

Département Océanographie et Dynamique des Écosystèmes (ODE)
Unité Littorale (UL)
Centre Ifremer Manche Mer du Nord
Laboratoire Environnement et Ressources (LER-BL)

Ifremer

MÉMOIRE D'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Présenté par
Alain LEFEBVRE



COMPRENDRE LA STRUCTURE ET LA DYNAMIQUE DU PHYTOPLANCTON EN REPONSE AUX FORCAGES NATURELS ET ANTHROPIQUES, ET CONTRIBUER AU DÉVELOPPEMENT DES OUTILS D'ANALYSES AUTOMATISÉES.

Vers un Système Intégré d'Observation

Membres du jury :

Sébastien Lefebvre, Univ. Lille, UMR LOG (Garant pour l'Univ. de Lille)
Cédric Bacher, Ifremer (Rapporteur)
Bezhad Mostajir, CNRS, Univ. Montpellier 2, UMR MARBEC (Rapporteur)
Jean Prygiel, Agence de l'Eau Artois Picardie (Rapporteur)
Marie-Hélène Tusseau, Ifremer (Examinatrice)
René Robert, Ifremer (Examinateur)
Koen Sabbe, Université de Gent (Examinateur)
François Schmitt, CNRS, UMR LOG (Examinateur)

ECOLE DOCTORALE : 104 - Sciences de la Matière, du Rayonnement et de
l'Environnement (SMRE)



SECTION CNU : 67 - Biologie des populations et écologie

MÉMOIRE D'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Présenté par

Alain LEFEBVRE

à

L'UNIVERSITÉ DE LILLE



COMPRENDRE LA STRUCTURE ET LA
DYNAMIQUE DU PHYTOPLANCTON EN REPONSE
AUX FORCAGES NATURELS ET ANTHROPIQUES, ET
CONTRIBUER AU DÉVELOPPEMENT DES OUTILS
D'ANALYSES AUTOMATISÉES.

Vers un Système Intégré d'Observation.

ECOLE DOCTORALE : 104 - Sciences de la Matière, du Rayonnement et de
l'Environnement (SMRE)



SECTION CNU : 67 - Biologie des populations et écologie

Fiche documentaire

Numéro d'identification du rapport : Diffusion : libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/> Validé par : les rapporteurs et les examinateurs. Adresse électronique : alain.lefebvre@ifremer.fr		date de publication : Décembre 2016 nombre de pages : 251 bibliographie : Oui illustration(s) : Oui langue du rapport : Français
Titre Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherche présenté par Alain Lefebvre à l'Université de Lille : Comprendre la structure et la dynamique du phytoplancton en réponse aux forçages naturels et anthropiques, et contribuer au développement des outils d'analyses automatisées. Vers un Système Intégré d'Observation.		
Auteur : Alain Lefebvre		Organisme / Direction / Service, laboratoire Ifremer/ODE-UL/LER-BL, Boulogne-sur-Mer.
Membres du jury : Sébastien Lefebvre, Cédric Bacher, Bezhad Mostajir Jean Prygiel Marie-Hélène Tusseau René Robert, Koen Sabbe, François Schmitt	Univ. Lille, UMR LOG, Wimereux (Garant pour l'Univ. de Lille) Ifremer, Brest. (Rapporteur) CNRS, Univ. Montpellier 2, UMR MARBEC, Montpellier (Rapporteur) Agence de l'Eau Artois Picardie, Douai (Rapporteur) Ifremer, Issy-Les-Moulineaux (Examinatrice) Ifremer, Brest (Examineur) Université de Gent (Examineur) CNRS, UMR LOG, Wimereux (Examineur)	

Résumé

Les écosystèmes marins sont soumis à des pressions d'origine anthropique très importantes depuis ces dernières décennies. Parmi ces pressions, les apports excessifs de nutriments vont impacter directement le phytoplancton et indirectement d'autres niveaux trophiques compromettant ainsi les biens et services écosystémiques. On parle alors d'eutrophisation, phénomène répandu à l'échelle mondiale. La Manche orientale et la baie sud de la mer du Nord ne font pas exception. La partie française de cette zone est marquée par des proliférations massives de la Prymnésiophycée, *Phaeocystis globosa*, qui aboutiront au développement d'une mousse abondante et nauséabonde sur le littoral comme à des dysfonctionnements au sein des habitats benthique et pélagique. C'est dans ce contexte, que j'ai pu structurer et contribuer au développement d'une recherche ciblée sur le développement et la mise en œuvre de systèmes instrumentés multiparamètres de mesures automatisées à haute fréquence et des outils numériques associés, afin de mieux comprendre la structure et la dynamique du phytoplancton en réponse aux forçages d'origines naturelle et anthropique. La valeur ajoutée de cette recherche est de proposer une approche intégrée, multiparamètre, pour des sites contrastés et s'appuyant sur les résultats acquis à long-terme via des stratégies d'échantillonnage à basse fréquence comme à haute fréquence et tirant bénéfice des produits dérivés de la modélisation et de l'observation de la couleur de l'eau. Ce manuscrit se découpe en trois grandes parties. La première dresse le bilan de ma contribution à la structuration des activités de recherche au sein du Laboratoire Environnement et Ressources (Ifremer Centre Manche - mer du Nord) que j'ai intégré en 2000 et que je dirige depuis 2005. La deuxième partie est dédiée à ma contribution à l'évolution, de la basse fréquence vers la haute fréquence, du programme de surveillance et d'observation de la Manche orientale et de la baie sud de la mer du Nord. Sur la base de séries à long-terme, je propose également un bilan des principaux schémas de variabilités saisonnière et pluri-annuelle, ainsi qu'une étude des ruptures et des tendances pour les concentrations de nutriments (azote inorganique dissous, phosphate, silicate), la biomasse et la composition du phytoplancton. Grâce à l'étude de séries à long-terme, mais également grâce à une modélisation couplée hydrodynamique/biogéochimie, je mets en avant les facteurs de contrôles proximaux et distaux des efflorescences, ainsi que leurs effets directs et indirects, avec un focus sur les taxons potentiellement nuisibles, *Phaeocystis globosa* et *Pseudo-nitzschia*. Sur la base de données acquises à haute résolution par la station instrumentée MAREL Carnot et par un système de mesures d'opportunités de type Ferry Box, j'oriente mon bilan vers la caractérisation des événements extrêmes, vers la définition d'états environnementaux par classification non-supervisée dans un espace spectral multi-dimensionnel. La définition de ces états et de leurs dynamiques permet ensuite d'envisager le développement d'un système numérique automatisé de prédiction de ces états. La troisième partie correspond à mon *curriculum vitae* détaillé. L'ensemble de ma production scientifique et technique, mes responsabilités, mes activités d'enseignement et d'encadrement, mon réseau de collaboration, mes projets y sont présentés pour la période 2000 - 2016.

