température de surface, les champs de pression, l'intensité et les composantes directionnelles des vents (zonales et méridionales) et les précipitations moyennes ; et (2) l'impact de trois indices hydro-climatiques à grande échelle : l'Oscillation Nord Atlantique (NAO), l'indice d'anomalies de températures de l'hémisphère Nord (NHT anomalies) et l'Oscillation Atlantique Multidécennale (AMO).

Ainsi, notre étude est novatrice dans le sens où il s'agit de la première étude de quantification de l'influence hydro-climatique, à la fois régionale et globale, s'exerçant à l'ensemble du

littoral français, la majorité des références actuellement disponibles dans la littérature ne concernant qu'un site ou qu'une zone d'échantillonnage.

VI. 2. 1) Le rôle majeur des températures de surface

Au niveau des systèmes côtiers français, les fluctuations des températures montrent une tendance à l'augmentation après 2001, avec l'année la plus chaude de la décennie en 2003, confirmant, à l'échelle régionale, le réchauffement observé au niveau planétaire (Intergovernmental Panel on Climate Change 2007). A l'échelle globale, des liens forts entre la variabilité de l'environnement côtier, le contexte hydro-climatique régional et les indices "NHT anomalies" et "AMO" sont observés, montrant l'influence de la variabilité climatique grande échelle. Ces résultats sont en accord avec ceux de Beaugrand & Reid (2003) ayant déjà identifié le rôle prépondérant des "NHT anomalies" dans la partie orientale de l'Atlantique Nord. Cette incidence de la température sur les divers compartiments des systèmes naturels est un fait avéré et s'étend aux autres composantes comme le mentionne le rapport de synthèse du GIEC (2007) : *"d'autres aspects du climat (i.e. autre que l'augmentation des températures) se sont durablement modifiés, tant à l'échelle continentale et régionale qu'à celle des bassins océaniques"*.

La température apparaît donc comme le principal paramètre responsable des changements de l'environnement littoral, agissant aussi bien sur les paramètres hydro-climatologiques, que physiques, chimiques et biologiques (Scavia et al. 2002, Beaugrand 2009) et soulevant la question de conséquences potentielles sur les propriétés physico-chimiques des masses d'eaux côtières : modifications de concentrations en nutriments, de salinité ou de concentrations en oxygène notamment. Ainsi, un réchauffement peut agir sur la stratification de la colonne d'eau, et plus particulièrement dans les régions non-tidales (Diaz & Rosenberg 1995, Bopp et al. 2002), influant alors les concentrations en nutriments, conformément à ce qui est observé à Marseille et Banyuls. La diminution du taux de dioxygène coïncide avec la période d'augmentation des températures observée entre 2001 et 2005. Plusieurs mécanismes permettent d'expliquer cette réduction : (1) des eaux plus chaudes contiennent moins de dioxygène que des eaux plus froides (Bopp et al. 2002, Beaugrand et al. 2008), (2) la production bactérienne et le métabolisme des organismes s'accélérent, la consommation en dioxygène augmente amplifiant alors la diminution de ces concentrations en dioxygène (Najjar et al. 2000).

L'impact du réchauffement des températures pourra également s'étendre au-delà des compartiments physico-chimiques et se propager le long de la chaîne trophique, altérant les compartiments biologiques (Harley et al. 2006, Kirby & Beaugrand 2009). Les effets se traduisent par des modifications biogéographiques (déplacement des espèces vers le Nord ; Beaugrand et al. 2002, Parmesan & Yohe 2003), phénologiques (Edwards & Richardson 2004), de dominance (e.g. remplacement de l'espèce *Calanus finmarchicus* par *Calanus helgolandicus* en mer du Nord ; Helaouët & Beaugrand 2007) et de fonctionnement des réseaux trophiques (Beaugrand et al. 2003, Kirby et al. 2009).

VI. 2. 2) L'influence des fluctuations des variables hydro-climatiques

Mais la température n'est pas le seul facteur climatique influençant la variabilité du littoral français. Des changements concomitants entre les systèmes côtiers, la circulation atmosphérique, la circulation océanique et les précipitations sont également observables. Par exemple, la modification abrupte de 2001 coïncide avec de fortes fluctuations des précipitations et de la composante zonale des vents. La variabilité des concentrations en nutriments, en chlorophylle *a* et en matière particulaire, pour les sites localisés le long de la façade Atlantique et de la Manche, ou encore en dioxygène, pour l'ensemble du littoral, s'explique par une influence notable du vent (aussi bien en terme d'intensité que de direction) et des précipitations.

Les changements de la circulation atmosphérique influencent la trajectoire des tempêtes en Atlantique (Dickson & Turrell 2000) et affectent les précipitations (Rogers 1997) qui, elles-mêmes, impactent directement l'activité des bassins versants et donc l'état du littoral (Milliman et al. 2008). Ainsi, la baisse des concentrations en nutriments entre 2001 et 2005 peut être attribuée, entre autre, à une diminution des débits des rivières (e.g. diminution des débits de l'Aulne et l'Elorn à Brest, de la Liane et la Somme pour Wimereux, du Rhône pour Marseille), corollaires d'une diminution des précipitations (Harley et al. 2006).

De la même manière, des modifications de la circulation océanique peuvent influencer la circulation régionale des mers côtières (Scavia et al. 2002, Harley et al. 2006). Bien qu'une diminution de l'intensité des vents ou une modification de sa direction puissent altérer le mélange de la colonne d'eau, les analyses menées sur les paramètres échantillonnés, en fond et en surface par le SOMLIT, montrent que les systèmes sont majoritairement influencés par les apports horizontaux. Par exemple, en mer du Nord, la circulation atmosphérique influence

l'hydrodynamisme, qui en retour module la nature des eaux océaniques entrant depuis l'Atlantique Nord et la Manche (Reid et al. 2003). Jickells (1998) souligne également cette influence de la circulation océanique sur les concentrations en nutriments en mer du Nord, quantifiant à hauteur de 75% les apports en nitrogène depuis l'Atlantique Nord. A l'inverse, en Méditerranée, la balance hydrique négative et le régime hydrologique particulier (i.e. une circulation océanique à contre courant ; Millot 2005) expliquent qu'une grande quantité des nutriments soit exportée vers l'Océan Atlantique.

Contrairement à ce qu'il a pu être observé pour d'autres sites d'études (e.g. New et al. 2001, Milliman et al. 2008), nos résultats ne révèlent qu'une influence modeste de la NAO sur les paramètres climatologiques de la zone étudiée et par là même un faible impact de l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) sur la variabilité physico-chimique du littoral français. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ce phénomène : (1) une série trop courte pour juger de l'impact de la NAO (Antoniadou et al. 2001) ou (2) une relation de causalité non-linéaire (Mysterud et al. 2001) ou (3) non-monotone (Breton et al. 2006) entre l'influence de la NAO et la réponse du système côtier. De plus il semblerait que (4) seules les valeurs extrêmes de l'indice, positives ou négatives, influencent les systèmes (Ibañez & Beaugrand 2008). Enfin, il est possible que cet impact à grande échelle soit (5) atténué à l'échelle locale, les particularités régionales complexifiant alors le signal climatique global (Marshall et al. 2001, Beaugrand & Goberville 2010).

VI. 2. 3) La complexité de l'identification des forçages sur les systèmes côtiers

Ce sont les études pratiquées à grande échelle qui permettent de distinguer plus clairement le signal climatique (Parmesan & Yohe 2003). En effet, c'est grâce au développement de ce type d'approche qu'il a été possible d'identifier les premières empreintes du changement climatique dans la biosphère (Parmesan & Yohe 2003). Attribuer les causes d'une modification de structure d'un système vivant aux changements climatiques reste une tâche difficile à l'échelle locale (Harley et al. 2006). La variabilité physico-chimique locale, associée à des phénomènes physiques tels que la marée, la turbulence ou la proximité d'un estuaire ou d'un delta, les contraintes de l'échantillonnage ou l'impact anthropique direct,

complexifient fortement le signal (Mysterud et al. 2001, Legendre & Borcard 2006, Billen & Garnier 2007, Halpern et al. 2007).

Bien qu'une sensibilité de l'environnement littoral à la variabilité climatique ait été clairement mise en évidence dans notre étude, caractériser les différentes interactions reste délicat. Il est important de noter que l'effet du climat dépend principalement de l'intensité des anomalies climatiques. C'est à la fois l'échelle à laquelle s'exercent les forçages, leur rythme et leur intensité qui influent sur la réponse des systèmes. Les résultats des corrélations linéaires montrent que ce sont les forçages de fortes intensités (que ce soit de manière positive ou négative) qui influencent l'état des systèmes côtiers, tandis que les forçages plus modérés n'ont que peu ou pas d'effet. Cette notion de seuil est d'ailleurs de plus en plus largement documentée, que ce soit pour les compartiments physiques (Rahmstorf 1995, Paillard 2001) ou biologiques (Scheffer et al. 2001, Carpenter & Brock 2006). De façon générale, les écosystèmes côtiers sont des prototypes mêmes de systèmes complexes, c'est-à-dire des systèmes comportant de multiples constituants interagissant entre eux de façon non-linéaire (Brizard Zongo 2010). Entre ces nombreux constituants, une kyrielle de réactions se produisent, selon des échelles de variations multiples (Brizard Zongo 2010). Cette notion de non-linéarité intrinsèque demande donc des méthodes adaptées pour une caractérisation optimale des forçages s'exerçant sur les systèmes : les suivis à long-terme, la conception d'états de référence, le développement d'indicateurs d'états de santé des systèmes...

VI. 3) La modulation par le climat du phénomène de fertilisation côtière en nutriments

Un des défis scientifiques actuels est de pouvoir séparer la part de la variabilité liée aux processus naturels, de celle liée aux activités humaines. Il faut, pour cela, disposer d'états de référence rendant possible la détection et la quantification des influences anthropiques ou naturelles (Binet 1997). Mais la réalisation de tels états de référence se heurte à des problèmes conceptuels et méthodologiques. Un des obstacles majeurs à surmonter est l'impossibilité de déterminer un état de référence absolu, la signature des activités humaines sur les systèmes côtiers remontant à des périodes bien antérieures à la mise en place de suivis du milieu marin. C'est la raison pour laquelle on ne peut que déterminer des états de référence relatifs ou opérationnels. Certaines méthodes ont déjà été proposées pour évaluer l'état actuel des

systèmes côtiers en se concentrant principalement sur les impacts des activités anthropiques et/ou sur l'analyse du fonctionnement des écosystèmes (Borja & Dauer 2008). Malheureusement, les outils sont généralement trop spécifiques d'un système, d'une zone d'étude ou encore dépendent des données à disposition (Vander Schaaf et al. 2006, Ban & Alder 2008, Halpern et al. 2008).

De plus, il est incontestable que le changement global influence et influera directement et indirectement les systèmes naturels (e.g. Halpern et al. 2008). Les écosystèmes déjà fragilisés seront ainsi probablement moins résistants et résilients que les écosystèmes peu impactés. Les réponses à ses pressions seront différentielles et des modifications brutales et inattendues de l'équilibre des écosystèmes sont à craindre (Beaugrand & Goberville 2010). Cependant, les techniques numériques actuellement à disposition ne sont pas en mesure d'identifier, en temps (quasi) réel, les modifications abruptes des systèmes, entraînant des détections *à posteriori* de ce type d'événements (e.g. dans le Pacifique Nord, Hare & Mantua 2000 ; en Mer du Nord, Reid et al. 2001). La présence de données manquantes, inhérente à la plupart des bases de données, engendre également une limite à l'application d'une majorité des outils numériques disponibles (moyenne mobile simple ou pondérée, médiane mobile, ACP).

En prenant en considération ces deux limites actuelles (i.e. pas d'états de référence des systèmes et la nécessité de développer des techniques de détection dès que la donnée est disponible), une nouvelle procédure numérique est proposée afin de répondre à la problématique suivante :

**Un état de référence des milieux côtiers n'existant pas,
comment détecter en temps (quasi) réel les perturbations des systèmes ?**

**VI. 3. 1) La détection et la quantification de la fertilisation côtière par
l'élaboration d'états de référence relatifs**

Dans le contexte actuel du changement global, quantifier l'intensité avec laquelle un site peut être perturbé est essentiel dans la priorisation des actions de gestion des zones sensibles (Halpern et al. 2007, Halpern et al. 2008). Parmi les conséquences de ce changement global, l'eutrophisation des zones côtières est une des plus préoccupantes (Selman et al. 2008). Il était

donc essentiel d'étudier ce phénomène à l'échelle du littoral français. Pour ce faire, nous avons adopté une stratégie à deux étapes : (1) un choix de paramètres pertinents permettant de caractériser l'altération anthropogénique des cycles biogéochimiques, (2) une conception d'états de référence relatifs pour quantifier l'intensité de la perturbation.

Comme en attestent de nombreux travaux, les concentrations en nitrates et phosphates, analysées conjointement, sont de robustes indicateurs de la perturbation anthropogénique (Cloern 2001, Billen & Garnier 2007, Selman et al. 2008, Ludwig et al. 2009), ce qui a motivé l'étude de leur variabilité spatio-temporelle. Quel que ce soit le site, la dynamique des concentrations en nutriments y est naturelle, avec deux périodes distinctes : une période hivernale, durant laquelle les concentrations en nutriments augmentent, et une période estivale, marquée par une réduction des concentrations (e.g. Gentilhomme & Lizon 1997). L'étude du rapport de Redfield a été utilisée en tant que première approche, mais la particularité de ce rapport en milieu côtier (Jickells 1998) nous a confortés dans l'idée de la nécessité d'élaborer une procédure plus adaptée à la détection des anomalies.

La difficulté majeure à laquelle nous avons été confrontés est l'absence de situation de référence ou de données historiques témoignant d'un état non perturbé des sites côtiers français (Binet 1997). En réponse aux différentes contraintes analytiques mentionnées précédemment, une nouvelle procédure numérique a donc été élaborée, basée sur la conception d'un état de référence relatif, déterminé empiriquement à partir de données du "large". Bien que ce choix méthodologique présente un biais potentiel, la différence naturelle des cycles biogéochimiques entre des masses d'eaux côtières et océaniques n'étant pas prise en compte, la fertilisation côtière est clairement détectée et quantifiée. L'application de cette procédure, à l'ensemble des sites suivis par le programme SOMLIT pour la période 1997-2008, conduit à l'obtention de 12 séries temporelles de probabilités (une par site) et permet (1) de détecter les événements "exceptionnels" et (2) de quantifier l'intensité des perturbations.

L'étude des séries temporelles révèle que le littoral français, dans son ensemble, est affecté par la fertilisation en nutriments. L'utilisation de diagrammes en box-plot permet une représentation synthétique de l'influence de la fertilisation en nutriments, subie par chaque site. Nos résultats confirment l'hypothèse selon laquelle les cycles de la matière, et principalement celui de l'azote, sont perturbés en milieu côtier (Schlesinger 1991, Vitousek et al. 1997a, Vitousek et al. 1997b) et préviennent, en accord avec ce qui est observé à l'échelle globale (Selman et al. 2008), d'un risque d'eutrophisation de certains sites (i.e. principalement

les sites situés les plus au nord ; Aminot et al. 2001, Ménesguen 2003). Cependant, la valeur "médiane" de fertilisation n'est pas identique pour tous les sites. Ainsi, les milieux oligotrophes (e.g. en Méditerranée) sont moins soumis à la fertilisation qu'un site comme Brest par exemple, qui manifeste l'émergence de conditions eutrophiques à certaines périodes de l'année (en automne et en hiver ; Le Pape et al. 1996). Ce résultat confirme donc l'importance des particularités locales des systèmes côtiers, et notamment morphologiques, hydrologiques et météorologiques qui contribuent à la diversité de réponses aux perturbations (Billen et al. 1991, Billen & Garnier 2007, Halpern et al. 2007).

VI. 3. 2) L'impact hydro-climatique local sur la fertilisation en nutriments

Dans quelle mesure le phénomène de fertilisation est-il impacté par les forçages hydro-climatiques locaux ?

L'étude de la variabilité décennale du littoral français ayant révélée que les sites échantillonnés par le programme SOMLIT ne sont pas insensibles aux forçages hydro-climatiques, l'importance de cet impact est considérée à l'échelle locale et pour deux systèmes contrastés : Brest (mésotrophe à tendance eutrophe, Le Pape et al. 1996) et Marseille (oligotrophe). Afin de témoigner de l'impact du climat à l'échelle locale, un indice d'alternance de périodes humides et sèches a été créé à partir de deux paramètres hydro-climatiques (i.e. le débit et la durée d'insolation) reconnus comme exerçant une influence plus ou moins directe sur l'état des systèmes littoraux (Valiela 1995, Harley et al. 2006, McQuatters-Gollop et al. 2007). En comparant les dynamiques temporelles de la fertilisation, l'influence climatique ne s'exprime pas aussi clairement sur les deux sites.

A Brest, la période de plus forte perturbation, entre 1998 et 2001, coïncide avec une période marquée par de forts débits (indice < 0). La fertilisation maximale, observée fin 2000, correspond à la plus faible valeur de l'indice hydro-climatique. En période plus "sèche" (indice > 0), le phénomène de fertilisation est moins important. Les perturbations en nutriments sont alors plus faibles et coïncident aux maximums de l'indice, entre fin 2002 et fin 2004. Ces perturbations en nutriments s'expliquent par les caractéristiques intrinsèques du point de prélèvement, naturellement soumis à d'importants apports allochtones en nitrates

depuis l'Aulne et l'Elorn (Aurousseau 2001) et à une contribution ponctuelle de la Loire (Dussauze & Ménesguen 2008). A ces spécificités locales vient s'ajouter une empreinte climatique forte, modulant la fertilisation à l'interface océan-continent, comme le montre le lien patent avec l'indice hydro-climatique. Les concentrations en nutriments co-varient avec les apports en eau douce, résultat en accord avec de récents travaux (en mer du Nord, Vermaat et al. 2008 ; dans le bassin du Mississippi, Donner et al. 2002). L'augmentation des précipitations, accélérant le débit des rivières, contribue à une amplification de la fertilisation par les apports en nitrates et en phosphates (Scavia et al. 2002, Vermaat et al. 2008, Ludwig et al. 2009). Ce processus est clairement observé à Brest en 2000, année caractérisée à la fois par des événements pluvieux extrêmes mais aussi par des apports continentaux en nutriments exceptionnellement élevés ($9500 \text{ kg.km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ de nitrates apportés depuis l'Elorn en 2000 ; Aurousseau 2001).

Si l'alternance de périodes humides et sèches est un facteur majeur de la variabilité de la fertilisation à Brest (corrélation de 0.73, significative au seuil de 5% entre l'indice hydro-climatique et l'indice de fertilisation), il n'en est pas de même pour le site de Marseille (corrélation de 0.27, non significative au seuil de 5%). Le site de Marseille, par sa position géographique, n'est pas directement sous l'influence des apports du Rhône (fleuve présentant le plus fort débit en Méditerranée occidentale ; Béthoux et al. 1992), la force de Coriolis, par son influence sur le sens de circulation du courant Liguro-Provençal, entraînant les masses d'eaux selon une direction Nord-Est/Sud-Ouest (Font et al. 1988). De plus, les concentrations en nitrates ne constituent pas le problème majeur des rivières méditerranéennes (Ludwig et al. 2009), contrairement à ce qui est observé pour les systèmes côtiers de la façade Atlantique ou de la mer du Nord (e.g. Crouzet 1999).

VI. 4) Procédures et indicateurs de la fertilisation anthropique des systèmes côtiers

Nos précédents résultats ont révélé et quantifié la fertilisation côtière en nutriments, suggérant une altération potentielle des cycles biogéochimiques, consécutive des forçages anthropiques (e.g. Cloern 2001, Borja & Dauer 2008).

**Une modulation hydro-climatique de la fertilisation ayant été identifiée,
est-il possible de s'affranchir de cette composante naturelle
afin de quantifier la part exclusivement liée aux activités humaines ?**

La littérature fait déjà état d'apports disproportionnés en nutriments depuis le continent, avec des augmentations de l'ordre de 6 à 50 des concentrations en nitrates, et de 18 à 180 des concentrations en phosphates en Mer Baltique ou dans la Baie de Chesapeake (Conley 2000). Cependant, cette quantification est le fruit d'une comparaison à une situation naturelle hypothétique, considérée comme non perturbée par l'homme (Billen & Garnier 2007), l'absence de données "historiques" des milieux rendant complexe la comparaison avec l'état actuel des systèmes (Nixon 1995, Conley 2000). Afin de répondre aux attentes scientifiques et sociétales de gestion et de préservation des systèmes naturels, nous avons donc proposé un nouvel indicateur de quantification du phénomène de fertilisation anthropogénique.

VI. 4. 2) La déconvolution de la variabilité climatique naturelle

En tenant compte de l'effet de la modulation par le climat de la fertilisation, la variabilité climatique naturelle des concentrations en nitrates et phosphates a été soustraite, afin de séparer la composante anthropique de la composante climatique naturelle. Deux paramètres sont pris en compte pour chaque nutriment : (1) les températures de surface, reflétant l'influence du climat sur les systèmes physico-chimiques et biologiques (Cloern 1996) et (2) les concentrations en silicates, témoignant d'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'une même zone 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 anthropogéniques en nitrates et phosphates.

Alors que les trois stations étudiées 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, observations en accord avec les résultats obtenus auparavant pour les stations de Brest et Marseille. Entre les deux sites localisés en Manche et le site de Villefranche-sur-Mer, les concentrations en nitrates varient d'un facteur 3 à 6 et celles en phosphates d'un facteur 2 à 4, phénomène imputable aux caractéristiques naturelles locales (Breton et al. 2006, 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 calculées entre les concentrations en nitrates ou phosphates et les concentrations en silicates (e.g. $r = -0.759$, $p < 0.001$ à Wimereux avec les nitrates) ou la température (e.g. $r = -0.748$, $p < 0.001$ à Wimereux avec les nitrates). 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 pour le site de Marseille et dans la littérature (Font et al. 1988, Béthoux et al. 2002), qui jouent un rôle prépondérant sur la disponibilité en nutriments, pouvant engendrer une limitation en nitrates et en phosphates (Guizien et al. 2007).

VI. 4. 3) Les indicateurs de la fertilisation anthropique du littoral français

Les indicateurs de concentrations anthropogéniques en nitrates et phosphates, déterminés pour les trois sites suivis, confirment l'existence de deux fonctionnements distincts, avec un système au nord (mésotrophe à tendance eutrophe ; Le Pape et al. 1996) et un système au sud (oligotrophe).

A Villefranche-sur-Mer, la variabilité saisonnière des indicateurs anthropogéniques est toujours visible. La persistance de ce signal, malgré la soustraction de la composante climatique par l'application des modèles de régressions linéaires, montre que la fertilisation anthropogénique du système côtier méditerranéen n'est pas majoritairement modulée par l'action de la température et de l'influence continentale, résultat en accord avec l'étude du site de Marseille. Comme le confirment de nombreux travaux, l'importance des apports atmosphériques en phosphates (Krom et al. 1991) ou en nitrates (Kerhervé et al. 2001, Garcia et al. 2006) 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 la fertilisation en nutriments liée 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, De Galan et al. 2004, Halpern et al. 2008, Vermaat et al. 2008), les indicateurs de la fertilisation révèlent un impact anthropique différent entre les deux sites. A Roscoff, les indicateurs attestent d'apports continus en nitrates et phosphates tout au long de la période étudiée, tandis qu'à Wimereux, la fertilisation liée aux activités humaines survient principalement entre Mars et Juin.

Cette disparité s'explique, une fois de plus, par les particularités locales des sites. Alors qu'à Wimereux l'activité agricole est concentrée sur quelques mois de l'année, l'utilisation de fertilisants (riches en nitrates et phosphates) à Roscoff se fait tout au long de l'année. La proximité de l'embouchure de la Penzé (0,5 mille) engendre d'importants apports au niveau du site de prélèvement et rend sûrement le signal anthropique plus intense qu'à Wimereux où, l'éloignement du site "large" (3,5 milles de la côte) contribue à atténuer l'intensité de la perturbation.

Conclusions, limites et perspectives

Finally, in conclusion, let me say just this...

(Peter Sellers)

Reasoning draws a conclusion, but does not make the conclusion certain, unless the mind discovers it by the path of experience

(Roger Bacon)

Conclusions, limites et perspectives

CONCLUSIONS GENERALES

La préservation de l'environnement est au cœur des préoccupations internationales, nationales et régionales, en particulier en raison de son importance pour la préservation des individus et l'avenir des écosystèmes. Un certain nombre de problèmes touchant, entre autres, les milieux littoraux, font l'objet actuellement d'une demande sociétale forte et d'une médiatisation importante. Les chercheurs impliqués dans cette thématique scientifique sont de plus en plus sollicités pour évaluer les conséquences à long-terme du changement global ou l'effet des perturbations anthropogéniques. L'objectif fixé est de prévoir, à l'échelle du siècle, l'évolution et le devenir de la planète Terre mais aussi d'évaluer l'impact de certains événements naturels sur la société et les activités humaines. Cependant, les influences anthropiques et climatiques sont parfois difficilement séparables lorsqu'elles sont fortement imbriquées dans le temps et l'espace. Leur déconvolution passe par la comparaison de systèmes analogues et/ou sur des durées suffisamment longues en s'appuyant sur les services d'observation existants.

L'étude menée dans le cadre de cette thèse s'est efforcée de montrer l'intérêt de la mise en place de programmes de suivis pluriannuels et multi-sites des systèmes littoraux, en prenant comme exemple le programme SOMLIT. Cette justification de l'importance des suivis à long-terme est accompagnée de l'élaboration de procédures analytiques novatrices et d'indicateurs pertinents, outils indispensables permettant la détection, la caractérisation des variations et des forçages impliqués et la quantification des perturbations naturelles et/ou anthropiques sur les systèmes côtiers. Bien entendu, cette démarche ne tient que si l'écologiste cherche à tester une hypothèse qu'il s'est forgée à la suite d'observations. Analyser des séries temporelles sans se baser, en amont, sur une problématique clairement énoncée, n'aurait que

peu de chance d'aboutir à une interprétation écologique cohérente. Mais si cette étape est cruciale, elle n'est pas toujours suffisante. Il est également nécessaire d'avoir à disposition le(s) jeu(x) de données adéquat(s) pour répondre à la question posée. Le programme SOMLIT ayant débuté en 1997, les données disponibles à l'heure actuelle permettent d'étudier la variabilité physico-chimique du littoral français à l'échelle décennale. Cependant, en raison des questions scientifiques formulées lors de l'initiation de ce travail, le besoin s'est imposé de coupler ces séries temporelles à des bases de données complémentaires (e.g. hydro-climatiques à l'échelle locale ou à méso-échelle, physiques et chimiques à grande échelle).

Il est maintenant largement admis, par la communauté scientifique, que les causes de variabilité des systèmes peuvent s'exprimer lentement et sur de longues périodes de temps (e.g. cycle séculaire, périodicité des indices hydro-climatiques grande échelle, fonctionnement à très grande inertie des cycles biogéochimiques...) mais également de manière brève, épisodique (e.g. cycle nyctéméral, crues...). Afin de comprendre et appréhender les propriétés et la dynamique de l'évolution des milieux et dans l'objectif final de caractériser l'état naturel des écosystèmes, les scientifiques ont, entre autres, besoin de séries de données sur de longues périodes de temps (Southward 1995). Il s'agit d'un outil indispensable si l'on ambitionne d'interpréter, de la façon la plus réaliste possible, les différents processus de systèmes complexes. De manière générale, il est donc plus que souhaitable de poursuivre l'acquisition des séries à long-terme aussi bien hydro-climatiques, physiques et chimiques que biologiques. C'est seulement à cette condition qu'il sera possible de caractériser l'origine des forçages et d'affiner notre compréhension de la dynamique naturelle des écosystèmes (Harley 2006). Afin d'atteindre ces objectifs scientifiques ambitieux, le maintien et l'amélioration de programmes de suivi à long-terme, tel que le SOMLIT, sont essentiels et passent par une pérennité des moyens humains et financiers mis à disposition. Il convient dès lors de se poser les questions en adéquation avec de tels desseins : Est-il indispensable de maintenir le suivi de tous les sites en cours ? Peut-on restreindre le nombre de paramètres ? Peut-on diminuer la fréquence d'échantillonnage ? Les réponses à ces trois questions prennent en point d'appui les résultats de notre étude des données issues du programme SOMLIT. Il est cependant important de noter que ces remarques sont transposables (1) pour une amélioration de programmes déjà existants et (2) en prévision de la mise en place de nouveaux suivis à long-terme.

La réponse à la première question est relativement aisée à la vue de nos résultats. Tout d'abord, l'étude de la variabilité décennale et des paramètres qui y contribuent, montre clairement une différence de fonctionnement entre la façade Atlantique/Manche et la façade méditerranéenne. Ces deux systèmes présentent des caractéristiques physico-chimiques fortement contrastées, avec une variabilité nettement influencée par les sels nutritifs et le matériel particulaire pour les sites les plus au nord. Cette disparité entre les systèmes est confirmée par les résultats obtenus après comparaisons aux états de référence relatifs. Les sites caractérisés par des masses d'eaux à tendance eutrophe ne réagissent pas de la même façon que les sites oligotrophes face aux phénomènes de fertilisation. Les sites Atlantique/Manche, à l'inverse des sites méditerranéens, présentent une vulnérabilité à l'apport anthropique en sels nutritifs plus marquée et l'importance de l'impact climatique y est clairement décelable. Enfin, l'étude comparative des stations de Wimereux et Roscoff, pourtant toutes deux localisées le long de la façade Manche, révèle un très net contraste dans leurs réponses à une perturbation anthropique. Il est donc important de développer une approche multi-site au sein de programmes de suivis afin de (1) caractériser les causes de modification de structure des systèmes à des changements globaux d'origine hydro-climatique ou anthropique mais aussi (2) comparer la réponse des différents systèmes à ces changements tout en prenant en compte (3) les spécificités des différents sites et l'importance des forçages à l'échelle locale.

De plus, il nous semble justifié de ne pas réduire le nombre de paramètres échantillonnés. En effet, les milieux littoraux étudiés dans le cadre du programme SOMLIT présentent une grande diversité de situations et de complexité de fonctionnement. Les paramètres choisis sont pertinents et complémentaires pour décrire, via une approche physico-chimique, la diversité des évolutions complexes des masses d'eaux. L'étude de la contribution de chacune des variables sur la tendance décennale du littoral français montre que, malgré certains patrons communs, chaque paramètre présente une réponse propre à la variabilité générale. Pour caractériser et comprendre, au mieux, le fonctionnement des systèmes côtiers, il est donc important de perpétuer la stratégie de suivi mise en place par le SOMLIT.

Quant au problème de la fréquence d'échantillonnage, il est intrinsèquement lié à la problématique que le scientifique cherche à résoudre. L'influence climatique doit être évaluée sous les deux aspects d'une dérive lente et progressive, et de la survenue d'événements plus exceptionnels. Pour aborder l'influence anthropique, il est nécessaire de considérer tout le champ des activités humaines susceptibles de modifier le fonctionnement des systèmes

côtiers, ce qui sous-entend une large couverture temporelle. Si l'on se base sur des propriétés purement analytiques, la fréquence d'échantillonnage doit être égale ou supérieure au double de la fréquence maximale contenue dans le signal... Ces recommandations théoriques sont difficilement applicables pour un échantillonnage "manuel" en écologie, et il paraît plus pragmatique que la fréquence d'échantillonnage soit suffisamment grande pour éviter des pertes d'information. Ainsi, plus la fréquence d'échantillonnage est haute moins les acquisitions sont espacées et les événements entre deux situations sont conservés. En tenant compte de cette notion, et en accord avec une faisabilité en temps de travail et économique, une cadence bimensuelle semble être appropriée à l'étude de la tendance générale et des changements potentiels à long-terme en milieux côtier, même si ce point reste discutable.

LIMITES DE L'ETUDE

Nos résultats permettent donc d'arguer de la nécessité du maintien et du développement des programmes de suivi à long-terme des systèmes. Malgré cela, certaines objections peuvent tout de même être formulées à l'encontre de notre démarche. Nous ne reviendrons pas sur la durée de la série, pouvant être jugée trop courte pour une détection de l'existence d'un signal climatique, la stratégie multi-sites et multi-paramètres permettant d'atténuer ce problème. La première critique concerne l'approche physico-chimique déterminée par le programme SOMLIT. En confrontant la stratégie adoptée par le SOMLIT à celle appliquée dans d'autre programme à long-terme, la principale constatation est que le suivi décennal analysé dans notre étude manque encore de "maturité". En prenant comme point de comparaison le programme "Long Term Ecological Research"¹ (LTER Network), il est possible de se rendre compte du chemin qu'il reste à parcourir au SOMLIT pour présenter toutes les caractéristiques d'un programme de suivi robuste et abouti. Le LTER est un réseau multi-sites de travail collaboratif, regroupant 26 zones aux caractéristiques propres, au sein desquelles cinq champs d'action de base sont définis, couvrant une majorité des processus écosystémiques². Les deux stratégies de suivi divergent donc assez nettement, montrant que la

¹ Réseau, sur le long-terme et à différentes échelles spatiales, d'étude des processus écologiques et des écosystèmes, mis en place par la "National Science Foundation" en 1980, pour soutenir les programmes de recherche sur les phénomènes écologiques à long-terme aux États-Unis.

² (1) pattern et contrôle de la production primaire, (2) distribution spatio-temporelle de populations représentatives de la structure trophique, (3) pattern et contrôle de l'accumulation de matière organique dans les couches de surface et les sédiments, (4) pattern des apports et de la dynamique physico-chimique dans les sols, les eaux souterraines et les eaux de surface et (5) pattern et fréquence des perturbations de site : <http://www.lternet.edu/>.

stratégie du SOMLIT est encore trop limitée par sa seule approche de l'environnement physico-chimique, avec uniquement la chlorophylle *a* comme "témoin" du compartiment biologique. Cette contrainte rend impossible la compréhension et la caractérisation de l'évolution de processus écologiques plus complexes, via par exemple l'application de modèles couplés physique-biogéochimiques les plus classiques de type NPZD (e.g. modèle ECO-MARS3D dans le golfe de Gascogne ; Huret 2009).

Une notion très importante dans le contexte de l'impact du changement climatique que nous n'avons pas abordée est celle de la vulnérabilité. La perturbation, qu'elle soit climatique ou anthropique, résulte de la conjonction de l'aléa et de la vulnérabilité. Lors de notre étude, l'aspect vulnérabilité n'a pas été abordé. En effet, l'évolution de la vulnérabilité des systèmes est une question très difficile. Traiter cette notion demanderait de modifier notre approche d'analyse de l'évolution du climat. Actuellement, la démarche consiste à quantifier les impacts des perturbations. Mais comme le soulignent Cox et Stephenson (2007), une autre approche consisterait à partir de la quantification de la vulnérabilité d'un système suivi, en fonction des amplitudes possibles du changement global, afin d'évaluer le seuil à partir duquel ce changement global devient préjudiciable pour le système. Mais les difficultés pratiques (la vulnérabilité et le seuil de dangerosité dépendant de chaque système) rendent encore complexe une telle approche (Boé 2007).

Enfin, comme mentionné précédemment, la fréquence de prélèvement lors de suivi à long terme doit être suffisante afin d'éviter une troncature de l'information. Bien que représentant un bon compromis entre faisabilité et représentativité, il est possible de discuter de la réelle significativité de l'échantillonnage SOMLIT dans l'étude des processus en milieu littoral. En effet, explorer la variabilité des systèmes côtiers implique de se poser la question sur la fréquence de prélèvement la plus adaptée à leur compréhension. Par exemple, dans les eaux côtières d'Europe occidentale, les variations des paramètres physiques, chimiques et biologiques sont contrôlées par quatre cycles naturels : (1) le cycle nyctéméral, (2) le cycle de marée, (3) le cycle de vives-eaux/mortes-eaux et enfin (4) le cycle saisonnier. A ces cycles naturels s'ajoute l'existence d'événements aléatoires (e.g. régime de crue, tempêtes). Toutefois, la fréquence choisie ne permet pas une caractérisation fine des processus biogéochimiques et fait plutôt figure d'un instantané du système, à l'instant *t*, qui ne prend pas en considération l'importance de la dynamique physique des masses d'eaux (e.g. hydrodynamisme). Ainsi, dans le cas de la salinité par exemple, alors que les données SOMLIT décèlent un signal saisonnier

clair, la haute fréquence permet de caractériser les phénomènes de dessalure consécutifs des cycles tidaux (Blain et al. 2004).

PERSPECTIVES

La nécessité du maintien et du développement des programmes de suivi à long-terme des systèmes étant par conséquent avérée, la question qui reste en suspens est : comment compléter et améliorer l'approche proposée dans le cadre de notre étude ? Il a déjà été amplement argumenté dans ce manuscrit que les systèmes côtiers demeurent complexes à plusieurs niveaux par : (1) les variabilités temporelles et spatiales liées aux forçages globaux et locaux, (2) la multiplicité des interactions entre les différents compartiments (i.e. physiques, chimiques et biologiques) ou encore (3) l'hétérogénéité des milieux, qui fait s'interroger sur l'échelle (à la fois dans le temps et l'espace) la plus adaptée à leur compréhension. Chaque facette de cette complexité représente ainsi un enjeu scientifique de taille dans le but d'approfondir notre compréhension des interfaces côtières.

Afin d'assurer une meilleure compréhension de la variabilité spatio-temporelle du littoral français dans son ensemble, il conviendrait de renouveler l'analyse exploratoire appliquée dans notre étude (i.e. analyse en composante principale à trois modes) après quelques années supplémentaires de suivis de manière à compléter cette approche décennale. En effet, la durée actuelle de la série temporelle SOMLIT est encore trop courte pour statuer d'une véritable modification du milieu côtier (i.e. le changement abrupt observé entre 2000 et 2001) sans qu'un doute subsiste sur l'existence d'un cycle naturel dont nous ne pouvons déceler l'intégralité du signal. En outre, l'impact du climat devant être préférentiellement quantifié sur de longues périodes temporelles, une mise à jour des matrices hydro-climatologiques issues du NCEP/NCAR, au-delà de l'année 2006, permettra d'analyser de manière plus robuste le signal climatique. A une échelle plus locale, il serait également intéressant que les sites suivis par le SOMLIT présentent à la fois un point d'échantillonnage en "côte" et en "large". Actuellement, seules les stations de Wimereux et Roscoff répondent à ce critère sur une période de temps suffisamment longue, ce qui a permis la quantification de l'impact de la fertilisation côtière en nutriments, tout en prenant en considération les spécificités naturelles des cycles biogéochimiques en milieu littoral. Cependant, transposer cette approche aux autres stations n'est pas encore possible. A titre d'exemple, dans le cas de

la façade méditerranéenne, il serait intéressant d'établir un point de suivi directement en sortie de panache du Rhône afin d'établir une comparaison avec le site actuel de Marseille, qui n'est que sporadiquement impacté par les apports depuis le continent.

Observer et identifier les propriétés des systèmes permet au scientifique d'élaborer des concepts de fonctionnements afin de les comprendre et les expliquer. Une telle approche nécessite néanmoins la prise en compte des différents niveaux d'organisation et des interactions entre les compartiments. En effet, il est maintenant largement documenté que les perturbations au sein des systèmes se propagent le long de ces différents compartiments, résultant en l'altération de la totalité des systèmes. Ainsi, pour compléter notre étude de l'impact des variabilités hydro-climatiques et des forçages anthropiques sur les systèmes littoraux, il conviendrait d'inclure un suivi des compartiments biologiques à notre réflexion. Mais le problème majeur qui se pose est qu'il est encore très difficile d'apprécier la diversité de l'ensemble des communautés biologiques du fait, notamment, du manque de données à long-terme des compartiments biologiques (études trop spécifiques, disparition de systématiciens "naturalistes" capables de décrire les communautés...). De plus, le manque de connaissance d'espèces biologiques pouvant jouer un "rôle clé" ou "d'espèces cibles" dans les écosystèmes, ou pouvant représenter de bons indicateurs de la santé des systèmes est également un frein à une telle approche. Depuis peu, le compartiment phytoplanctonique (pico et nanophytoplancton) a été ajouté à la liste des paramètres échantillonnés par le SOMLIT, ouvrant ainsi la voie d'un suivi biologique et laissant augurer de la possibilité de transposer notre démarche à l'ensemble de la colonne d'eau.