Mots-clés

Manche, baie sud de la mer du Nord, eutrophisation, habitat pélagique, phytoplancton, abondance, diversité, hydrologie, climat, observation, surveillance, écologie numérique, modélisation, haute fréquence, systèmes automatisés, stations instrumentées, Ferry Box.

Sommaire

Fiche documentaire	5
1. Ma contribution à la structuration de la recherche	10
2. Synthèse des travaux de recherche	15
2.1. Objectifs scientifiques et enjeux.....	15
2.2. Présentation générale de la zone d'étude	26
2.3. Contribution à l'évolution de l'observation de l'environnement marin.....	28
2.3.1. De la basse fréquence	28
2.3.2. ... vers la haute fréquence.....	34
2.3.3. Développement d'outils d'analyses numériques	53
2.3.4. Modélisation hydrodynamique/biogéochimique.....	68
2.3.5. Couleurs de l'eau	71
2.3.6. Conclusions	72
2.4. Dynamiques environnementale et phytoplanctonique	74
2.4.1. Les nutriments	74
2.4.2. Le phytoplancton.....	92
2.4.3. Facteurs de contrôle proximaux, effets directs et indirects	114
2.4.4. Contrôles climatiques	127
2.4.5. Dynamique à haute résolution temporelle et/ou spatiale	132
2.5. Conclusions.....	149
2.6. Perspectives.....	164
2.7. Références.....	169
Annexe 1	181
Annexe 2	206
3. Curriculum vitae.....	208
3.1. État civil.....	208
3.2. Formation et titres universitaires	208
3.3. Expériences professionnelles avant recrutement à l'Ifremer	209
3.4. Responsabilités administratives.....	209
3.5. Expertises techniques et scientifiques	212
3.5.1. Responsabilités.....	212
3.5.2. Bilan des expertises.....	214
3.6. Activités d'enseignements	219
3.7. Activités d'encadrement	220
3.7.1. Stages post-bac à bac +4	220
3.7.2. Stages Bac +5	222
3.7.3. Thèses	223
3.7.4. Post-doc ou assimilés (niveau > thèse).....	226
3.7.5. Encadrements CDD, intérimaires (niveau < thèse)	227
3.7.6. Autres.....	227
3.8. Collaborations et partenariats	228
3.9. Projets, contrats régionaux, nationaux et internationaux.....	229
3.10. Liste des travaux et publications	230

Remerciements

Je pense que tous ceux dont le nom figure dans ce manuscrit méritent d'être remerciés. Il peut ainsi s'agir des auteurs de publications, de rapports qui m'ont inspiré ou qui ont conforté mes choix techniques et scientifiques. Il peut s'agir de mes collaborateurs, chercheurs et techniciens, qui m'ont aidé à trouver ma voix et/ou qui m'ont soutenu et/ou qui m'ont suivi à terre comme en mer. Il s'agit aussi des membres d'équipages, des personnels administratifs et financiers qui m'ont apporté leur soutien. Merci à vous tous.

La Recherche n'est envisageable que si elle bénéficie des moyens humains et financiers adaptés. Ainsi, je tiens à remercier tous ceux qui ont arbitré favorablement mes demandes, qui ont contribué aux financements des projets, des thèses, des post-docs, des CDD, des stages évoqués dans ce manuscrit... Merci à vous tous.

Lors de mon recrutement à l'Ifremer, j'ai eu la chance de rapidement pouvoir échanger avec les piliers de l'Observation et de la Surveillance. Merci à Catherine Belin, Bruno Barnouin, Benoit Beliaeff, Patrick Camus, Didier Claisse, Luc Drévès, Michel Marchand, Michel Joanny, Marcel Chaussepied pour nos discussions et pour votre confiance. Merci également à Philippe Grosjean, Dominique Soudant, Gaétane Durand, Alice Lamoureux pour nos échanges sur ou en R. Merci à Michel Répecaud, Jean-Valéry Facq, Loïc Quémeneur, à la MAREL Team pour son implication.

Merci à l'équipe de la DEL/BL devenue le LER/BL pour sa confiance et son implication. Merci à Marc Morel, Benoist Hitier, René Olivesi, Robert Bottesini, Karenn Bucas, Camille Blondel, Vincent Duquesne, Françoise Vérin, Pascale Hébert, Elvire Antajan, Rémy Cordier, David Devreker.

Merci à toutes les équipes scientifiques citées dans ce manuscrit pour leur implication, leur motivation, leur confiance, leur bonne humeur.

Merci à Felipe Artigas pour ses très longs mails, sa persévérance, son amitié. Merci à Emilie Poisson-Caillaut pour son dynamisme, pour ses explications de la 61 pour les nuls, pour son rire et son amitié.

Merci à Jean Prygiel qui a pressé le premier le bouton « passe ton HDR ». Merci à Urania Christaki, Emilie Poisson-Caillaut, François Schmitt, Sébastien Lefebvre, d'avoir continué à appuyer sur le bouton.

Merci aux rapporteurs et examinateurs de mon jury d'avoir accepté cette tâche. Je suis très honoré d'avoir reçu une réponse positive instantanée de votre part lors de ma sollicitation pour vous demander d'évaluer ce travail.

J'ai inévitablement oublié de remercier des personnes qui sont intervenues de près ou de loin dans mes travaux de recherche. Pardon et merci à vous.

Et je ne peux pas finir, sans remercier mes princesses, la grande, la moyenne et la petite, pour leur soutien, leur patience, leur compréhension. Isabelle, Alicia, Eryne, c'est pour vous !

« Do or do not, there is no try » (Star Wars: Episode V – The Empire Strikes Back, 1980 movie).

*« Le chemin qui mène au bonheur demande parfois de renoncer à la facilité, pour suivre les exigences de sa volonté au plus profond de soi »
(Gounelle Laurent, l'homme qui voulait être heureux, 2014).*

Les travaux présentés sont cités dans le document grâce à un système d'abréviation par catégorie suivi du numéro de document (X) de cette catégorie :

AC-X. pour les actes de conférence avec comité de lecture.

AE-X. pour l'édition de documents en réponse à des demandes d'Avis et Expertises.

Art-X. pour les articles de revues internationales à comité de lecture, de revues nationales.

ArtS-X. pour les articles en préparation ou en soumission.

O-X. pour les ouvrages avec ISBN.

R-X. pour les rapports.

ArtV-X. pour les articles de vulgarisation, presse et autres médias et actions de communications grand public.

CI-X. pour les communications internationales.

CN-X. pour les communications nationales.

CEur-X. pour les contrats, projets européens, internationaux.

CNat-X. pour les contrats, projets nationaux.

CReg-X. pour les contrats, projets régionaux.

Th-X. pour l'encadrement de thèses ou la contribution à des travaux de thèses.

J.Th-X. pour la participation à des jurys de thèse.

Thématique de recherche :
COMPRENDRE LA DYNAMIQUE
PHYTOPLANCTONIQUE EN REPONSE AUX FORCAGES
NATURELS ET ANTHROPIQUES, ET CONTRIBUER AU
DÉVELOPPEMENT DES OUTILS D'ANALYSES
AUTOMATISÉES.
 Vers un système intégré d'Observation.

1. Ma contribution à la structuration de la recherche

Titulaire d'un doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille (soutenance en décembre 1999) après avoir acquis et contribué à développer des connaissances sur le fonctionnement de l'écosystème Manche orientale aussi bien au niveau du compartiment benthique que du compartiment pélagique (*Art-1.*, *Art-2.*, *O-1.*), j'ai rejoint le Laboratoire Environnement côtier et Ressources (LER-BL) du Centre Ifremer Manche - Mer du Nord en juin de l'année 2000. Les fonctions définies dans la fiche de poste étaient celles d'un cadre chargé d'études et adjoint au chef de laboratoire et, plus précisément, consistaient en la coordination générale et la gestion des laboratoires d'analyses, la coordination des études du programme IGA (Impacts des Grands Aménagements) pour le Centre National de Production Électrique de Gravelines, le développement des applications de l'outil de modélisation hydrodynamique en liaison avec la surveillance hydrobiologique et la participation à l'élaboration des avis en matière d'environnement et d'aménagement littoral. L'évolution de mes mandats et des priorités de l'Ifremer m'ont conduit à prendre la fonction de chef du laboratoire LER-BL en 2005 et à développer un projet de contribution à la recherche qui sera développé dans ce manuscrit.

Au cours de mes travaux de thèse intitulée « Reproduction d'une espèce benthique à phase larvaire planctonique, l'ophiure *Ophiothrix fragilis* (Échinoderme), dans un système côtier à fort hydrodynamisme (Déroit du Pas-de-Calais): interactions physique-biologie et implications dans le fonctionnement de l'écosystème » (soutenance le 14 décembre 1999), j'ai pu développer mes compétences de base en océanologie, aussi bien théoriques que pratiques, (analyses hydrologiques en laboratoire et *in situ*, expérimentations, organisation et mise en œuvre de campagnes en mer) et des compétences spécifiques liées à ma problématique de l'époque (analyses chimiques, taxonomie du zooplancton). En parallèle, différents contrats d'études liées à la surveillance du fonctionnement d'aménagements côtiers (centrale nucléaire, industrie chimique) m'ont permis de développer une expertise en environnement marin côtier et de faire mes premiers pas dans l'étude des relations pressions / impacts.

L'étude d'*Ophiothrix fragilis*, de son environnement physico-chimique et biologique (plancton) et de son rôle, comme pour les suspensivores en général, dans la régulation des flux (contrôle de la biomasse phytoplanctonique, modification des flux de particules vers le sédiment, ...) m'orientait déjà vers la problématique de l'Eutrophisation. Mon recrutement à l'Ifremer allait m'éloigner progressivement de ce modèle biologique, lors

d'une phase de transition entre la fin de ma thèse, mon recrutement à l'Ifremer et le début de mes activités significatives en matière d'études et de recherches sur la qualité de l'environnement marin. Cette phase m'a permis de contribuer à l'amélioration des connaissances en terme de transport de particules passives (les larves d'*Ophiothrix fragilis*) à l'échelle de la Manche (**Art-1., O-1.**) et, de commencer à mettre à profit mes nouvelles connaissances sur le compartiment phytoplancton, et notamment sur *Phaeocystis globosa*, en participant à ce qui allait devenir ma première étude sur les conséquences de la prolifération de ce taxon sur le fonctionnement de l'environnement marin côtier (**Art-2.**).

Depuis mon recrutement à l'Ifremer, la surveillance, l'observation et l'évaluation de l'état des eaux littorales représentent une part importante de mes activités. Mes compétences scientifiques et techniques m'amènent ainsi à coordonner la mise en œuvre de réseaux d'observation et de surveillance, à participer au développement et à la mise en œuvre d'études et de recherches. L'ensemble de ces activités conduit à la réalisation de publications, la participation à des colloques ou à des groupes de travail, la rédaction de rapports, l'émission d'avis et d'expertises. La coordination des réseaux implique une connaissance de tous les cahiers de prescriptions et de recommandations techniques afin que je sois capable de proposer une phase de restitution des résultats auprès des administrations et des professionnels qui s'avère très importante dans le contexte d'une surveillance à vocation « santé publique » ou dans le contexte de résultats d'études tendant à prouver des améliorations ou des dégradations de la qualité de l'environnement avec les conséquences que cela peut avoir sur les programmes de gestion qui en découlent.

C'est sur cette base qu'il m'a fallu développer le volet Recherche d'une stratégie qui se doit d'être orientée Observation/Surveillance, Recherche et Avis/Expertises, triptyque indissociable afin de répondre aux exigences de nos tutelles, des directives et face aux questions de plus en plus précises et pressantes des professionnels comme de la société au sens large.

Dès mon recrutement, ma participation comme collaborateur ou responsable d'axe des projets de recherche suivants :

- Contrat de Projets État Région (CPER) « Étude et Observation de l'écosystème côtier de la Manche orientale : le bloom de *Phaeocystis* et ses effets sur l'écosystème » (2000-2007) (**CReg-4.**),
- Programme National Environnement Côtier (PNEC) « Déterminisme du bloom de *Phaeocystis* et ses conséquences sur l'écosystème Manche orientale - Sud Mer du Nord » (2002-2005) (**CNat-1.**),
- LITEAU II « Modélisation intégrée des transferts de nutriments depuis les bassins versants de la Seine, la Somme et l'Escaut jusqu'en Manche-Mer du Nord » (2004-2006) (**CNat-2.**),
- Interreg IVa - 2 Mers DYMAPHY « Development of a DYNAMIC observation system for the assessment of MARine water quality, based on PHYtoplankton analysis » (2010-2014) (**CEur-1.**),

a été engagée sur la base d'un travail d'analyses de données des différents réseaux afin de faire un état des lieux des systèmes étudiés, de contribuer à la définition de certaines stratégies d'échantillonnages, conduisant à la mise en œuvre d'études

complémentaires ainsi qu'au développement ou à l'optimisation d'outils. Cette ouverture m'a alors permis d'envisager de développer des collaborations afin d'aller plus loin dans l'analyse, la compréhension et la prédiction de la dynamique phytoplanktonique de la Manche orientale et de la baie sud de la mer du Nord. Mon projet de recherche est ainsi construit par intégration de l'information à différentes échelles spatiales et temporelles ainsi que par une approche pluridisciplinaire (Figure 1).