En ce qui concerne la fréquence d'échantillonnage adoptée par le SOMLIT, ce point a été développé plus haut, et bien que la stratégie d'acquisition actuelle semble être le meilleur compromis possible entre la qualité de l'information et une faisabilité manuelle elle reste critiquable. Cependant, le développement de réseaux instrumentés d'observation permet d'envisager une nouvelle voie d'analyse des processus en milieu côtier. Ainsi, de récentes études (e.g. Brizard Zongo 2010, Blain et al. 2004) nous renseignent sur l'intérêt de développer de futurs travaux s'appuyant sur le couplage entre les programmes de suivis à long-terme et ceux effectués par des stations instrumentées autonomes à acquisition haute-fréquence (e.g. les stations Marel, un prélèvement toutes les 20 minutes). Cette comparaison permettrait ainsi d'examiner, de la façon la plus réaliste possible, la variabilité des descripteurs de l'environnement tout en révélant les fortes fluctuations, à petites échelles temporelles, indétectables par les programmes de suivi manuel. Les mesures haute fréquence

permettent ainsi de rendre compte de la très haute variabilité des processus en milieu côtier, tout en s'affranchissant des contraintes d'environnement que l'on rencontre sur les sites qualifiés "d'hostiles". Les données échantillonnées manuellement, quant à elles, constituent une référence incontournable pour la calibration des données instrumentales.

Enfin, il serait souhaitable de confronter les résultats, obtenus dans le cadre de cette thèse, à ceux acquis dans d'autres pays, où des suivis des systèmes à moyen et long-terme sont déjà en place, comme, entre autres, le programme "Long Term Ecological Research" ou la base de données du "British Oceanographic Data Centre"³. Un tel projet nécessiterait l'élaboration d'une large collaboration internationale entre les différentes organisations ayant établi des programmes de suivi à long-terme des compartiments physiques, chimiques et biologiques. Cependant, dans l'optique d'une meilleure compréhension des systèmes naturels à l'échelle globale, un développement de stratégies d'observatoires et de sites ateliers pourrait également être envisagé afin de favoriser la synthèse des connaissances déjà disponibles et en cours d'acquisition. Cette marche à suivre offrirait plusieurs avantages, à savoir : (1) la mise en commun de données environnementales sur la base de territoires géographiques pertinents, (2) la caractérisation du fonctionnement des zones côtières et d'interface au travers d'une typologie des zones de transition dans une perspective d'approche globale, (3) la mise en place de réseaux de mesures cohérents et pérennes, (4) la synthèse des résultats pour une aide à la compréhension globale du comportement des systèmes, et transposable à des systèmes équivalents. Bien que de nombreuses contraintes soient inhérentes à cette démarche (e.g. nécessité de moyens, validation de la qualité des données, accès aux données), il est nécessaire de développer ce type de stratégie pour valoriser les données à disposition, optimiser les suivis existants, produire des outils analytiques d'intégration des différentes échelles temporelles et spatiales d'étude et enfin permettre de scinder les fonctionnements locaux et globaux par la comparaison des résultats obtenus sur plusieurs sites. L'objectif final d'une telle approche étant de garantir ou de restaurer l'équilibre des systèmes naturels, via une gestion adaptée.

³ le BODC est un centre national de centralisation et de distribution des données d'observation du milieu marin : http://www.bodc.ac.uk/about/what_is_bodc/



Références bibliographiques

A

- Aebischer NJ, Coulson JC, Colebrook JM** (1990) Parallel long-term trends across four marine trophic levels and weather. *Nature* 347:753-755
- Alheit J** (2009) Consequences of regime shifts for marine food webs. *International Journal of Earth Sciences* 98:261-268
- Alheit J, Hagen E** (1997) Long-term forcing of European herring and sardine populations. *Fisheries Oceanography* 6:130-139
- Alheit J, Mollmann C, Dutz J, Kornilovs G, Loewe P, Mohrholz V, Wasmund N** (2005) Synchronous ecological regime shifts in the central Baltic and the North Sea in the late 1980s. *ICES Journal of Marine Science* 62
- Alley RB, Marotzke J, Nordhaus WD, Overpeck JT, Peteet DM, Pielke RA, Jr., Pierrehumbert RT, Rhines PB, Stocker TF, Talley LD, Wallace JM** (2003) Abrupt climate change. *Science* 299:2005-2010
- Aminot A, Belin C, Chapelle A, Guillaud JF, Joanny M, Lefevre A, Ménesguen A, Merceron M, Piriou JY, Souchu P** (2001) L'eutrophisation des eaux marines et saumâtres en Europe, en particulier en France. Ifremer (eds), France
- Aminot A, Kérouel R** (2004) Hydrologie des systèmes marins; paramètres et analyses. In: Ifremer (eds) *Méthodes d'analyse en milieu marin*. 336pp
- Aminot A, Kérouel R** (2007) Dosage automatique des nutriments dans les eaux marines: Méthodes en flux continu. In: Ifremer (eds) *Méthodes d'analyse en milieu marin*. 188pp
- Anderson DM, Glibert PM, Burkholder JM** (2002) Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries and Coasts* 25:704-726
- Anderson NJ** (2000) Miniview: Diatoms, temperature and climatic change. *European Journal of Phycology* 35:307-314
- Antoniadou T, Besse P, Fougères AL, Le Gall C, Stephenson DB** (2001) L'Oscillation Atlantique Nord (NAO) et son influence sur le climat Européen. *Revue de Statistique Appliquée* 49:39-60
- Antonov JI, Levitus S, Boyer TP** (2005) Thermosteric sea level rise, 1955-2003. *Geophysical Research Letters* 32:L12602

Antonov JI, Locarnini RA, Boyer TP, Mishonov AV, & Garcia HE (2006). In: Levitus S (eds) World Ocean Atlas 2005, volume 2: Salinity, Washington, DC: NOAA Atlas NESDIS 62, US Government Printing Office. 182pp

Arrhenius S (1896) On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. Philosophical Magazine Series 5 41:237-276

Attrill MJ, Power M (2002) Climatic influence on a marine fish assemblage. Nature 471:275-278

Aulard FA (1793) Recueil des Actes du Comité de salut public

Aurousseau P (2001) Les flux d'azote et de phosphore provenant des bassins versants de la rade de Brest. Comparaison avec la Bretagne. Océanis 27:137-161

B

Baer KE, Pringle CM (2000) Special problems of urban river conservation: The encroaching megalopolis. In: Boon PJ, Davies B, Petts GE (eds) Global perspectives on river conservation: science policy, and practice. Chichester, UK: John Wiley & Sons, p. 385-402

Bald J, Borja A, Muxika I, Franco J, Valencia V (2005) Assessing reference conditions and physico-chemical status according to the European Water Framework Directive: A case-study from the Basque Country (Northern Spain). Marine Pollution Bulletin 50:1508-1522

Balmford A, Green RE, Jenkins M (2003) Measuring the changing state of nature. Trends in Ecology & Evolution 18:326-330

Ban N, Alder J (2008) How wild is the ocean? Assessing the intensity of anthropogenic marine activities in British Columbia, Canada. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 18:55-85

Barnett TP, Pierce DW, AchutaRao KM, Gleckler PJ, Santer BD, Gregory JM, Washington WM (2005) Penetration of human-induced warming into the world's oceans. Science 309:284-287

Barthélemy-Saint-Hilaire J (1863) Météorologie d'Aristote. Durand A (ed)

Beaugrand G (2004) The North Sea regime shift: Evidence, causes, mechanisms and consequences. Progress in Oceanography 60:245-262

- Beaugrand G** (2009) Decadal changes in climate and ecosystems in the North Atlantic Ocean and adjacent seas. *Deep-Sea Research II: Topical Studies in Oceanography* 56:656-673
- Beaugrand G, Brander KM, Lindley JA, Souissi S, Reid PC** (2003) Plankton effect on cod recruitment in the North Sea. *Nature* 426:661-664
- Beaugrand G, Edwards M, Brander K, Luczak C, Ibanez F** (2008) Causes and projections of abrupt climate-driven ecosystem shifts in the North Atlantic. *Ecology Letters* 11:1157-1168
- Beaugrand G, Goberville E** (in press) Conséquences des changements climatiques en milieu océanique. *Vertigo*
- Beaugrand G, Helaouët P** (2008) Simple procedures to assess and compare the ecological niche of species. *Marine Ecology Progress Series* 363:29-37
- Beaugrand G, Ibanez F** (2004) Monitoring marine plankton ecosystems (2): Long-term changes in North Sea calanoid copepods in relation to hydro-meteorological variability. *Marine Ecology Progress Series* 284:35-47
- Beaugrand G, Ibanez F, Reid D** (2000) Spatial, seasonal and long-term fluctuations of plankton in relation to hydroclimatic features in the English Channel, Celtic Sea and Bay of Biscay. *Marine Ecology Progress Series* 200:93-102
- Beaugrand G, Lenoir S, Ibanez F, Manté C** (in press) A new model to assess the probability of occurrence of a species based on presence-only data. *Marine Ecology Progress Series*
- Beaugrand G, Reid D, Ibanez F, Lindley JA, Edwards M** (2002) Reorganization of North Atlantic Marine Copepod Biodiversity and Climate. *Science* 296:1692-1694
- Beaugrand G, Reid PC** (2003) Long-term changes in phytoplankton, zooplankton and salmon related to climate. *Global Change Biology* 9:801-817
- Beer J, Mende W, Stelmacher R** (2000) The role of the sun in climate forcing. *Quaternary Science Reviews* 19:403-415
- Behrenfeld MJ, O'Malley RT, Siegel DA, McClain CR and others** (2006) Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature* 444:752-755
- Beltrami H, Smerdon JE, Pollack HN, Huang S** (2002) Continental heat gain in the global climate system. *Geophysical Research Letters* 29:1167
- Bertrand C, van Ypersele JP, Berger A** (1999) Volcanic and solar impacts on climate since 1700. *Climate dynamics* 15:355-367

- Bertrand E** (1760) Mémoires sur la structure intérieure de la terre, Heidegger et Compagnie
- Béthoux JP, Morin P, Chaumery C, Connan O, Gentili B, Ruiz-Pino D** (1998) Nutrients in the Mediterranean Sea, mass balance and statistical analysis of concentrations with respect to environmental change. *Marine Chemistry*, 63:155-169
- Béthoux JP, Morin P, Ruiz-Pino DP** (2002) Temporal trends in nutrient ratios: Chemical evidence of Mediterranean ecosystem changes driven by human activity. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 49:2007-2016
- Betts AK, Hong S-Y, Pan H-L** (1996) Comparison of NCEP-NCAR Reanalysis with 1987 FIFE Data. *Monthly Weather Review* 124:1480-1498
- Billen G, Garnier J** (2007) River basin nutrient delivery to the coastal sea: Assessing its potential to sustain new production of non-siliceous algae. *Marine Chemistry* 106:148-160
- Billen G, Lancelot C, Meybeck M** (1991) N, P, and Si retention along the aquatic continuum from land to ocean. In: Mantoura RFC, Martin JM & Wollast R (eds) *Ocean margin processes in global change*. John Wiley & Sons, pp. 19-44
- Binet D** (1997) Menace anthropique et évolution climatique - Nécessité d'une stratégie pour évaluer le changement dans les écosystèmes. In: Dauvin JC (ed) *Les biocénoses marines et littorales françaises des côtes Atlantique, Manche et Mer du Nord, synthèse, menaces et perspectives*, pp. 267-286. Laboratoire de Biologie des Invertébrés Marins et Malacologie - Service du Patrimoine naturel / IEGB / MNHN, Paris. 376pp
- Biondini ME, Bonham CD, Redente EF** (1985) Secondary successional patterns in a sagebrush (*Artemisia tridentata*) community as they relate to soil disturbance and soil biological activity. *Plant Ecology* 60:25-36
- Blackford JC** (2010) Predicting the impacts of ocean acidification: Challenges from an ecosystem perspective. *Journal of Marine Systems* 81:12-18
- Blain S, Guillou J, Tréguer P, Woerther P, Delauney L, Follenfant E, Gontier O, Hamon M, Leildé B, Masson A, Tartu C, Vuillemin R** (2004) High frequency monitoring of the coastal marine environment using the MAREL buoy. *Journal of Environmental Monitoring* 6:569-575
- Boé J** (2007) *Changement global et cycle hydrologique: Une étude de régionalisation sur la France*. PhD. Thesis, University of Toulouse III, France

- Bopp L, Aumont O, Cadule P, Alvain S, Gehlen G** (2005) Response of diatoms distribution to global warming and potential implications: A global model study. *Geophysical Research Letters* 32
- Bopp L, Le Quéré C, Heimann M, Manning AC, Monfray P** (2002) Climate-induced oceanic oxygen fluxes: Implications for the contemporary carbon budget. *Global Biogeochemical Cycles* 16:1022
- Borja A, Bricker SB, Dauer DM, Demetriades NT, Ferreira JG, Forbes AT, Hutchings P, Jia X, Kenchington R, Marques JC, Zhu C** (2008) Overview of integrative tools and methods in assessing ecological integrity in estuarine and coastal systems worldwide. *Marine Pollution Bulletin* 56: 1519-1537
- Borja A, Dauer DM** (2008) Assessing the environmental quality status in estuarine and coastal systems: Comparing methodologies and indices. *Ecological Indicators* 8:331-337
- Box GEP, Jenkins GW** (1976) *Time series analysis: Forecasting and control*. Holden-Day, San Francisco, CA
- Breton E, Rousseau V, Parent J, Ozer J, Lancelot C** (2006) Hydroclimatic modulation of diatom/*Phaeocystis* blooms in nutrient-enriched Belgian coastal waters (North Sea). *Limnology and Oceanography* 51:1401-1409
- Brizard Zongo S** (2010) *Fluctuations multi-échelles et extrêmes dans les séries temporelles biogéochimiques à moyen et long terme en milieu marin côtier*. PhD. Thesis, University of Lille 1, France
- Buddemeier RW, Smith SV, Swaney DP, Crossland CJ** (2002) The role of the coastal ocean in the disturbed and undisturbed nutrient and carbon cycles, LOICZ Reports and Studies Series No. 24, pp. 48-51
- Burkett V, Codignotto JO, Forbes DL, Mimura N, Beamish RJ, Ittekkot V** (2001) Coastal zones and marine ecosystems. In: *Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability* (eds. McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Doken DJ, White KS), Cambridge University Press, Cambridge, pp. 343-379

C

- Cabeçadas G, Nogueira M, Brogueira MJ** (1999) Nutrient dynamics and productivity in three European estuaries. *Marine Pollution Bulletin* 38:1092-1096
- Caldeira K, Wickett ME** (2003) Oceanography: Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature* 425:365-365
- Carlton JT, Geller JB** (1993) Ecological roulette: The global transport of nonindigenous marine organisms. *Science* 261:78-82
- Carpenter SR, Brock WA** (2006) Rising variance: A leading indicator of ecological transition. *Ecology Letters* 9:311-318
- Chan F, Barth JA, Lubchenco J, Kirincich A, Weeks H, Peterson WT, Menge BA** (2008) Emergence of anoxia in the California Current large marine ecosystem. *Science* 319:920
- Chapelle A, Lazure P, Ménesguen A** (1994) Modelling eutrophication events in a coastal ecosystem. Sensitivity analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 39:529-548
- Chapin III FS, Crumley CL, Gomes CP, Graedel TE, Levin J, Matson PA, Matus K, Myers S, Smith VK** (2010) Working Group IV: Managing Human-Environment Systems for Sustainability. In: Levin SA, Clark WC (eds.) "Toward a Science of Sustainability: Report from Toward a Science of Sustainability Conference, Airlie Center, Warrenton, Virginia, November 29, 2009 – December 2, 2009" CID Working Paper No. 196. Center for International Development at Harvard University. May 2010
- Chatfield C** (1996) *The analysis of time series: An introduction*. Chapman & Hall, London
- Chelton DB** (1984) Commentary: Short-term climatic variability in the northeast Pacific Ocean. In: Pearcy W (ed) *The influence of ocean conditions on the production of salmonids in the North Pacific*. Oregon State University Press, Corvallis, OR, p 87-99
- Chelton, DB, Bernal, PA, McGowan, JA** (1982). Large-scale interannual physical and biological interaction in the California Current. *Journal of Marine Research* 40, 1095-1125
- Christensen NL, Bartuska AM, Brown JH, Carpenter S, D'Antonio C, Francis R, Franklin JF, MacMahon JA, Noss RF, Parsons DJ** (1996) *The report of the Ecological Society of America*

- committee on the scientific basis for ecosystem management. *Ecological Applications* 6:665-691
- Church JA, Gregory JM, Huybrechts P, Kuhn M, Lambeck K, Nhuan MT, Qin D, Woodworth PL** (2001) Changes in sea level. *Climate Change* 200:639-694
- Cloern JE** (1996) Phytoplankton bloom dynamics in coastal ecosystems: A review with some general lessons from sustained investigation of San Francisco Bay, California. *Reviews of Geophysics* 34:127-168
- Cloern JE** (2001) Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series* 210:223-253
- Conley DJ** (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
- Conversi A, Fonda Umami S, Peluso T, Molinero JC, Santojanni A, Edwards M, Humphries S** (2010) The Mediterranean Sea regime shift at the end of the 1980s, and intriguing parallelisms with other European basins. *PLoS ONE* 5:e10633
- Corten A** (1999) A proposed mechanism for Bohuslän herring periods. *ICES Journal of Marine Science* 56:207-220
- Cox P, Stephenson D** (2007) A changing climate for prediction. *Science* 317, 207–208
- Crouzet P, Nixon S, Laffon L, Bogestrand J, Lallana C, Izzo G, Bak J** (1999) Nutrients in European ecosystems: Environmental Assessment Report 4. European Environmental Agency, Copenhagen, Denmark, 123pp
- Cury PM, Shannon L, Shin Y-J** (2002) The functioning of marine ecosystems: A fisheries perspective. In: Sinclair M, Valdimarsson G (eds) *Responsible fisheries in the marine ecosystem* FAO and CAB International, Rome, pp. 103-123

D

- Dagnelie P** (1975) Les méthodes de l'inférence statistique. In: Ducolot J (ed) Théorie et méthodes statistiques, Vol 2, Gambroux, Belgium, pp. 1-463
- Dale B, Thorsen TA, Fjellsa A** (1999) Dinoflagellate cysts as indicators of cultural eutrophication in the Oslofjord, Norway. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 48:371-382
- David V** (2006) Dynamique spatio-temporelle du zooplancton dans l'estuaire de la Gironde et implications au sein du réseau trophique planctonique. PhD. Thesis, University of Bordeaux 1, France
- Davies SP, Jackson SK** (2006) The biological condition gradient: A descriptive model for interpreting change in aquatic ecosystems. *Ecological Applications* 16:1251-1266
- de Boor C** (1978) A practical guide to splines. In: Applied Mathematical Sciences. Springer Verlag, New York
- De Galan S, Elskens M, Goeyens L, Pollentier A, Brion N, Baeyens W** (2004) Spatial and temporal trends in nutrient concentrations in the Belgian Continental area of the North Sea during the period 1993-2000. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 61:517-528
- Desalos D** (1999) *Alexandrium minutum* dans les estuaires nord-finistériens: Eaux colorées et toxicité des coquillages en relation avec quelques facteurs naturels. Ifremer (eds), France
- DeYoung B, Barange M, Beaugrand G, Harris R, Perry RI, Scheffer M, Werner F** (2008) Regime shifts in marine ecosystems: Detection, prediction and management. *Trends in Ecology & Evolution* 23:402-409
- Diaz R, Rosenberg R** (1995) Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanography and Marine Biology Annual Review* 33:245-203
- Diaz RJ** (2001) Overview of Hypoxia around the World. *Journal of Environmental Quality* 30:275-281
- Dickson R, Yashayaev I, Meincke J, Turrell B, Dye S, Holfort J** (2002) Rapid freshening of the deep North Atlantic Ocean over the past four decades. *Nature* 416:832-837

- Dickson RR, Meincke J, Malmberg S-A, Lee AJ** (1988) The "Great Salinity Anomaly" in the northern North Atlantic, 1968-1982. *Progress in Oceanography* 20:103-151
- Dickson RR, Turrell WR** (2000) The NAO: The dominant atmospheric process affecting oceanic variability in home, middle and distant waters of European Atlantic salmon. In: Mills D (ed) *The ocean life of Atlantic salmon environmental and biological factors influencing survival*. Fishing News Books, Bodmin, pp. 92-115
- Dobson AP, Bradshaw AD, Baker AJM** (1997) Hopes for the future: Restoration ecology and conservation biology. *Science* 277:515-522
- Dolédec S, Chessel D** (1994) Co-inertia analysis: An alternative method for studying species-environment relationships. *Freshwater Biology* 31:277-294
- Donner SD, Coe MT, Lenters JD, Twine TE, Foley JA** (2002) Modeling the impact of hydrological changes on nitrate transport in the Mississippi River Basin from 1955 to 1994. *Global Biogeochemical Cycles* 16:1043
- Drinkwater KF, Belgrano A, Borja A, Conversi A, Edwards M, Greene C, Ottersen G, Pershing A, Walker H** (2003) The response of marine ecosystems to climatic variability associated with the North Atlantic Oscillation. In: Hurrell JW, Kushnir Y, Ottersen G, Visbeck M (eds) *The North Atlantic Oscillation: Climate significance and environmental impact*. American Geophysical Union 134:211-234
- 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 (eds), France, 160 pp
- Dziok F, Henle K, Foeckler F, Follner K, Scholz M** (2006) Biological indicator systems in Floodplains - a review. *International Review of Hydrobiology* 91:271-291

E

- Edwards M, John AWG, Johns DG, Reid PC** (2001) Case history and persistence of the non-indigenous diatom *Coscinodiscus wailesii* in the north-east Atlantic. *Journal of Marine Biology Association of the United Kingdom* 81:207-211

Edwards M, Richardson AJ (2004) Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature* 430:881-884

Elmore KL, Richman MB (2001) Euclidean distance as a similarity metric for principal component analysis. *Monthly Weather Review* 129:540-549

Enfield DB, Mestas-Nuñez AM, Trimble PJ (2001) The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophysical Research Letters* 28:2077-2080

F

Fernandez de Puelles ML, Valencia J, Vicente L (2004) Zooplankton variability and climatic anomalies from 1994 to 2001 in the Balearic Sea (Western Mediterranean). *ICES Journal of Marine Science* 61:492-500

Font J, Salat J, Tintoré J (1988) Permanent features of the circulation in the Catalan Sea. *Oceanologica Acta* 9:51-57

Fourth Progress Report (1995) Fourth International conference on the Protection of the North Sea, Esbjerg, Denmark, 8-9 June 1995. Ministry of the Environment and Energy, Danish Environmental Protection Agency, Strandgade 29, DK-1401 Copenhagen, Denmark

Frank KT, Petrie B, Choi JS, Leggett WC (2005) Trophic cascades in a formerly cod-dominated ecosystem. *Science* 308:1621-1623

Fromentin J-M (1995) Evolution à long-terme de communautés zooplanctoniques et macrozoobenthiques. Relation avec les changements climatiques. PhD. Thesis, University of Paris 6, France

Fromentin J-M, Planque B (1996) *Calanus* and environment in the eastern North Atlantic. II. Influence of the North Atlantic Oscillation on *C. finmarchicus* and *C. helgolandicus*. *Marine Ecology Progress Series* 134:111-118

Frontier S, Pichot-Viale D, Leprêtre A, Davoult D, Luczak C (2008) Ecosystèmes. Structure, fonctionnement et évolution. Dunod (eds), Paris

G

- Gaedke U, Ollinger D, Bauerle E, Straile D** (1998) The impact of the interannual variability in hydrodynamic conditions on the plankton development in Lake Constance in spring and summer. *Advances in Limnology* 53:565-585
- Galloway JN, Schlesinger WH, Levy H, II, Michaels A, Schnoor JL** (1995) Nitrogen fixation: Anthropogenic enhancement-environmental response. *Global Biogeochemical Cycles* 9:235-252
- Garcia HE, Locarnini RA, Boyer TP, Antonov JI** (2006a) In: Levitus S (ed) *World Ocean Atlas 2005*, volume 3: Dissolved oxygen, apparent oxygen utilization, and oxygen saturation. Washington, DC: NOAA Atlas NESDIS 63, US Government Printing Office, 342pp
- Garcia HE, Locarnini RA, Boyer TP, Antonov JI** (2006b) In: Levitus S (ed) *World Ocean Atlas 2005*, Volume 4: Nutrients (phosphate, nitrate, silicate). Washington, DC: NOAA Atlas NESDIS 64, US Government Printing Office, 396pp
- Garcia N, Raimbault P, Gouze E, Sandroni V** (2006) Fixation de diazote et production primaire en Méditerranée occidentale. *Comptes Rendus Biologies* 329:742-750
- García P, Santín C, Colubi A, Gutiérrez LM** (2010) Nutrient and oxygenation conditions in transitional and coastal waters: Proposing metrics for status assessment. *Ecological Indicators*, 10:1184-1192
- Gattuso J-P** (2007) Ocean acidification. In: J. CC (ed) *Encyclopedia of Earth*. Environmental information coalition, National Council for Science and the Environment, Washington, DC
- 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
- Gergel SE, Turner MG, Miller JR, Melack JM, Stanley EH** (2002) Landscape indicators of human impacts to riverine systems. *Aquatic Sciences - Research Across Boundaries* 64:118-128
- Ghil M** (2002) Natural Climate Variability. In: Munn T, Perry J (eds) *Encyclopedia of Global Environmental Change*, Vol. 1. John Wiley & Sons, New York, pp. 544-549
- Goberville E, Beaugrand G, Sautour B, Tréguer P** (submitted) Climate modulation of the anthropogenic fertilisation

Goberville E, Beaugrand G, Sautour B, Tréguer P and SOMLIT Team (2010) Climate-driven changes in coastal marine systems of Western Europe. *Marine Ecology Progress Series* 408:129-147

Graham RW, Grimm EC (1990) Effects of global climate change on the patterns of terrestrial biological communities. *Trends in Ecology & Evolution* 5:289-292

Gray JS, Wu RS, Or YY (2002) Effects of hypoxia and organic enrichment on the coastal marine environment. *Marine Ecology Progress Series* 238:249-279

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

H

Haigh JD (1996) The Impact of Solar Variability on Climate. *Science* 272:981-984

Halpern BS, Selkoe KA, Micheli F, Kappel CV (2007) Evaluating and ranking the vulnerability of global marine ecosystems to anthropogenic threats. *Conservation Biology* 21:1301-1315

Halpern BS, Walbridge S, Selkoe KA, Kappel CV, Micheli F, D'Agrosa C, Bruno JF, Casey KS, Ebert C, Fox HE, Fujita R, Heinemann D, Lenihan HS, Madin EMP, Perry MT, Selig ER, Spalding M, Steneck R, Watson R (2008) A global map of human impact on marine ecosystems. *Science* 319:948-952

Hare SR, Mantua NJ (2000) Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. *Progress in Oceanography* 47:103-145

Harley CDG, Hughes AR, Hultgren KM, Miner BG, Sorte CJB, Thornber CS, Rodriguez LF, Tomanek L, Williams SL (2006) The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology letters* 9:228-241

Harvell CD, Mitchell CE, Ward JR, Altizer S, Dobson AP, Ostfeld RS, Samuel MD (2002) Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota. *Science* 296:2158-2162

Hawkins SJ, Southward AJ, Genner MJ (2003) Detection of environmental change in a marine ecosystem-evidence from the western English Channel. *Science of the Total Environment* 310:245-256

- Hays GC, Richardson AJ, Robinson C** (2005) Climate change and marine plankton. *Trends in Ecology & Evolution* 20:337-344
- Helaouët P, Beaugrand G** (2007) Macroecology of *Calanus finmarchicus* and *C.helgolandicus* in the North Atlantic Ocean and adjacent seas. *Marine Ecology Progress Series* 345:147-165
- Henderson-Sellers A, Robinson PJ** (1986) *Contemporary climatology*. John Wiley & Sons, New-York, N.Y
- Hochberg Y** (1988) A sharper Bonferroni procedure for multiple tests of significance. *Biometrika* 75:800-802
- Hohn ME** (1993) Principal component analysis of three-way data. In: Davis JC, Hertzfeld UC (eds) *Computers in geology: 25 years of progress*. Oxford University Press, New York, NY, pp. 181-194
- Holm S** (1979) A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*: 65-70
- Hopkins TS** (1985) Physics of the sea. In: Margalef R (ed) *Key environments: Western Mediterranean*. Pergamon Press, New York, NY, pp. 100-125
- Houdart M** (2003) *Entre terre et mer, les 250 ans du littoral*. Ifremer (eds), France
- Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, Van der Linden PJ, Dai X, Maskell K, Johnson CA** (2001) IPCC, 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom, New York, USA, Cambridge University Press 881:9
- Howarth RW** (1988) Nutrient limitation of net primary production in marine ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 19:89-110
- Hughes RM** (1995) Defining acceptable biological status by comparing with reference conditions. In: Davis W, Simon T (eds) *Biological assessment and criteria: Tools for water resource planning and decision making* CRC Press., Lewis, Boca Raton, Florida, USA, pp.31-47
- Hughes TP** (1994) Catastrophes, phase shifts, and large-scale degradation of a Caribbean coral reef. *Science*, 265:1547-1551
- Huntington TG** (2006) Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology* 319:83-95

Hurrell JW (1995a) Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitations. *Science* 269:676-679

Hurrell JW (1995b) Transient eddy forcing of the rotational flow during Northern winter. *Journal of the Atmospheric Sciences* 52:2286-2301

I

Ibàñez C, Prat N, Canicio A (1996) Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro River and its estuary. *Regulated Rivers: Research and Management* 12:51-62

Ibàñez F (1981) Immediate detection of heterogeneities in continuous multivariate, oceanographic recordings. Application to time series analysis of changes in the bay of Villefranche sur Mer. *Limnology and Oceanography* 26:336-349

Ibàñez F, Beaugrand G (2008) Monitoring marine plankton ecosystems: Identification of the most relevant indicators of the state of an ecosystem. *Journal of Marine Systems* 73:138-154

Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research (IMBER) (2005). Available via: <http://www.imber.info/>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007) Fourth Assessment Report. *Climate Change 2007: "The Physical Science Basis"*. Cambridge University Press, Cambridge

Irigoién X, Castel J (1997) Light limitation and distribution of chlorophyll pigments in a highly turbid estuary: The Gironde (SW France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 44:507-517

J

Jackson S, Davis W (1994) Meeting the goal of biological integrity in water-resource programs in the US Environmental Protection Agency. *Journal of the North American Benthological Society* 13:592-597

Jennings S, Kaiser MJ (1998) The effects of fishing on marine ecosystems. *Advances in Marine Biology* 34:201-352

Jennings S, Kaiser MJ, Reynolds JD (2001) *Marine fisheries ecology*. Blackwell Scientific Publishers, Oxford

Jickells TD (1998) Nutrient biogeochemistry of the coastal zone. *Science* 281:217-222

Joliffe I (1986) *Principal component analysis*. Springer-Verlag New York, NY

Justic D, Rabalais N, Turner RE (1997) Impacts of climate change on net productivity of coastal waters: Implications for carbon budgets and hypoxia. *Climate Research* 8:225-237

Justic D, Rabalais NN, Turner RE (1995) Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication. *Marine Pollution Bulletin* 30:41-46

K

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Leetmaa A, Reynolds R, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo KC, Ropelewski C, Wang J, Jenne R, Joseph D (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77:437-471

Karl DM, Laws EA, Morris P, Williams PJJ, Emerson S (2003) Metabolic balance of the open sea. *Nature* 426:32

Karl TR, Trenberth KE (2003) Modern Global Climate Change. *Science* 302:1719-1723

Kaufmann MR (1998) Forest reference conditions for ecosystem management in the Sacramento Mountains, New Mexico. Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado, USA

Kaufmann MR, Graham RT, Boyce DA, Moir WH, Perry L, Reynolds RT, Bassett RL, Mehlhop P, Edminster CB, Block WM (1994) An ecological basis for ecosystem management. U.S. Forest Service General Technical Report RM-GTR-246, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado, USA

Keenlyside NS, Latif M, Jungclauss J, Kornbluh L, Roeckner E (2008) Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector. *Nature* 453:84-88

- Kerhervé P, Minagawa M, Heussner S, Monaco A** (2001) Stable isotopes ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) in settling organic matter of the northwestern Mediterranean Sea: Biogeochemical implications. *Oceanologica Acta* 24:77-85
- Kirby R, Beaugrand G, Lindley JA** (2009) Synergistic effects of climate and fishing in a marine ecosystem. *Ecosystems* 12:548-561
- Kirby RR, Beaugrand G** (2009) Trophic amplification of climate warming. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 276:4095-4103
- Kistler R, Kalnay E, Collins W, Saha S, White G, Woollen J, Chelliah M, Ebisuzaki W, Kanamitsu M, Kousky V, van den Dool H, Jenne R, Fiorino M** (2000) The NCEP–NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 82
- Knap A, Michaels A, Close A, Ducklow H, Dickson A** (1996) Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) core measurements. JGOFS Report No. 19. Reprint of the IOC Manuals and Guides No. 29, 1994. UNESCO, Paris, France
- Kremer HH, Le Tissier MDA, Burbridge PR, Talaue-McManus L, Rabalais NN, Parslow J, Crossland CJ, Young B** (2005) Land–Ocean interactions in the coastal zone, science plan and implementation strategy. *International Geosphere-Biosphere Programme Report 51 / International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change Report 18*. IGBP Secretariat, Stockholm
- Krom MD, Kress N, Brenner S, Gordon LI** (1991) Phosphorus limitation of primary productivity in the eastern Mediterranean Sea. *Limnology and oceanography* 36:424-432
- Kroncke I, Dippner JW, Heyen H, Zeiss B** (1998) Long-term changes in macrofaunal communities off Norderney (East Frisia, Germany) in relation to climate variability. *Marine Ecology Progress Series* 167:25-36
- Kroonenberg PM** (1989) The analysis of multiple tables in factorial ecology. III. Three-mode principal component analysis: "analyse triadique complète". *Acta Oecologica, Oecologia Generalis* 10:245-256

L

- Labat D, Goddérés Y, Probst JL, Guyot JL** (2004) Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Advances in Water Resources* 27:631-642
- Lacaze JC** (1996) L'eutrophisation des eaux marines et continentales: Causes, manifestations, conséquences et moyens de lutte, Ellipse (eds), Paris
- Lam CWY, Ho KC** (1989) Red tides in Tolo Harbour, Hong Kong. In: Okaichi T, Anderson DM, Nemoto T (eds) *Red Tides: Biology Environmental Science and Technology*, p 49-52
- Le Pape O, Del Amo Y, Menesguen A, Aminot A, Quéguiner B, Tréguer P** (1996) Resistance of a coastal ecosystem to increasing eutrophic conditions: The Bay of Brest (France), a semi-enclosed zone of Western Europe. *Continental Shelf Research* 16:1885-1907
- Le Roy Ladurie E** (1983) *Histoire du climat depuis l'An mil*. Flammarion, Paris
- Le Tissier MDA, Buddemeier R, Parslow J, Swaney DP, Crossland CJ, Smith SV, Whyte HAY, Dennison WC, Hills JM, Kremer HH** (2006) The role of the coastal ocean in the disturbed and undisturbed nutrient and carbon cycles – a management perspective. *Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ)*, Geesthacht
- Lean J, Beer J, Bradley R** (1995) Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. *Geophysical Research Letters* 22:3195-3198
- Lean J, Rind D** (1998) Climate forcing by changing solar radiation. *Journal of Climate* 11:3069-3094
- Lefèvre D, Minas HJ, Minas M, Robinson C, Le B. Williams PJ, Woodward EMS** (1997) Review of gross community production, primary production, net community production and dark community respiration in the Gulf of Lions. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 44:801-819
- Legendre L, Demers S** (1984) Towards dynamic biological oceanography and limnology. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 41:2-19
- Legendre P, Borcard D** (2006) Analyse statistique des données spatiales. In: *Economics B* (ed) *Analyse statistique des données spatiales*. Editions TECHNIP, 468 pp
- Legendre L, Legendre P** (1998) *Numerical Ecology*, second edition (English). Elsevier, Amsterdam, 853 pp

- Lehodey P, Alheit J, Barange M, Baumgartner T, Beaugrand G, Drinkwater KF, Fromentin JM, Hare SR, Ottersen G, Perry RI, Roy C, van der Lingen CD, Werner F** (2006) Climate variability, fish and fisheries. *Journal of Climate* 19:5009-5030
- Lenoir S, Beaugrand G, Lécuyer E** (in press) Modelled spatial distribution of marine fish and projected modifications in the North Atlantic Ocean. *Global Change Biology*
- Levitus S, Antonov J, Boyer T** (2005) Warming of the world ocean, 1955-2003. *Geophysical Research Letters* 32:L02604
- Levitus S, Antonov JI, Wang J, Delworth TL, Dixon KW, Broccoli AI** (2001) Anthropogenic warming of Earth's climate system. *Science* 292:267-270
- Lewis DM, Bala SI** (2006) Plankton predation rates in turbulence: A study of the limitations imposed on a predator with a non-spherical field of sensory perception. *Journal of Theoretical Biology* 242:44-61
- Lewis DM, Pedley TJ** (2001) The influence of turbulence on plankton predation strategies. *Journal of Theoretical Biology* 210:347-365
- Lindahl O, Belgrano A, Davidsson L, Hernroth B** (1998) Primary production, climatic oscillations, and physico-chemical processes: The Gullmar Fjord time-series data set (1985-1996). *ICES Journal of Marine Science* 55:723-729
- Livingston RJ, Niu X, Lewis Iii FG, Woodsum GC** (1997) Freshwater input to a gulf estuary: Long-term control of trophic organization. *Ecological Applications* 7:277-299
- Locarnini RA, Mishonov AV, Antonov JI, Boyer TP, Garcia HE** (2006) In: Levitus S (ed) *World Ocean Atlas 2005, Volume 1: Temperature*. Washington, DC: NOAA Atlas NESDIS 61, US Government Printing Office, 182 pp
- Lotze HK, Worm B** (2002) Complex interactions of climatic and ecological controls on macroalgal recruitment. *Limnology and Oceanography* 47:1734-1741
- Luck GW, Daily GC, Ehrlich PR** (2003) Population diversity and ecosystem services. *Trends in Ecology & Evolution* 18:331-336
- 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? *Progress in Oceanography* 80:199-217

M

- Mahalanobis PC** (1936) On the generalized distance in statistics. *Proceedings National Institute of Sciences of India* 2:49-55
- Mann ME** (2002) Climate reconstruction: The value of multiple proxies. *Science* 297:1481-1482
- Mantoura RFC, Martin JM, Wollast R** (1990) Ocean margin processes in global change. Report of the Dahlem Workshop on Ocean Margin Processes in Global Change, Berlin, John Wiley & Sons
- Marshall J, Kushnir Y, Battisti D, Chang P, Czaja A, Dickson R, Hurrell J, McCartney M, Saravanan R, Visbeck M** (2001) North Atlantic climate variability: Phenomena, impacts and mechanisms. *International Journal of Climatology* 21:1863-1898
- Martins I, Pardal MA, Lilleb, oslash, A.I, Flindt MR, Marques JC** (2001) Hydrodynamics as a major factor controlling the occurrence of green macroalgal blooms in a eutrophic estuary: A case study on the influence of precipitation and river management. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 52:165-177
- Marty J-C, Chiavérini J** (2002) Seasonal and interannual variations in phytoplankton production at DYFAMED time-series station, northwestern Mediterranean Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 49:2017-2030
- Marty J-C, Chiavérini J, Pizay M-D, Avril B** (2002) Seasonal and interannual dynamics of nutrients and phytoplankton pigments in the western Mediterranean Sea at the DYFAMED time-series station (1991-1999). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 49:1965-1985
- McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ, White KS** (2001) *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- McCune B, Mefford MJ** (1999) *PCORD: Multivariate Analysis of Ecological Data, Version 4 for Windows*. MjM Software Design, Gleneden Beach, OR
- McQuatters-Gollop A, Gilbert AJ, Mee LD, Vermaat JE, Artioli Y, Humborg C, Wulff F** (2009) How well do ecosystem indicators communicate the effects of anthropogenic eutrophication? *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 82:583-596

- McQuatters-Gollop A, Raitsos DE, Edwards M, Pradhan Y, Mee LD, Lavender SJ, Attrill MJ** (2007) A long-term chlorophyll dataset reveals regime shift in North Sea phytoplankton biomass unconnected to nutrient levels. *Limnology and Oceanography* 52:635-648
- Ménesguen A** (2003) Les marées vertes en Bretagne, la responsabilité du nitrate, Ifremer (eds), France
- Meybeck M** (1982) Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by World Rivers. *American Journal of Science*, 282:401-450
- Mielke PW, Berry KJ** (1982) An extended class of permutation techniques for matched pairs. *Communications in Statistics-Theory and Methods* 11:1197-1207
- Mielke PW, Berry KJ, Brier GW** (1981) Application of Multi-Response Permutation Procedures for examining Seasonal changes in monthly mean Sea-Level pressure patterns. *Monthly Weather Review* 109:120-126
- Milliman JD, Farnsworth KL, Jones PD, Xu KH, Smith LC** (2008) Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951–2000. *Global and Planetary Change* 62:187-194
- Millot C** (2005) Circulation in the Mediterranean Sea: Evidences, debates and unanswered questions. *Scientia Marina* 69:5-21
- Montgomery DC** (1991) Introduction to statistical quality control. John Wiley & Sons, New York
- Moore MM, Covington WW, Fulé PZ** (1999) Reference conditions and ecological restoration: A southwestern ponderosa pine perspective. *Ecological Applications* 9:1266-1277
- Mozin DJ, Biber JT, Hölder M** (1828) Nouveau dictionnaire complet à l'usage des Allemands et des Français. JG Cotta, Cotta, Stuttgart, Tubingen
- Murakawa M** (1987) Marine pollution and countermeasures in Japan. *Oceanus* 30, 55-60
- Muylaert K, Sanchez-Pérez JM, Teissier S, Sauvage S, Dauta A, Vervier P** (2009) Eutrophication and its effect on dissolved Si concentrations in the Garonne River (France). *Journal of Limnology* 68:368-374
- Mysterud A, Stenseth NC, Yoccoz NG, Langvatn R, Steinhelm G** (2001) Nonlinear effects of large-scale climatic variability on wild and domestic herbivores. *Nature* 410:1096-1099

N

- Najjar RG, Walker HA, Anderson PJ, Barron EJ, Bord RJ, Gibson JR, Kennedy VS, Knight CG, Megonigal JP, O'Connor RE, Polsky CD, Psuty NP, Richards BA, Sorenson LG, Steele EM, Swanson RS** (2000) The potential impacts of climate change on the mid-Atlantic coastal region. *Climate Research* 14:219-233
- Nakanishi H, Ukita M, Sekine M, Fukagawa M, Murakami S** (1992) Eutrophication control in the Seto Inland sea. In: Vollandweider RA, Marchetti R, Viviani R (eds) *Marine Coastal Eutrophication*, pp. 1239-1256
- New M, Todd M, Mike H, Phil J** (2001) Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *International Journal of Climatology* 21:1889-1922
- Nielsen KJ** (2003) Nutrient loading and consumers: Agents of change in open-coast macrophyte assemblages. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100:7660-7665
- Niemeijer D** (2002) Developing indicators for environmental policy: Data-driven and theory-driven approaches examined by example. *Environmental Science & Policy* 5:91-103
- Niemeijer D, de Groot RS** (2008) A conceptual framework for selecting environmental indicator sets. *Ecological Indicators* 8:14-25
- Nixon S** (1995) Coastal marine eutrophication: A definition, social causes, and future concerns. *Ophelia* 41:199-219
- Norse EA** (1993) *Global marine biological diversity. A strategy for building conservation into decision making.* Island Press, Washington, DC
- North Sea Task Force** (1993) *North Sea quality status report 1993.* Oslo and Paris Commissions, London and Olsen & Olsen, Fredensborg

O

- Ohman MD, Hirche H-J** (2001) Density-dependent mortality in an oceanic copepod population. *Nature* 412:638-641
- Omori M, Norman CP** (1998) Anthropogenic short-term effects on distribution patterns and food webs of pelagic organisms. Proc 2nd Int Conf on Pelagic Biogeography IcoPBII. Final report of SCOR/IOC Working Group 93 Pelagic Biogeography, Noordwijkerhout, The Netherlands, 9 Jul-14 Jul 1995. Workshop report no. 142, pp. 279-284. Intergovernmental Oceanographic Commission, Paris
- Omori M, Van Der Spoel S, Norman CP** (1994) Impact of human activities on pelagic biogeography. *Progress in Oceanography* 34:211-219
- Orr JC, Fabry VJ, Aumont O, Bopp L, Doney SC, Feely RA, Gnanadesikan A, Gruber N, Ishida A, Joos F, Key RM, Lindsay K, Maier-Reimer E, Matear R, Monfray P, Mouchet A, Najjar RG, Plattner G-K, Rodgers KB, Sabine CL, Sarmiento JL, Schlitzer R, Slater RD, Totterdell IJ, Weirig M-F, Yamanaka Y, Yool A** (2005) Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437:681-686

P

- Paerl HW** (2006) Assessing and managing nutrient-enhanced eutrophication in estuarine and coastal waters: Interactive effects of human and climatic perturbations. *Ecological Engineering* 26:40-54
- Paillard D** (2001) Glacial hiccups. *Nature* 409:147-148
- Le Pape O, Menesguen A** (1997) Hydrodynamic prevention of eutrophication in the Bay of Brest (France), a modelling approach. *Journal of Marine Systems* 12:171-186
- Parmesan C, Yohe G** (2003) A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421:37-42

- Pauly D** (2003) Ecosystem impacts of the world's marine fisheries. *Global Change NewsLetter* 55:21-23
- Pauly D, Christensen V** (1995) Primary production required to sustain global fisheries. *Nature* 374:255-257
- Pauly D, Christensen V, Dalsgaard J, Froese R, Torres TJ** (1998) Fishing down marine food webs. *Science* 279:860-863
- Peltier WR, Tushingham AM** (1989) Global sea level rise and the greenhouse effect: Might they be connected? *Science* 244:806-810
- Peperzak L** (2003) Climate change and harmful algal blooms in the North Sea. *Acta Oecologica* 24:139-144
- Pereira HM, Cooper DH** (2006) Towards the global monitoring of biodiversity change. *Trends in Ecology & Evolution* 21:123-129
- Pérès JM** (1961) *Océanographie biologique et biologie marine*. Presses universitaires de France
- Pernetta JC, Milliman JD** (1995) Land-ocean interactions in the coastal zone implementation plan. *IGBP Report* 33:1-215
- Pilmer I** (2009) *Heaven and Earth: Global Warming, the missing science*. Neilsen Bookscan
- Planque B, Reid PC** (1998) Predicting *Calanus finmarchicus* abundance from a climatic signal. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 78:1015-1018
- Pyper BJ, Peterman RM** (1998) Comparison of methods to account for autocorrelation analyses of fish data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55:2127-2140

R

- Radach G** (1998) Quantification of long-term changes in the German Bight using an ecological development index. *ICES Journal of Marine Science* 55:587-599
- Ragueneau O, Quéguiner B, Tréguer P** (1996) Contrast in biological responses to tidally-induced vertical mixing for two macrotidal ecosystems of Western Europe. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 42:645-665

- Rahmstorf S** (1995) Bifurcations of the Atlantic thermohaline circulation in response to changes in the hydrological cycle. *Nature* 378:145-149
- Raymo ME, Ruddiman WF** (1992) Tectonic forcing of late Cenozoic climate. *Nature* 359:117-122
- Redfield AC** (1934) On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton. In: Daniel RJ (ed) James Johnstone Memorial Volume. University Press of Liverpool, Liverpool, pp. 177-192
- Reid PC, Borges M, Svenden E** (2001) A regime shift in the North Sea circa 1988 linked to changes in the North Sea horse mackerel fishery. *Fisheries Research* 50:163-171
- Reid PC, Colebrook JM, Matthews JBL, Aiken J, Barnard R, Batten SD, Beaugrand G, Buckland C, Edwards M, Finlayson J, Gregory L, Halliday N, John AWG, Johns D, Johnson AD, Jonas T, Lindley JA, Nyman J, Pritchard P, Richardson AJ, Saxby RE, Sidey J, Smith MA, Stevens DP, Tranter P, Walne A, Wootton M, Wotton COM, Wright JC** (2003) The Continuous Plankton Recorder: concepts and history, from plankton indicator to undulating recorders. *Progress in Oceanography* 58:117-173
- Reid PC, Edwards M, Beaugrand G, Skogen M, Stevens D** (2003) Periodic changes in the zooplankton of the North Sea during the twentieth century linked to oceanic inflow. *Fisheries Oceanography* 12:260-269
- Reynolds RW, Smith TM** (1994) Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. *Journal of Climate* 7:929-948
- Richardson AJ, Poloczanska ES** (2008) Under-resourced, under threat. *Science* 320:1294-1295
- Richardson AJ, Schoeman DS** (2004) Climate impact on plankton ecosystems in the northeast Atlantic. *Science* 305:1609-1612
- Richardson K, Blaxter JHS, Southward AJ** (1997) Harmful or exceptional phytoplankton blooms in the marine ecosystem. *Advances in Marine Biology* 31:301-385
- Rind D** (2002) The Sun's role in climate variations. *Science* 296:673-677
- Rippeth TP, Jones KJ** (1997) The seasonal cycle of nitrate in the Clyde Sea. *Journal of Marine Systems* 12:299-310
- Rogers JC** (1997) North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic Oscillation and climate variability of northern Europe. *Journal of Climate* 10:1635-1647

Rombouts I, Beaugrand G, Ibanez F, Gasparini S, Chiba S, Legendre L (2009) Global latitudinal variations in marine copepod diversity and environmental factors. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 276:3053-3062

S

Sabine CL, Feely RA, Gruber N, Key RM, Lee K, Bullister JL, Wanninkhof R, Wong CS, Wallace DWR, Tilbrook B, Millero FJ, Peng T-H, Kozyr A, Ono T, Rios AF (2004) The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science* 305:367-371

Sarmiento JL, Gruber N (2006) *Ocean biogeochemical dynamics*. Princeton University Press, Princeton and Oxford

Sarmiento JL, Slater R, Barber R, Bopp L, Doney SC, Hirst AC, Kleypas J, Matear R, Mikolajewicz U, Monfray P, Soldatov V, Spall SA, Stouffer R (2004) Response of ocean ecosystems to climate warming. *Global Biogeochemical Cycles* 18

Scavia D, Field JC, Boesch DF, Buddemeier RW, Burkett V, Cayan DR, Fogarty M, Harwell M, Howarth RW, Mason C, Reed DJ, Royer TC, Sallenger AH, Titus JG (2002) Climate Change Impacts on U.S. Coastal and Marine Ecosystems. *Estuaries* 25:149-164

Scheffer M, Carpenter S, Foley JA, Folke C, Walker B (2001) Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* 413:591-596

Schlesinger WH (1991) *Biogeochemistry: An analysis of global change*. Academic Press, San Diego

Selman M, Greenhalgh S, Diaz R, Sugg Z (2008) Eutrophication and hypoxia in coastal areas: A global assessment of the state of knowledge. *Water Quality: Eutrophication and Hypoxia Policy Note Series No. 1*, World Resources Institute, Washington, DC

Sherman K, Duda AM (1999) An ecosystem approach to global assessment and management of coastal waters. *Marine Ecology Progress Series* 190:271-287

Small C, Nicholls RJ (2003) A global analysis of human settlement in coastal zones. *Journal of Coastal Research* 19:584-599

- Smith SV, Swaney DP, Talaue-McManus L, Bartley JD, Sandhei PT, McLaughlin CJ, Dupra VC, Crossland CJ, Buddemeier RW, Maxwell BA, Wulff F** (2003) Humans, hydrology, and the distribution of inorganic nutrient loading to the ocean. *Bioscience* 53:235-245
- Smith VH, Tilman GD, Nekola JC** (1999) Eutrophication: Impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution* 100:179-196
- Sokal RR, Rohlf FJ** (1995) *Biometry. The principles and practice of statistics in biological research.* 3rd edn. Freeman WH and Company, New York, 887 pp
- Sournia A, Brylinski J-M, Dallot S, Le Corre P, Leveau M, Prieur L, Froget C** (1990) Fronts hydrologiques au large des côtes françaises: Les sites-ateliers du programme Frontal. *Oceanologica Acta* 13:413-438
- Southward AJ** (1995) The importance of long time-series in understanding the variability of natural systems. *Helgoland Marine Research* 49:329-333
- Southward AJ, Hawkins DJ, Burrows MT** (1995) Seventy years' observations of changes in distribution and abundance of zooplankton and intertidal organisms in the Western English Channel in relation to rising sea temperature. *Journal of Thermal Biology* 20:127-155
- Steedman RJ** (1994) Ecosystem health as a management goal. *Journal of the North American Benthological Society* 13:605-610
- Steneck RS** (1998) Human influences on coastal ecosystems: Does overfishing create trophic cascades? *Trends in Ecology & Evolution* 13:429-430
- Stoddard JL, Larsen DP, Hawkins CP, Johnson RK, Norris RH** (2006) Setting expectations for the ecological condition of streams: The concept of reference condition. *Ecological Applications* 16:1267-1276
- Strickland JDH, Parsons TR** (1972) *A practical handbook of seawater analysis*, 2nd edition, Vol 167. Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada, Ottawa
- Sverdrup HU** (1953) On conditions for the vernal blooming of phytoplankton. *ICES Journal of Marine Science* 18:287-295
- Swanson FJ, Jones JA, Wallin DO, Cissel JH** (1994) Natural variability-implications for ecosystem management, pp. 80-94. In: Jensen ME, Bourgeron PS (eds) *Ecosystem management: Principles and applications*, Vol. II. Eastside forest ecosystem health assessment. U.S. Forest Service, General Technical Report PNW-GTR-318, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon, USA

T

- Talagrand O** (1997) Assimilation of observations: An introduction. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 75:191-209
- Taylor AH, Allen JI, Clark PA** (2002) Extraction of a weak climatic signal by an ecosystem. *Nature* 416:629-632
- Thingstad TF, Zweifel UL, Rassoulzadegan F** (1998) P limitation of heterotrophic bacteria and phytoplankton in the northwest Mediterranean. *Limnology and Oceanography* 43:88-94
- Tukey JW** (1977) *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley Series in Behavioural Science: Quantitative Methods. Reading, Massachusetts

V

- Vafeidis AT, Nicholls RJ, McFadden L, Hinkel J, Grasshoff PS** (2004) Developing a global database for coastal vulnerability analysis: Design issues and challenges. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34:801-805
- Valiela I** (1995) *Marine Ecological Processes*. 2nd edition. New York (USA): Springer-Verlag, 546 pp
- Van Andel TH** (1981) *Science at sea: Tales of an old ocean*. W.H. Freeman and Co, San Francisco, 186 pp
- Vander Schaaf D, Wilhere G, Ferdaña Z, Popper K, Schindel M, Skidmore P, Rolph D, Iachetti P, Kittel G, Crawford R, Pickering D, Christy J** (2006) A conservation assessment of the Pacific Northwest coast ecoregion, the nature conservancy of Canada, Victoria, BC, and Washington Department of Fish and Wildlife, Olympia, WA, 2006
- Vaquer-Sunyer R, Duarte CM** (2008) Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Science* 105:15452–15457
- Vermaat JE, McQuatters-Gollop A, Eleveld MA, Gilbert AJ** (2008) Past, present and future nutrient loads of the North Sea: Causes and consequences. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 80:53-59

Vitousek PM, Aber JD, Howarth RW, Likens GE, Matson PA, Schindler DW, Schlesinger WH, Tilman DG (1997a) Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences. *Ecological Applications* 7:737-750

Vitousek PM, Mooney HA, Lubchenco J, Melillo JM (1997b) Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277:494-499

Vorosmarty CJ, Sahagian D (2000) Anthropocentric disturbance of the terrestrial water cycle. *Bioscience* 50:753-765

W

Wafar MVM (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 AW (1993) A modelling study of nitrogen cycling in the Firth of Clyde. PhD. Thesis, University of Wales

Warwick RM, Ashman CM, Brown AR, Clarke KR, Dowell B, Hart B, Lewis RE, Shillabeer N, Somerfield PJ, Tapp JF (2002) Inter-annual changes in the biodiversity and community structure of the macrobenthos in Tees Bay and the Tees estuary, UK, associated with local and regional environmental events. *Marine Ecology Progress Series* 234:1-13

Winder M, Schindler DE (2004) Climate change uncouples trophic interactions in an aquatic ecosystem. *Ecology* 85:2100-2106

Wright SP (1992) Adjusted P-values for simultaneous inference. *Biometrics*, pp. 1005-1013

Y

Yoccoz NG, Nichols JD, Boulinier T (2001) Monitoring of biological diversity in space and time. *Trends in Ecology & Evolution* 16:446-453

Z

Zaldívar JM, Cardoso AC, Viaroli P, Newton A, de Wit R, Ibañez C, Reizopoulou S, Somma F, Razinkovas A, Basset A (2008) Eutrophication in transitional waters: An overview. *Transitional Waters Monographs* 2

Zonneveld IS (1983) Principles of bio-indication. *Environmental Monitoring and Assessment* 3:207-217



Annexes

Annexe I :

Conséquences des changements climatiques en milieu océanique

Conséquences des changements climatiques en milieu océanique

Grégory Beaugrand, Eric Goberville

(*Vertigo*, 2010)

Résumé:

Le changement climatique a une influence grandissante sur l'ensemble des composantes du système terre. Cette contribution présente l'évolution des températures globales and montre que le changement climatique affecte les systèmes biologiques et écologiques de la planète, en particulier ceux de l'Océan Atlantique Nord et de ses mers adjacentes. Les changements biologiques que l'on peut attribuer au changement climatique affectent le phytoplancton, le zooplancton, les poissons et modifient la dominance de nombreuses espèces ainsi que la structure, le fonctionnement et la diversité des écosystèmes. Les changements sont aussi perçus sur la biogéographie et la phénologie des espèces et ont impliqué dans certaines régions des changements écosystémiques abrupts appelés aussi changement de régime. Ces altérations reflètent un ajustement des systèmes biologiques et écologiques face au réchauffement des températures. Les mécanismes impliqués sont complexes, présentant des points de bifurcation et variant dans le temps et l'espace. La sensibilité des organismes vis-à-vis du réchauffement est forte et de faibles fluctuations des températures peuvent avoir des effets prononcées sur les systèmes biologiques et écologiques. Il est urgent de placer ces systèmes sous surveillance et de développer des indicateurs couplés à des outils statistico-mathématiques adaptés afin de détecter, comprendre et anticiper les modifications des systèmes biologiques et écologiques face au changement climatique global.

Mots-clés: *réchauffement global, changement climatique, systèmes biologiques et écologiques, plancton, poissons, systèmes côtiers, acidification.*

Abstract:

Climate change is unambiguous and its effects are clearly detected in all functional units of the Earth System. This paper presents analyses of sea surface temperature changes and shows that climate change is affecting both biological and ecological systems of the world and most specifically the North Atlantic and its adjacent seas. Changes are seen from phytoplankton to zooplankton to fish and are modifying the dominance of species and the structure, the diversity and the functioning of marine ecosystems. Changes also range from biogeographical to phenological shifts and have involved in some regions of the Atlantic abrupt ecosystem shifts also called regime shift. These alterations reflect the response of ecosystems to a warmer temperature regime. Mechanisms are complex because they are nonlinear exhibiting tipping points and varying in space and time. Sensitivity of organisms to temperature changes is high, implicating that a small temperature modification can have sustained ecosystem effects. It is urgent to develop monitoring systems, indicators and both statistical and mathematical tools to detect, understand and anticipate the alterations of both biological and ecological systems that may be induced by global climate change.

Keywords: *global warming, climate change, biological and ecological systems, plankton, fish, coastal systems, acidification.*

Introduction

La pression exercée par l'homme est telle qu'elle a une influence prononcée et grandissante sur la planète depuis la révolution industrielle. Sur terre, la transformation, la fragmentation et la destruction des habitats sont responsables d'une érosion de la biodiversité mille fois supérieure au taux naturel d'extinction (Pimm et al. 1995). Le changement est global, influençant tous les compartiments ou éléments fonctionnels de l'écosphère. L'océan global, représentant près de 71% de la surface de la Terre, subit les effets de la pollution, de l'eutrophisation et de la surexploitation de ces ressources. La biodiversité marine que l'on croyait moins fragile, montre des signes d'érosion de plus en plus perceptibles. L'environnement marin a une place importante dans la société humaine. Plus de 50% de la population mondiale vit à moins de 60 km de la côte. L'environnement marin constitue la plus grande source de biodiversité sur la planète (Lasserre 1994) et les différents biomes marins produisent 35% de la production primaire globale (Constanza et al. 1997). De nombreuses activités humaines telles que la pêche, le tourisme, ou encore l'aquaculture dépendent de la biodiversité marine et de la bonne santé des mers et océans (Worm et al. 2006). L'invasion d'espèces exotiques est devenue la deuxième cause de perte de biodiversité. La Manche et la mer du Nord ne sont pas épargnées. L'introduction des deux crabes asiatiques *Hemigrapsus sanguineus* et *Hemigrapsus takanoi* menace le crabe vert *Carcinus maenas*, espèce autochtone des côtes européennes qui pourrait être menacée dans les sites colonisés par les deux espèces et où la densité de ces espèces introduites devient importante (du même ordre de grandeur que le long des côtes nord-est américaines chez *H. sanguineus* qui a colonisé 750 km de côtes du New Jersey au Maine; Dauvin 2009a, Dauvin 2009b).

L'atmosphère ne fait pas figure d'exception. Les activités humaines modifient sa composition chimique. Il est très probable, au sens communément admis par le groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat (Intergovernmental Panel on Climate Change 2007) que l'élévation globale des températures qui s'accélère depuis la fin des années 1970 soit le résultat de l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère tels que le dioxyde de carbone et le méthane. En sus des problèmes directs, reliés aux pollutions, à l'eutrophisation, à la surexploitation et à l'invasion d'espèces exotiques, l'augmentation de la concentration du dioxyde de carbone et de la température risque d'occasionner des modifications majeures de la biodiversité, de la structure et du fonctionnement des écosystèmes marins.

Le réchauffement climatique est détecté dans les nombreuses unités fonctionnelles du système Terre. C'est ainsi que la signature du réchauffement est identifiée dans l'océan, la cryosphère (c'est-à-dire la glace sous toutes ses formes incluant le pergélisol, un sol gelé depuis au moins deux ans) et la biosphère terrestre et aquatique. Les températures globales se sont élevées de 0.76°C entre les périodes 1850-1899 et 2001-2005 (Intergovernmental Panel on Climate Change 2007). Cette augmentation des températures a principalement concerné les océans qui ont absorbé 84% de la chaleur additionnée au système climatique pour une période couvrant les quatre dernières décennies (Barnett et al. 2005; Levitus et al. 2005; Levitus et al. 2001). Cette augmentation de la chaleur emmagasinée par l'océan a contribué par expansion thermique à hauteur de 25% depuis les années 1950s (Antonov et al. 2005). Le réchauffement, projeté par les modèles de circulation générale océan-atmosphère, varie entre 1.1 (Scenario B1, introduction rapide de technologies efficaces et propres) et 6.4°C (Scenario A1FI, consommation intensive de carbone fossile) pour la fin du siècle (Intergovernmental Panel on Climate Change 2007).

Les objectifs de cet article sont (1) de présenter succinctement les conséquences du réchauffement climatique pour l'hydrosphère océanique et (2) d'exposer les altérations occasionnées pour les systèmes biologiques marins d'une échelle spécifique à celle des écosystèmes.

Fluctuations à long-terme des températures de surface

Dans l'océan, les températures ont augmenté de 0.6°C entre les périodes 1900-1920 et les deux dernières décennies (Figure A1-1).

Le réchauffement n'a pas été progressif et a connu deux phases d'accélération durant la période 1920-1940 et depuis la fin des années 1970s. Tous les systèmes océaniques n'ont pas été touchés avec la même intensité. Le réchauffement a en effet été plus important dans l'hémisphère Nord ($\Delta T=0.62$ entre 1900-1920 et 1990-2007) que dans l'hémisphère Sud ($\Delta T=0.59$ entre 1900-1920 et 1990-2007). L'augmentation des températures a commencé plus tôt dans l'hémisphère sud. Cependant, l'élévation des températures a été plus prononcée après le milieu des années 1990s (Beaugrand 2009). Basant leurs analyses sur la période 1955-

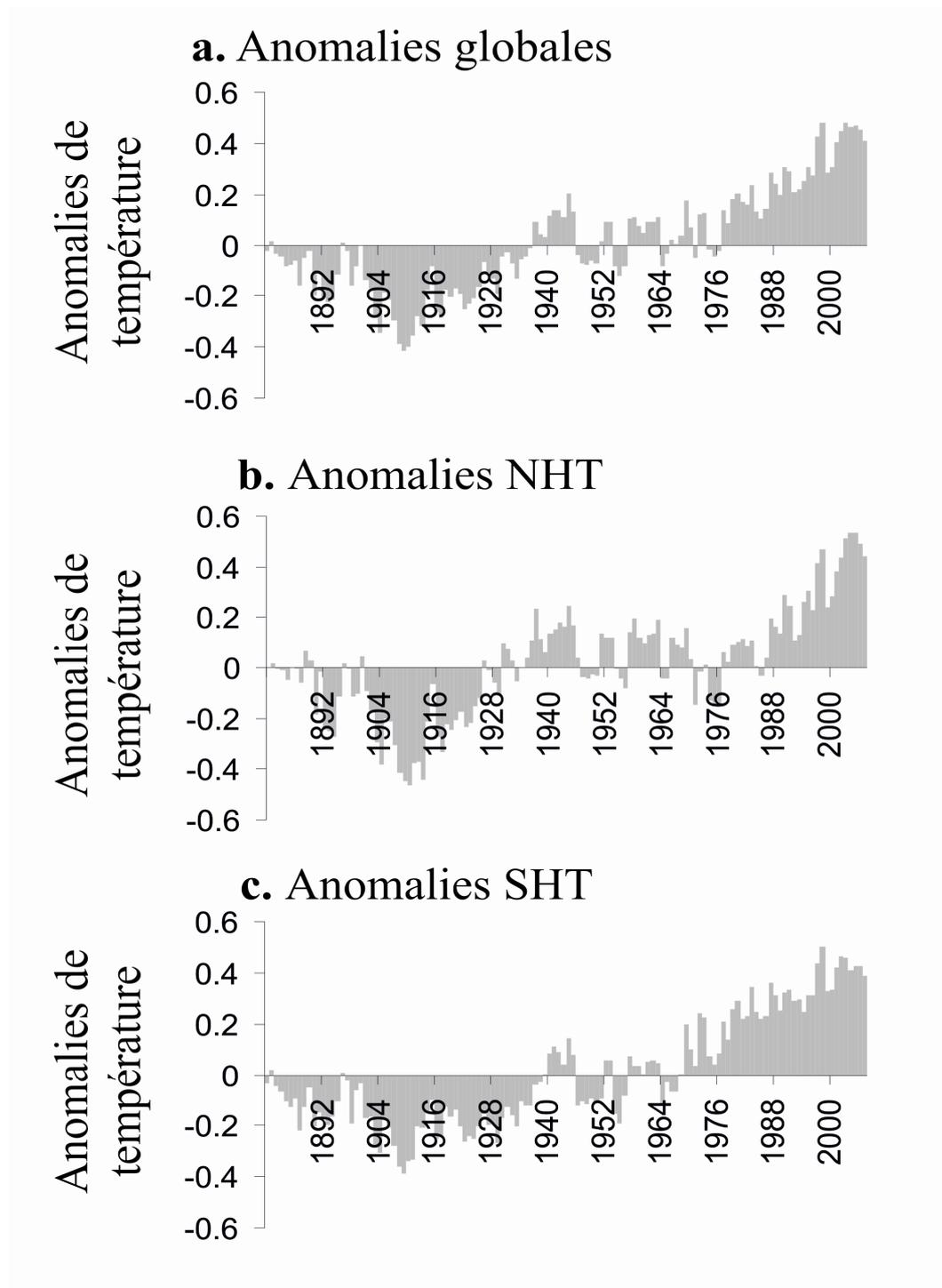


Figure A-I-1. Changements à long-terme (1880-2007) des températures de surface aux échelles globales (a; GT), de l'hémisphère Nord (b; NHT) et de l'hémisphère Sud (c; SHT). Les données proviennent du "National Climatic Data Center" (NCDC: <http://www.ncdc.noaa.gov/>).

1998, Levitus et ses collègues (Levitus et al. 2005) ont estimé que le contenu en chaleur de l'océan a augmenté de 14.5×10^{22} J alors que Beltrami et collègues (Beltrami et al. 2002) ont calculé que la lithosphère continentale avait seulement gagné 0.91×10^{22} J durant la période 1950-2000. L'océan est donc l'unité fonctionnelle qui a connu la plus grande augmentation de contenu en chaleur. Levitus et al. (2001) ont estimé que l'augmentation du contenu en chaleur de l'atmosphère était de l'ordre de 0.66×10^{22} J. Durant la période 1955-1996, une augmentation de 0.81×10^{22} J dans les glaciers continentaux a été observée. Durant la même période, des augmentations de 0.32×10^{22} J de la banquise Antarctique entre les années 1950s et 1970s et de 1.1×10^{22} J dans les glaciers de montagne pour la période 1961-1997 ont été enregistrés. La probabilité que le réchauffement constaté depuis la fin des années 1970s soit liée aux activités humaines est très importante (Intergovernmental Panel on Climate Change 2007).

Depuis les années 1960s dans l'hémisphère Nord, le réchauffement a été plus prononcé dans les régions tempérées et subtropicales de l'océan Atlantique, sur la côte est du Pacifique et dans une moindre proportion au niveau de l'océan Indien (Figure A1-2). Dans l'océan Atlantique, le réchauffement a été particulièrement intense au dessus des régions du plateau continental telles que la mer du Nord. Un réchauffement des régions subpolaires n'a été que récemment détecté. Les estimations faites indiquent que le réchauffement a pénétré jusqu'à 700 m de profondeur, en particulier dans certaines régions des hautes latitudes de l'océan Atlantique Nord, en raison de la convection profonde. Dans les océans Pacifique et Indien, le réchauffement est localisé principalement jusqu'à 100m de profondeur (Barnett et al. 2005).

Il est également important d'évoquer que le climat varie naturellement. L'oscillation australe dans l'Océan Pacifique sud tropicale, couplée aux phénomènes El Niño et La Niña, a des impacts très marqués dans les océans tropicaux. La pêche minotière fût par exemple fortement touchée par l'événement El Niño de 1998 puisque les prises d'anchois du Pérou passèrent de 9 à 1,7 millions de tonnes à cause des réductions de la composition en plancton (Thomas-Bourgneuf & Mollo 2009).

La sévérité des hivers en Europe est quant à elle influencée par l'Oscillation Nord Atlantique (NAO, de l'anglais "North Atlantic Oscillation"). Cette oscillation atmosphérique est caractérisée par une différence de pression existant entre les basses pressions des régions

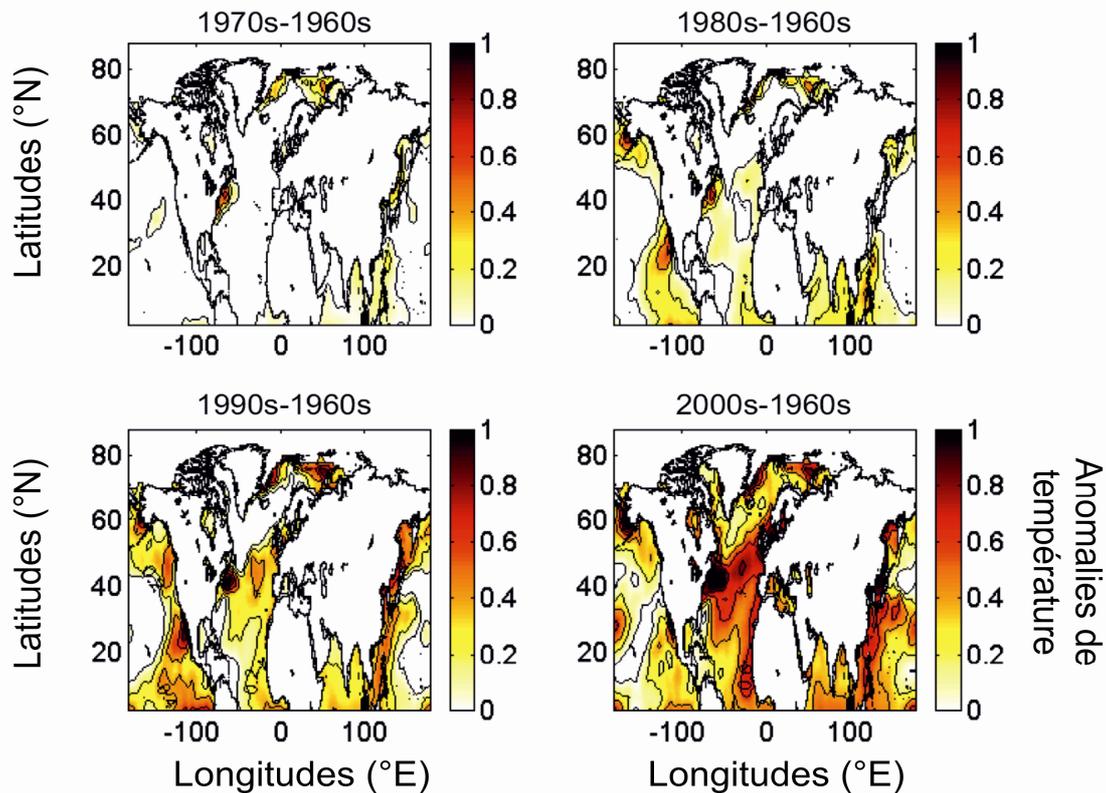


Figure A-I-2. Régionalisation des changements des températures de surface dans l'hémisphère Nord. Les températures ont été moyennées par décennie (à l'exception de la période 2000-2006) et ont été soustraites par la moyenne des températures de surface pour la période 1960-1969. Les données utilisées ici proviennent de la base de données ERSST.v2 (NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, <http://www.cdc.noaa.gov/>). D'après Beaugrand (2009).

subpolaires (généralement centrées sur l'Islande) et les hautes pressions des régions subtropicales (généralement centrées sur les Açores). Ce patron de variabilité atmosphérique est identifié pour chaque mois de l'année mais le phénomène est plus actif l'hiver (Hurrell & Dickson 2004). Plus la différence de pression est forte (phase positive de la NAO), plus le flux d'Ouest est puissant apportant douceur et humidité en Europe, un froid renforcé en mer du Labrador et au sud du Groenland, ainsi qu'un temps plus humide le long de la côte est nord-américaine et autour du bassin méditerranéen. Lorsque la différence de pression est atténuée durant une période négative de la NAO, un patron inverse de variabilité est généralement observé. Le phénomène influence le plancton et certaines espèces de poissons commercialement exploitées. Cependant, son influence sur les espèces et écosystèmes n'est pas constantes dans le temps ce qui rend difficile son utilisation à des fins de projection et d'anticipation (Beaugrand 2003).

Les corrélations calculées entre l'indice NAO et les températures de surface entre les périodes 1953-1979 et 1980-2006 ont été assez constantes à l'exception de la diminution observée des corrélations positives dans les régions de latitudes moyennes situées à l'est de l'océan Atlantique (Figure A1-3). La figure montre un patron de variabilité spatiale avec la présence de trois pôles. Les corrélations sont négatives dans les régions subpolaires et subtropicales et positives dans les régions de latitudes moyennes de l'océan Atlantique. Des résultats bien différents sont observés lorsque les corrélations entre les anomalies de températures de l'Hémisphère Nord et les températures de surface sont calculées. En effet, les corrélations observées pour la période 1953-1979 se sont renforcées durant la période 1980-2006. Cette analyse suggère que l'effet du réchauffement global sur les températures régionales s'est accéléré récemment.

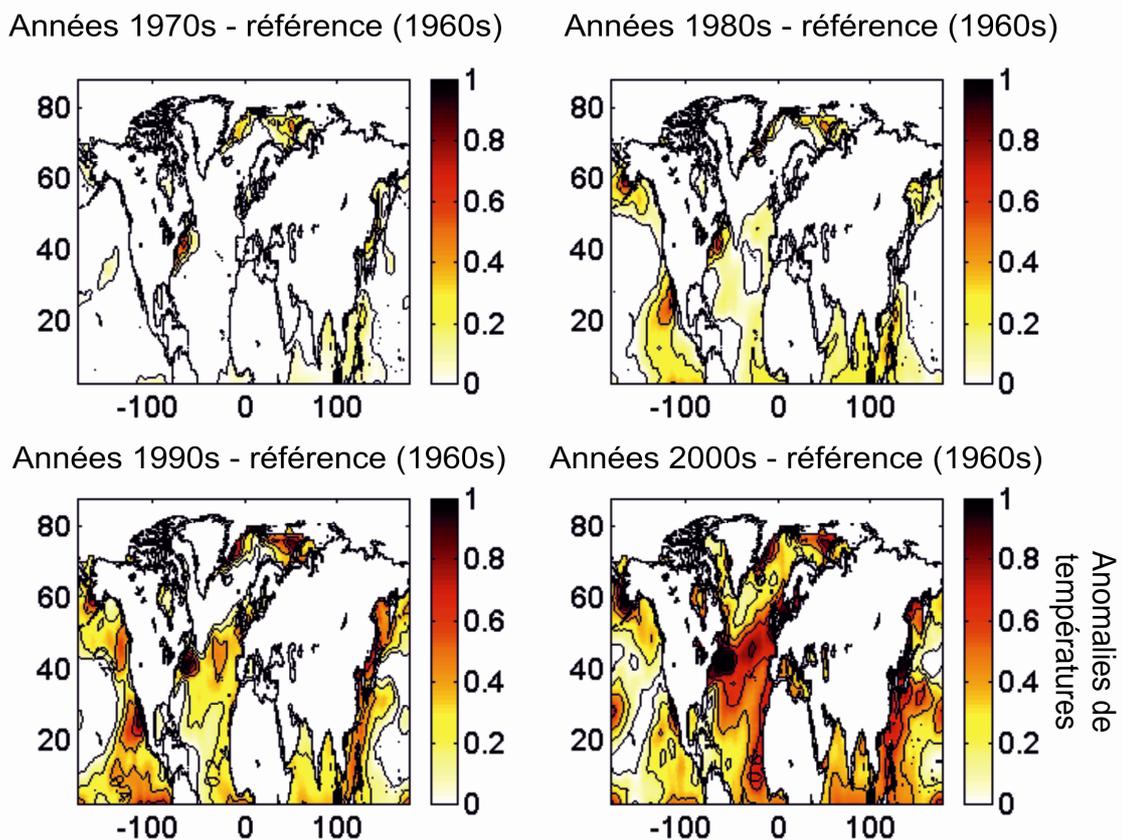


Figure A-I-3. Changements spatiaux des corrélations entre les températures de surface et les anomalies de température de l'hémisphère Nord et entre les températures de surface et l'indice hivernal de l'oscillation Atlantique Nord pour deux périodes: 1953-1979 et 1980-2006. Les périodes comportent le même nombre d'années à des fins de comparaison. L'indice utilisé est l'indice hivernal d'Hurrell (Hurrell et al. 2001). D'après Beaugrand (2009).