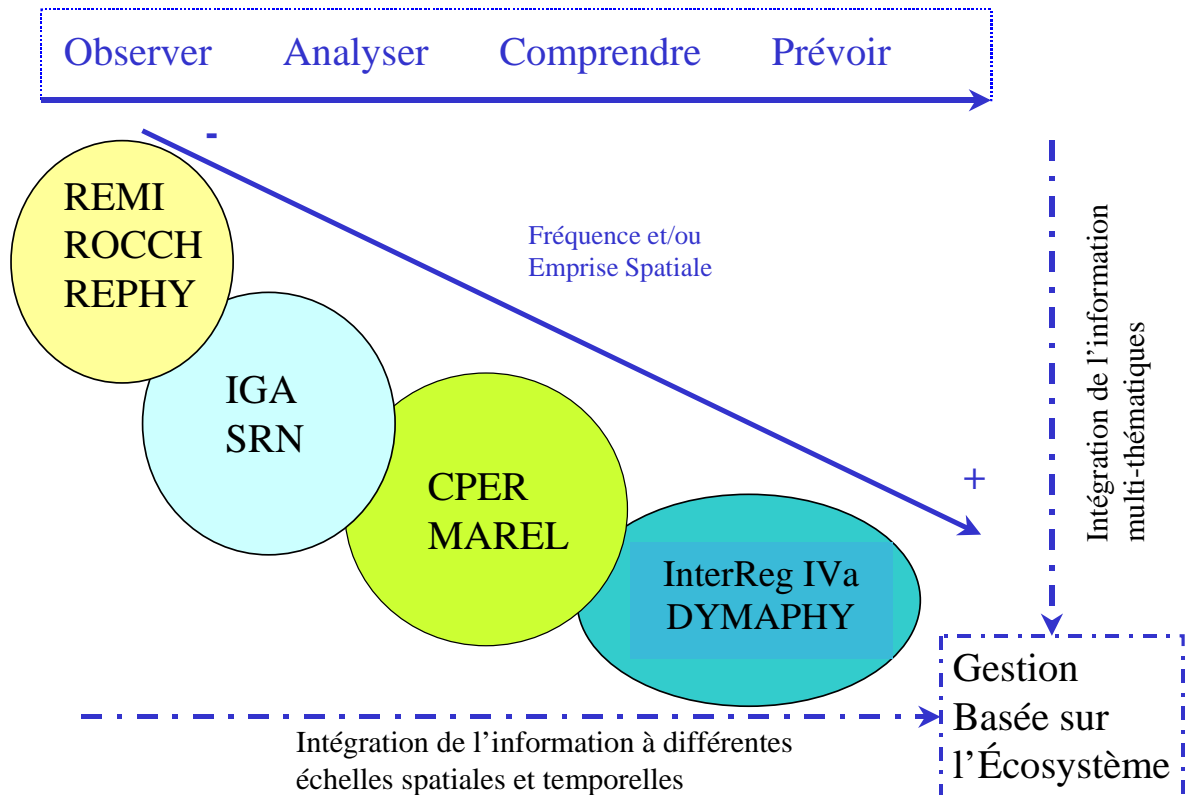


Figure 1. Programmes supports, moyens et objectifs de la stratégie de recherche développés au sein du LER-BL.

(ROCCH : Réseau d'Observation de la Contamination Chimique, REPHY : Réseau Phytoplankton et Phycotoxines, IGA : Impacts des Grands Aménagements (**CReg-1.**), SRN : Suivi Régional des Nutriments (**CReg-2.**), CPER Contrat de Plan Etat Région dédié aux écosystèmes perturbés et ciblant *Phaeocystis globosa*, MAREL : Système de mesures automatisées à haute fréquence (**CReg-3.**), InterReg IVa DYMAPHY).

Au cours de ces dernières années, j'ai ainsi mis en place le projet de contribution à la recherche du laboratoire que je dirige, le LER-BL, intitulé « **Comprendre la dynamique planctonique et développer des outils d'analyses automatisées** ». Les rapprochements scientifiques au sein du GIS campus de la mer, du GDR Phycotox et le réseau de partenaires mis en place permettent ainsi à mon laboratoire d'étendre son ambition pour atteindre l'objectif d'une approche écosystémique du trophodynamisme planctonique (*i.e.*, dynamique planctonique et relation trophique au sein du plancton).

Ce projet de recherche s'articule autour de trois sous-thèmes (Figure 2) détaillés ci-après. Je pilote les sous-thèmes 1 et 3.1, et j'assure le co-pilotage, avec E. Antajan, du sous-thème 3.2 :

- 1) **Biodiversité et dynamique spatio-temporelle des communautés phytoplanctoniques,**
- 2) **Biodiversité et dynamique spatio-temporelle des communautés zooplanctoniques,**

Pour ces 2 thèmes, l'accent est mis sur la structuration des assemblages phytoplanctoniques et zooplanctoniques et de leurs distributions spatiale et saisonnière, en relation avec les variations de l'environnement ;

3) **Amélioration de la stratégie d'observation 3.1) par le développement et la mise en œuvre de systèmes automatisés de mesures en continue :** Ce sous-thème vise à comprendre la variabilité et la complexité de l'environnement marin (via l'étude approfondie des compartiments hydrologique et phytoplanctonique) en intégrant l'information à différentes échelles de temps et d'espace, via le développement et la mise en œuvre de systèmes *in situ* de mesures automatisées à haute fréquence **et 3.2) par l'imagerie.** Il s'agit ici d'optimiser et de mettre en œuvre des outils permettant l'identification d'organismes phyto-, zoo- et ichtyo-planctoniques de façon automatisée et/ou semi-automatisée via l'acquisition et l'analyse d'images. Les méthodes sont développées dans le but d'accroître et d'améliorer nos capacités d'observation tant dans l'espace que dans le temps.

Les investissements consentis permettent au LER-BL de bénéficier d'une plateforme technologique : la station MAREL Carnot et un pocket Ferry-Box ; d'une plateforme technique dédiée à l'hydrologie et au phytoplancton (approches conventionnelles et imagerie numérique) ; et d'un Pôle de Taxinomie et Écologie du Zooplancton (PTÉZoo) transversal avec le Laboratoire Ressources Halieutiques du Centre Manche-Mer du Nord. Mon laboratoire peut ainsi prétendre aborder ses thématiques de recherche, en tenant compte d'une couverture spatiale et d'une résolution temporelle adaptées, des compartiments étudiés grâce à la mise en œuvre de technologies adéquates disponibles au sein du laboratoire (mesures à haute fréquence, analyses d'images, ...) ou partagées avec ses collaborateurs (images satellites, modélisation, cytométrie en flux,...).

Thématique de recherche du LER/BL
Comprendre la dynamique planctonique
et développer des outils d'analyses automatisées

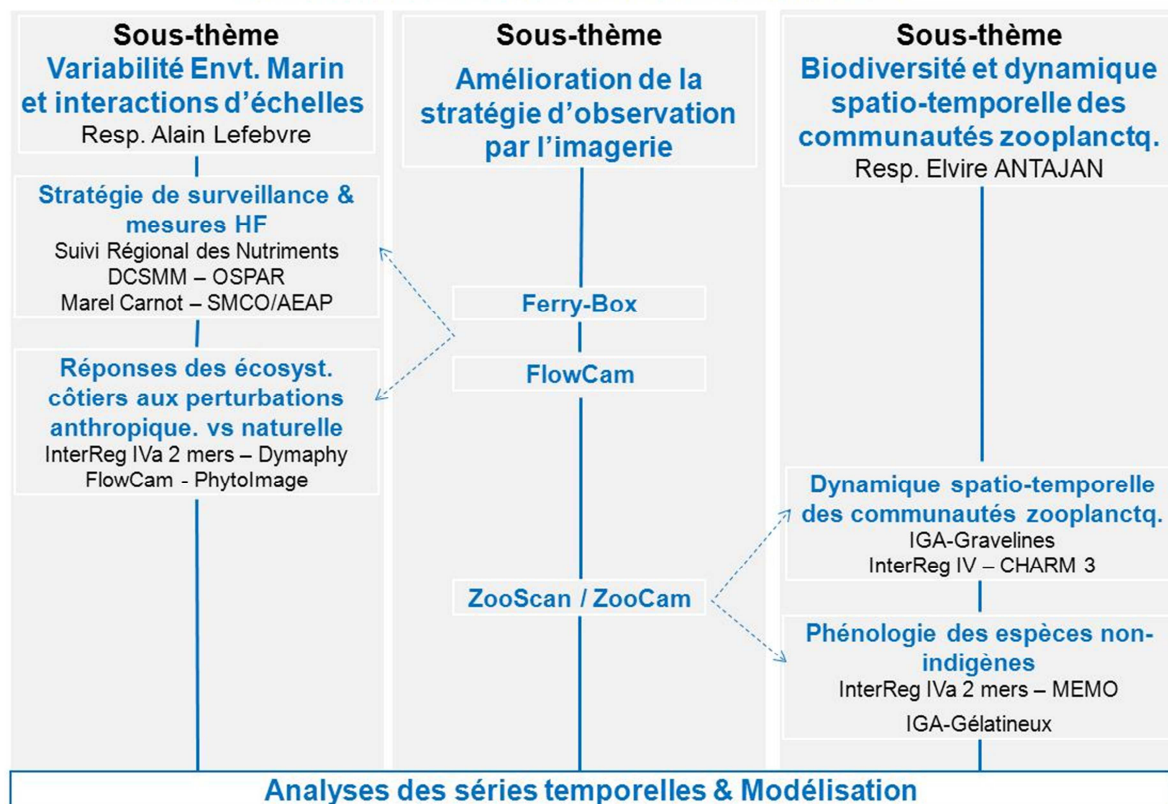


Figure 2. Projet de recherche tel que présenté à l'AERES en 2012 : « Comprendre la dynamique planctonique et développer des outils d'analyses automatisées » : présentation de la thématique, des sous-thèmes et de la plateforme technique.

Mes compétences en environnement et écosystèmes marins et continentaux me permettent ainsi de contribuer aux missions principales d'un LER :

- l'observation du littoral (mise en œuvre des réseaux nationaux et régionaux d'observation et de surveillance : contaminants chimiques, microbiologie, phytoplancton et phycotoxines),
- la recherche et la mise en œuvre d'études régionales, nationales et européennes,
- l'expertise et l'émission d'avis, la valorisation des connaissances,

et me permettent de développer une véritable dynamique basée sur le triptyque **Observation/Surveillance, Recherche et Avis/Expertise**. Ces différentes actions m'amènent également à contribuer à la formation d'étudiants (enseignement et encadrements de stagiaires - sections 5 et 6) et à des actions de communications vers le grand public (**ArtV-1. à ArtV-14.**).

Je développe ainsi depuis mon recrutement une **recherche** qui vise à intégrer i) les compétences scientifiques de mon réseau de collaboration, ii) les études et les programmes d'observation et de surveillance à différentes échelles de temps et d'espace et iii) les différentes méthodes de prélèvements, d'analyses d'échantillons et de données.

2. Synthèse des travaux de recherche

2.1. Objectifs scientifiques et enjeux

*« We may not know exactly what we are measuring,
but the patterns observed are too strong to ignore »
(Cullen & Renger, 1979).*

Les conclusions des évaluations de la qualité de l'environnement au travers des analyses des résultats issus des réseaux nationaux et régionaux, de l'application des méthodes d'évaluation de la DCE ou de la convention OSPAR (Annexe 1) mettent clairement en évidence un déclassement de la qualité de l'environnement marin côtier en Manche orientale et dans la baie sud de la mer du Nord soit par des éléments chimiques, soit par des éléments biologiques. Inévitablement, au regard de ma formation, mes activités d'études et de recherche se sont focalisées sur le compartiment biologique.

Mon **objectif général** est de contribuer à une **meilleure compréhension des effets des forçages naturels et anthropiques sur la dynamique du phytoplancton** en tenant compte des **interactions d'échelles** (long-terme vs court terme, régional vs global, basse fréquence vs haute fréquence). Pour ce faire, il s'agit également pour moi de développer ou de contribuer au développement et à la mise en œuvre de **systèmes de mesures automatisés à haute fréquence** (fréquence d'échantillonnage infra-journalière) en complément de programmes existants, principalement basés sur des approches conventionnelles à basse fréquence (fréquence de prélèvements mensuelle, bimensuelle ou au mieux hebdomadaire). Les résultats acquis avec ces différentes stratégies sont alors analysés avec des méthodes classiques en écologie numérique, ou alors, avec des méthodes d'analyses plus innovantes. Ces différentes approches permettent de caractériser les sites étudiés du point de vue de leurs spécificités physico-chimiques et biologiques, de décrire la biodiversité phytoplanctonique et par conséquent les habitats pélagiques, de définir la phénologie des efflorescences phytoplanctoniques et d'envisager les effets de changements naturels et/ou liés aux activités anthropiques dans des environnements contrastés.

Mon projet concerne plus particulièrement l'**étude de la dynamique et de la structure de la communauté du phytoplancton**, compartiment biologique essentiel dans le cycle des matières ainsi que pour la productivité des zones côtières et des océans (Cloern et Jasby, 2008). Pour attirer l'attention sur les effets dévastateurs des activités anthropiques de l'Homme sur l'environnement, les médias évoquent souvent la forêt amazonienne comme LE poumon de la planète. Beaucoup ont oublié leurs cours de biologie élémentaire et le fait qu'il existe deux poumons : ce deuxième poumon de la planète correspond au phytoplancton, bien que sa biomasse soit très nettement inférieure. Il contribue à la fameuse pompe biologique permettant de réguler les flux de dioxyde de carbone. Ce compartiment est d'une importance capitale puisqu'il constitue la base des réseaux trophiques marins. La compréhension de la structure de cette communauté est essentielle pour toute évaluation de la diversité marine (Garmendia *et al.*, 2013). Le maintien des biens et des services écologiques est donc en partie lié à la dynamique du phytoplancton. Il existe plusieurs milliers d'espèces phytoplanctoniques au niveau mondial : quelques centaines peuvent proliférer de façon importante en formant des eaux rouges, brunes ou vertes, quelques dizaines sont toxiques pour la faune marine ou pour l'homme par consommation de coquillages (processus de