La variabilité climatique naturelle a de tout temps modifié les écosystèmes marins

Avant de mentionner les conséquences possibles du changement climatique global sur les écosystèmes, il est important de rappeler que le climat varie naturellement et à toutes les échelles de temps et que ses variations ont de tout temps influencé les écosystèmes marins (Alheit 2009). Certains enregistrements historiques de populations de poissons témoignent de l'impact du forçage climatique sur les écosystèmes marins. Depuis des temps aussi éloignés que la période Viking, sur la côte ouest suédoise dans une région appelée le Bohuslän, la sévérité des hivers a été associée avec la présence en nombre considérable de harengs venus passer l'hiver. Neuf périodes de fortes abondances de harengs ont ainsi été identifiées depuis le 12^{ème} jusqu'au milieu du 20^{ème} siècle. L'identification de ces périodes a été rendue possible du fait de leur impact sur l'économie locale. Jusqu'à 50,000 personnes venaient annuellement dans cette région pour y travailler. Ces périodes de prospérité (20-50 ans) alternaient avec des périodes d'absence (50-70 ans) du hareng où le Bohuslän redevenait une région pauvre. Il a été montré que les époques riches en hareng étaient caractérisées par des hivers rigoureux et leurs fins coïncidaient avec l'arrivée d'hivers plus doux. D'autres stocks de poissons européens, tels que les sardines, montrent des variations qui semblent être synchrones avec celles observées au Bohuslän.

Nous avons vu plus haut que l'oscillation Atlantique Nord influençait fortement les conditions météo-océaniques. Un changement naturel de forçage atmosphérique peut provoquer des changements de grande magnitude, rapides et souvent inattendus. Ces modifications majeures de structure et de fonctionnement des écosystèmes portent le nom de changement de régime. Le Pacifique Nord a connu un tel phénomène au milieu de l'année 1977. En raison d'un changement des champs de pression atmosphérique associés avec l'Oscillation Pacifique Décennale (PDO pour "Pacific Decadal Oscillation", un phénomène analogue à la NAO dans le Pacifique Nord), le régime des vents a changé et a provoqué des modifications de courantologie dans la région pacifique nord-est. Ce changement a modifié l'équilibre des écosystèmes, phénomène visible depuis le plancton végétal jusqu'aux poissons (Hare and Mantua 2000). Autrefois dominée par la crevette rouge, l'exploitation des ressources s'est modifiée dans le milieu des années 1970 pour être dominée par la morue d'Alaska. Depuis, d'autres changements de régime ont été détectés dans d'autres régions du monde. Des modifications souvent faibles du forçage atmosphérique sont amplifiées par

l'hydrologie régionale et la biologie. Le changement climatique global pourrait intensifier ce genre de phénomènes (Beaugrand et al. 2008).

Empruntes biologiques du réchauffement climatique

Attribuer les causes d'une modification de biodiversité ou de structure d'un écosystème aux changements climatiques n'est pas une tâche aisée à l'échelle locale. En effet, à cette échelle la variabilité physico-chimique locale associée à des phénomènes physiques tels que la marée, la turbulence ou la proximité d'un estuaire ou un delta, les contraintes de l'échantillonnage ou l'impact anthropique direct (pollution, eutrophisation) complexifient fortement le signal. Les études pratiquées à grande échelle distinguent plus nettement le signal climatique et leur développement a permis d'identifier les premières empruntes du changement climatique dans la biosphère.

Modifications biogéographiques

Une des premières conséquences attendues du changement climatique sur les organismes marins est le déplacement horizontal des espèces vers le Nord. Parmesan et collègues (Parmesan & Yohe 2003) ont quantifié pour la première fois, à l'échelle de la planète, la réponse des organismes vivants vis-à-vis du réchauffement climatique global. En utilisant des données basées sur l'abondance ou la présence de 1700 espèces appartenant à des écosystèmes à la fois terrestres et marins, cette étude suggère que les espèces ont soit progressé vers les pôles, soit migré en altitude de 6.1 km par décennie. Les analyses suggèrent avec un niveau de confiance élevé (probabilité supérieure à 95%) que le changement climatique global a commencé à affecter les systèmes biologiques de la planète. Cependant, ce taux moyen masque des disparités entre systèmes biologiques et espèces importantes. C'est ainsi que Beaugrand et collègues ont montré des migrations très rapides du zooplancton caractérisant les eaux chaudes dans le bassin ouest européen et le long des côtes européennes entre les latitudes correspondant au sud du golfe de Gascogne et à l'Islande (Beaugrand et al. 2009; Beaugrand et al. 2002) (Figure A1-4).

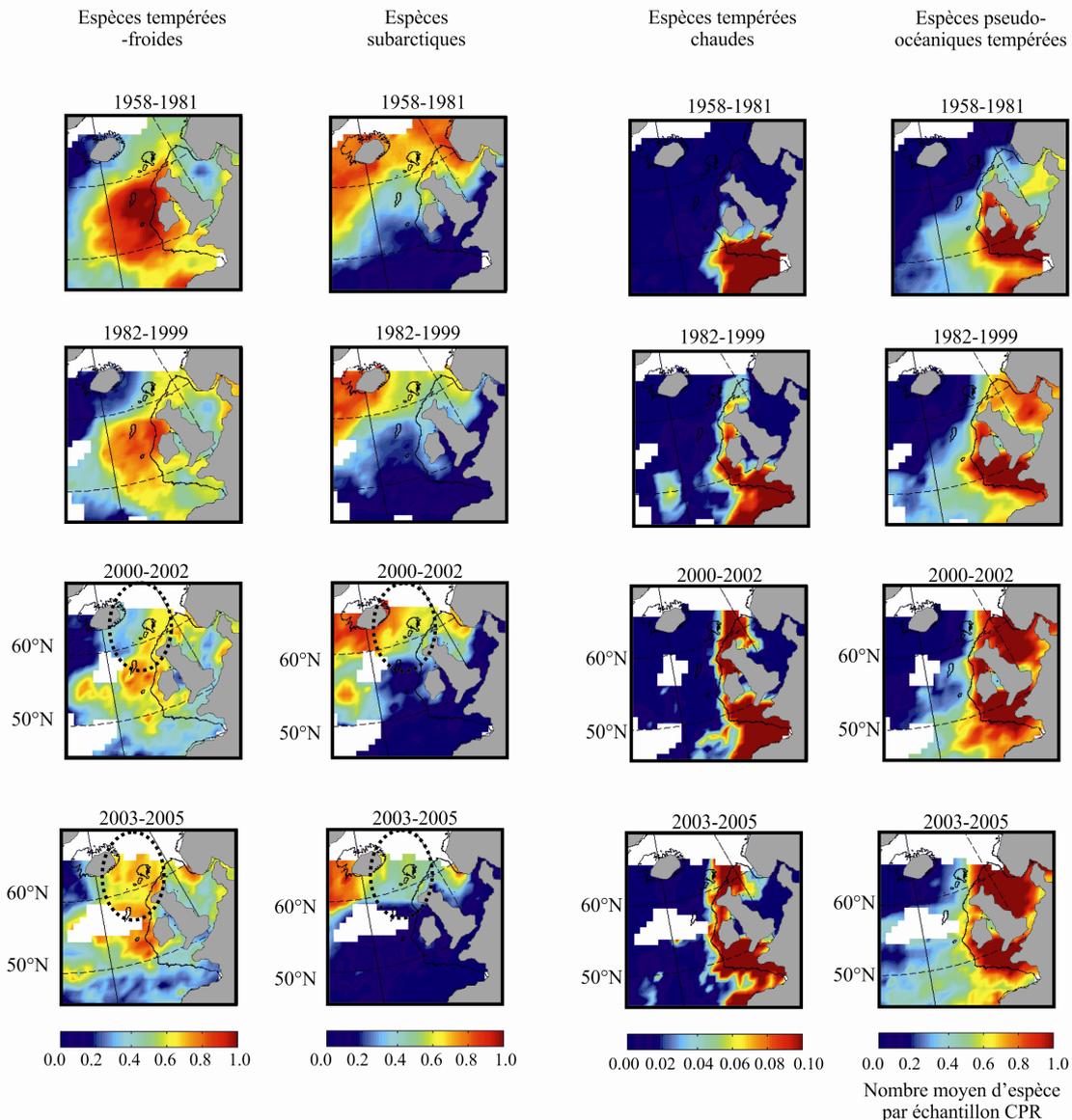


Figure A-I-4. Changements à long-terme de la diversité (nombre d'espèces) de quatre assemblages de copépodes dans l'océan Atlantique Nord-Est pour la période 1958-2005. D'après Beaugrand et al. (2009).

Un groupe d'espèces autrefois présent uniquement dans le golfe de Gascogne est maintenant identifié jusqu'à l'ouest des côtes norvégiennes. Les espèces indicatrices de masses d'eau plus froides ont quant à elle diminué. Les écosystèmes planctoniques n'ont pas été les seuls à subir de profondes modifications de leur biodiversité. De nombreuses études ont reporté l'apparition dans le golfe de Gascogne d'espèces de poissons tropicaux, leur migration progressive le long du talus continental européen (Quero et al. 1998) ainsi que la migration, vers le nord, d'espèces de poissons caractérisant les eaux plus chaudes en mer du

Nord (Perry et al. 2005). Dans cette étude, les auteurs ont analysé les changements à long-terme de la répartition spatiale de 90 espèces de poissons en mer du Nord. Durant la période étudiée (1977 à 2001), cette mer s'est réchauffée d'à peine 1.05°C en moyenne. Pourtant sur les espèces de poissons ayant leur limite nord ou sud de répartition dans la mer du Nord (36 espèces), 15 espèces ont migré en réponse au réchauffement des eaux. La sole commune et la morue de l'Atlantique sont 2 exemples d'espèces ayant migrées. . Le réchauffement des eaux de la mer du Nord va vraisemblablement continuer. Les climatologues prévoient une augmentation comprise entre 1 et 2.5°C d'ici 2050. Si de telles valeurs étaient atteintes, la sole et la morue disparaîtraient probablement de cette région avec toutes les conséquences économiques que cela pourrait impliquer.

Modifications phénologiques

Les études pratiquées sur le plancton marin de l'océan Atlantique Nord-Est et en particulier la mer du Nord ont montré d'importantes modifications de la phénologie des espèces, phénomène attribué au réchauffement des températures (Edwards & Richardson 2004). La phénologie est l'étude de l'évolution des rythmes naturels dans les écosystèmes. Ces changements ne sont pas constants parmi les groupes planctoniques étudiés. Par exemple, les diatomées marines (groupe phytoplanctonique important pour la survie des copépodes herbivores) n'ont que peu modifié leur maximum annuel d'abondance. D'autres groupes, tels que les dinoflagellés et le méroplancton (phase larvaire pélagique de certains organismes benthiques tels que les crabes), ont vu leur maximum saisonnier progresser d'un mois entre 1958 et 2002. Beaucoup de diatomées forment des spores, lesquelles sont déposées dans les sédiments durant l'hiver. La germination de ces spores ou le développement des diatomées marines au printemps sont d'avantage contrôlé par des paramètres tels que la longueur du jour et l'intensité de la lumière. Par conséquent, le changement climatique n'affecte pas ces organismes. Par contre, les dinoflagellés et le méroplancton, qui dépendent d'avantage des caractéristiques physiques de la colonne d'eau (température et stratification) susceptibles d'être influencées par le changement climatique, seront plus sensibles. La spécificité de la réponse des groupes d'organismes, liée aux caractéristiques de leur cycle de vie, va provoquer des perturbations de la trophodynamique (relation trophique entre les groupes d'espèce) dans les écosystèmes marins.

Modifications de dominance

Les modifications de dominance des espèces ou de groupes d'espèces, à moyenne ou grande échelles, sont bien souvent associées aux changements biogéographiques et phénologiques (Beaugrand 2009). Un synchronisme important a souvent été observé entre les changements de différents groupes trophiques (Kirby and Beaugrand 2009). C'est ainsi que Beaugrand et collègues ont montré des changements concomitants entre les anomalies de températures de l'hémisphère Nord et les changements de dominance du phytoplancton, zooplancton et de certaines espèces de poissons à l'échelle de l'océan Atlantique Nord-Est (Figure A1-5).

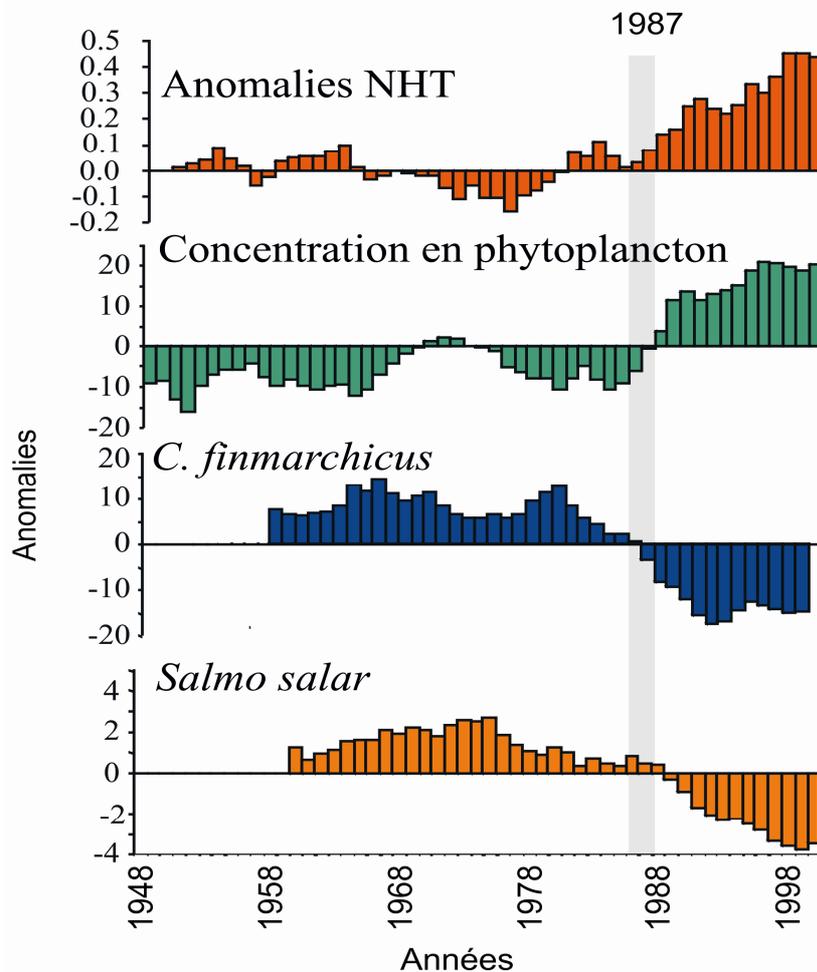


Figure A-I-5. Changements à long-terme des anomalies de température dans l'hémisphère Nord (NHT, en rouge), les anomalies de la composition en phytoplancton (en vert), de l'abondance de *C. finmarchicus* (copépode subarctique, en bleu) et de la concentration en saumon adulte (en orange) pour une zone située autour des îles britanniques.

Dans la mer du Nord, une espèce de copépode subarctique importante pour la survie des larves de morue et appelée *Calanus finmarchicus* a été progressivement remplacée par son espèce congénérique *C. helgolandicus*. Autrefois représentant 80% du nombre total d'individus de *Calanus* en mer du Nord, *C. finmarchicus* n'en représente aujourd'hui plus que 20% (Figure A1-6).

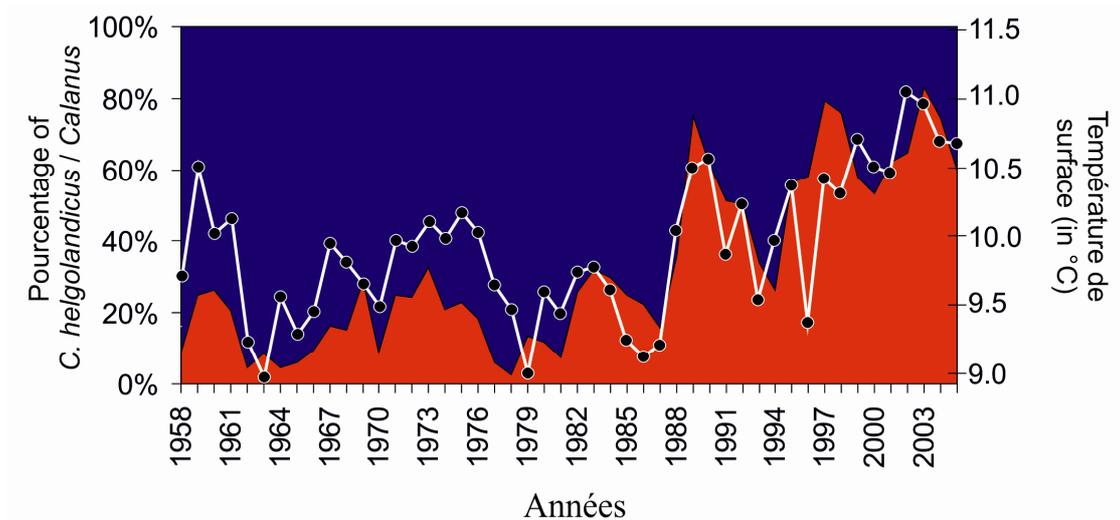


Figure A-I-6. Changements à long-terme du pourcentage de *Calanus helgolandicus* (copépode tempéré) par rapport au genre *Calanus* (*C. helgolandicus* et *C. finmarchicus*) en mer du Nord. D'après Beaugrand (2009).

Ce changement de dominance a contribué à la diminution de la survie des larves de morue. Il permet d'expliquer en partie l'importante diminution de la biomasse des morues adultes observée en mer du Nord (Beaugrand et al. 2003). Les conséquences de l'élévation des températures pour les morues sont doubles. Les larves de morues ont augmenté leur métabolisme en raison de l'élévation des températures et par conséquent leur demande énergétique. Cependant, l'énergie disponible a diminué en raison de l'affaiblissement du nombre de proies lorsque les larves sont présentes dans la colonne d'eau. Le déséquilibre énergétique s'est donc accru réduisant la croissance et donc la survie des larves. Ce phénomène a été aggravé par la surexploitation. Le nombre d'œufs produit par les morues adultes a diminué, les individus étant moins nombreux et de tailles plus réduites à cause des effets de la pêche. Le changement climatique et son incidence sur les écosystèmes planctoniques de la mer du Nord a ainsi amoindri la survie des œufs et leur probabilité de donner une morue capable de se reproduire.

Impact du réchauffement des températures sur la biodiversité, les services et le cycle du carbone

Une voie prometteuse est de transposer le concept de niche écologique à des groupes d'espèces ou à la notion de biodiversité de certains groupes (Helaouët & Beaugrand 2009; Lenoir et al. 2010). La niche écologique au sens d'Hutchinson peut être définie comme étant le préférendum environnemental d'une espèce (Hutchinson, 1957). Récemment, Beaugrand et collègues (Beaugrand 2010) ont caractérisé les régimes thermiques où se trouve le plus de diversité (la diversité étant ici définie comme étant le nombre moyen d'espèces ou de genres par échantillon). C'est ainsi que les chercheurs ont montré qu'un réchauffement diminuerait la diversité des diatomées dans l'océan Atlantique Nord, un groupe phytoplanctonique important pour le cycle du carbone dans les régions de hautes latitudes. Par contre, elle augmentera la diversité des dinoflagellés et des copépodes. Certaines espèces de dinoflagellés, telles que *Alexandrium minutum* ou le genre *Gonyaulax*, peuvent être fortement toxiques. La diversité des copépodes augmentant, on pourrait penser que cela conférerait une résistance et une résilience plus forte vis-à-vis des fluctuations de l'environnement. Cependant, l'augmentation de diversité du plancton s'est accompagnée d'une réduction de la taille moyenne des copépodes. Plus d'une centaine d'espèces de ce groupe peuple cette partie de l'océan mondial, assurant le transfert entre les producteurs primaires (le plancton végétal) et les niveaux trophiques supérieurs. Cette diminution de taille moyenne indique une réduction potentielle de l'exportation de carbone depuis la surface jusqu'au fond des océans ainsi qu'une augmentation du métabolisme de l'écosystème (vitesse à laquelle le carbone biogénique circule dans la colonne d'eau). L'étude révèle également une relation inverse entre la diversité du zooplancton et la probabilité de présence des morues, suggérant que l'augmentation de la diversité du zooplancton et la diminution de sa taille se traduit par une réduction de la probabilité de présence de ce poisson subarctique, amplifiant l'effet de la surexploitation.

Les modèles biogéochimiques actuels prévoient un affaiblissement du puit de carbone dans l'océan Atlantique par l'action de la température sur la stratification de la colonne d'eau (Bopp et al. 2005; Sarmiento et al. 2004). La stratification accrue de l'océan de surface va probablement conduire à une réduction des concentrations en éléments nutritifs dans la couche de surface et par conséquent à une diminution de la productivité marine. Cette recherche suggère qu'en plus de ce phénomène, l'augmentation de la diversité, souvent associée à une diminution de la taille moyenne du plancton marin, accélérera le phénomène en

changeant la composition du plancton et réduisant l'exportation du carbone dans les couches profondes. La quantification de cet effet reste cependant encore difficile.

L'étude de Beaugrand et collègues révèle qu'une augmentation de la biodiversité, souvent vue comme avantageuse en termes de résilience et de stabilité (Worm et al. 2006), peut au contraire altérer certaines fonctions bénéfiques telles que la régulation du dioxyde de carbone et l'exploitation des ressources marines. Cette augmentation, jamais constatée à une aussi grande échelle spatiale, est à interpréter comme étant une indication de l'altération des systèmes biologiques et des services qu'ils fournissent à l'homme face au changement climatique.

Les récifs coralliens

Le lien entre le changement climatique global et les récifs coralliens, encore considéré comme douteux par les spécialistes il y a une dizaine d'années, est aujourd'hui clair (Bellwood et al. 2004). Les prédictions indiquent des températures de surface qui dépasseront les conditions dans lesquelles les récifs coralliens ont évolué depuis 500,000 ans. L'élévation des températures affecte ces animaux déjà fragilisés par la surexploitation et la pollution. Des températures élevées provoquent le blanchissement de nombreuses espèces de coraux. Ce blanchissement est la conséquence de l'expulsion d'une micro-algue, appelée zooxanthelle (endosymbionte du genre *Symbiodinium*), indispensable au corail. Si le stress thermique persiste, le corail meurt. Un épisode de blanchissement du corail au Panama, Kenya, Arabie Saoudite et dans l'archipel indo-pacifique a été observé après un évènement El-Niño en 1997/1998, lequel a provoqué une hausse substantielle des températures. Cet évènement fût responsable de la mort de 16% des coraux du monde. L'augmentation des températures, associée à l'augmentation de la fréquence des cyclones de 10 à 20% d'ici 2070, risque d'engendrer une érosion massive de la biodiversité. Cependant, prévoir et quantifier la réponse de ces écosystèmes reste un défi scientifique. Il a été montré récemment que certaines espèces pourront s'adapter. Par conséquent, même si 60% des récifs pourraient disparaître (et avec eux toute la biodiversité qui leur est associée), les récifs ne disparaîtront probablement pas complètement. Certaines espèces pourront s'associer avec des zooxanthelles plus thermophiles. Une étude menée par le Dr Andrew Baker (Wildlife Conservation Society, USA) a montré que la capacité des récifs coralliens à s'adapter au réchauffement des températures

pourrait dépendre de leur association avec des zooxanthelles génétiquement plus résistantes aux températures élevées (Baker et al. 2004).

L'acidification des océans

L'augmentation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère influence plus directement les océans (Sabine et al. 2004). En effet, l'océan a absorbé presque la moitié (118 milliards de tonnes de carbone) des émissions de dioxyde de carbone depuis 1800, ce qui a provoqué une réduction de 0.1 unité de pH. Cette diminution du pH, qui peut paraître faible, représente une augmentation de 30% de la concentration en ions hydrogène dans l'océan et ainsi une acidification substantielle. Si les émissions de dioxyde de carbone continuent au rythme actuel, l'acidification pourrait correspondre à une réduction du pH de 0.5 unité d'ici 2100, risquant d'entraver le processus de calcification de nombreux organismes marins tels que les coraux et certaines espèces planctoniques telles que foraminifères et mollusques ptéropodes (Orr et al. 2005). Peu d'études sur les effets d'une réduction du pH sur les organismes marins ont été réalisées à ce jour. Ce type de recherche est en train de se développer dans le cadre de programmes internationaux tels que EPOCA (European Project on Ocean Acidification). Les organismes constitués d'un type de carbonate de calcium dénommé aragonite (les coraux par exemple) sont plus sensibles à l'acidification que les organismes constitués de calcite (les foraminifères par exemple). Les coraux seront probablement les organismes les plus affectés mais des études plus approfondies sur le sujet restent nécessaires (Blackford 2010).

Impacts sur les écosystèmes côtiers

Ne couvrant que 8% de l'océan mondial mais offrant 85% des ressources marines exploitées, les systèmes côtiers sont d'importantes plaques tournantes d'échanges de matières et d'énergie jouant un rôle capital dans les cycles biogéochimiques (Kremer et al. 2005). Cette position contraint ces milieux à une forte hétérogénéité spatio-temporelle des facteurs environnementaux. Les systèmes marins littoraux sont ainsi soumis à des forçages d'origine naturelle comme l'influence climatique (Harley et al. 2006) mais également à de fortes pressions humaines (Cloern 2001). Le changement global, en particulier l'intensification d'origine anthropique de l'effet de serre, a pour conséquence des anomalies de température de plus en plus fréquentes et marquées sur ces milieux sensibles.

De plus, il est avéré la température gouverne de part une influence indirecte de nombreux autres forçages climatiques, que ce soit l'augmentation du niveau de la mer (Pethick 2001), la circulation atmosphérique et océanique (Harley et al. 2006; Scavia et al. 2002), ou encore les précipitations et les apports des rivières (Milliman et al. 2008). La récente tendance climatique, ne représentant qu'une faible part de l'amplitude des changements pour les siècles à venir, montre déjà des premières répercussions sur l'équilibre des systèmes et les différents compartiments: physiques, chimiques et biologiques (Intergovernmental Panel on Climate Change 2007). Cette évidente accumulation des changements subis par les systèmes côtiers a conduit les décisionnaires et les scientifiques à encourager le développement d'une démarche systématique d'observation des milieux littoraux. La fédération de ces efforts a notamment conduit à la mise en place du Service d'Observation en Milieu Littoral (SOMLIT) en 1995, labellisé par l'INSU en 1996, et qui regroupe actuellement 8 Stations Marines.

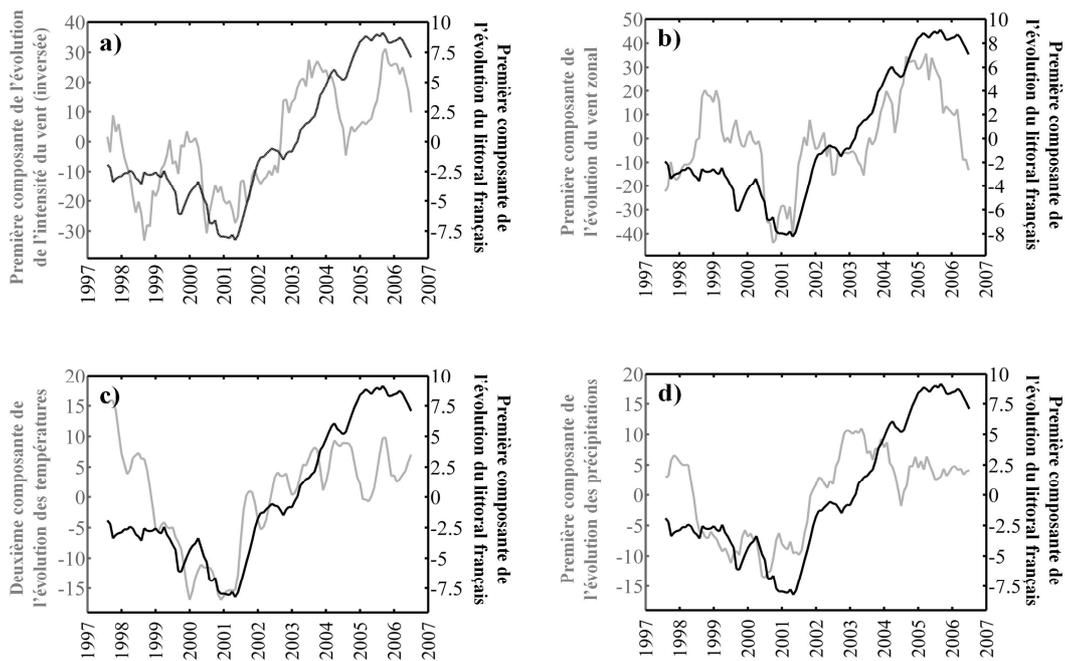


Figure A-I-7. Corrélations entre la variabilité décennale du littoral français (en noir) et la variabilité décennale du climat (en gris) à l'échelle de l'ouest de l'Europe (de 41°N à 51°N et de 5°O à 8°E) en prenant en compte différentes variables climatiques: l'intensité du vent (a) et sa composante zonale (b), la température de surface de l'océan (c) et les précipitations moyennes (d) pour la période 1997-2007. D'après Goberville et al. 2010.

Les données récoltées par ce programme d'observation ont permis à Goberville et collègues (Goberville et al. 2010) de mettre en évidence la fluctuation décennale des systèmes marins côtiers français et d'évaluer l'influence potentielle de la variabilité climatique. Cette étude suggère une sensibilité importante de ces systèmes aux forçages climatiques aussi bien à l'échelle régionale par l'action concomitante des champs de pression, de l'intensité et de la direction des vents (Figure A1-7a et b), des températures (Figure A1-7c) et des précipitations (Figure A1-7d), qu'à l'échelle globale (principalement les anomalies de températures) sur la variabilité des éléments physico-chimiques de la colonne d'eau.

En prenant en compte ces résultats, l'étude a notamment permis de mettre en évidence un lien positif, au niveau des systèmes Manche-Mer du Nord, entre la diminution des sels nutritifs, du matériel particulaire, une réduction des précipitations et une modification de la circulation atmosphérique. En plus de cet impact notable sur la physico-chimie du milieu, cette étude a également montré une dynamique commune entre la variabilité climatique et les concentrations en chlorophylle a, témoignant d'un risque de répercussion sur le compartiment biologique (composition de la biocénose et abondance des espèces).

Cependant de nombreuses études montrent que le lien entre les différents forçages et la réponse de l'écosystème n'est pas linéaire (Breton et al. 2006; Labat et al. 2004; Mysterud et al. 2001) et révèlent l'importance de la prise en compte des forçages à l'échelle locale (particularités morphologiques, hydrologiques et météorologiques; Billen & Garnier 2007). C'est pour ces raisons que les multiples et profondes altérations de ces systèmes, sensibles à un changement global de plus en plus prononcé (à la fois climatique et anthropique), rendent incontournables la mise en place d'outils d'observation, de surveillance et de management adaptés.

Comprendre et anticiper l'impact du climat sur les systèmes biologiques océaniques

Le changement climatique global est peut être l'impact anthropogénique le plus préoccupant actuellement, non seulement pour l'océan, mais aussi pour l'ensemble de la planète. Ces manifestations agiront directement par les effets de la température sur les organismes marins dont la température interne est pour la plupart contrôlée par le milieu environnant (ectothermie). Cependant, le changement climatique global influencera plus indirectement les écosystèmes marins par son incidence sur le climat et l'hydrologie régionale

(oscillation atmosphérique et courants marins). Les réponses des organismes seront différentielles et des modifications brutales et inattendues de l'équilibre des écosystèmes sont à craindre. Cependant, la complexité des réponses et des mécanismes en jeu rendent difficiles la quantification précise des changements et sans doute même la prédiction de certaines réponses. Les écosystèmes, déjà fragilisés par l'effet de la pollution, l'eutrophisation ou la surexploitation, seront probablement moins résistants et résilients que les autres. Malgré les incertitudes qui existent encore, notre niveau de connaissance est suffisant pour exhorter les politiques à diminuer les rejets des gaz à effet de serre dans l'atmosphère mais aussi à prendre en compte les autres conséquences des activités humaines qui vont à l'encontre du développement durable.

Un des défis scientifiques actuels est de pouvoir séparer la part de la variabilité liée aux processus naturels de celle liée aux activités humaines. Pour cela, il faut disposer d'états de référence rendant possible la quantification des influences anthropiques ou naturelles. La réalisation de tels états de référence se heurte à des problèmes conceptuels et méthodologiques. Un des obstacles majeurs à surmonter est l'impossibilité de déterminer un état de référence absolu car la signature des activités humaines sur la biodiversité marine remonte à des périodes bien antérieures à la mise en place de suivis du milieu marin. C'est la raison pour laquelle on ne peut que déterminer des états de référence relatifs ou opérationnels. Pour les déterminer, il est essentiel de pouvoir réunir à la fois chercheurs, gestionnaires, décideurs et entreprises (pêche) dès le départ dans le processus de recherche pour les rendre les plus pratiques, accessibles et utiles. Leur détermination permet de mieux évaluer, comprendre et prédire les changements de biodiversité. Cependant, elle nécessite l'utilisation d'outils statistiques et mathématiques nouveaux et encore actuellement peu accessibles, même dans le monde de la recherche.

Conclusions

La convention sur la diversité biologique adoptée à Rio de Janeiro en 1992 définit la biodiversité comme étant "*la variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie; cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces ainsi que celle des écosystèmes*". La biodiversité marine est importante et intègre à la fois les compartiments pélagiques et benthiques. Elle concerne de ce fait une grande variété d'organismes (unicellulaires, protozoaires, métazoaires, invertébrés, vertébrés). Cependant, cette biodiversité subit un grand nombre de pressions anthropiques liées (i) à l'exploitation du milieu et de ses ressources (pêche, tourisme, aquaculture) (ii) à un impact direct de l'homme sur son milieu (eutrophisation et pollution locale, extraction de matériaux, introduction d'espèces par eaux de ballast). Si la biodiversité est naturellement résistante ou résiliente à la variabilité naturelle des événements hydro-météorologiques, l'effet des processus anthropiques est encore peu rapporté et étudié. Depuis la fin des années 1970 et la modification notable de certaines écorégions dans le monde, le changement climatique global apparaît comme un facteur supplémentaire impactant la biodiversité.

Bien que de nombreuses incertitudes subsistent et malgré parfois l'absence de mécanismes intermédiaires clairement identifiés entre la variabilité du climat et les systèmes biologiques, un faisceau d'éléments convergeant suggèrent que l'élévation récente des températures a commencé à influencer la biosphère marine. L'augmentation des températures globales a pourtant été relativement faible (0.8°C depuis le début du 20^{ème} siècle) par rapport à celle qui est prévue par le groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat (entre 1.4°C et 5.8°C d'ici 2100 suivant les différents scénarios d'émission, d'évolution démographique et technologique). Cette amplification des systèmes biologiques aquatiques est préoccupante car, si l'augmentation plus substantielle des températures entre 1.4 et 5.8°C d'ici 2100 se confirme, des modifications inattendues et de grandes magnitudes ne sont pas à exclure. Elles pourront contribuer à accentuer l'érosion globale de la biodiversité, diminuer les services que la biosphère fournit à l'humanité au quotidien et avoir des conséquences socio-économiques importantes. Il est par conséquent essentiel de développer des moyens de suivi de ces systèmes biologiques, en conjonction avec des méthodes mathématiques de détection, de modélisation afin d'anticiper les changements. Ce sont les approches macro-écosystémiques et bioclimatologiques qui ont pour l'instant acquis les résultats les plus

dénués d'ambiguïté. De telles approches doivent être encouragées mais pour cela il faut développer des systèmes d'observation à grandes échelles, comparables aux systèmes développés en météorologie.

Remerciements

Nous remercions le Pr Robert Drobenko pour avoir encourager l'initiation de ce travail. Cette contribution a été en partie financée par le Centre National de la Recherche Scientifique.