bioaccumulation de toxines) et d'autres provoquent des apports excessifs de matière organique impactant la qualité des masses d'eau, mais la plupart d'entre elles sont totalement inoffensives. Le développement de ces taxons est fortement dépendant des conditions environnementales et sera marqué par un cycle saisonnier qui, dans les écosystèmes tempérés, permet d'observer des abondances plus importantes au cours du printemps et de l'été, avec parfois un développement secondaire à l'automne. Parmi les taxons marins, la majorité des études conclut que les diatomées sont les premières à se développer entre mars et mai en raison de leur tolérance à de plus fortes turbulences, une plus faible luminosité. Cette biomasse constitue alors une ressource nutritive essentielle pour les autres niveaux trophiques. Les dinoflagellés se développent généralement après les diatomées en réponse à des conditions hydrodynamiques plus stables. Alors que certains taxons vont naturellement contribuer aux transferts énergétiques vers les niveaux supérieurs, d'autres vont être responsables de la formation de blooms nuisibles qui limitent le grazing, peuvent provoquer des dysfonctionnements et/ou des mortalités au sein des écosystèmes benthiques et pélagiques, et pourront entraîner, par bioaccumulation, une dégradation de la qualité des produits de la mer, rendus impropres pour la consommation humaine. Par conséquent, tout déséquilibre au sein de la communauté, par exemple en favorisant les dinoflagellés au dépend des diatomées, va avoir des effets majeurs sur la biodiversité des niveaux trophiques supérieurs comme au niveau de la qualité de l'écosystème en général. Cette modification des biens et services écosystémiques ne sera pas sans conséquence socio-économique.

Par sa capacité à répondre rapidement aux modifications de la qualité de son environnement, permettant ainsi d'évaluer une réponse à différentes sources de pressions, le phytoplancton est ainsi régulièrement utilisé comme un indicateur de qualité pour les directives et conventions (exemples de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE - 2000/60/CE), de la Directive Cadre Stratégie du Milieu Marin (DCSMM - 2008/56/CE) et de la Convention d'Oslo et de Paris (OSPAR, 2010)). La biomasse du phytoplancton, son abondance et sa composition, la fréquence et l'intensité des efflorescences sont régulièrement utilisés dans les métriques développées pour leurs besoins.

Mon approche considère bien évidemment **les paramètres physico-chimiques et biologiques** classiquement mesurés dans les systèmes aquatiques permettant ainsi de définir les conditions environnementales favorables au développement de la faune et de la flore, et reflétant également les effets directs et indirects de leur développement et de leurs interactions dans le milieu, mais aussi leurs réponses aux pressions. La succession des assemblages phytoplanctoniques est principalement contrôlée par les conditions environnementales (disponibilité des nutriments, de la lumière, conditions hydrodynamique et météorologique) et par la réponse des populations phytoplanctoniques à leurs variations. La diversité et la dynamique des populations phytoplanctoniques résultent ainsi d'interactions complexes entre des facteurs hydrodynamiques, physico-chimiques et biologiques. Ces mesures sont indispensables d'une part pour rendre compte de la dynamique multi-échelle des zones côtières, de l'océan et des écosystèmes qu'ils abritent, d'autre part pour surveiller leur état environnemental susceptible de se dégrader sous l'effet des pressions anthropiques.

Les zones estuariennes et côtières sont les environnements les plus productifs au monde (De Jonge et Elliott, 2001). Environ 26 % de la production primaire totale y

prend place, alors que la surface de ces zones ne représente que 8 % de la surface de la Terre (Figure 3). Ainsi, les effets de l'eutrophisation sont particulièrement marqués dans les zones estuariennes et côtières, ce qui n'exclue pas des effets directs et indirects sur **les zones plus au large**. C'est pourquoi mon projet développé initialement en zone marine côtière s'est rapidement étendu vers le large.

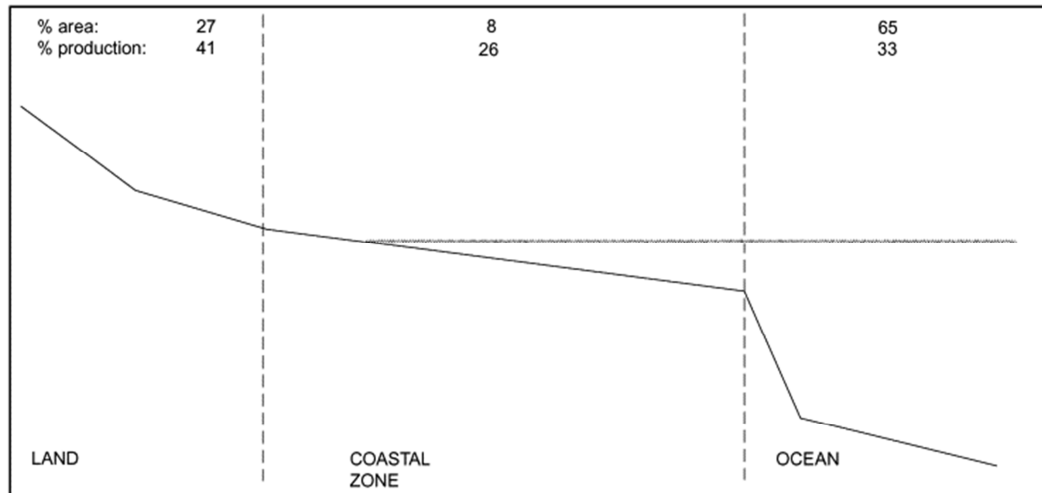


Figure 3. Importance de la Production Primaire (% Production) en fonction de la surface de différents types de zone (terre, zone côtière et océan) (% area) (Source : De Jonge et Elliott, 2001).

Il s'agit en effet de travailler i) à l'échelle de la Manche orientale sur des environnements différents (Figure 4) :

- la zone côtière de Boulogne-sur-Mer, zone de faible profondeur sous influence d'une structure frontale,
- la zone côtière de Dunkerque, zone côtière de transition entre les systèmes Manche et Mer du Nord,
- la baie de Somme, deuxième plus gros estuaire après la Seine au niveau de la Manche,

puis ii) à l'échelle de la Manche et de la baie sud de la Mer du Nord lors de campagnes spécifiques (Figure 5) afin d'étudier la variabilité spatiale des patrons de variation mis en évidence. Plus récemment, mon implication dans la mise en œuvre de la Directive Cadre Stratégie pour le milieu Marin (DCSMM, 2008/56/UE) comme chef de file puis comme pilote scientifique pour le volet Eutrophisation et co-pilote avec le CNRS-Résomar pour le volet Habitats Pélagiques, me permet d'envisager d'étendre cette approche aux autres sous-régions marines Atlantique et Méditerranée occidentale (Figure 6).