Bibliographie

- Alheit, J., 2009. Consequences of regime shifts for marine food webs. *International Journal of Earth System Sciences*, 98: 261-268.
- Antonov JI, Levitus S, Boyer TP (2005) Thermohaline sea level rise, 1955-2003. *Geophysical Research Letters* 32: L12602
- Baker AC, Starger CJ, McClanahan TR, Glynn PW (2004) Corals' adaptive response to climate change. *Nature* 430:741
- Barnett TP, Pierce DW, AchutaRao KM, Gleckler PJ, Santer BD, Gregory JM, Washington WM (2005) Penetration of human-induced warming into the world's oceans. *Science* 309:284-287
- Beaugrand G (2003) Long-term changes in copepod abundance and diversity in the north-east Atlantic in relation to fluctuations in the hydroclimatic environment. *Fisheries Oceanography* 12:270-283
- Beaugrand G (2009) Decadal changes in climate and ecosystems in the North Atlantic Ocean and adjacent seas. *Deep-Sea Research II* 56:656-673
- Beaugrand G, Brander KM, Lindley JA, Souissi S, Reid PC (2003) Plankton effect on cod recruitment in the North Sea. *Nature* 426:661-664
- Beaugrand G, Edwards M, Brander K, Luczak C, Ibanez F (2008) Causes and projections of abrupt climate-driven ecosystem shifts in the North Atlantic. *Ecology Letters* 11:1157-1168
- Beaugrand G, Edwards M, Legendre L (2010) Marine biodiversity, ecosystem functioning, and carbon cycles. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107 (22):10120-10142
- Beaugrand G, Luczak C, Edwards M (2009) Rapid biogeographical plankton shifts in the North Atlantic Ocean. *Global Change Biology*
- Bellwood DR, Hughes TP, Folke C, Nystrom M (2004) Confronting the coral reef crisis. *Nature* 429:827-833
- Beltrami H, Smerdon JE, Pollack HN, Huang S (2002) Continental heat gain in the global climate system. *Geophysical Research Letters* 29:10.1029/2001GL014310
- Billen G, Garnier J (2007) River basin nutrient delivery to the coastal sea: Assessing its potential to sustain new production of non-siliceous algae. *Marine Chemistry* 106:148-160
- Blackford JC (2010) Predicting the impacts of ocean acidification: Challenges from an ecosystem perspective. *Journal of Marine Systems* 81:12-18
- Bopp L, Aumont O, Cadule P, Alvain S, Gehlen G (2005) Response of diatoms distribution to global warming and potential implications: A global model study. *Geophysical Research Letters* 32
- Breton E, Rousseau V, Parent J, Ozer J, Lancelot C (2006) Hydroclimatic modulation of diatom/*Phaeocystis* blooms in nutrient-enriched Belgian coastal waters (North Sea). *Limnol Oceanogr* 51:1401-1409
- Cloern JE (2001) Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series* 210:223-253
- 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
- Dauvin JC (2009a) Asian Shore Crabs *Hemigrapsus spp.* (Crustacea: Brachyura: Grapsoidea) continue their invasion around the Cotentin Peninsula, Normandy, France: Status of the *Hemigrapsus* population in 2009. *Aquatic Invasions* 4:605-611
- Dauvin JC (2009b) Establishment of the invasive Asian shore crab *Hemigrapsus sanguineus* (De Haan, 1835) (Crustacea: Brachyura: Grapsoidea) from the Cotentin Peninsular, Normandy, France. *Aquatic Invasions* 4:467-472
- Edwards M, Richardson AJ (2004) Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature* 430:881-884
- Goberville E, Beaugrand G, Sautour B, Tréguer P (2010) Climate-driven changes in coastal marine systems of Western Europe. *Marine Ecology Progress Series* 408:129:147

- Hare SR, Mantua NJ (2000) Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. *Progress in Oceanography* 47:103-145
- Harley CDG, Hughes AR, Hultgren KM, Miner BG, Sorte CJB, Thornber CS, Rodriguez LF, Tomanek L, Williams SL (2006) The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology letters* 9:228-241
- Helaouet P, Beaugrand G (2009) Physiology, Ecological Niches and Species Distribution. *Ecosystems* 12:1235-1245
- Hurrell JW, Dickson RR (2004) Climate variability over the North Atlantic. In: N.C. Stenseth GO, J.W. Hurrell and A. Belgrano (Editors) *Marine ecosystems and climate variation*. Oxford University Press, Chippenham, p 15-32
- Hutchinson GE (1957) Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposium Quantitative Biology* 22:415-427
- Intergovernmental Panel on Climate Change, W.G.I., 2007. *Climate change 2007: the physical science basis*. Cambridge University Press, Cambridge, 996 pp.
- Kirby RR, Beaugrand G (2009) Trophic amplification of climate warming. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 276:4095-4103
- Kremer, H.H., Le Tissier, M.D.A., Burbridge, P.R., Talaue-McManus, L., Rabalais, N.N., Parslow, J., Crossland, C.J., & Young, B. (2004). Land–Ocean interactions in the coastal zone, science plan and implementation strategy. *Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone*. International Geosphere-Biosphere Programme Report 51/International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change Report 18. Stockholm: IGBP Secretariat. 60p.
- Labat D, Goddérís Y, Probst JL, Guyot JL (2004) Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Advances in Water Resources* 27:631-642
- Lasserre P (1994) The role of biodiversity in marine ecosystems. In: Solbrig OT, van Emden HM, Van Oordt PGWJ (eds) *Biodiversity and global change*. Cab International, Oxon, p 107-132
- Lenoir S, Beaugrand G, Lécuyer E (2010) Modelled spatial distribution of marine fish and projected modifications in the North Atlantic Ocean. *Global Change Biology*
- Levitus S, Antonov J, Boyer T (2005) Warming of the world ocean, 1955-2003. *Geophys Res Lett* 32:L02604
- Levitus S, Antonov JI, Wang J, Delworth TL, Dixon KW, Broccoli AI (2001) Anthropogenic warming of Earth's climate system. *Science* 292:267-270
- Milliman JD, Farnsworth KL, Jones PD, Xu KH, Smith LC (2008) Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951–2000. *Global and Planetary Change* 62:187–194
- Mysterud A, Stenseth NC, Yoccoz NG, Langvatn R, Steinhelm G (2001) Nonlinear effects of large-scale climatic variability on wild and domestic herbivores. *Nature* 410:1096-1099
- Orr JC, Fabry VJ, Aumont O, Bopp L, Doney SC, Feely RA, Gnanadesikan A, Gruber N, Ishida A, Joos F, Key RM, Lindsay K, Maier-Reimer E, Matear R, Monfray P, Mouchet A, Najjar RG, Plattner G-K, Rodgers KB, Sabine CL, Sarmiento JL, Schlitzer R, Slater RD, Totterdell IJ, Weirig M-F, Yamanaka Y, Yool A (2005) Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437:681-686
- Parmesan C, Yohe G (2003) A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421:37-42
- Perry AL, Low PJ, Ellis JR, Reynolds JD (2005) Climate Change and Distribution Shifts in Marine Fishes. *Science* 308:1912-1915
- Pethick J (2001) Coastal management and sea-level rise. *Catena* 42:307-322
- Pimm SL, Russell GF, Gittleman JL, Brooks TM (1995) The future of biodiversity. *Science* 269:347-350
- Quero JC, Du Buit MH, Vayne JJ (1998) Les observations de poissons tropicaux et le réchauffement des eaux de l'Atlantique européen. *Oceanologica Acta* 21:345-351
- Sabine CL, Feely RA, Gruber N, Key RM, Lee K, Bullister JL, Wanninkhof R, Wong CS, Wallace DWR, Tilbrook B, Millero FJ, Peng T-H, Kozyr A, Ono T, Rios AF (2004) The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science* 305:367-371

- Sarmiento JL, Slater, R., Barber, R., Bopp, L., Doney, S.C., Hirst, A.C., Kleypas, J., Matear, R., Mikolajewicz, U., Monfray, P., Soldatov, V., Spall, S.A., Stouffer, R. (2004) Response of ocean ecosystems to climate warming. *Global Biogeochemical Cycles* 18
- Scavia D, Field JC, Boesch DF, Buddemeier RW, Burkett V, Cayan DR, Fogarty M, Harwell M, Howarth RW, Mason C, Reed DJ, Royer TC, Sallenger AH, Titus JG (2002) Climate Change Impacts on U.S. Coastal and Marine Ecosystems. *Estuaries* 25:149-164
- Thomas-Bourgneuf M, Mollo P (2009) *L'enjeu plancton, l'écologie de l'invisible*, Vol. Lavoisier, Paris, France
- Worm B, Barbier EB, Beaumont N, Duffy JE, Folke C, Halpern BS, Jackson JBC, Lotze HK, Micheli F, Palumbi SR, Sala E, Selkoe KA, Stachowicz JJ, Watson R (2006) Impacts of Biodiversity Loss on Ocean Ecosystem Services. *Science* 314:787-790

Annexe II :

Histogrammes du pourcentage de données SOMLIT disponibles pour la période 1997-2009

Histogrammes du pourcentage de données SOMLIT disponibles pour la période 1997 - 2009

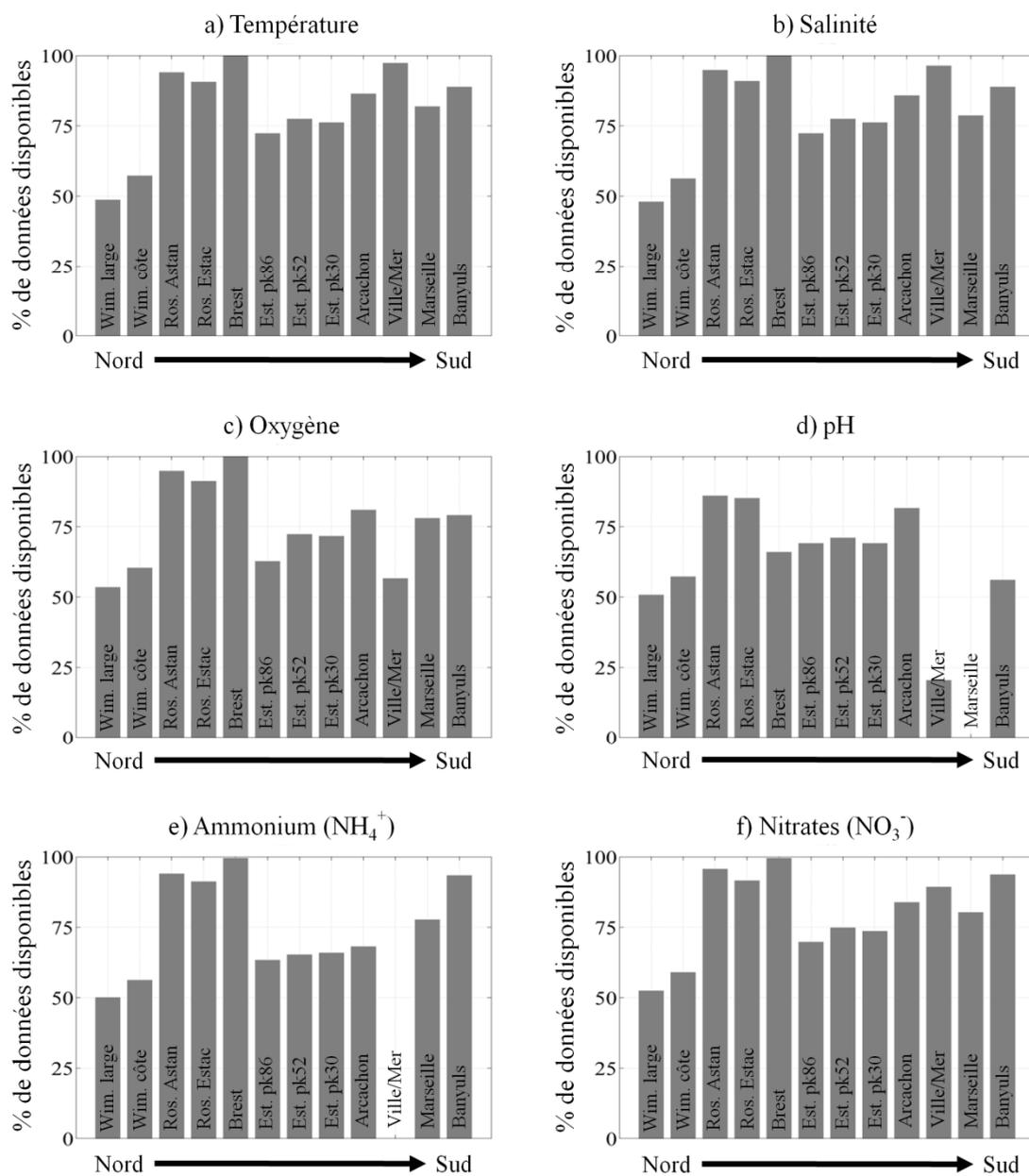


Figure A-II-1. Histogrammes du pourcentage de données SOMLIT présentes pour chaque site de prélèvement sur la période 1997-2009. (a) température; (b) salinité; (c) oxygène; (d) pH; (e) ammonium; (f) nitrates. Les sites sont classés du site le plus au nord au site le plus au sud.

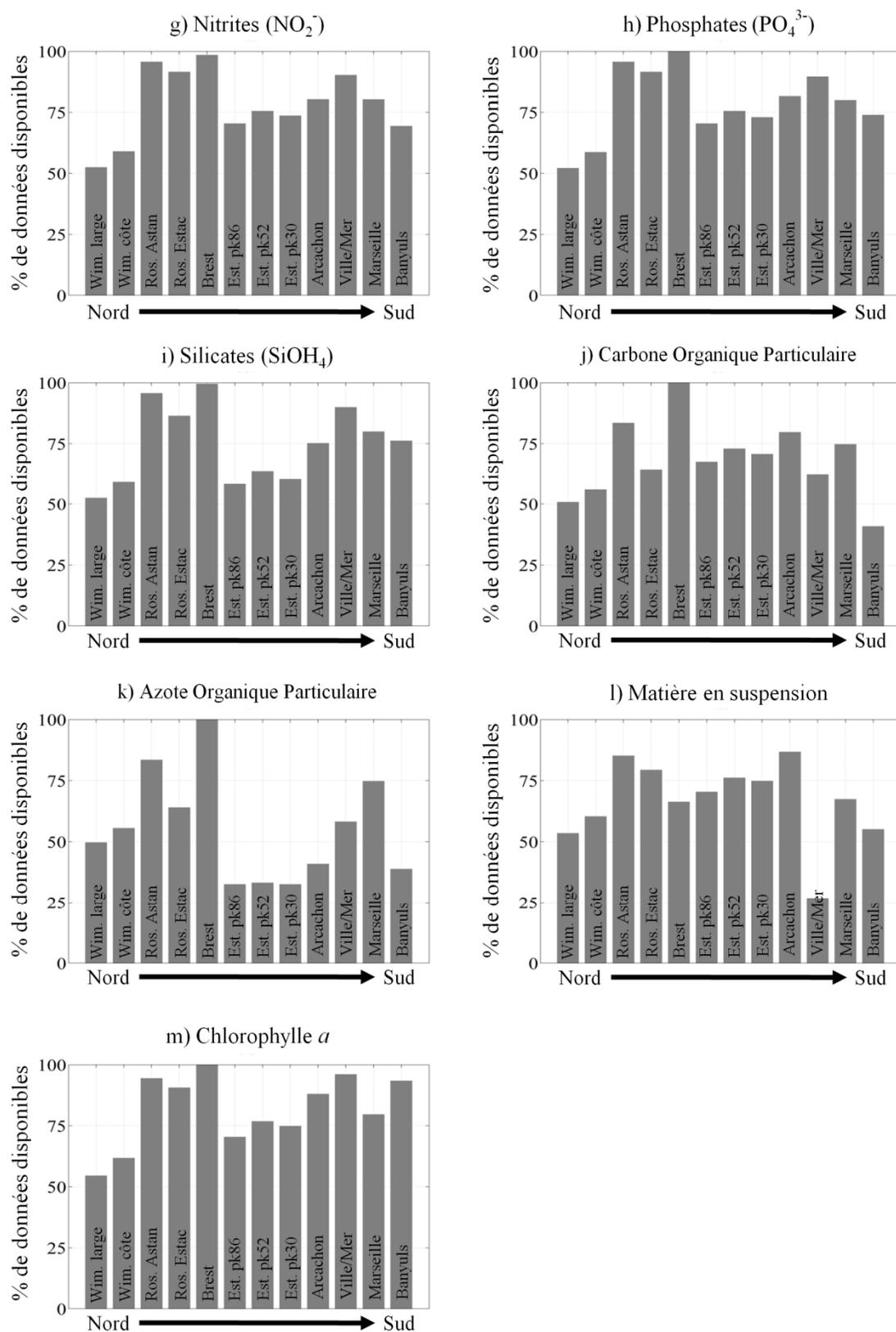


Figure A-II-2. Histogrammes du pourcentage de données SOMLIT présentes pour chaque site de prélèvement sur la période 1997-2009. (g) nitrites; (h) phosphates; (i) silicates; (j) carbone organique particulaire; (k) azote organique particulaire; (l) matière en suspension; (m) chlorophylle a. Les sites sont classés du site le plus au nord au site le plus au sud.

Annexe III :

Climate-driven changes in coastal marine systems of western Europe

Climate-driven changes in coastal marine systems of western Europe

Eric Goberville^{1,2,*}, Grégory Beaugrand^{1,3}, Benoit Sautour², Paul Tréguer⁴,
SOMLIT Team⁵

¹Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, UMR CNRS 8187 (LOG), 28 avenue Foch, 62930 Wimereux, France

²Université Bordeaux I – Laboratoire d'Océanographie Biologique UMR CNRS 5805, Rue du Pr Jolyet, 33120 Arcachon, France

³Centre National de la Recherche Scientifique, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille 1, France

⁴Institut Universitaire Européen de la Mer, UMS CNRS 3113, Université Européenne de Bretagne, Technopole Brest-Iroise, Place Nicolas Copernic, 29280 Plouzané, France

⁵Coordinators of the team in 2009: Pascal Claquin and Sébastien Lefebvre (Luc-sur-mer), Eva Bucciarelli and Jacques Guillou (Brest), Pascal Morin (Roscoff), Laure Mousseau (Villefranche-sur-Mer), Patrick Raimbault (Marseille), Nicolas Savoye (Arcachon), Sami Souissi (Wimereux), Renaud Vuillemin and Stéphane Blain (Banyuls)

ABSTRACT: Coastal marine systems, the interface between the ocean and terrestrial realms, are among the most important systems on the planet both ecologically and economically because of their crucial role in earth system functioning. Although direct impacts of human activities on physical, chemical and biological components of these systems have been widely documented, the potential influence of climate variability is less well known. Here, we used data from Service d'Observation en Milieu Littoral (SOMLIT), a marine monitoring programme that has since 1997 collected samples at 12 sites located along the French coasts from 42° to 51° N. Applying standardised principal component analysis (PCA), we documented the year-to-year fluctuations in these coastal systems and evaluated the potential influence of climate variability using data on atmospheric circulation (wind intensity and direction), precipitation and temperature. Our study revealed a pronounced sensitivity of these systems to climate variability. As the impact of climate change may become more prominent in the next decades, this study suggests that climate might strongly influence the marine coastal environment and act in synergism with other anthropogenic pressures to alter the state and functioning of biological and ecological systems and the services they provide.

KEY WORDS: Coastal systems · Climate change · SOMLIT · Anthropogenic impact · Multivariate analyses

Resale or republication not permitted without written consent of the publisher

INTRODUCTION

Many studies have shown that climate variability influences marine systems ranging from benthic (Kroncke et al. 1998, Warwick et al. 2002) to pelagic (Ohman & Hirche 2001) and from oceanic (Hare & Mantua 2000) to coastal (Attrill & Power 2002). The impact of climate on marine systems is not limited to a particular biological component but generally extends to all ecosystem functional units (Drinkwater et al. 2003). Some studies have documented potential links from phyto-

plankton to zooplankton to higher trophic levels (Aebischer et al. 1990, Frank et al. 2005, Lehodey et al. 2006). Climate also impacts the biodiversity of marine systems and their spatial and temporal fluctuations, modulating the phenology of many organisms (i.e. their rhythm of reproduction, Edwards & Richardson 2004) as well as their response at both year-to-year and decadal scales (Cury et al. 2002).

Climate influences systems through a number of physical and chemical processes and pathways (Kirby et al. 2009). In coastal systems, in addition to the well-

*Email: e.goberville@epoc.u-bordeaux1.fr

documented direct effects of temperature on organisms (Beaugrand 2004), temperature has an impact on water stratification, which in turn modulates vertical nutrient and oxygen inputs (Sarmiento & Gruber 2006). For example, climate warming is likely to increase the frequency of hypoxia or anoxia events (Diaz 2001, Selman et al. 2008). Atmospheric circulation (sea level pressure and wind direction and intensity), by its action on oceanic currents, also contributes to the horizontal inputs of nutrients and di-oxygen in coastal systems (Cloern 2001, Reid et al. 2003). Wind-induced and/or tidal-induced turbulent mixing are important as they control the onset of the spring phytoplankton bloom (Sverdrup 1953, Legendre & Demers 1984, Cloern 1996, Ragueneau et al. 1996, Gaedke et al. 1998) and the contact rates between prey and predators (Gaedke et al. 1998, Lewis & Pedley 2001, Lewis & Bala 2006). Coastal systems are also strongly influenced by the continent. Precipitation, by its effect on the volume of river discharge, is among the major mechanisms by which the strength of the interaction between the land and the ocean can be modulated (Harley et al. 2006).

The impact of humans on marine ecosystems occurs on a variety of temporal and spatial scales (Dobson et al. 1997). Biodiversity of marine systems is being altered by many human-induced factors including over-exploitation of marine resources (e.g. Omori et al. 1994, Jennings & Kaiser 1998), destruction of wetlands and habitat loss (Cloern 2001) and invasion of exotic species (Cariton & Geller 1993, Steneck 1998, Edwards et al. 2001). For decades, this has also included eutrophication as a result of increasing nutrient inputs (e.g. Howarth 1988, North Sea Task Force 1993, Cloern 2001) and perturbation due to dispersion of chemical pollutants in estuarine and coastal waters (e.g. Norse 1993). Fisheries have affected the marine environment both directly and indirectly (Omori et al. 1994, Omori & Norman 1998, Jennings et al. 2001). Teasing out the respective influence of natural and anthropogenic forcing on ecosystems represents perhaps one of the biggest challenges of this century.

Marine coastal systems of western Europe have been monitored since 1997 by Service d'Observation en Milieu Littoral (SOMLIT). Since 1997 this monitoring programme has gathered a database of physical, chemical and biological parameters at 12 sites located along the coasts of France, from the Mediterranean Sea (42° 30' N) to the English Channel (51° N) on a bimonthly basis (i.e. twice a month). The 12 studies sites have specific hydrographic features. The Atlantic, and especially the English Channel, coastal stations are under the direct influence of Atlantic ocean waters and are characterised by strong tidal forcing (e.g. the Ushant Front; Sournia et al. 1990); however, fresh-water inputs can impact their physical and chemical

characteristics locally, especially in the English Channel (the River Seine) and in the Bay of Biscay (the Gironde estuary). In the Mediterranean Sea, stations experience weak tidal forcing. The water circulation patterns are typically driven by the Liguro-Provençal current and surface currents flowing in a roughly NE-SW direction, almost parallel to the shoreline (Font et al. 1988). The Rhône River strongly influences fresh-water inputs in the north-western part of the Mediterranean Sea.

The main objectives of our study were (1) to examine year-to-year changes in coastal systems monitored by SOMLIT and (2) to quantify the potential influence of climate variability on coastal systems. Both the regional climatic and coastal variability were first characterised and then related to large-scale hydro-climatic forcing. Our analyses suggest a clear influence of climate variability on coastal systems.

MATERIALS AND METHODS

Environmental database: SOMLIT. SOMLIT is a French marine monitoring programme, created by a national institute, the Institut National des Sciences de l'Univers (INSU), which has coordinated activities of a number of marine stations along the French coasts since 1997 (Fig. 1). This programme currently comprises 7 marine laboratories which monitor sampling sites in the English Channel, the Atlantic Ocean and

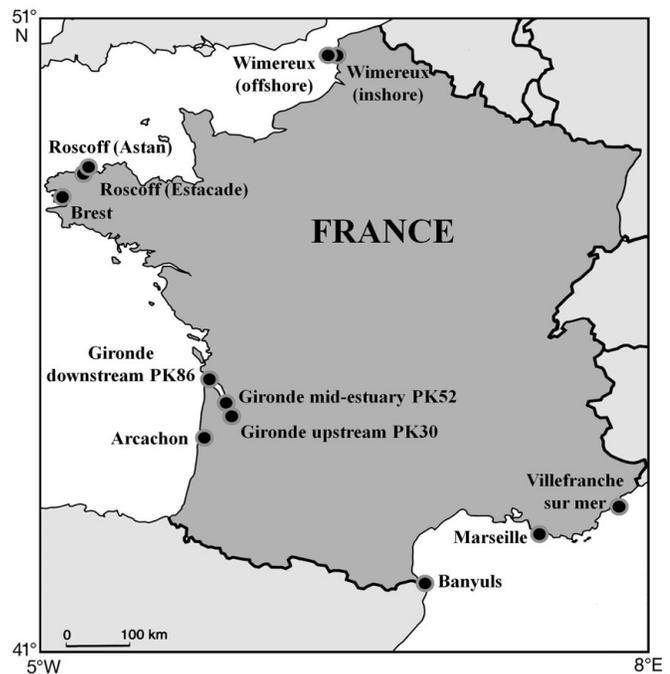


Fig. 1. Location of the Service d'Observation en Milieu Littoral (SOMLIT) sites used in our study

the Mediterranean Sea. At the beginning of the programme, the sampling sites were chosen because they reflected the diversity of systems along the French coasts (e.g. marine, estuarine and mixed systems). In practical terms, the choice of sampling sites was driven by (1) their local or regional environmental benefits, (2) the existence of historical biological or hydro-climatic monitoring and (3) the accessibility for regular sampling and for possible automation in the measurement of some parameters. Coastal systems studied under this programme have a variety of hydro-climatic characteristics ranging from the non-tidal Mediterranean Sea (e.g. Marseille) to the mega-tidal English Channel (Wimereux, see Fig. 1). Sampling has been carried out at least twice a month since 1997. A protocol has been established so that sampling is carried out at all stations at sub-surface and at high tide (for the tidal seas). More details on the monitoring are available at <http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr/fr>. All data gathered by this programme were considered in this study. It is important to note that because of dependency on meteorological conditions during sampling, the percentage of available data is not always the optimum (Tables 1 & 2).

Climatological variables. In this paper, gridded data on sea level pressure (SLP), wind intensity and its zonal (i.e. the west to east component of the wind) and meridional (i.e. the south to north component of the wind) components were used (Table 3). The wind intensity can be considered as a surface pressure gradient (Henderson-Sellers & Robinson 1986). Defined in this way, when combined, the information on both zonal and meridional wind enables the true average direction and strength of the wind to be calculated from the Pythagorean formula. These data were obtained from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP, USA) and the National Center for Atmospheric Research (NCAR, USA). The methodol-

ogy of the NCEP-NCAR reanalysis data assimilation was discussed in detail by Kalnay et al. (1996) and Kistler et al. (2000), and more information on the numerical procedures was provided by Betts et al. (1996) and Kalnay et al. (1996).

Sea surface temperatures (SST) were used as they can have a large influence on coastal processes (Harley et al. 2006). The data set is based on methods that use high-frequency SST anomalies interpolated in such a way that interpolated temperatures fit spatial modes. The technique takes into account sea-ice concentration to better assess SST at high latitudes and a modified historical bias correction for the period 1939 to 1941 as well as an improved error estimate. The optimum interpolation (OI) SST analysis is produced weekly on a 1° grid, so SST over land and island lakes is filled by interpolation. A full description of the OI analysis can be found in Reynolds & Smith (1994). In the present study, data were interpolated on a grid of 1° longitude \times 1° latitude from December 1981 to December 2006 (Table 3).

Precipitation data were used, as this parameter impacts both the input of freshwater and nutrients from land to ocean. Data consisted of monthly values from January 1979 to December 2006, with a spatial resolution of 2.5° longitude \times 2.5° latitude. More information on the data can be found at www.cru.uea.ac.uk/cru/data/ncep. All gridded climatological data were analysed between 1997 and 2006.

Large-scale hydro-climatic indices. Three large-scale hydro-climatic indices were selected because of their potential importance in the studied area (Marshall et al. 2001, Beaugrand 2009).

The winter North Atlantic Oscillation index (NAO; Hurrell 1995a) is a basin-scale alternation of atmospheric masses between the subtropical and the Arctic Atlantic (Dickson & Turrell 2000). This oscillation has been correlated with a large range of physical and bio-

Table 1. Data relating to the sites used in this study. For location of sites see Fig. 1

Site	Latitude	Longitude	Period (mm/yy)	Depth sampling (m)	Distance to coast (km)	Bathymetry (m)	River close to site	River flow ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
Wimereux offshore	50° 40' 75" N	1° 24' 60" E	11/97–12/06	1	9.26	53	Liane	3
Wimereux inshore	50° 40' 75" N	1° 31' 17" E	11/97–12/06	1	1.85	26	Liane	3
Roscoff Astan	48° 46' 40" N	3° 56' 15" W	02/00–12/06	1	3.5	60	Penzé	4
Roscoff Estacade	48° 43' 56" N	3° 58' 58" W	01/97–12/06	1	0.05	3	Penzé	4
Brest	48° 21' 60" N	4° 33' 38" W	03/98–12/06	2	0.25	10	Aulne	30
Downstream estuary	45° 31' 00" N	1° 57' 00" W	03/97–12/06	1	2	8.2	Garonne	631
Mid-estuary	45° 14' 80" N	0° 43' 50" W	01/97–12/06	1	1	7	Garonne	631
Upstream estuary	45° 04' 10" N	0° 38' 30" W	01/97–12/06	1	0.5	8	Garonne	631
Arcachon	44° 40' 00" N	1° 10' 00" W	01/97–12/06	3	0.05	6	Eyre	18.8
Villefranche-sur-Mer	43° 41' 00" N	7° 19' 00" E	01/97–12/06	1	1.85	95	–	0
Marseille	43° 14' 30" N	5° 17' 30" E	01/97–12/06	1	6.48	60	Rhône	1700
Banyuls	42° 29' 30" N	3° 8' 70" E	03/97–12/06	3	0.92	27	Baillaury	4

Table 2. Percentages of data available in the SOMLIT database for the studied period and for each site. For location of sites see Fig. 1

Site	Temp. (°C)	Salinity (‰)	Oxygen (ml l ⁻¹)	pH	Ammonium (µmol l ⁻¹)	Nitrate (µmol l ⁻¹)	Nitrite (µmol l ⁻¹)	Phosphate (µmol l ⁻¹)	Silicate (µmol l ⁻¹)	Particulate organic nitrogen (µg l ⁻¹)	Particulate organic carbon (µg l ⁻¹)	Suspended matter (µg l ⁻¹)	Chl <i>a</i> (µg l ⁻¹)
Wimereux offshore	80.13	78.21	89.74	85.26	83.97	85.26	85.26	84.62	88.46	87.82	86.54	87.18	89.74
Wimereux inshore	90.06	87.58	95.65	91.93	90.06	93.79	93.79	93.17	96.27	93.79	93.17	93.79	96.89
Roscoff Asian	96.79	97.33	97.33	86.63	96.79	98.40	98.40	98.40	98.40	73.80	73.80	85.56	97.86
Roscoff Estacade	97.19	97.99	97.59	90.76	98.39	97.99	97.99	97.99	91.57	55.02	55.02	83.53	97.19
Brest	99.79	98.73	98.31	58.05	97.88	98.73	96.61	98.52	98.73	89.83	90.04	58.26	98.73
Downstream estuary	95.51	95.51	86.89	86.89	61.05	65.92	66.29	66.29	50.94	64.04	20.60	87.27	69.66
Mid-estuary	98.63	98.63	93.84	91.44	59.93	66.78	67.47	67.12	53.08	66.44	18.15	91.10	71.92
Upstream estuary	100	100.00	94.37	90.85	60.92	66.90	67.96	67.96	53.52	66.20	19.72	91.55	72.18
Arcachon	99.73	98.92	85.71	86.52	61.99	85.18	81.67	83.29	68.19	83.83	22.37	94.61	95.42
Villefranche-sur-Mer	98.51	97.91	37.16	4.63	0.00	85.82	86.72	84.03	83.88	40.00	36.27	5.37	95.52
Marseille	99.15	93.62	94.47	0.00	94.04	97.02	97.02	96.60	96.60	82.98	82.98	77.87	96.60
Banyuls	79.58	79.58	67.11	44.61	83.55	87.90	58.79	63.71	66.16	26.47	23.82	42.72	87.90

logical indicators or phenomena, e.g. the paths of Atlantic storms and their intensity (Hurrell 1995b), precipitation patterns (Hurrell 1995a), abundances of zooplankton species (Fromentin & Planque 1996, Beaugrand et al. 2000), or fluctuations in the productivity of some fish and invertebrate species (Alheit & Hagen 1997, Anderson 2000).

An index of Northern Hemisphere temperature (NHT) anomalies from 1958 to 2006 was used (Beaugrand 2009). Data were provided by the Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Meteorological Office (Exeter, UK).

The Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) is a large-scale oceanic phenomenon, the source of natural variability in the range of 0.4°C in many oceanic regions (Enfield et al. 2001). We used the index constructed from Extended Reconstruction SST (ERSST) data and averaged in the area of 25 to 60°N and 7 to 75°W, minus regression (i.e. detrending is intended to remove the North Atlantic SST anomaly data from the analysis) on global mean temperature (National Climate Data Center, USA: NCDC). This index was downloaded from <http://climexp.knmi.nl/>. Previous studies have shown that this oceanic oscillation might have a large influence on SST changes (Enfield et al. 2001, Keenlyside et al. 2008).

Analysis 1: long-term spatial and temporal changes in coastal systems. SOMLIT data gather information on physical, biological and chemical properties of the water column structured in space and time. The original 3-way data matrix was therefore composed of 13 parameters × 120 mo (period 1997 to 2006) × 12 stations.

Prior to the analysis, data were averaged per month, and a simple moving average of order 6 was used to remove the effect of seasonality (Legendre & Legendre 1998):

$$y_i = \frac{1}{2m+1} \sum_{j=i-m}^{i+m} x_j \quad (1)$$

where y_i is the simple moving average at observation i , m is the number of months, $2m+1$ is the time window with $m+1 \leq i \leq n-m$, with n being the length of the time series.

Only a few statistical techniques exist to analyse such complex tables, e.g. co-inertia analysis (Dolédéc & Chessel 1994) and 3-mode principal component analysis (PCA; Hohn 1993). The 3-mode PCA, used by Beaugrand et al. (2000), first calculates 3 classical PCAs on 2-dimensional tables after having transformed 1 table to ensure that the total inertia is identical in each mode (Beaugrand et al. 2000). The analysis then relates the different modes by assessing a core matrix calculated from the eigenvectors of each mode (Beaugrand et al. 2000). In the present study, we only calculated 1 standardised PCA (i.e. subtracting the mean and dividing by the SD to give all parameters the same variation) on the deployed 3-way matrix 120 mo

Table 3. Origin and characteristics of climatic data used in this study. Source: National Centers for Environmental Protection/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR). n: number of data. For all climatological variables the spatial resolution of the grid was 1°, with the exception of precipitation for which it was 2.5°. Data were obtained each month

Data	Units	Spatial range	Years	n ($\times 10^5$)
Sea level pressure	hPa	11.5° W to 11.5° E 60.5° to 28.5° N	1948–2006	5.60
Zonal wind	m s ⁻¹	11.5° W to 11.5° E 60.5° to 28.5° N	1948–2006	5.60
Meridional wind	m s ⁻¹	11.5° W to 11.5° E 60.5° to 28.5° N	1948–2006	5.60
Wind intensity	m s ⁻¹	11.5° W to 11.5° E 60.5° to 28.5° N	1948–2006	5.60
Sea surface temperature	°C	11.5° W to 11.5° E 60.5° to 28.5° N	1982–2006	2.37
Mean precipitation	mm d ⁻¹	13.75° W to 11.25° E 56.25° to 28.75° N	1979–2006	0.44

\times (12 parameters \times 12 stations) (Fig. 2), which represents the first stage performed in a 3-mode PCA. This PCA was performed on a correlation matrix. Although the number of variables is greater than the number of observations, our analysis remains valid because we only focused on a limited number of principal components (PCs; a total of 2 here) (Legendre & Legendre 1998). It should also be noted that temperature was not included directly in the analysis but as a supplementary variable, so that it does not contribute to PCs. Eigenvectors were normalised as follows:

$$\mathbf{U}_n = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda}^{1/2} \quad (2)$$

where \mathbf{U}_n is the matrix of normalised eigenvectors, \mathbf{U} is the matrix of eigenvectors and $\mathbf{\Lambda}$ is the diagonal matrix of eigenvalues. Thus, the variables in the space of eigenvectors represented the linear correlation with the first and the second PCs (Legendre & Legendre 1998). We used this mathematical property to add temperature as a supplementary variable, simply by calculating the linear correlation (Pearson correlation coefficient) between temperature and the first 2 PCs. Thus, temperature had no weight in the calculation of the PCs. The use of this statistical technique allowed in a single analysis the characterisation of temporal changes, the identification of parameters that contribute to the change and the recognition of locations mainly influenced by the temporal patterns. Prior to the mapping of each eigenvector (12 stations \times 13 parameters), the order of each parameter was sorted by performing a PCA on the matrix of eigenvectors acquired after PCA on SOMLIT data. The PCA of eigenvectors identifies parameters that are close to each other in a Euclidean distance sense (Elmore & Richman 2001), thereby providing a new similarity matrix choice.

To examine the influence of each environmental parameter on the first and second PC, we did a sensitivity analysis by re-performing the standardised PCA on a decreasing number of parameters from 12 to 1. It should be noted that even with 1 parameter, there were still 12 sites; therefore, the dimension of the matrix was 120 observations \times 12 sites when only 1 parameter remained. The sensitivity analysis was also performed by removing each site from 12 sites to only 1. In such a case, when only 1 site remained, the dimension of the matrix was 120 observations \times 12 parameters. Two separate standardised PCAs were also conducted for Mediterranean (matrix 120 observations \times 36 parameters and sites) and Atlantic sites (matrix 120 observations \times 108 parameters and sites).

Analysis 2: long-term spatial and temporal changes in some climatological variables. Long-term climatological changes were investigated by standardised PCA (Joliffe 1986). The PCA was performed on a correlation matrix with the double objective of identifying major long-term changes in climatological variables (examination of PCs) and locating their geographical patterns (mapping of eigenvectors, Beaugrand 2009). A total of 6 PCAs was performed on the climatological data (Table 3). The analyses were applied in the spatial domain ranging from 14° W to 12° E and from 28° to 61° N (Table 3). For all climatological variables, except precipitation (Table 3), the spatial grid had a spatial resolution of 1° latitude \times 1° longitude. As with SOMLIT data, a simple moving average of order 6 was used to remove the effect of seasonality.

Analysis 3: correlation analysis. Correlation analyses were performed between the first PCs obtained from Analysis 1 (year-to-year changes in the coastal environment) and the first PCs from the PCAs performed on (regional) climatological variables (Analysis 2), and all PCs were correlated to large-scale hydro-climatic indices (see Figs. 2 & 8, see Tables 4 & 5). Probabilities were corrected to account for temporal autocorrelation. A Box-Jenkins (Box & Jenkins 1976) autocorrelation function modified by Chatfield (1996) was used to assess the temporal dependence of years. The Chelton formula (Chelton 1984) was applied to adjust the degrees of freedom. This procedure was recommended by Pyper & Peterman (1998).

When ordinary correlations between year-to-year changes in the coastal systems and hydro-climatic variability were greater than 0.5, cross-correlation analyses were performed to examine whether these relationships were direct or occurred with a certain

lag. These analyses were performed by lagging months from 1 to 60 (5 yr). To assess the probability of the cross-correlogram, we adjusted the degrees of freedom for each lag and also for temporal autocorrelation. As a result of this procedure, an identical value of correlation for 2 successive lags can have different values of probability, independently of the degrees of freedom lost by the lag itself.

Multiple testing increases the probability of a type I error (i.e. finding too many significant correlations). To correct for this potential bias, the Hochberg (1988)

method was applied with $\alpha = 0.05$ for correlations with climatological variables and for correlations with large-scale hydro-climatic indices. This nonparametric correction is considered more robust and less conservative than the Bonferroni technique (Legendre & Legendre 1998).

All methods used in the present study were programmed using MATLAB language.

RESULTS

Year-to-year changes in French coastal systems

A PCA was performed on the 2-way table (120 mo \times 12 stations – 12 parameters) with temperature as a supplementary variable. Year-to-year changes in the first PC (24.16% of the total variability) exhibited a period of relative stability until 2001, followed by a pronounced decrease in the trend until 2005 (Fig. 3a, left). Mapping of the first eigenvector indicated that the trend detected by the component is especially strong for sites located in the English Channel, the Celtic Sea and to a lesser extent Arcachon, Banyuls and Marseille (Fig. 3a, right). Parameters that contributed to the changes were mainly nutrients, particulate organic carbon (POC) and to a lesser extent particulate organic nitrogen (PON). The nutrients and POC were positively correlated to the first component so that the reduction observed in the component after 2001 corresponded to a decrease in nutrient concentration for sites located mainly in the English Channel. Salinity was strongly negatively correlated with the first PC for all stations, indicating an increase in salinity after the shift of 2001. The Gironde estuary differed from the other sites, showing a tendency toward an increase in phosphate, silicic acid, particulate matter (PON and suspended particulate matter, SPM) and chlorophyll (chl) *a*.