Figure 4. Zone d'emprise du laboratoire Environnement et Ressources de Boulogne-sur-Mer (LER-BL) pour la mise en œuvre des réseaux d'Observation et de Surveillance (polygone jaune). Localisation des radiales du réseau régional SRN (Suivi Régional des Nutriments) (polygones verts). Site d'implantation de la station instrumentée MAREL Carnot (★).

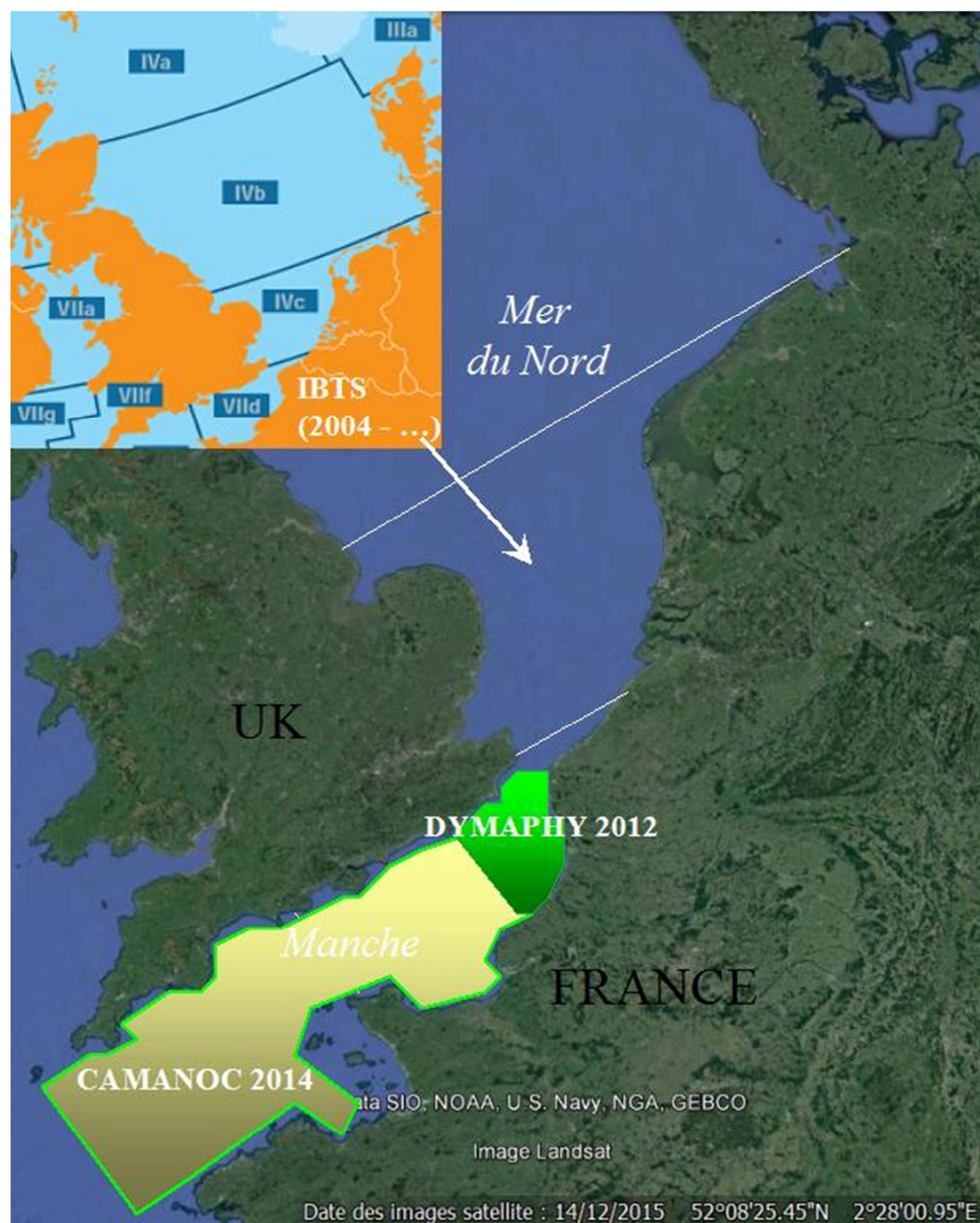


Figure 5. Zones d'investigations de la campagne DYPHYMA du projet InterReg IVA 2 Mers DYMAPHY (2012), de la campagne écosytémique CAMANOC 2014 et des campagnes IBTS (carrés IVa,b,c et VIId).

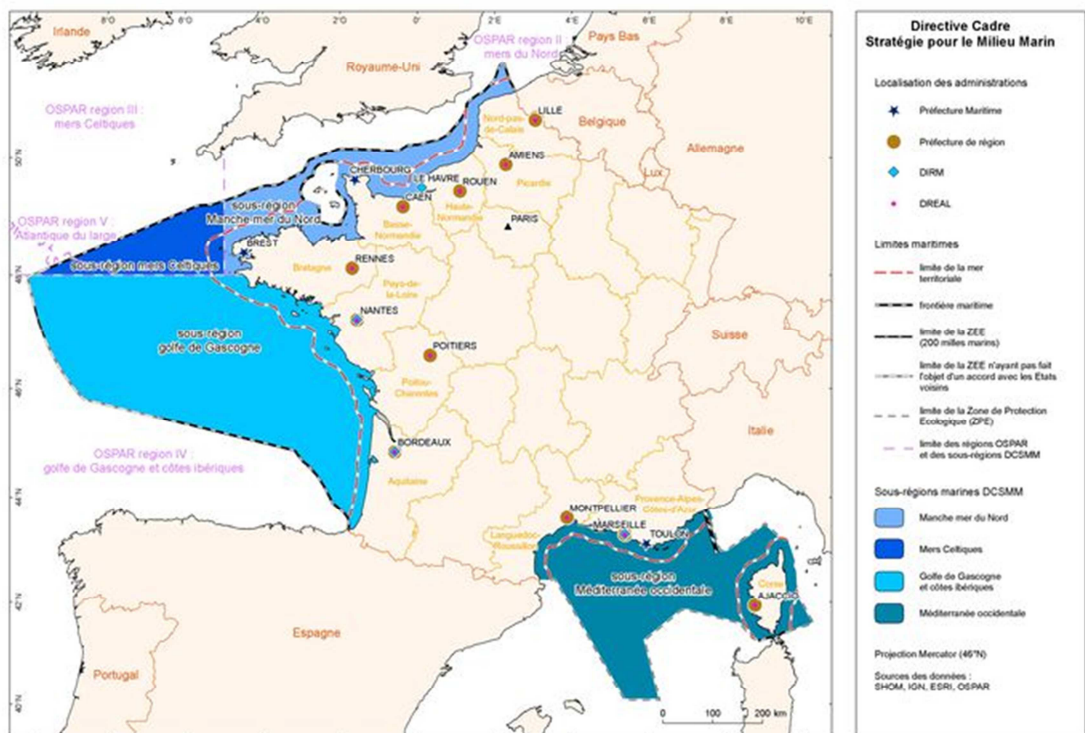


Figure 6. Division en quatre sous-régions marines des zones métropolitaines sous souveraineté ou juridiction française pour la mise en œuvre de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) : la Manche-mer du Nord, les mers celtiques, le golfe de Gascogne, la Méditerranée occidentale.