Year-to-year changes in the second PC (14.13% of the total variability) exhibited a pseudo-cyclical variability of 6 to 7 yr (Fig. 3b, left). Pronounced negative values were observed in the second PC between 2001 and 2005 at the time the first component diminished (Fig. 3a). Mapping of the sorted second eigenvector (Fig. 3b, right) showed that POC, PON, SPM, pH and to

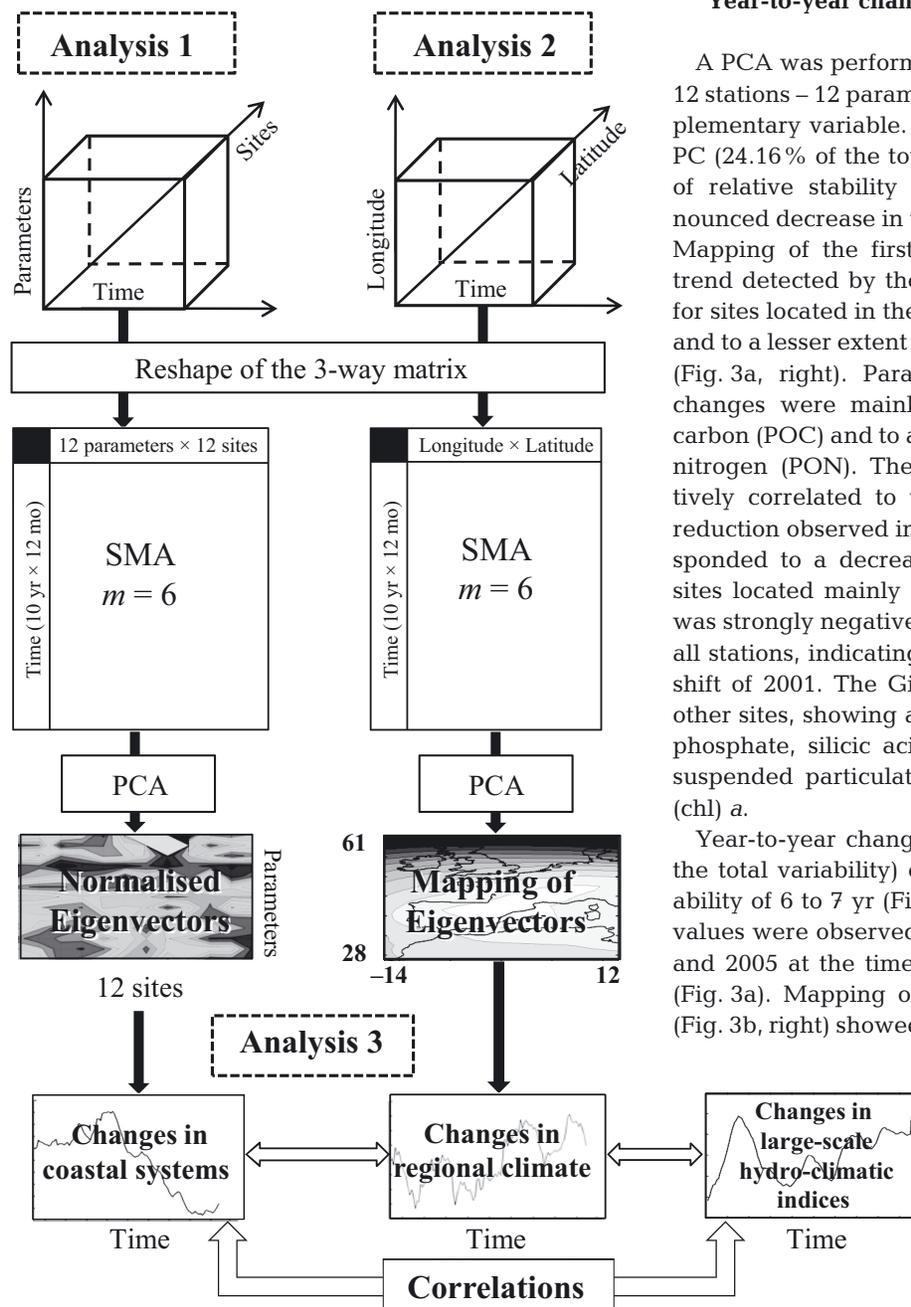


Fig. 2. Statistical analyses applied in this study. SMA: simple moving average of order 6; PCA: principal component analysis; m: no. of months

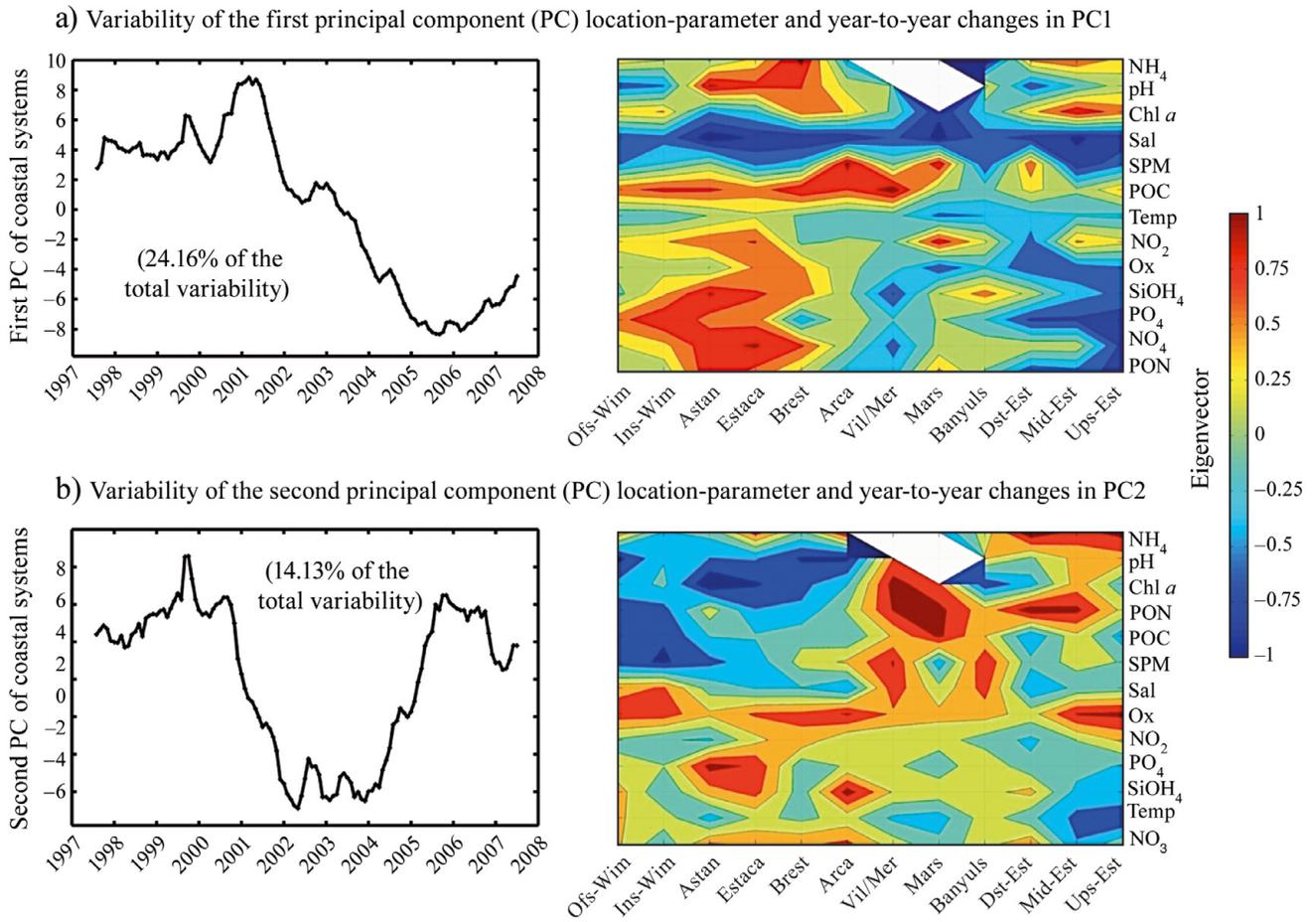


Fig. 3. Principal component analysis (PCA) of the year-to-year changes in the coastal systems of western Europe in (a) the first and (b) the second principal component (PC) location-parameter (left) and mapping of the first eigenvector (right). Temperature was added in the analysis as a supplementary variable. Sites were ordered from north to south and estuarine sites positioned along the abscissa. Ofs-Wim: Wimereux (offshore); Ins-Wim: Wimereux (inshore); Astan: Roscoff Astan; Estaca: Roscoff Estacade; Brest; Arca: Arcachon; Vil/Mer: Villefranche-sur-Mer; Mars: Marseille; Banyuls; Dst-Est: Gironde PK86 (downstream); Mid-Est: Gironde PK52 (middle); Ups-Est: Gironde PK30 (upstream); Sal: salinity; Ox: oxygen; NH_4 : ammonium; NO_3 : nitrate; NO_2 : nitrite; PO_4 : phosphate; SiOH_4 : silicate; POC: particulate organic carbon; PON: particulate organic nitrogen; SPM: suspended particulate matter; Chl *a*: chlorophyll *a*; Temp: temperature

a lesser extent chl *a* were negatively related to the second PC in stations located in Arcachon and northwards, indicating an increase in the values of these parameters between 2001 and 2005. There was a distinct difference between the western coasts and the Mediterranean Sea. Dissolved di-oxygen was strongly positively correlated with the second component for all the stations, indicating a low-amplitude tendency toward a decrease in di-oxygen concentration everywhere during the period 2001 to 2005.

Environmental temperature was added in the analysis as a supplementary variable because we then calculated correlations between changes in both regional temperature and the first PC. If environmental temperature was included directly in the PCA, the 2 variables (PC1 SOMLIT and regional SST) would not be entirely

independent (an important assumption in correlation analysis, see Sokal & Rohlf 1995). Thereby, the variable was removed from the analysis. However, as the eigenvectors show (Fig. 3), the environmental temperature is highly correlated to the first component and therefore the removal of this variable did not affect the first PC.

Results from the sensitivity analysis showed that our conclusions were not greatly affected by removing an increasing number of parameters or sites (Fig. 4). Indeed, the correlation of the first component decreased from 0.994 ($p < 0.05$) when based on 11 parameters to 0.458 ($p < 0.05$) when based on only 1 parameter. Despite the decrease observed in the percentage of variance explained by the analysis, the significant positive correlation suggested that

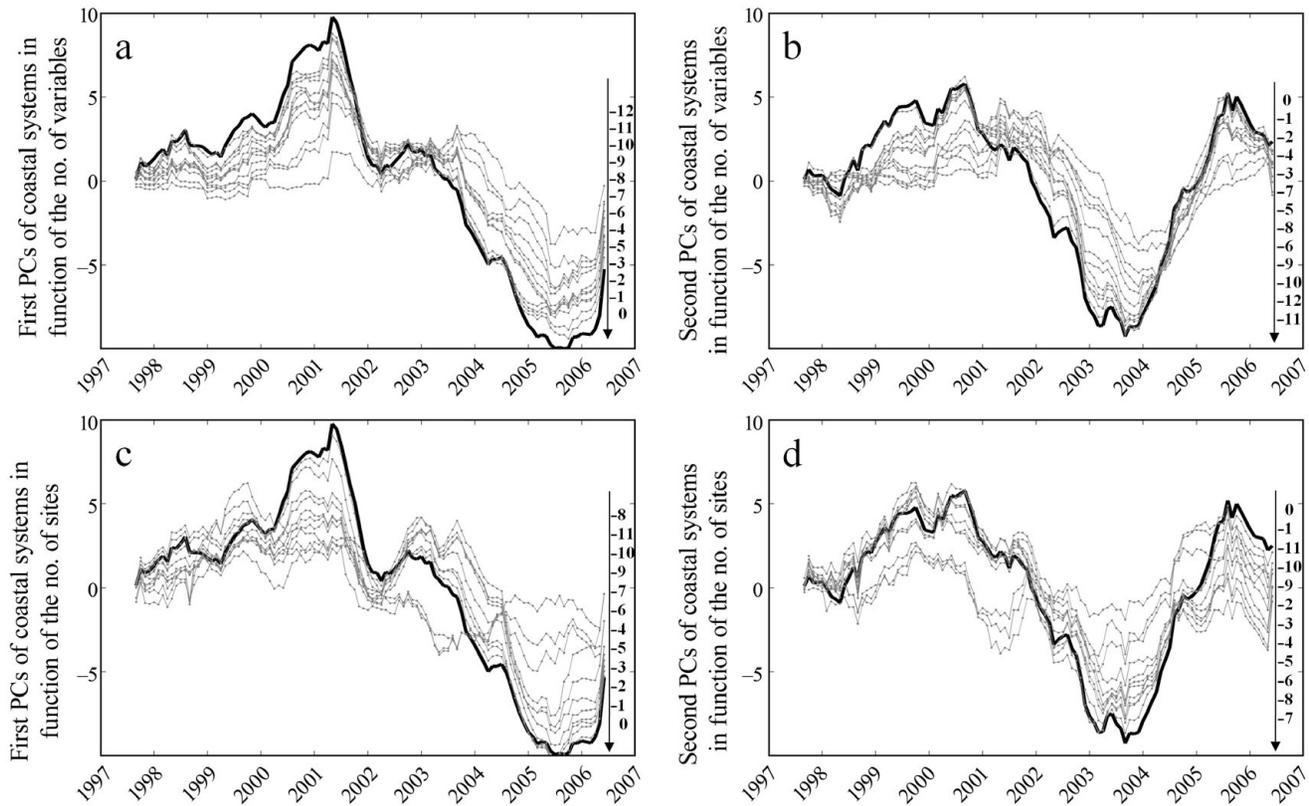


Fig. 4. Sensitivity analysis on the first 2 principal components (PCs) calculated from a standardised principal component analysis (PCA) performed on a decreasing number of parameters and sites. The thick black line represents the PCs when no parameter or site was removed. (a) First and (b) second PC of the PCA performed on the table: time \times (observations – variables) based on a decreasing number of variables from 12 to 1. (c) First and (d) second PC of the PCA performed on the table: time \times (observations – variables) based on a decreasing number of sites from 12 to 1. '0' indicates that no variable or site was removed; negative values on the graph indicate the number of sites or variables that were removed from the PCA

results were still positively correlated based on only 1 variable. For the second PC, this correlation decreased from 0.996 to 0.637. Our conclusion was also not affected by the removal of sites. The correlation of the first component decreased from 0.998 when based on 11 sites to 0.657 when based on only 1 site; the correlation of the second PC decreased from 0.996 to 0.389.

The 2 separate standardised PCAs confirmed the average correlation between the year-to-year changes in Atlantic and Mediterranean sites observed in Fig. 3 (mapping of eigenvectors). The correlation between the 2 first PCs (Atlantic: 28.47% of the total variance; Mediterranean Sea: 33.10% of the total variance) were high ($r = 0.69$) although at the limit of significance ($p = 0.12$) when the temporal autocorrelation was taken into account (Fig. 5a). The correlation was low ($r = 0.08$) and not significant ($p = 0.78$) when the 2 second PCs (Atlantic: 16.82% of the total variance; Mediterranean Sea: 17.20% of the total variance) were examined (Fig. 5b).

Year-to-year changes in regional climate

Six PCAs were performed on the 2-way table (time \times space) of each climatological variable to characterise the spatial and temporal changes in regional climate during the period of sampling by SOMLIT. We only describe 4 analyses in detail (zonal and meridional wind, temperature and precipitation), as results obtained on SLP and wind intensity can be deduced from the analyses performed on directional wind.

Changes in atmospheric circulation may strongly affect coastal systems. The examination of the first component (42.65% of the total variability) of the PCA performed on zonal winds showed, for all regions covering the French coast, a stepwise increase in zonal wind in 2001 and the occurrence of 2 minima around 1999 and 2005 (Fig. 6a). Between 2001 and 2005, an irregular reduction in zonal wind was observed. As the eigenvectors were positive, an increase in the value of the PC should be interpreted as an increase in zonal wind and vice versa. The second component (20.56%

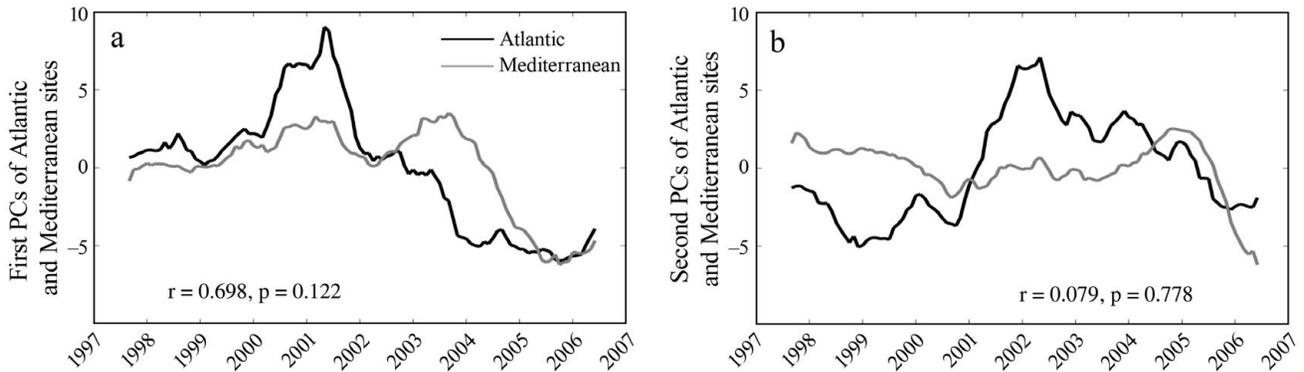


Fig. 5. Comparison of (a) the first and (b) second principal components (PCs) from a standardised principal component analysis (PCA) performed on Atlantic (black) and Mediterranean sites (gray), showing changes in the coastal systems of western Europe. Probabilities were corrected to account for temporal autocorrelation using the method recommended by Pyper & Peterman (1998)

of the total variability) showed a pseudo-cyclical variability of about 4 yr (Fig. 6b). For regions mainly located in the eastern part of the English Channel and Villefranche-sur-Mer where eigenvectors are negative, the component indicated higher zonal winds between 1998 and 2001 and lower winds between 2001 and 2005. Locations of high values in the first and second eigenvectors are obviously related to the boundary between regions of lower and higher SLP (see

Fig. S1 in the supplement at www.int-res.com/articles/suppl/m408p129_supp.pdf).

The examination of the first eigenvectors (45.35 % of the total variability) of the PCA performed on meridional winds showed a clear bi-polar pattern (Fig. 7a). Values of the eigenvectors were strongly positive around Spain and negative north of France. Therefore, the first component was not considered to explain year-to-year changes in the French coastal systems.

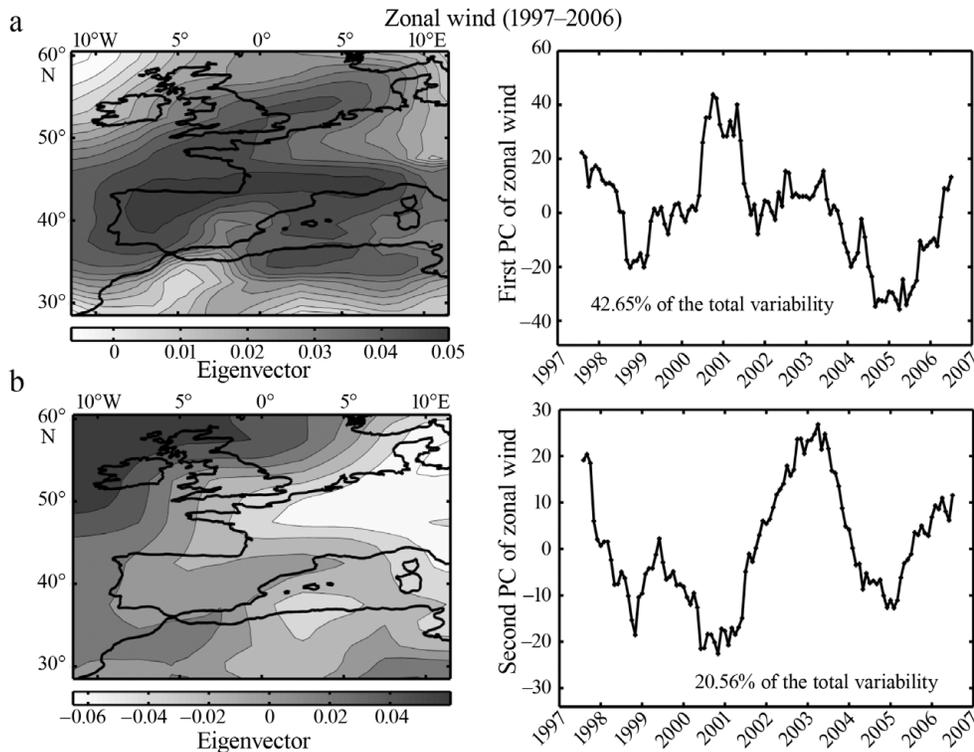


Fig. 6. Principal component analysis (PCA) on the year-to-year changes in zonal wind (1997–2006). Mapping of (a) the first eigenvector (left) and year-to-year changes in the first principal component (PC; right; 42.65 % of the total variability) and (b) the second eigenvector (left) and year-to-year changes in the second PC (right; 20.56 % of the total variability)

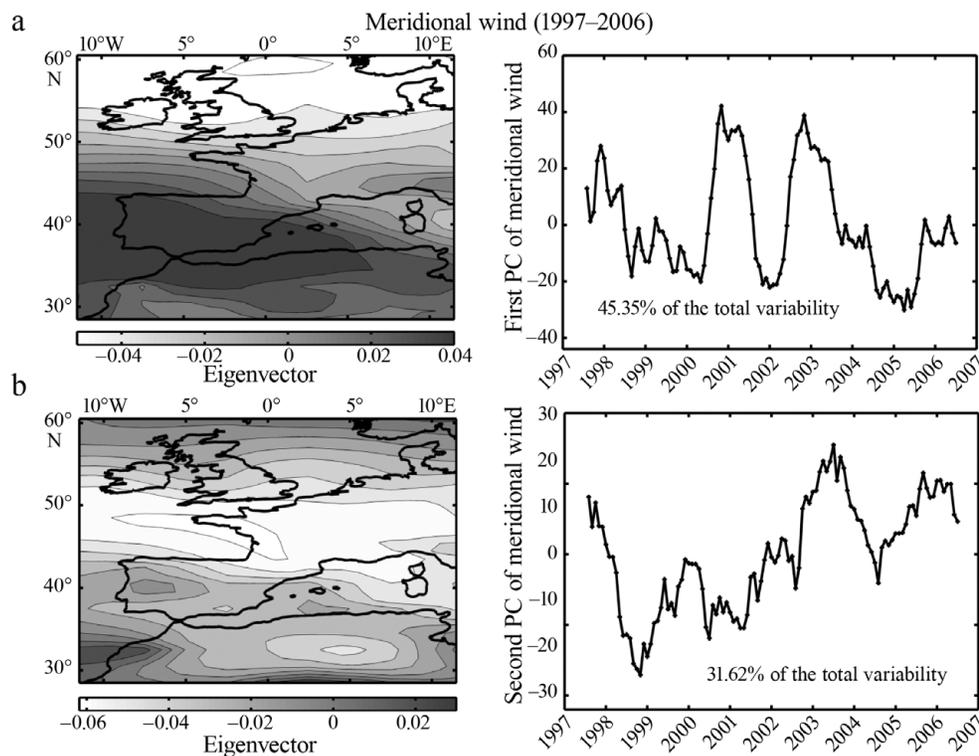


Fig. 7. Principal component analysis (PCA) on the year-to-year changes in meridional wind (1997–2006). Mapping of (a) the first eigenvector (left) and year-to-year changes in the first principal component (PC; right; 45.35% of the total variability) and (b) the second eigenvector (left) and year-to-year changes in the second PC (right; 31.62% of the total variability)

The second eigenvectors (31.62% of the total variability) had great negative values centred around France (Fig. 7b, left). The second component therefore revealed a continued decrease in meridional winds with a superimposed pseudo-cyclical variability. Minima in meridional winds were observed during 1998, 2003 and 2006, and a maximum in 1999. The information gained from both zonal and meridional winds was in general also found in the examination of the PCA performed on wind intensity (see Fig. S2 in the supplement at www.int-res.com/articles/suppl/m408p129_supp.pdf).

Change in atmospheric circulation influences SST. The examination of year-to-year changes in the PC (71.26% of the total variability) showed high values in 1998 and 2003–2004, and minima in 1999 and 2005–2006 (Fig. 8a). As the first eigenvector was positive, a positive value of the component indicated warmer SST (and vice versa). The component exhibited a cyclical variability, close but slightly greater than an annual cycle and despite the use of the order-6 simple moving average. The second PC (10.35% of the total variance) detected an anomaly in SST in 2002 (Fig. 8b).

Atmospheric circulation changes also influence precipitation patterns that affect coastal systems through river run-off. Year-to-year changes in the first PC

(36.99% of the total variability) showed an abrupt increase in the value of the component that started at the end of 1998 and ended in 2002 (Fig. 9a). This phenomenon was particularly pronounced in the Mediterranean Sea but also reflected changes occurring over the western coasts of France (see high values in the first eigenvector, Fig. 9a). The second PC (19.92% of the total variance) exhibited a pseudo-cyclical variability of about 3 yr with opposite consequences in southern and northern regions.

Relationships between year-to-year changes in coastal systems, regional climate and large-scale hydro-climatic indices

Linear correlations between the first 2 PCs that originated from the 6 PCAs and the first 2 components from the PCA performed to investigate year-to-year changes in coastal systems were calculated to test whether such changes were related to changes in regional climate (Table 4).

Results from correlation analyses suggested a concomitant change in coastal systems (as inferred from the first component of the PCA performed on environmental parameters) and atmospheric circulation, tem-

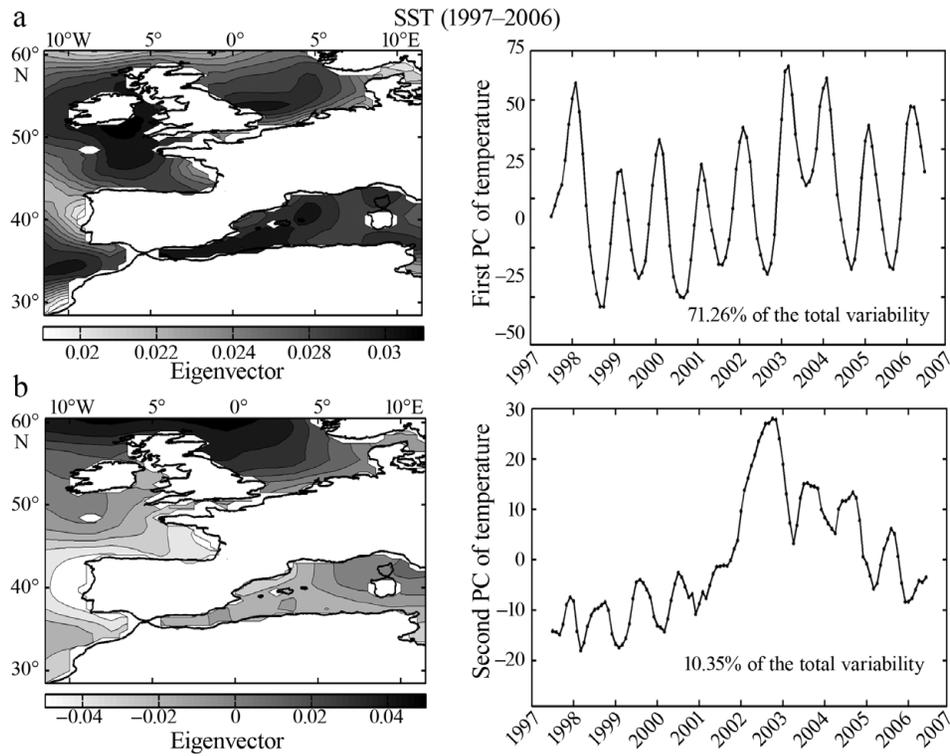


Fig. 8. Principal component analysis (PCA) on the year-to-year changes in sea surface temperature (SST; 1997–2006). Mapping of (a) the first eigenvector (left) and year-to-year changes in the first principal component (PC; right; 71.26 % of the total variability) and (b) the second eigenvector (left) and year-to-year changes in the second PC (right; 10.35 % of the total variability)

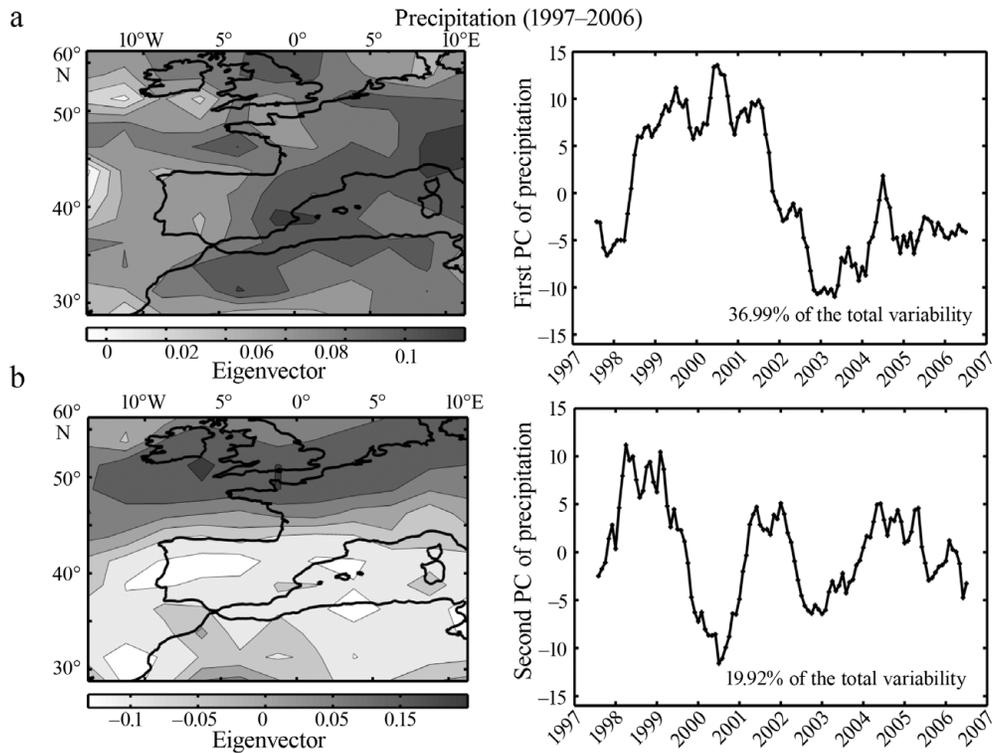


Fig. 9. Principal component analysis (PCA) on the year-to-year changes in mean precipitation (1997–2006). Mapping of (a) the first eigenvector (left) and year-to-year changes in the first principal component (PC; right; 36.99 % of the total variability) and (b) the second eigenvector (left) and year-to-year changes in the second PC (right; 19.92 % of the total variability)

perature and precipitation (Table 4). The link between the changes in the coastal systems and climate was patent. However, a graphical examination of the correlation showed that the link with climate occurred when the forcing was markedly low or high (Fig. 8). For example, high values observed in 2001 of the first component from the PCA performed on the coastal environment coincided with high values of zonal wind and vice versa (Fig. 10b), lower temperatures (not shown) and higher precipitation (Fig. 10e). Taking into consideration interpretations of the PCAs (see Figs. 5–9), this analysis indicated that the changes observed in nutrients, di-oxygen, chl *a* and particulate matter in the Atlantic ocean and the English Channel were positively related to wind intensity, direction and precipitation and negatively related to temperature. The link between environmental and climate change seemed more difficult to detect after 2005.

The second PC originating from the PCA performed on environmental parameters (SOMLIT) was in general less related to climatological parameters (Table 4). A weak but significant link was detected with zonal wind (Fig. 10f) and precipitation (Fig. 10h). However, analysis of the graphs showed that the link was detected for substantial changes in climatological variables and seemed less obvious at the end of the time series.

Examination of potential lags was carried out by cross-correlation analysis for pairs of variables that

showed correlations >0.5 (see Table 4). Examination of all cross-correlograms (Fig. 11) suggests that no lag existed between the year-to-year variability in coastal systems and hydroclimate. The slight increase in the value of the correlation was too small (maximum range of correlation between $r = 0.704$ and $r = 0.752$ for the cross-correlogram between PC1 SOMLIT data and PC1 zonal wind, Fig. 11b) to be related to a significant lag. This was probably more influenced by the decrease in the degrees of freedom. However, the present analysis is influenced by the application of the order-6 simple moving average.

Correlations between coastal environmental and regional climatological changes (annual mean) and large-scale hydro-climatic indices (NHT, AMO and NAO) were calculated between 1997 and 2006 (Table 5). Only NHT anomalies were correlated with changes in the coastal environment. High correlations were found between regional climate and this index, but only SLP was correlated significantly with NHT anomalies after adjusting the probability of considering multiple tests of correlation. Correlations between the state of the NAO and regional climate and changes in the coastal environment were low and insignificant, suggesting a weak impact of the NAO in our region (Table 5). High correlations were found between the AMO and the first PC that originated from the analysis on SOMLIT data. However, after correction to account for multiple testing, the probability of the correlation (i.e. the *p* value) exceeded 0.05 (Table 5).

DISCUSSION

Results suggest that coastal systems of western Europe located in the 42 to 51° N latitude range were affected by climate variability during the period 1997 to 2006. Strong correlations were found between regional climate and changes observed in the coastal environment, suggesting a substantial impact of climate on the coastal systems of western Europe. Both regional hydro-climatic and coastal changes were influenced by NHT, a large-scale climatological index. However, our study only covers a short time period. According to Southward (1995), long periods of monitoring are required to unambiguously separate the main drivers of changes that can affect a marine system (Hawkins et al. 2003). For example, Fromentin & Planque (1996) detected a strong negative correlation between the state of the NAO and the abundance of *Calanus finmarchicus* in the North Sea for the period 1962 to 1992. As the relationship was highly significant, they attempted to forecast the abundance of the species for a given value of the NAO. However, the correlation broke down after 1996 (Planque & Reid 1998). This example suggests

Table 4. Correlations between the first 2 principal components (PCs) of the principal component analysis (PCA) performed on Service d'Observation en Milieu Littoral (SOMLIT) data and the first 2 PCs of the PCA performed on each climatological variable (SLP: sea level pressure; UWIND: zonal wind; VWIND: meridional wind; IWIND: wind intensity; SST: sea surface temperature; MP: mean precipitation), with probability corrected to account for temporal autocorrelation with the method recommended by Pyper & Peterman (1998); *df* = 106. *p* values were also adjusted with Hochberg's procedure (1988) and $\alpha = 0.05$. Significant correlations ($r > 0.5$) are in **bold**

Variable	PC	SOMLIT PC			
		1		2	
		<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>
SLP	1	0.462	0.012	0.046	0.809
	2	-0.692	0.128	0.333	0.420
UWIND	1	-0.704	0.034	-0.064	0.870
	2	0.295	0.409	-0.512	0.195
VWIND	1	-0.451	0.031	-0.233	0.336
	2	0.658	0.156	-0.375	0.407
IWIND	1	0.751	0.086	-0.193	0.678
	2	0.224	0.218	0.233	0.285
SST	1	0.320	0.137	-0.405	0.045
	2	0.315	0.606	-0.709	0.114
MP	1	-0.657	0.229	0.574	0.233
	2	0.094	0.592	0.019	0.952

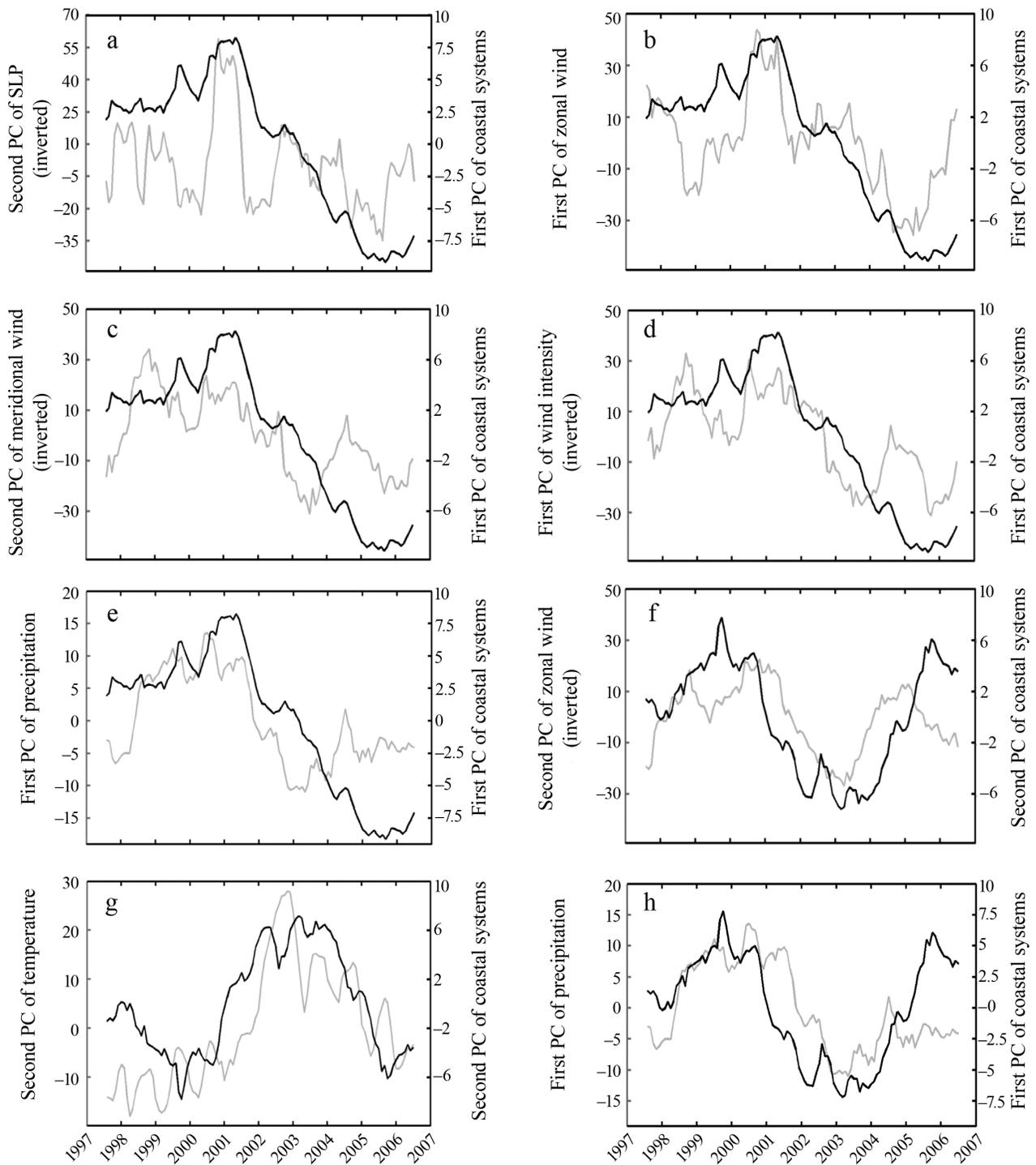


Fig. 10. Year-to-year changes in the coastal systems of western Europe in relation to hydro-climatic forcing. Year-to-year changes in the coastal systems of western Europe (first principal component [PC1] of the principal component analysis [PCA] performed on SOMLIT data; in black) and (a) sea level pressure (SLP; PC2 of the PCA performed on SLP; in gray), (b) zonal wind (PC1 of the PCA performed on zonal wind; in gray), (c) meridional wind (PC2 of the PCA performed on meridional wind; in gray), (d) wind intensity (PC1 of the PCA performed on wind intensity; in gray), (e) precipitation (PC1 of the PCA performed on precipitation; in gray). Year-to-year changes in the coastal systems of western Europe (PC2 of the PCA performed on SOMLIT data; in black) and (f) zonal wind (PC2 of the PCA performed on zonal wind; in gray), (g) sea surface temperature (SST; PC2 of the PCA performed on SST; in gray), (h) precipitation (PC1 of the PCA performed on precipitation; in gray). See Table 4 for the values of correlations. Probabilities were corrected to account for temporal autocorrelation using the method recommended by Pyper & Peterman (1998), p values were adjusted with Hochberg's procedure (1988) and $\alpha = 0.05$

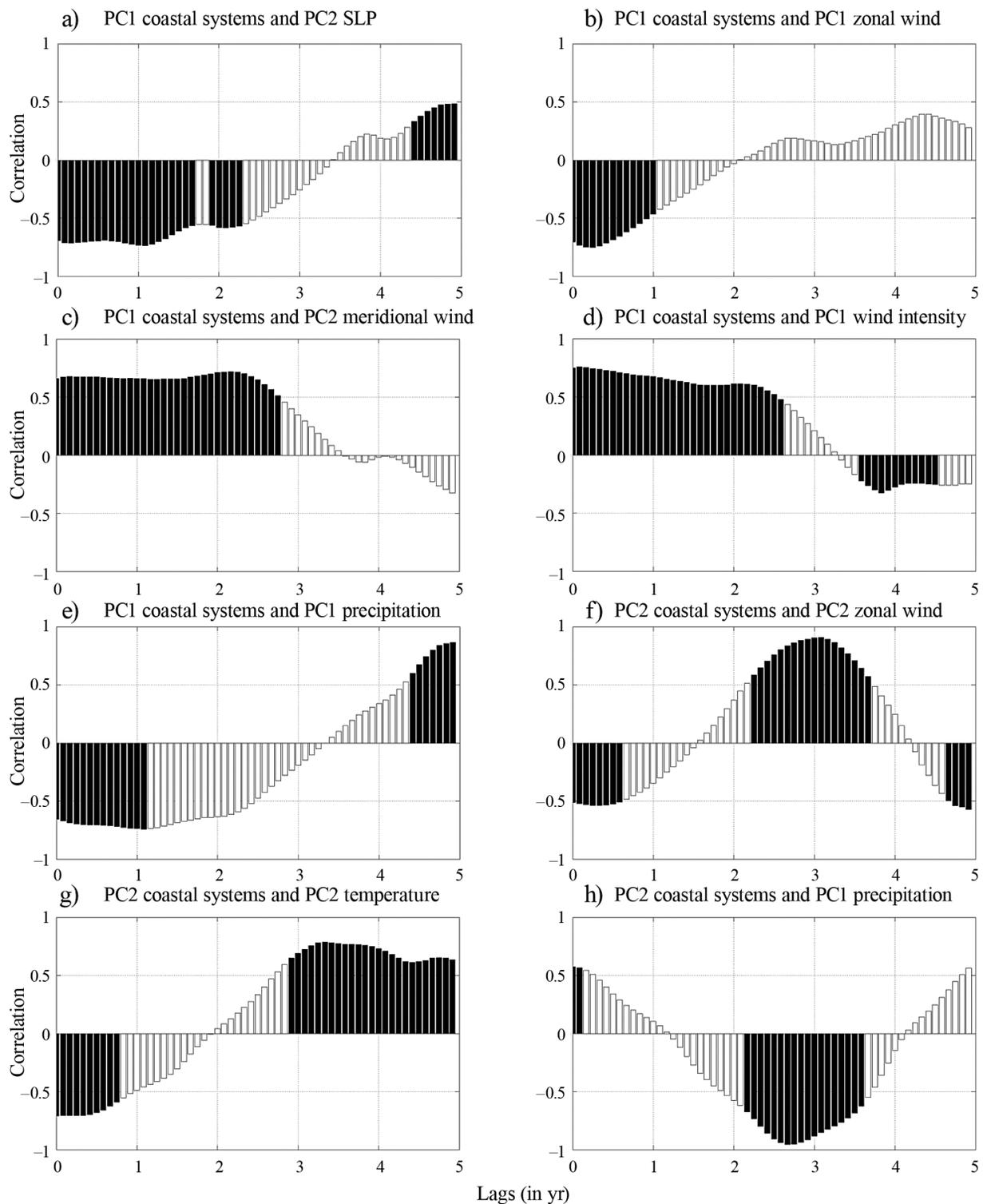


Fig. 11. Cross-correlograms between year-to-year changes in the coastal systems and hydro-climatic variability (only pairs of variables characterised by ordinary correlations >0.5 ; see Table 4). (a) First principal component (PC1) SOMLIT data and PC2 sea level pressure (SLP), (b) PC1 SOMLIT data and PC1 zonal wind, (c) PC1 SOMLIT data and PC2 meridional wind, (d) PC1 SOMLIT data and PC1 wind intensity, (e) PC1 SOMLIT data and PC1 precipitation, (f) PC2 SOMLIT data and PC2 zonal wind, (g) PC2 SOMLIT data and PC2 sea surface temperature, (h) PC2 SOMLIT data and PC1 precipitation. White bars are not significant; black bars are significant: the significance threshold was set at $p = 0.25$ after accounting for the reduction in the degrees of freedom due to the lag and the temporal autocorrelation

Table 5. Correlations ($df = 8$) between the first 2 principal components (PCs) of the principal component analysis (PCA) performed on climatic and SOMLIT data and large-scale hydro-climatic variables (abbreviations as in Table 4). As the time series were too short, correlations were not corrected to account for temporal autocorrelation. However, the p values were adjusted with Hochberg's procedure (1988) and $\alpha = 0.05$. Significant correlations ($r > 0.5$) are in **bold**

Variable	PC	North Atlantic Oscillation		Atlantic Multidecadal Oscillation		Northern Hemisphere temperature	
		r	p	r	p	r	p
SLP	1	0.276	0.440	-0.566	0.088	-0.783	0.007
	2	-0.279	0.434	-0.294	0.410	-0.055	0.880
UWIND	1	0.063	0.928	-0.716	0.020	-0.641	0.046
	2	-0.215	0.551	0.115	0.752	0.462	0.179
VWIND	1	-0.152	0.676	0.308	0.386	0.630	0.051
	2	-0.064	0.860	-0.610	0.061	-0.380	0.279
IWIND	1	-0.100	0.783	0.460	0.181	0.635	0.048
	2	-0.018	0.961	0.253	0.481	0.432	0.212
SST	1	-0.135	0.710	0.338	0.340	0.419	0.228
	2	0.269	0.453	-0.064	0.860	0.494	0.146
MP	1	0.349	0.323	-0.356	0.313	-0.693	0.026
	2	0.425	0.221	-0.519	0.124	-0.231	0.521
SOMLIT	1	-0.344	0.330	0.708	0.022	0.871	0.001
	2	-0.275	0.442	0.063	0.862	-0.150	0.679

that the relationships between a large-scale climatic phenomenon and some coastal systems may not be constant through time. Such a result also reveals the nonlinearity of the system.

When analysing the effects of climate on marine systems, it is often relevant to separate natural changes from those caused by the confounding influence of human activity (Harley et al. 2006). Long-term monitoring is also preferable to establish a baseline against which perturbations can be better identified. However, most environmental coastal time series are short (e. g. Lindahl et al. 1998, Marty et al. 2002, Fernandez de Puelles et al. 2004). The SOMLIT programme, implemented in 1997, also suffers from lack of background. However, the spatial extent of the programme and the number of parameters measured are unique, compensating in part the short temporal coverage. The large spatial extent of the programme reduces the noise inherent to a sampling site (e. g. local disturbance and forcing), the influence of local hydro-dynamical forcing (e. g. tide, turbulence, frontal structures) and thereby increases the signal to noise ratio that enables the effect of climate to be better detected (Taylor et al. 2002, Beaugrand & Ibañez 2004).

In the regions where changes in nutrients, dissolved di-oxygen and salinity were observed, the positive correlations between chl *a* and the first PC from the analysis performed on SOMLIT data (Fig. 3) also revealed a decrease after 2001. These changes, led by regional climate forcing, are likely to have affected biological

systems. Lotze & Worm (2002) and Nielsen (2003) have suggested that variations in nutrients may have subsequent effects on primary production, which can eventually cascade or be amplified through trophodynamics (Frank et al. 2005, Kirby et al. 2009). Many biological changes such as a modification in the grazing rates of zooplankton, a shift in species composition and phenological or biogeographical shifts (Richardson & Schoeman 2004, Winder & Schindler 2004) have been attributed to rising water temperature or changes in physico-chemical characteristics of the water column, at least in temperate coastal systems (Harley et al. 2006, Kirby et al. 2009).

SST appears to be a master parameter governing the changes in the coastal environment (Scavia et al. 2002, Beaugrand 2009). The increase in SST observed after 2001 and particularly pronounced in 2003 (during the summer heat wave of 2003, Fig. 8) might

have exacerbated the decrease in nutrients observed mainly along the western coast of France. This phenomenon, combined with the reduction in zonal wind and precipitation, which is likely to have reduced horizontal inputs, could have contributed to the diminution of nutrients observed in these coastal regions. The effect of SST in the water column would be to increase the vertical stratification in the coastal non-tidal regions monitored by the SOMLIT programme and in offshore areas (Diaz & Rosenberg 1995, Bopp et al. 2002), but this phenomenon is not likely to occur in tidal regions because of the mixing by currents. Another impact of temperature is through the amount of di-oxygen that water can hold (i.e. warmer water holds less di-oxygen than cooler water; e.g. Beaugrand et al. 2008). Furthermore, warming increases bacterial production and the metabolism of organisms, augmenting di-oxygen consumption (Najjar et al. 2000). Our study has revealed a small reduction in the concentration of dissolved di-oxygen. This event, observed between 2001 and 2005, is currently too weak to lead to hypoxia or anoxia events, but reveals a possible tendency for the future as suggested by some authors such as Chan et al. (2008). The projected increase in temperature (IPCC 2007) may also place further stress on coastal systems already affected by eutrophication, pollution and harmful algal blooms and exacerbate phenomena of anoxia or hypoxia (Diaz & Rosenberg 1995, Justic et al. 1997, Najjar et al. 2000, Peperzak 2003, Selman et al. 2008).

While many studies to date have focused exclusively on the impact of temperature as an indicator of climate change (e.g. Edwards & Richardson 2004), our results suggest that atmospheric circulation is also an important parameter, as shown by the strong correlations between both zonal circulation and wind intensity and the state of coastal systems (see Fig. 10 and Table 4). After a period of relative stability, the decreases in nutrients, PON, POC and chl *a* in regions located in western France and the reduction in dissolved di-oxygen at all sites (Fig. 3) observed during the period 2001 to 2005 coincided with the decrease observed in the intensity of zonal wind during the same period. Changes in atmospheric circulation influence the Atlantic storm track (e.g. Dickson & Turrell 2000) and affect precipitation patterns (Rogers 1997). Precipitation was also highly related to changes in the state of the coastal systems (Fig. 10, Table 4), a result also found by Harley et al. (2006) for other coastal systems. The reduction in nutrients observed during 2001 to 2005 may have been reinforced by the decrease in precipitation and its influence on drainage and river runoff. In a study of 137 representative rivers around the world, Milliman et al. (2008) suggested that river discharge generally reflected precipitation patterns, themselves a climatic response to oceanic/atmospheric drivers such as El Niño and Southern Oscillation (ENSO) or NAO and AMO (New et al. 2001). Direct human impact (damming, irrigation and interbasin water transfers) could be superimposed to the river flow pattern (Ludwig et al. 2009) and thereby also influence these concentrations in nutrients and particulate matters (e.g. damming in the Ebro River in Spain, Ibáñez et al. 1996). Contrary to Livingston et al. (1997), who showed a reduced nutrient input after drought periods in an estuary located in the Gulf of Mexico, our results (Fig. 3) revealed a particularity of the Gironde that presents a conservative behaviour, except in downstream areas (Irigoién & Castel 1997). This conservative behaviour suggests the absence of intense biogeochemical processes in this estuary (Cabeçadas et al. 1999).

Changes in ocean circulation can affect the regional circulation of shelf and coastal seas (Scavia et al. 2002, Harley et al. 2006). Although reduced wind might also alter physical mixing, the examination of bottom and surface samples for some sites monitored by SOMLIT shows that there are generally no vertical differences and that the system is more likely influenced by horizontal inputs from offshore. In the North Sea, the atmospheric circulation influences the hydrodynamics that modulate the nature of sea water entering from the North Atlantic and the English Channel (Reid et al. 2003). Jickells (1998) stressed that the oceanic inflow had a strong impact on the concentration of nutrients

in this sea and that a percentage of 82.68 % of nitrogen input originated from this phenomenon. In contrast to the sites of the Atlantic and adjacent seas considered in this study, Mediterranean waters export a great amount of nutrients to the Atlantic Ocean because of its negative water balance and the resulting water circulation (Hopkins 1985).

Substantial correlations were generally observed between the state of the coastal environment and large-scale climatological indices (Table 5), although not all correlations were significant after correction for temporal autocorrelation and for multiple testing. Beaugrand & Reid (2003) showed that NHT anomalies and SST covaried positively for many months in the eastern part of the North Atlantic, around the British Isles and the North Sea, the influence of which was stronger than that of the NAO. No influence of the NAO on the state of coastal systems was detected, probably because this oscillation only has a modest influence on the regional climatological parameters of the region (Marshall et al. 2001).

The effect of climate depended upon the intensity of the climate anomalies. The scale, the rhythm and the intensity of physical forcing indeed influence biological production (e.g. the theory of ergoclines, Legendre & Demers 1984). Our results showed that both substantial negative or positive forcing were related to changes in the state of the coastal systems, while moderate forcing had no effect (Fig. 10). Such threshold effects are beginning to be widely documented for systems ranging from physical (Rahmstorf 1995, Paillard 2001) to biological and ecological systems (Scheffer et al. 2001, Carpenter & Brock 2006) and reflect a pronounced non-linearity (e.g. the strength of the correlation may vary locally and temporally) and thereby sensitivity of the response of most natural systems to climate change.

Coastal regions, located at the interface between oceanic and terrestrial systems, play a crucial role in earth system functioning (Le Tissier et al. 2006). It is assumed that currently more than 60 % of the world's population live less than 60 km from the sea, increasing the human pressure on these systems at the same time as we are experiencing a period of rapid climate change (IPCC 2007). The spatial and temporal heterogeneity of coastal systems is considerable (Vafeidis et al. 2004), leading to methodological problems in developing global perspectives on the role and scale of the coastal domain in earth system functioning (Kremer et al. 2004, Harley et al. 2006). The acquisition of data by coordinated sampling programmes enables a robust comparison of the heterogeneity between sites to be made and relationships between contrasting coastal systems of western Europe and climate variability to be outlined. Although it is well known that coastal systems are locally strongly impacted

by human activities, it remains difficult to disentangle climatic from anthropogenic forcing (Behrenfeld et al. 2006, Le Tissier et al. 2006).

In summary, our results suggest that (1) regional climate through its influence on local atmospheric and ocean circulation and temperature substantially influences coastal systems of Europe in the 42 to 51° N latitudinal range, and that (2) regional climate variability is correlated to an index of global temperature change (NHT anomalies). Our analysis shows that changes observed in nutrients are also detected in chl *a* and indicate that the climatic signal may propagate through the trophodynamics. Monitoring such as SOMLIT should be pursued and perhaps extended, as it represents the only way forward to robustly detect potential alterations of coastal systems in the future.

Acknowledgements. We thank the National Institute for the Sciences of the Universe and the entire SOMLIT team—technicians, researchers, captains and crews—who have contributed to the collection of the SOMLIT samples since 1997. Thanks also to I. Rombouts for reading the manuscript. The database is available at: <http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr/fr>. This project was funded by a French grant BDI-CNRS.

LITERATURE CITED

- Aebischer NJ, Coulson JC, Colebrook JM (1990) Parallel long-term trends across four marine trophic levels and weather. *Nature* 347:753–755
- Alheit J, Hagen E (1997) Long-term forcing of European herring and sardine populations. *Fish Oceanogr* 6:130–139
- Anderson NJ (2000) Miniview: diatoms, temperature and climatic change. *Eur J Phycol* 35:307–314
- Attrill MJ, Power M (2002) Climatic influence on a marine fish assemblage. *Nature* 417:275–278
- Beaugrand G (2004) Monitoring marine plankton ecosystems. I: Description of an ecosystem approach based on plankton indicators. *Mar Ecol Prog Ser* 269:69–81
- Beaugrand G (2009) Decadal changes in climate and ecosystems in the North Atlantic Ocean and adjacent seas. *Deep-Sea Res II* 56:656–673
- Beaugrand G, Ibañez F (2004) Monitoring marine plankton ecosystems. II: Long-term changes in North Sea calanoid copepods in relation to hydro-climatic variability. *Mar Ecol Prog Ser* 284:35–47
- Beaugrand G, Reid PC (2003) Long-term changes in phytoplankton, zooplankton and salmon related to climate. *Glob Change Biol* 9:801–817
- Beaugrand G, Ibañez F, Reid PC (2000) Spatial, seasonal and long-term fluctuations of plankton in relation to hydroclimatic features in the English Channel, Celtic Sea and Bay of Biscay. *Mar Ecol Prog Ser* 200:93–102
- Beaugrand G, Edwards M, Brander K, Luczak C, Ibanez F (2008) Causes and projections of abrupt climate-driven ecosystem shifts in the North Atlantic. *Ecol Lett* 11:1157–1168
- Behrenfeld MJ, O'Malley RT, Siegel DA, McClain CR and others (2006) Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature* 444:752–755
- Betts AK, Hong SY, Pan HL (1996) Comparison of NCEP-NCAR reanalysis with 1987 FIFE data. *Mon Weather Rev* 124:1480–1498
- Bopp L, Le Quéré C, Heimann M, Manning AC, Monfray P (2002) Climate-induced oceanic oxygen fluxes: implications for the contemporary carbon budget. *Global Biogeochem Cycles* 16:1022, doi: 10.1029/2001GB001445
- Box GEP, Jenkins GW (1976) Time series analysis: forecasting and control. Holden-Day, San Francisco, CA
- Cabeçadas G, Nogueira M, Brogueira MJ (1999) Nutrient dynamics and productivity in three European estuaries. *Mar Pollut Bull* 38:1092–1096
- Cariton JT, Geller JB (1993) Ecological roulette: the global transport of nonindigenous marine organisms. *Science* 261:78–82
- Carpenter SR, Brock WA (2006) Rising variance: a leading indicator of ecological transition. *Ecol Lett* 9:311–318
- Chan F, Barth JA, Lubchenco J, Kirincich A, Weeks H, Peterson WT, Menge BA (2008) Emergence of anoxia in the California Current large marine ecosystem. *Science* 319:920
- Chatfield C (1996) The analysis of time series: an introduction. Chapman & Hall, London
- Chelton DB (1984) Commentary: short-term climatic variability in the northeast Pacific Ocean. In: Pearcy W (ed) The influence of ocean conditions on the production of salmonids in the North Pacific. Oregon State University Press, Corvallis, OR, p 87–99
- Cloern JE (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 JE (2001) Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Mar Ecol Prog Ser* 210:223–253
- Cury PM, Shannon L, Shin YJ (2002) The functioning of marine ecosystems: a fisheries perspective. In: Sinclair M, Valdimarsson G (eds) Responsible fisheries in the marine ecosystem. FAO and CAB International, Rome, p 103–123
- Diaz RJ (2001) Overview of hypoxia around the world. *J Environ Qual* 30:275–281
- Diaz R, Rosenberg R (1995) Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanogr Mar Biol Annu Rev* 33:245–303
- Dickson RR, Turrell WR (2000) The NAO: the dominant atmospheric process affecting oceanic variability in home, middle and distant waters of European Atlantic salmon. In: Mills D (ed) The ocean life of Atlantic salmon: environmental and biological factors influencing survival. Fishing News Books, Bodmin, p 92–115
- Dobson AP, Bradshaw AD, Baker AJM (1997) Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology. *Science* 277:515–522
- Dolédéc S, Chessel D (1994) Co-inertia analysis: an alternative method for studying species-environment relationships. *Freshw Biol* 31:277–294
- Drinkwater KF, Belgrano A, Borja A, Conversi A and others (2003) The response of marine ecosystems to climatic variability associated with the North Atlantic Oscillation. *Geophys Monogr* 134:211–234
- Edwards M, Richardson AJ (2004) Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature* 430:881–884
- Edwards M, John AWG, Johns DG, Reid PC (2001) Case history and persistence of the non-indigenous diatom *Coscinodiscus wailesii* in the north-east Atlantic. *J Mar Biol Assoc UK* 81:207–211
- Elmore KL, Richman MB (2001) Euclidean distance as a similarity metric for principal component analysis. *Mon Weather Rev* 129:540–549

- Enfield DB, Mestas-Nuñez AM, Trimble PJ (2001) The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophys Res Lett* 28:2077–2080
- Fernandez de Puelles ML, Valencia J, Vicente L (2004) Zooplankton variability and climatic anomalies from 1994 to 2001 in the Balearic Sea (Western Mediterranean). *ICES J Mar Sci* 61:492–500
- Font J, Salat J, Tintoré J (1988) Permanent features of the circulation in the Catalan Sea. *Oceanol Acta* 9:51–57
- Frank KT, Petrie B, Choi JS, Leggett WC (2005) Trophic cascades in a formerly cod-dominated ecosystem. *Science* 308:1621–1623
- Fromentin JM, Planque B (1996) *Calanus* and environment in the eastern North Atlantic. II. Influence of the North Atlantic Oscillation on *C. finmarchicus* and *C. helgolandicus*. *Mar Ecol Prog Ser* 134:111–118
- Gaedke U, Ollinger D, Bauerle E, Straile D (1998) The impact of the interannual variability in hydrodynamic conditions on the plankton development in Lake Constance in spring and summer. *Adv Limnol* 53:565–585
- Hare SR, Mantua NJ (2000) Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. *Prog Oceanogr* 47: 103–145
- Harley CDG, Hughes AR, Hultgren KM, Miner BG and others (2006) The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecol Lett* 9:228–241
- Hawkins SJ, Southward AJ, Genner MJ (2003) Detection of environmental change in a marine ecosystem—evidence from the western English Channel. *Sci Total Environ* 310:245–256
- Henderson-Sellers A, Robinson PJ (1986) Contemporary climatology. John Wiley & Sons, New York, NY
- Hochberg Y (1988) A sharper Bonferroni procedure for multiple tests of significance. *Biometrika* 75:800–802
- Hohn ME (1993) Principal component analysis of three-way data. In: Davis JC, Hertzfeld UC (eds) *Computers in geology: 25 years of progress*. Oxford University Press, New York, NY, p 181–194
- Hopkins TS (1985) Physics of the sea. In: Margalef R (ed) *Key environments: western Mediterranean*. Pergamon Press, New York, NY, p 100–125
- Howarth RW (1988) Nutrient limitation of net primary production in marine ecosystems. *Annu Rev Ecol Syst* 19:89–110
- Hurrell JW (1995a) Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitations. *Science* 269:676–679
- Hurrell JW (1995b) Transient eddy forcing of the rotational flow during Northern winter. *J Atmos Sci* 52:2286–2301
- Ibàñez C, Prat N, Canicio A (1996) Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro River and its estuary. *Regul Rivers Res Manag* 12:51–62
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007) *Climate change 2007: the physical science basis*. Cambridge University Press, Cambridge
- Irigoin X, Castel J (1997) Light limitation and distribution of chlorophyll pigments in a highly turbid estuary: the Gironde (SW France). *Estuar Coast Shelf Sci* 44: 507–517
- Jennings S, Kaiser MJ (1998) The effects of fishing on marine ecosystems. *Adv Mar Biol* 34:201–352
- Jennings S, Kaiser MJ, Reynolds JD (2001) *Marine fisheries ecology*. Blackwell Scientific Publishers, Oxford
- Jickells TD (1998) Nutrient biogeochemistry of the coastal zone. *Science* 281:217–222
- Joliffe I (1986) *Principal component analysis*. Springer-Verlag, New York, NY
- Justic D, Rabalais N, Turner RE (1997) Impacts of climate change on net productivity of coastal waters: implications for carbon budgets and hypoxia. *Clim Res* 8:225–237
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W and others (1996) The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Am Meteorol Soc* 77:437–471
- Keenlyside NS, Latif M, Jungclaus J, Kornbluh L, Roeckner E (2008) Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector. *Nature* 453:84–88
- Kirby R, Beaugrand G, Lindley JA (2009) Synergistic effects of climate and fishing in a marine ecosystem. *Ecosystems* 12: 548–561
- Kistler R, Kalnay E, Collins W, Saha S and others (2000) The NCEP–NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation. *Bull Am Meteorol Soc* 82: 247–267
- Kremer HH, Le Tissier MDA, Burbridge PR, Talaue-McManus L and others (2004) Land–ocean interactions in the coastal zone: science plan and implementation strategy. International Geosphere-Biosphere Programme Report 51/International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change Report 18. IGBP Secretariat, Stockholm
- Kroncke I, Dippner JW, Heyen H, Zeiss B (1998) Long-term changes in macrofaunal communities off Norderney (East Frisia, Germany) in relation to climate variability. *Mar Ecol Prog Ser* 167:25–36
- Legendre L, Demers S (1984) Towards dynamic biological oceanography and limnology. *Can J Fish Aquat Sci* 41: 2–19
- Legendre P, Legendre L (1998) *Numerical ecology*, 2nd edn. Elsevier Science BV, Amsterdam
- Lehodey P, Alheit J, Barange M, Baumgartner T and others (2006) Climate variability, fish and fisheries. *J Clim* 19: 5009–5030
- Le Tissier MDA, Buddemeier R, Parslow J, Swaney DP and others (2006) The role of the coastal ocean in the disturbed and undisturbed nutrient and carbon cycles—a management perspective. Land–Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ), Geesthacht
- Lewis DM, Bala SI (2006) Plankton predation rates in turbulence: a study of the limitations imposed on a predator with a non-spherical field of sensory perception. *J Theor Biol* 242:44–61
- Lewis DM, Pedley TJ (2001) The influence of turbulence on plankton predation strategies. *J Theor Biol* 210:347–365
- Lindahl O, Belgrano A, Davidsson L, Hernroth B (1998) Primary production, climatic oscillations, and physico-chemical processes: the Gullmar Fjord time-series data set (1985–1996). *ICES J Mar Sci* 55:723–729
- Livingston RJ, Niu X, Lewis Iii FG, Woodsum GC (1997) Freshwater input to a gulf estuary: long-term control of trophic organization. *Ecol Appl* 7:277–299
- Lotze HK, Worm B (2002) Complex interactions of climatic and ecological controls on macroalgal recruitment. *Limnol Oceanogr* 47:1734–1741
- 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
- Marshall J, Kushnir Y, Battisti D, Chang P and others (2001) North Atlantic climate variability: phenomena, impacts and mechanisms. *Int J Climatol* 21:1863–1898
- Marty JC, Chiavérini J, Pizay MD, Avril B (2002) Seasonal and interannual dynamics of nutrients and phytoplankton pigments in the western Mediterranean Sea at the

- DYFAMED time-series station (1991–1999). *Deep-Sea Res II* 49:1965–1985
- Milliman JD, Farnsworth KL, Jones PD, Xu KH, Smith LC (2008) Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951–2000. *Global Planet Change* 62:187–194
- Najjar RG, Walker HA, Anderson PJ, Barron EJ and others (2000) The potential impacts of climate change on the mid-Atlantic coastal region. *Clim Res* 14:219–233
- New M, Todd M, Hulme M, Jones P (2001) Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *Int J Climatol* 21:1889–1922
- Nielsen KJ (2003) Nutrient loading and consumers: agents of change in open-coast macrophyte assemblages. *Proc Natl Acad Sci USA* 100:7660–7665
- Norse EA (1993) Global marine biological diversity: a strategy for building conservation into decision making. Island Press, Washington, DC
- North Sea Task Force (1993) North Sea quality status report 1993. Oslo and Paris Commissions, London and Olsen & Olsen, Fredensborg
- Ohman MD, Hirche HJ (2001) Density-dependent mortality in an oceanic copepod population. *Nature* 412:638–641
- Omori M, Norman CP (1998) Anthropogenic short-term effects on distribution patterns and food webs of pelagic organisms. Proc 2nd Int Conf on Pelagic Biogeography ICoPBII. Final report of SCOR/IOC Working Group 93 Pelagic Biogeography, Noordwijkerhout, The Netherlands, 9 Jul–14 Jul 1995. Workshop report no. 142, p 279–284. Intergovernmental Oceanographic Commission, Paris
- Omori M, Van Der Spoel S, Norman CP (1994) Impact of human activities on pelagic biogeography. *Prog Oceanogr* 34:211–219
- Paillard D (2001) Glacial hiccups. *Nature* 409:147–148
- Peperzak L (2003) Climate change and harmful algal blooms in the North Sea. *Acta Oecol* 24:S139–S144
- Planque B, Reid PC (1998) Predicting *Calanus finmarchicus* abundance from a climatic signal. *J Mar Biol Assoc UK* 78: 1015–1018
- Pyper BJ, Peterman RM (1998) Comparison of methods to account for autocorrelation analyses of fish data. *Can J Fish Aquat Sci* 55:2127–2140
- Ragueneau O, Quéguiner B, Tréguer P (1996) Contrast in biological responses to tidally-induced vertical mixing for two macrotidal ecosystems of Western Europe. *Estuar Coast Shelf Sci* 42:645–665
- Rahmstorf S (1995) Bifurcations of the Atlantic thermohaline circulation in response to changes in the hydrological cycle. *Nature* 378:145–149
- Reid PC, Edwards M, Beaugrand G, Skogen M, Stevens D (2003) Periodic changes in the zooplankton of the North Sea during the twentieth century linked to oceanic inflow. *Fish Oceanogr* 12:260–269
- Reynolds RW, Smith TM (1994) Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. *J Clim* 7:929–948
- Richardson AJ, Schoeman DS (2004) Climate impact on plankton ecosystems in the northeast Atlantic. *Science* 305:1609–1612
- Rogers JC (1997) North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic Oscillation and climate variability of northern Europe. *J Clim* 10:1635–1647
- Sarmiento JL, Gruber N (2006) Ocean biogeochemical dynamics. Princeton University Press, Princeton, NJ
- Scavia D, Field JC, Boesch DF, Buddemeier RW and others (2002) Climate change impacts on U.S. coastal and marine ecosystems. *Estuaries* 25:149–164
- Scheffer M, Carpenter S, Foley JA, Folke C, Walker B (2001) Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* 413:591–596
- Selman M, Greenhalgh S, Diaz R, Sugg Z (2008) Eutrophication and hypoxia in coastal areas: a global assessment of the state of knowledge. Water quality: Eutrophication and Hypoxia Policy Note Series No. 1, World Resources Institute, Washington, DC
- Sokal RR, Rohlf FJ (1995) Biometry. The principles and practice of statistics in biological research. 3rd edn. W. H. Freeman and Co., New York, NY
- Sournia A, Brylinski JM, Dallot S, Le Corre P, Leveau M, Prieur L, Froget C (1990) Fronts hydrologiques au large des côtes françaises: les sites-ateliers du programme Frontal. *Oceanol Acta* 13:413–438
- Southward A (1995) The importance of long time-series in understanding the variability of natural systems. *Helgol Mar Res* 49:329–333
- Steneck RS (1998) Human influences on coastal ecosystems: Does overfishing create trophic cascades? *Trends Ecol Evol* 13:429–430
- Sverdrup HU (1953) On conditions for the vernal blooming of phytoplankton. *J Cons Int Explor Mer* 18:287–295
- Taylor AH, Allen JI, Clark PA (2002) Extraction of a weak climatic signal by an ecosystem. *Nature* 416:629–632
- Vafeidis AT, Nicholls RJ, McFadden L, Hinkel J, Grasshoff PS (2004) Developing a global database for coastal vulnerability analysis: design issues and challenges. *Int Arch Photogram Rem Sens Spat Inf Sci* 34:801–805
- Warwick RM, Ashman CM, Brown AR, Clarke KR and others (2002) Inter-annual changes in the biodiversity and community structure of the macrobenthos in Tees Bay and the Tees estuary, UK, associated with local and regional environmental events. *Mar Ecol Prog Ser* 234:1–13
- Winder M, Schindler DE (2004) Climate change uncouples trophic interactions in an aquatic ecosystem. *Ecology* 85: 2100–2106

Editorial responsibility: Just Cebrian,
Dauphin Island, Alabama, USA

Submitted: May 20, 2009; Accepted: February 19, 2010
Proofs received from author(s): May 24, 2010

Annexe IV :

Etats de référence relatifs des sites SOMLIT à partir des données de la World Ocean Database 05

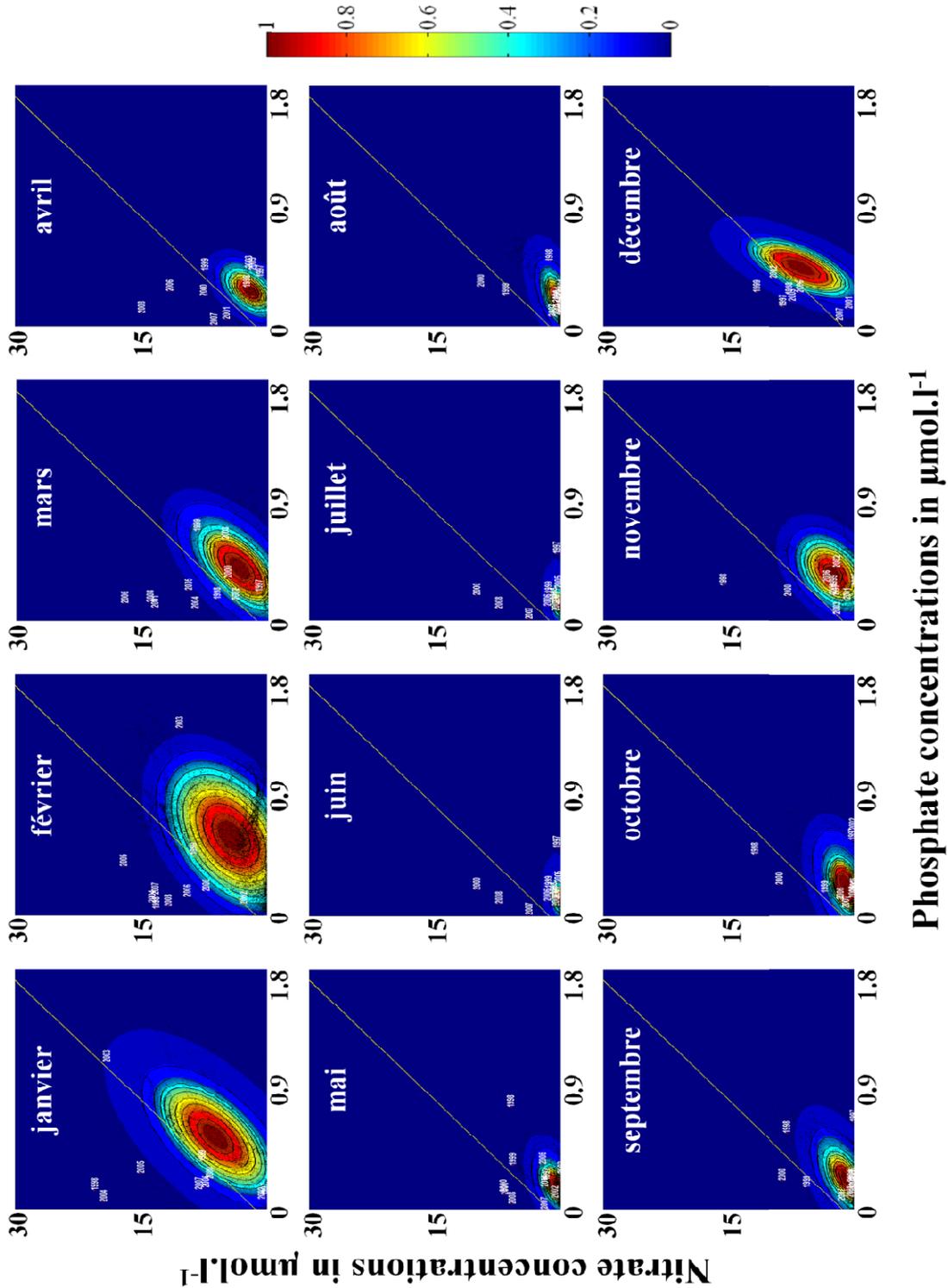


Figure A-IV-1. Représentation des états de référence relatifs et de la probabilité pour chaque année qu'une observation appartienne aux états de référence relatifs pour un mois donné de Janvier à Décembre: **exemple d'Arcachon**. La position des états de référence est calculée dans un espace euclidien à 2 dimensions; la 1^{ère} dimension (x) correspond à la concentration en phosphate et la 2^{ème} (y) à la concentration en nitrate. La probabilité qu'une observation appartienne aux états de références relatifs pour chaque année (de 1997 à 2008) est calculée et positionnée dans l'espace euclidien pour chaque mois. La distance entre une année donnée et le centroïde des hautes probabilités est directement donnée par la probabilité de l'année. La ligne en jaune représente le rapport de Redfield ($N/P = 16$).

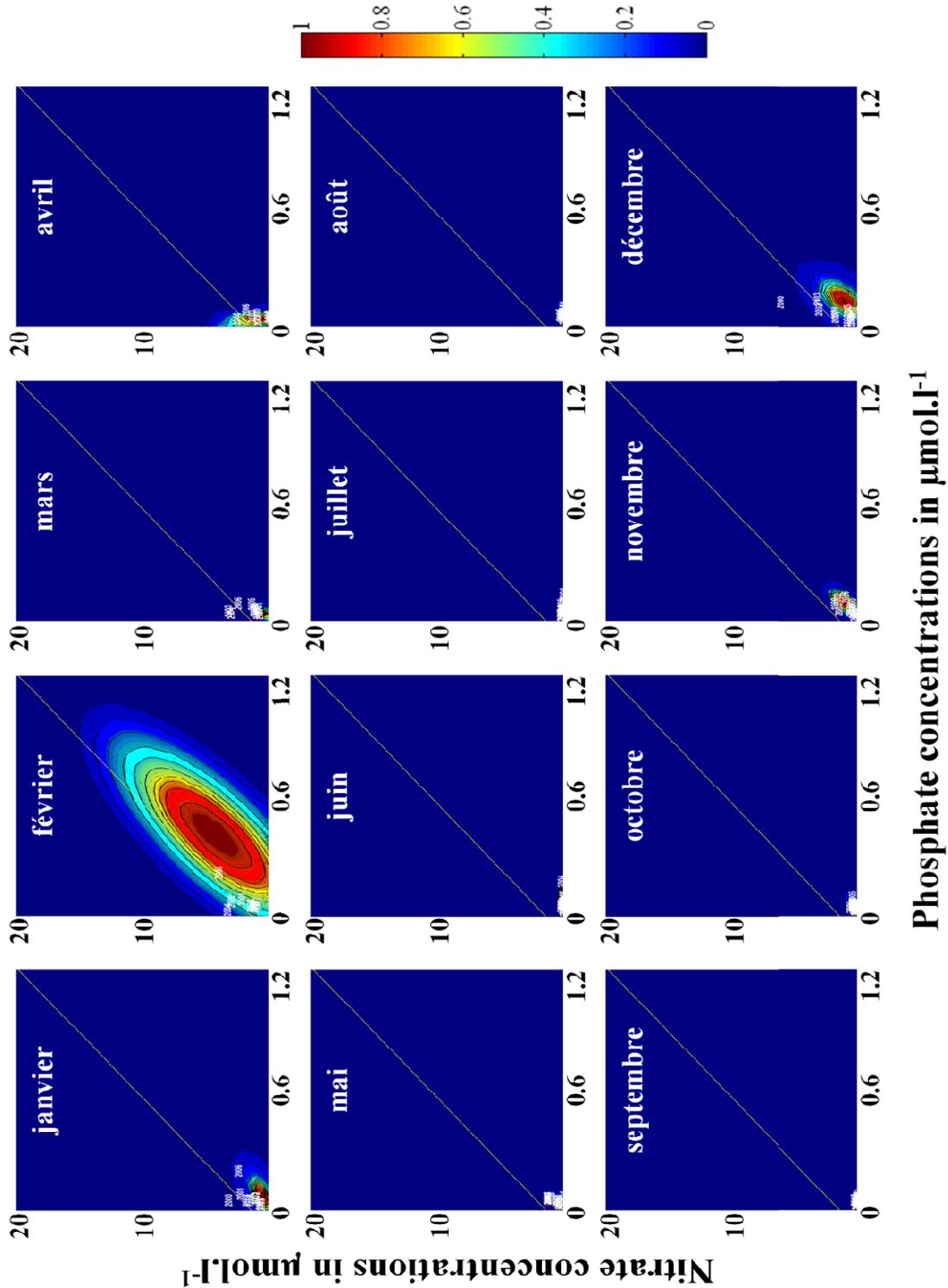


Figure A-IV-2. Représentation des états de référence relatifs et de la probabilité pour chaque année qu'une observation appartienne aux états de référence relatifs pour un mois donné de Janvier à Décembre: **exemple de Banyuls**. La position des états de référence est calculée dans un espace euclidien à 2 dimensions; la 1^{ère} dimension (x) correspond à la concentration en phosphate et la 2^{ème} (y) à la concentration en nitrate. La probabilité qu'une observation appartienne aux états de références relatifs pour chaque année (de 1997 à 2008) est calculée et positionnée dans l'espace euclidien pour chaque mois. La distance entre une année donnée et le centroïde des hautes probabilités est directement donnée par la probabilité de l'année. La ligne en jaune représente le rapport de Redfield ($N/P = 16$).

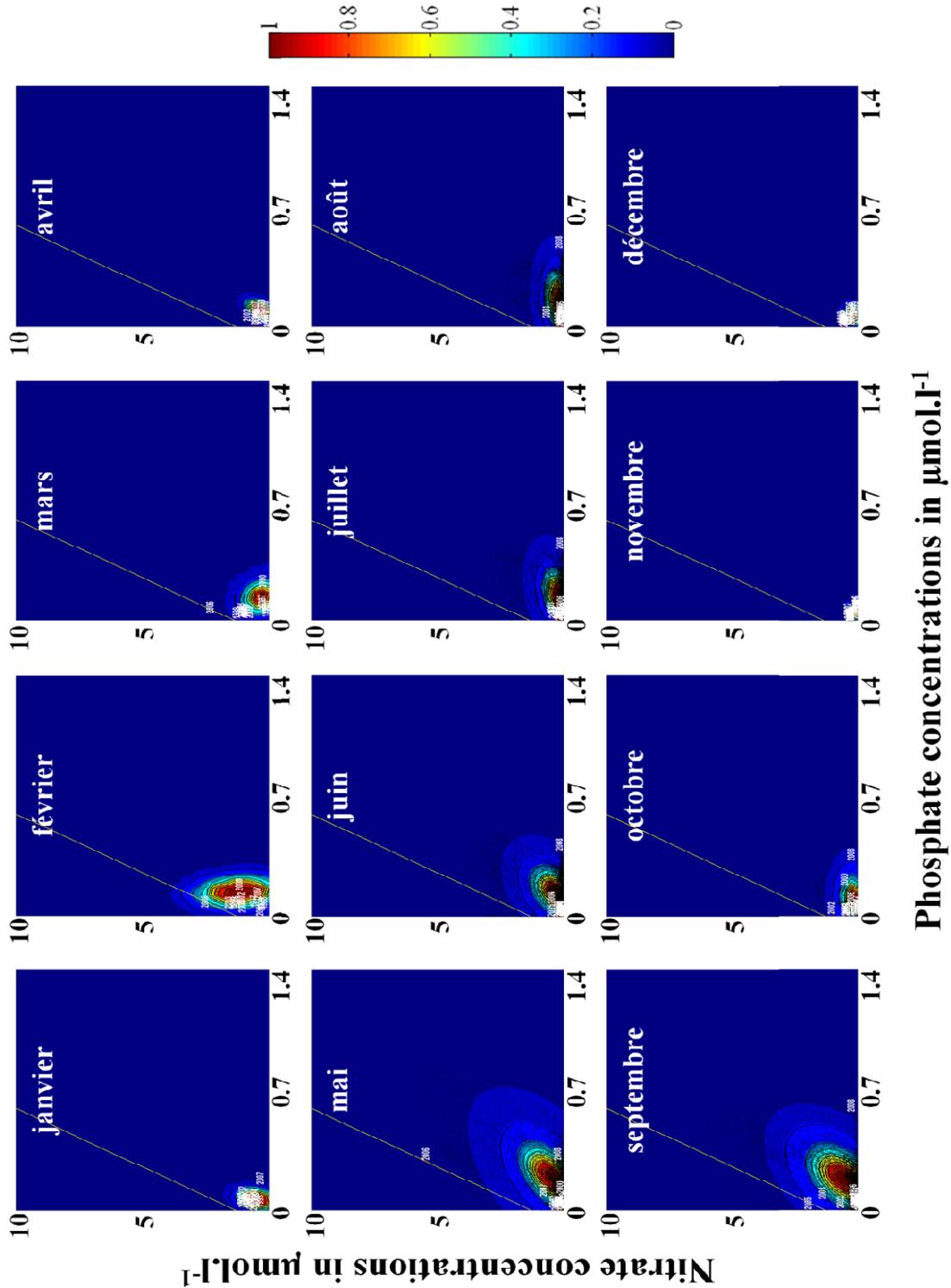


Figure A-IV-3. Représentation des états de référence relatifs et de la probabilité pour chaque année qu'une observation appartienne aux états de référence relatifs pour un mois donné de Janvier à Décembre: **exemple de Villefranche-sur-Mer**. La position des états de référence est calculée dans un espace euclidien à 2 dimensions; la 1^{ère} dimension (x) correspond à la concentration en phosphate et la 2^{ème} (y) à la concentration en nitrate. La probabilité qu'une observation appartienne aux états de références relatifs pour chaque année (de 1997 à 2008) est calculée et positionnée dans l'espace euclidien pour chaque mois. La distance entre une année donnée et le centroïde des hautes probabilités est directement donnée par la probabilité de l'année. La ligne en jaune représente le rapport de Redfield ($N/P = 16$).

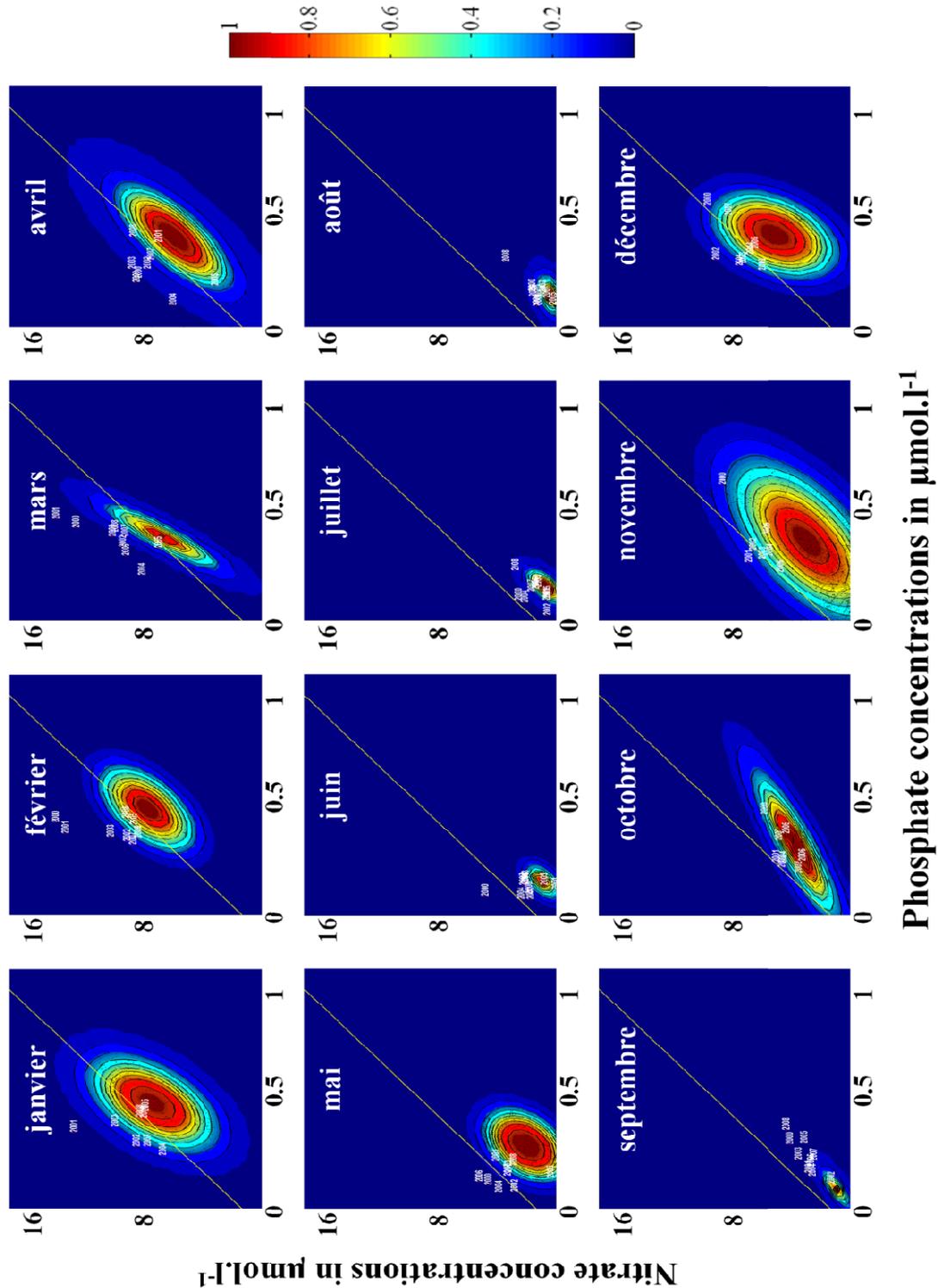


Figure A-IV-5. Représentation des états de référence relatifs et de la probabilité pour chaque année qu'une observation appartienne aux états de référence relatifs pour un mois donné de Janvier à Décembre: **exemple de Roscoff Astan**. La position des états de référence est calculée dans un espace euclidien à 2 dimensions; la 1^{ère} dimension (x) correspond à la concentration en phosphate et la 2^{ème} (y) à la concentration en nitrate. La probabilité qu'une observation appartienne aux états de références relatifs pour chaque année (de 2000 à 2008) est calculée et positionnée dans l'espace euclidien pour chaque mois. La distance entre une année donnée et le centroïde des hautes probabilités est directement donnée par la probabilité de l'année. La ligne en jaune représente le rapport de Redfield ($N/P = 16$).

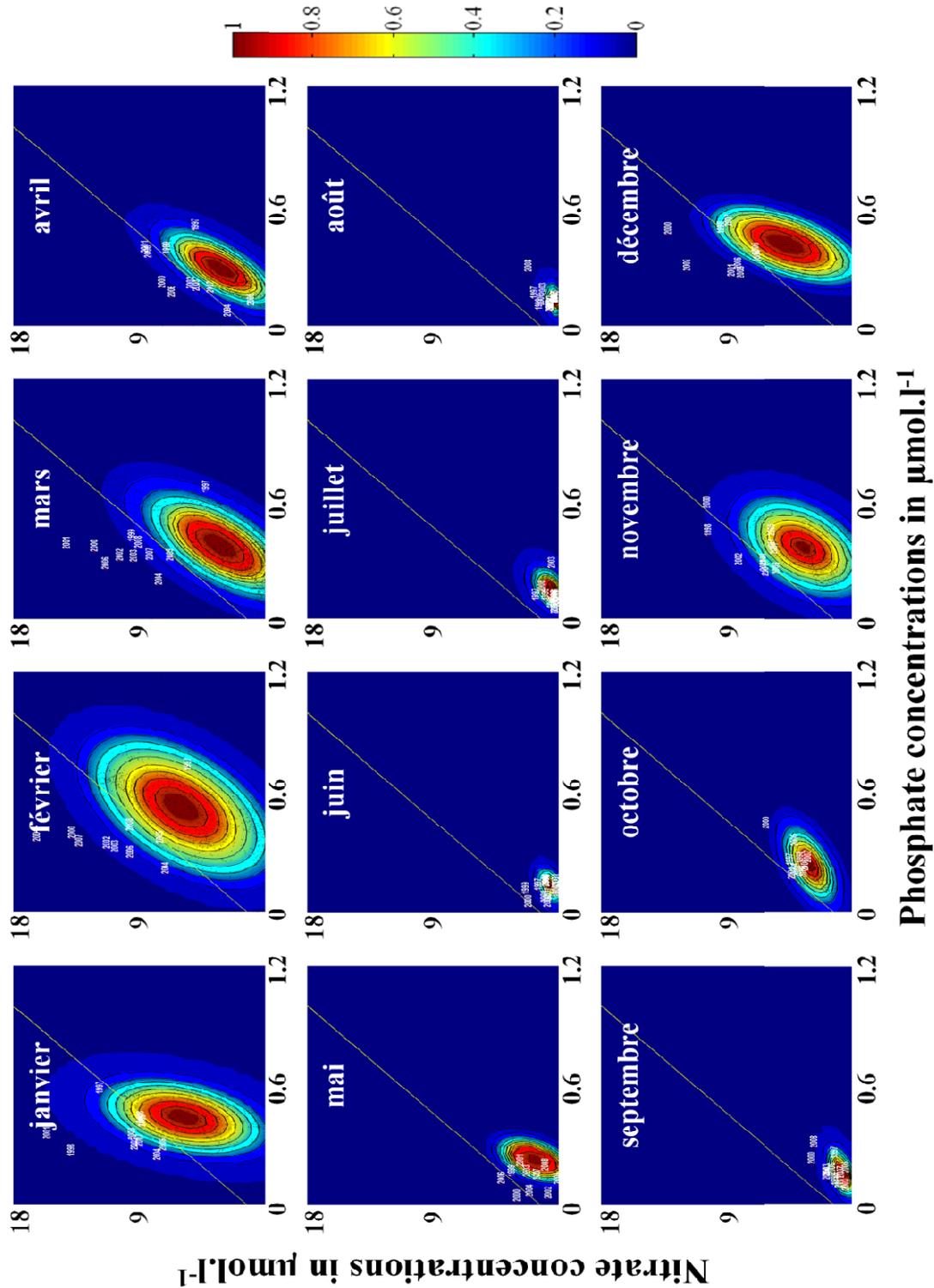


Figure A-IV-6. Représentation des états de référence relatifs et de la probabilité pour chaque année qu'une observation appartienne aux états de référence relatifs pour un mois donné de Janvier à Décembre: **exemple de Roscoff Estacade**. La position des états de référence est calculée dans un espace euclidien à 2 dimensions; la 1^{ère} dimension (x) correspond à la concentration en phosphate et la 2^{ème} (y) à la concentration en nitrate. La probabilité qu'une observation appartienne aux états de références relatifs pour chaque année (de 1997 à 2008) est calculée et positionnée dans l'espace euclidien pour chaque mois. La distance entre une année donnée et le centroïde des hautes probabilités est directement donnée par la probabilité de l'année. La ligne en jaune représente le rapport de Redfield ($N/P = 16$).

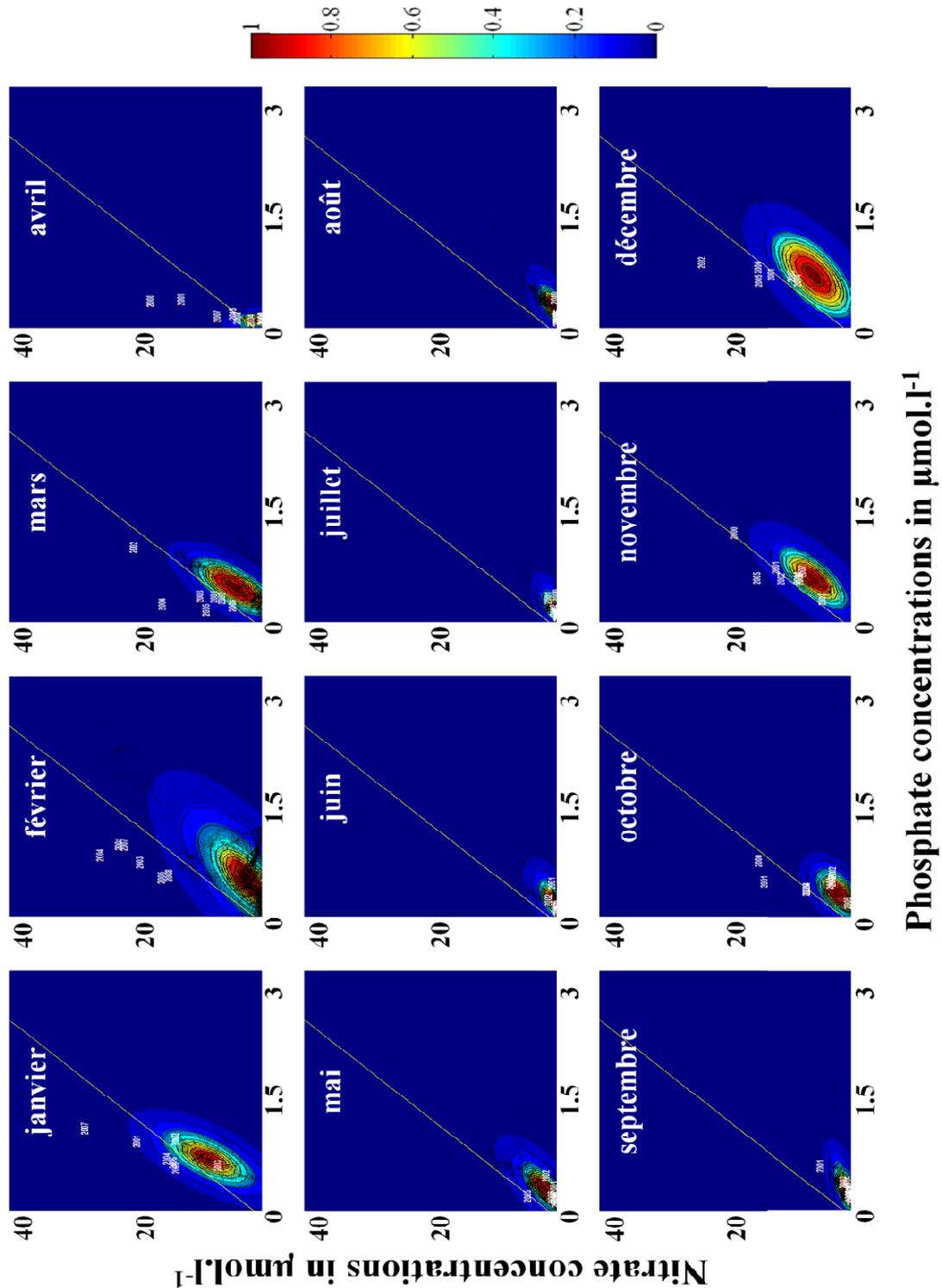


Figure A-IV-7. Représentation des états de référence relatifs et de la probabilité pour chaque année qu'une observation appartienne aux états de référence relatifs pour un mois donné de Janvier à Décembre: **exemple de Wimereux côte.** La position des états de référence est calculée dans un espace euclidien à 2 dimensions; la 1^{ère} dimension (x) correspond à la concentration en phosphate et la 2^{ème} (y) à la concentration en nitrate. La probabilité qu'une observation appartienne aux états de références relatifs pour chaque année (de 1997 à 2008) est calculée et positionnée dans l'espace euclidien pour chaque mois. La distance entre une année donnée et le centroïde des hautes probabilités est directement donnée par la probabilité de l'année. La ligne en jaune représente le rapport de Redfield ($N/P = 16$).

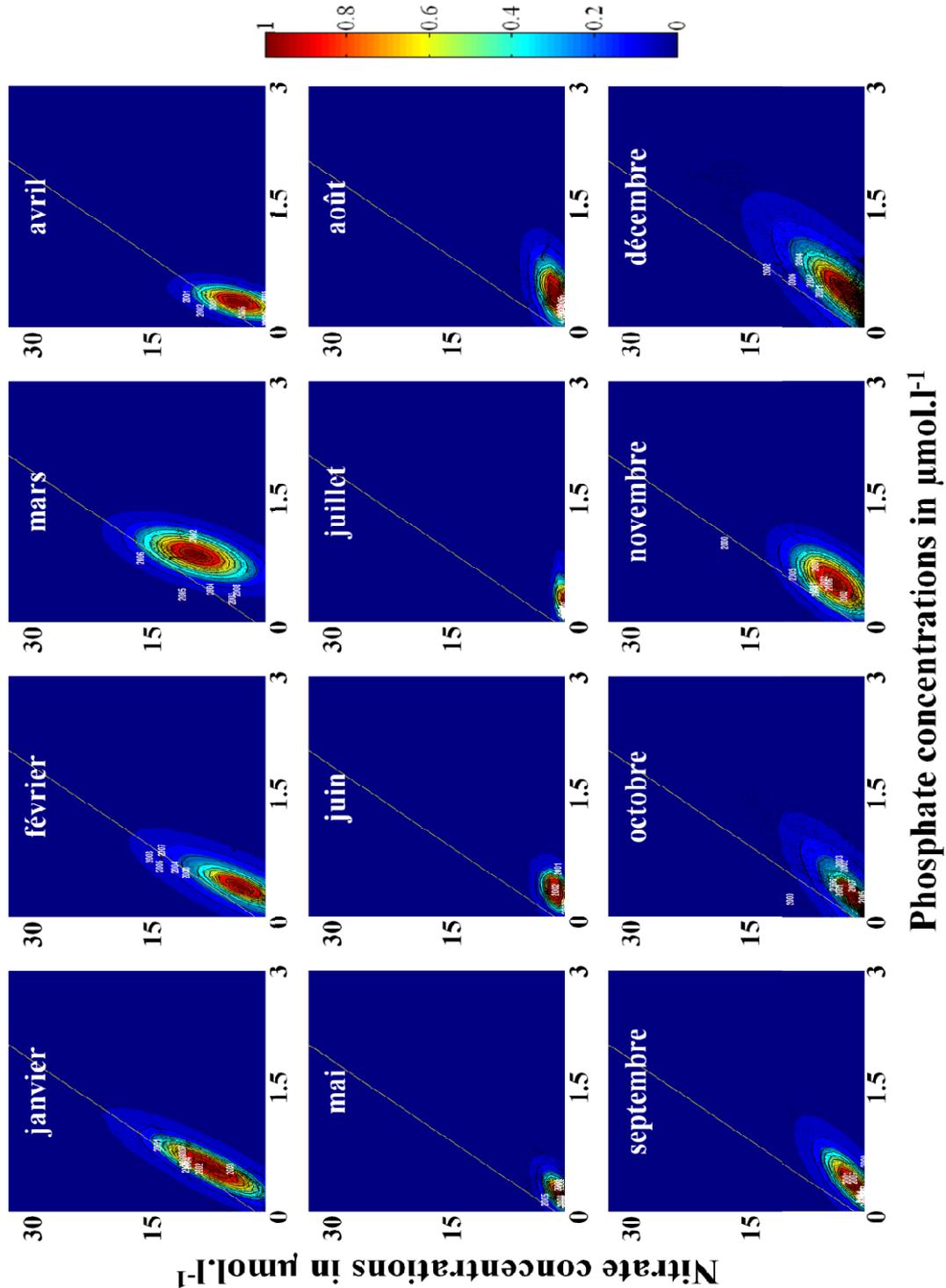


Figure A-IV-8. Représentation des états de référence relatifs et de la probabilité pour chaque année qu'une observation appartienne aux états de référence relatifs pour un mois donné de Janvier à Décembre: **exemple de Wimereux large**. La position des états de référence est calculée dans un espace euclidien à 2 dimensions; la 1^{ère} dimension (x) correspond à la concentration en phosphate et la 2^{ème} (y) à la concentration en nitrate. La probabilité qu'une observation appartienne aux états de références relatifs pour chaque année (de 1997 à 2008) est calculée et positionnée dans l'espace euclidien pour chaque mois. La distance entre une année donnée et le centroïde des hautes probabilités est directement donnée par la probabilité de l'année. La ligne en jaune représente le rapport de Redfield ($N/P = 16$).

Annexe V :

Procédures et indicateurs de la fertilisation anthropique des systèmes côtiers

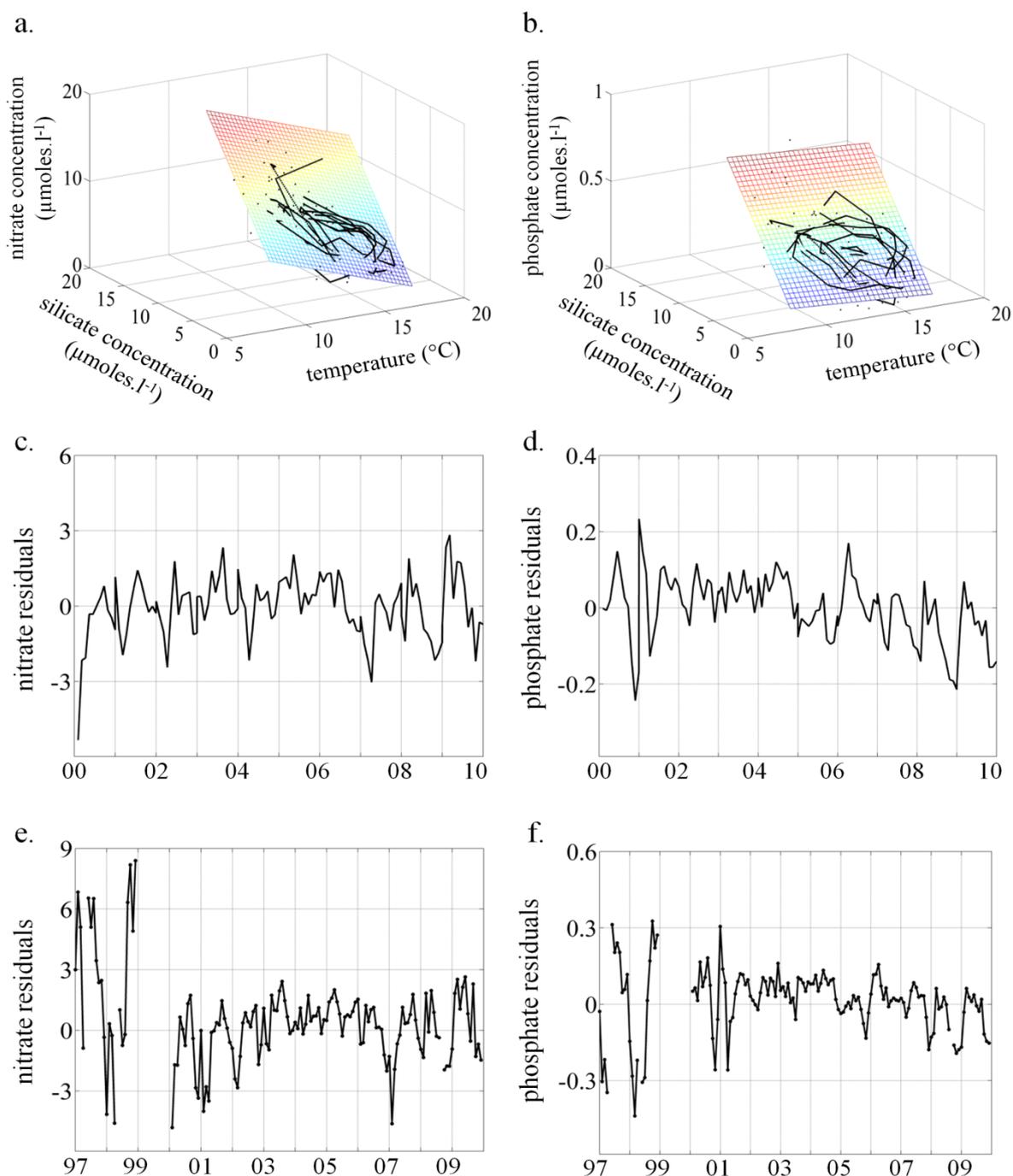


Figure A-V-1. Déconvolution de la variabilité climatique naturelle des concentrations en nitrate et phosphate pour la station de Roscoff. Modèle de régression linéaire multiple en utilisant (a) les concentrations en nitrate ou (b) les concentrations en phosphate comme variables expliquées et la température et les concentrations en silicate comme variables explicatives. Variabilité temporelle des concentrations en nitrate anthropogénique (c) pour le site du large et (e) pour le site côtier. Variabilité temporelle des concentrations en phosphate anthropogénique (d) pour le site du large et (f) pour le site côtier.

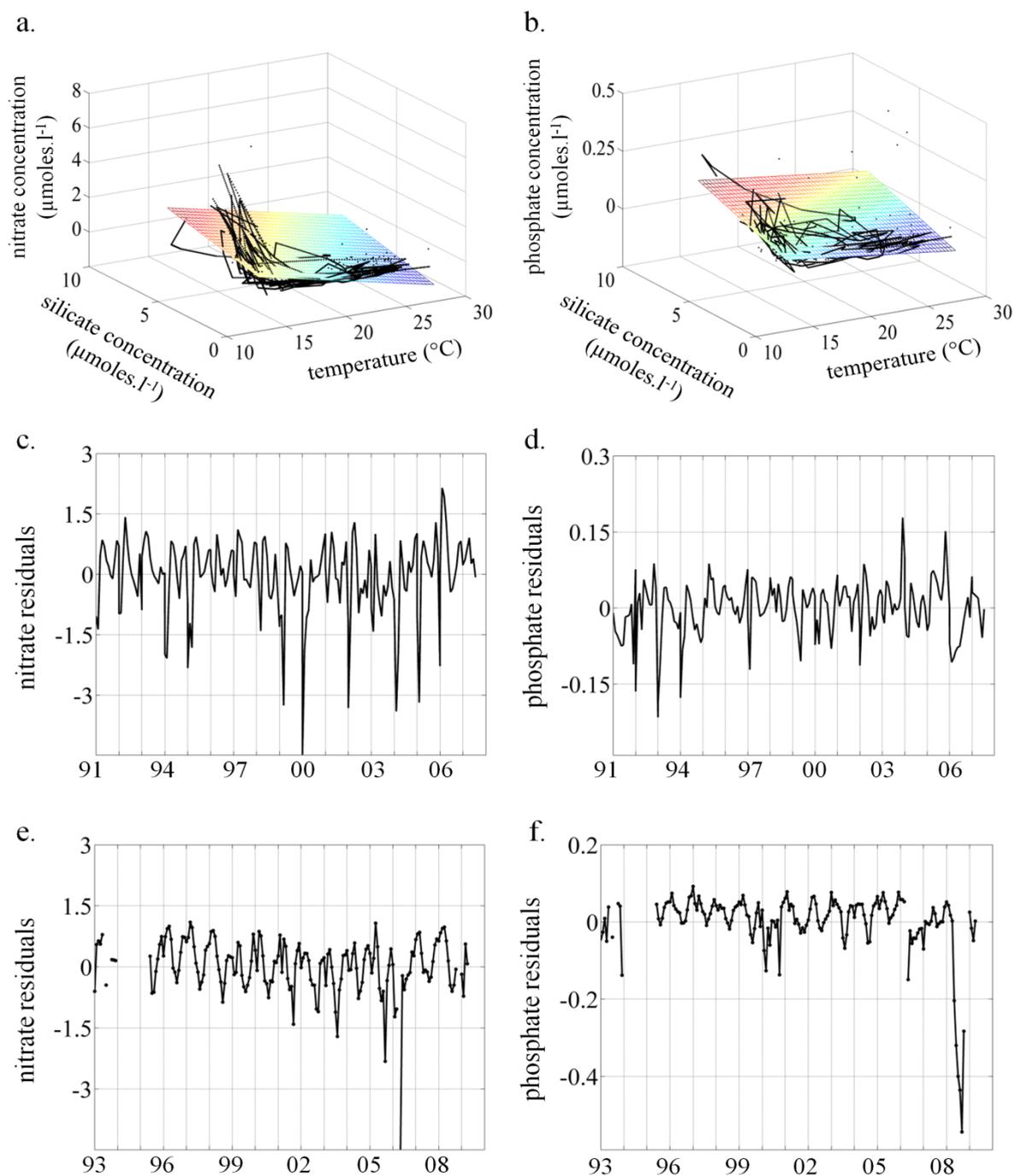


Figure A-V-2. Déconvolution de la variabilité climatique naturelle des concentrations en nitrate et phosphate pour la station de Villefranche-sur-Mer. Modèle de régression linéaire multiple en utilisant (a) les concentrations en nitrate ou (b) les concentrations en phosphate comme variables expliquées et la température et les concentrations en silicate comme variables explicatives. Variabilité temporelle des concentrations en nitrate anthropogénique (c) pour le site du large et (e) pour le site côtier. Variabilité temporelle des concentrations en phosphate anthropogénique (d) pour le site du large et (f) pour le site côtier.

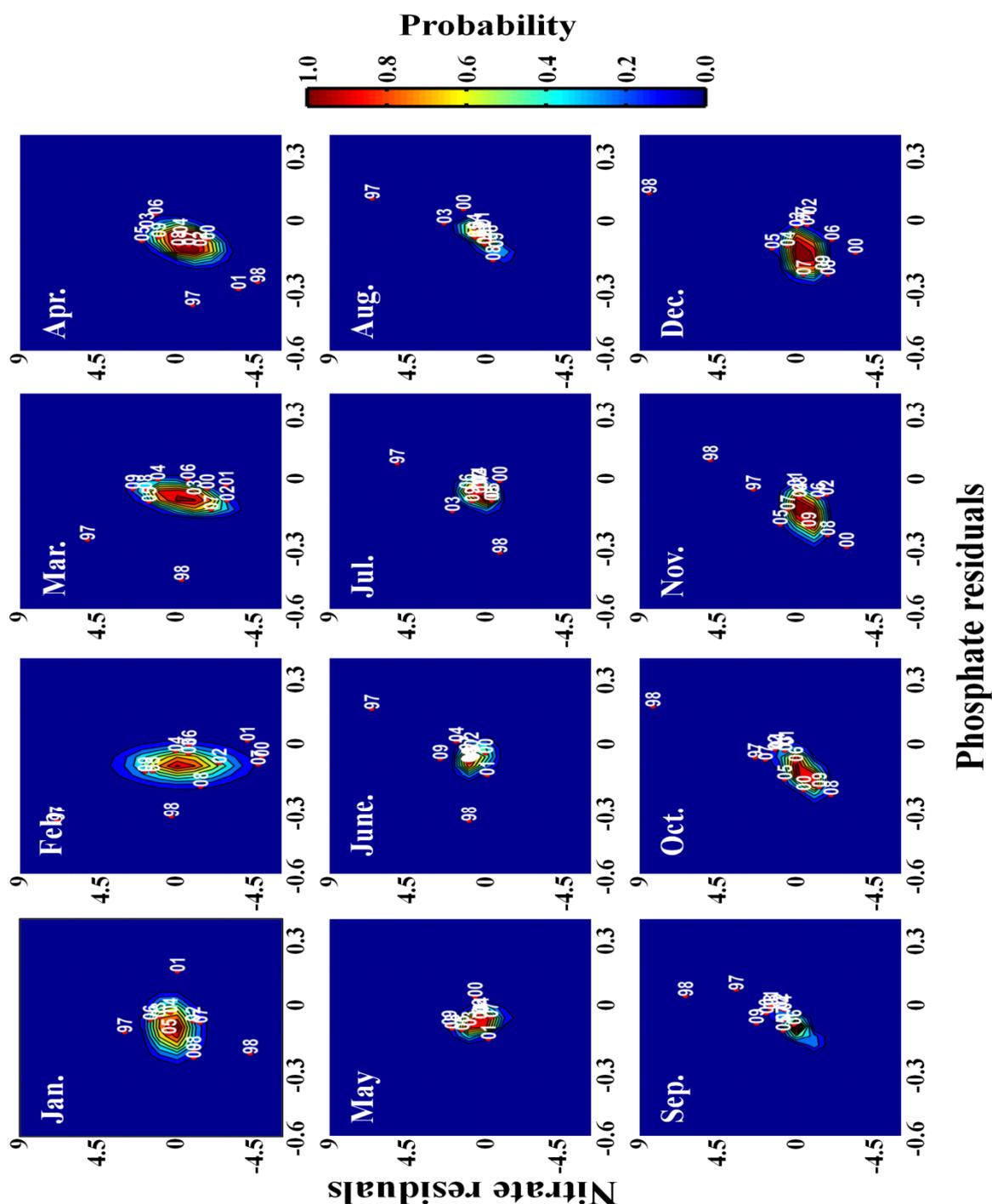


Figure A-V-3. Cartographie des états de référence relatifs pour la station de Roscoff en fonction des concentrations en nitrate et phosphate d'origine anthropogénique (résidus des analyses de multirégression linéaire multiple, voir Figure V-2) de Janvier (Jan.) à Décembre (Dec.). La couleur symbolise la probabilité qu'une observation appartienne à l'état de référence relatif. Chaque année, de 1997 à 2009 sont superposées à l'espace Euclidien pour le mois donné. La distance entre une année donnée et le centroïde de plus forte probabilités est directement donnée par la probabilité de l'année ($d=1-p$, voir méthodes). Les années manquantes sont dues à l'absence d'échantillonnage lors de conditions météorologiques défavorables.

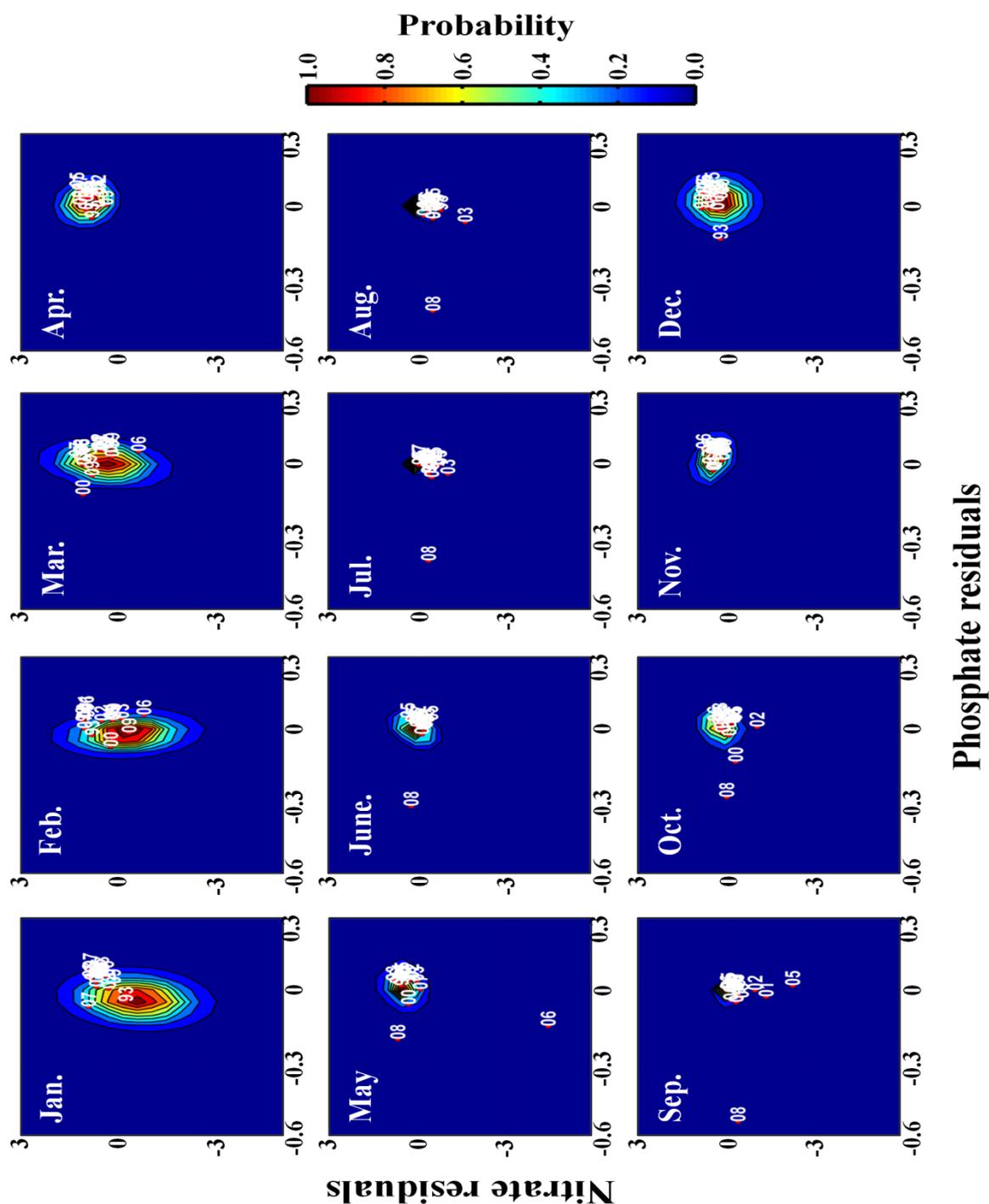


Figure A-V-3. Cartographie des états de référence relatifs pour la station de Villefranche-sur-Mer en fonction des concentrations en nitrate et phosphate d'origine anthropogénique (résidus des analyses de multirégression linéaire multiple, voir Figure V-2) de Janvier (Jan.) à Décembre (Dec.). La couleur symbolise la probabilité qu'une observation appartienne à l'état de référence relatif. Chaque année, de 1993 à 2009 sont superposées à l'espace Euclidien pour le mois donné. La distance entre une année donnée et le centroïde de plus forte probabilités est directement donnée par la probabilité de l'année ($d=1-p$, voir méthodes). Les années manquantes sont dues à l'absence d'échantillonnage lors de conditions météorologiques défavorables.