Étudier le phytoplancton dans une zone géographique comme la Manche orientale et la partie sud de la mer du Nord, c'est à dire dans une zone caractérisée par des proliférations massives de la prymnésiofycée *Phaeocystis globosa* (Annexe 1), amène inévitablement à aborder la thématique de l'eutrophisation. **L'eutrophisation** est définie par Ferreira *et al.* (2011) comme un processus contrôlé par l'enrichissement de l'eau par les nutriments, et particulièrement par les composés de l'azote et/ou du phosphore, conduisant à une augmentation de la croissance, de la production primaire et de la biomasse des algues, ainsi qu'un changement dans l'équilibre des organismes et une dégradation de la qualité de l'eau. Les conséquences de l'eutrophisation sont indésirables si elles dégradent sensiblement la santé de l'écosystème et/ou l'apport durable des biens et services qu'il procure.

Au regard de cette définition, *Phaeocystis* apparaît donc comme un modèle biologique très intéressant afin de mieux comprendre le processus d'eutrophisation. Les proliférations anormales (augmentation de la durée et de l'intensité des efflorescences) de cette algue présente naturellement en mer du Nord depuis les années 70 dans un contexte d'enrichissement excessif des eaux marines en nutriments ont motivé les équipes scientifiques de cette vaste zone à initier des programmes de recherche dédiés à ce taxon (Eberlein *et al.*, 1985 ; Admiraal et Venekamp, 1986 ; Bätje et Mickaelis, 1986 ; Cadée et Hegeman, 1986 ; Lancelot et Mathot, 1987 ; Lancelot *et al.*, 1987 ; Rousseau *et al.*, 1994). Il est très vite apparu que *Phaeocystis* allait rejoindre la liste des taxons nuisibles (au sens HAB - Harmful Algal Bloom) non pas en raison d'une toxicité potentielle, mais par l'importance de la biomasse générée lors de ses proliférations et de

ses conséquences. *Phaeocystis* est par ailleurs susceptible de produire des précurseurs de diméthyl-sulphide (DMS) favorable à la formation des pluies acides. A la fin de son cycle de développement très complexe, polymorphe, *Phaeocystis* apparaît sous forme coloniale. Ces colonies sont chargées de mucos-polysaccharides. Elles vont se rompre en réponse à des facteurs internes (vieillessement, lyse,...) et/ou externes (turbulence) et provoquer par émulsion l'accumulation d'une mousse épaisse, nauséabonde sur le littoral. En Manche orientale et dans les eaux françaises de la baie sud de la mer du Nord, il faudra attendre le début des années 2000 pour avoir un programme dédié exclusivement à *Phaeocystis* (**CReg-4.**, **CNat-1.**).

Le nombre de publications dédiées à l'eutrophisation (recherche pour le mot clef « Eutrophication » via Web Of Science entre 1980 et 2015) a considérablement augmenté depuis le début des années 1980 (Figure 7). Partant de quelques dizaines de publications par an dans les années 80, la production annuelle actuelle est de l'ordre de 1 500 contributions à l'échelle mondiale.

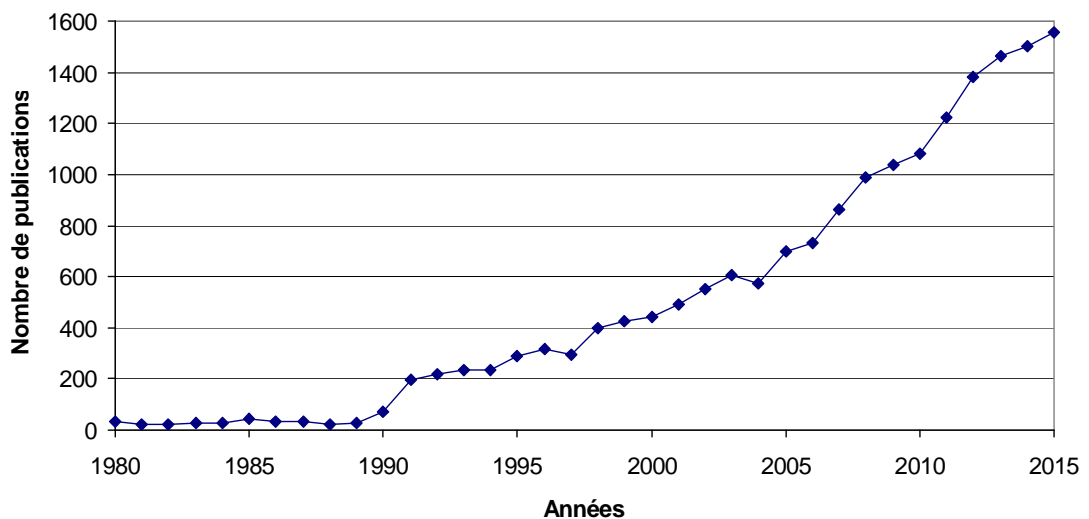


Figure 7. Évolution du nombre de publications dédiées à l'eutrophisation entre 1980 et 2015 (Source : Web Of Science Core Collection - mot clef = eutrophication).

Les connaissances ainsi acquises ces dernières années sont telles qu'il est généralement admis qu'il existe une bonne connaissance qualitative des processus mis en jeu dans l'eutrophisation mais l'influence quantitative sur les processus écologiques et les changements dans la structure des communautés ne sont pas encore bien connus (De Jonge et Elliott, 2001). Mon identification des travaux à poursuivre ou à mettre en œuvre afin de contribuer à améliorer les connaissances s'inspire du schéma conceptuel du processus d'eutrophisation développé par OSPAR (Figure 8) et du schéma conceptuel d'Elliott et De Jonge (2002) qui proposent une approche bottom-up des causes et processus en réponse aux apports de nutriments (Figure 9a) ou une approche top-down des réponses (Figure 9b). Ces figures mettent en évidence les compartiments biologiques, les paramètres, les processus à considérer pour une étude approfondie de l'eutrophisation. L'idée globale est de considérer que l'enrichissement en nutriments par les apports internes et externes (y compris transfrontaliers), selon les conditions de disponibilité de la lumière support à l'activité photosynthétique, dans un contexte hydrodynamique donné, va contribuer directement à une augmentation excessive de la biomasse du phytobenthos, du phytoplancton et des macroalgues. Ce premier symptôme

de l'eutrophisation sera associé à des effets négatifs sur la qualité des masses d'eaux (hypoxie, anoxie, apports excessifs de matière organique, ...) et par conséquent sur les compartiments benthique et pélagique (niveaux trophiques supérieurs). Par ailleurs, les interactions complexes au sein de ces compartiments contribueront à favoriser ou à inhiber le processus d'eutrophisation.

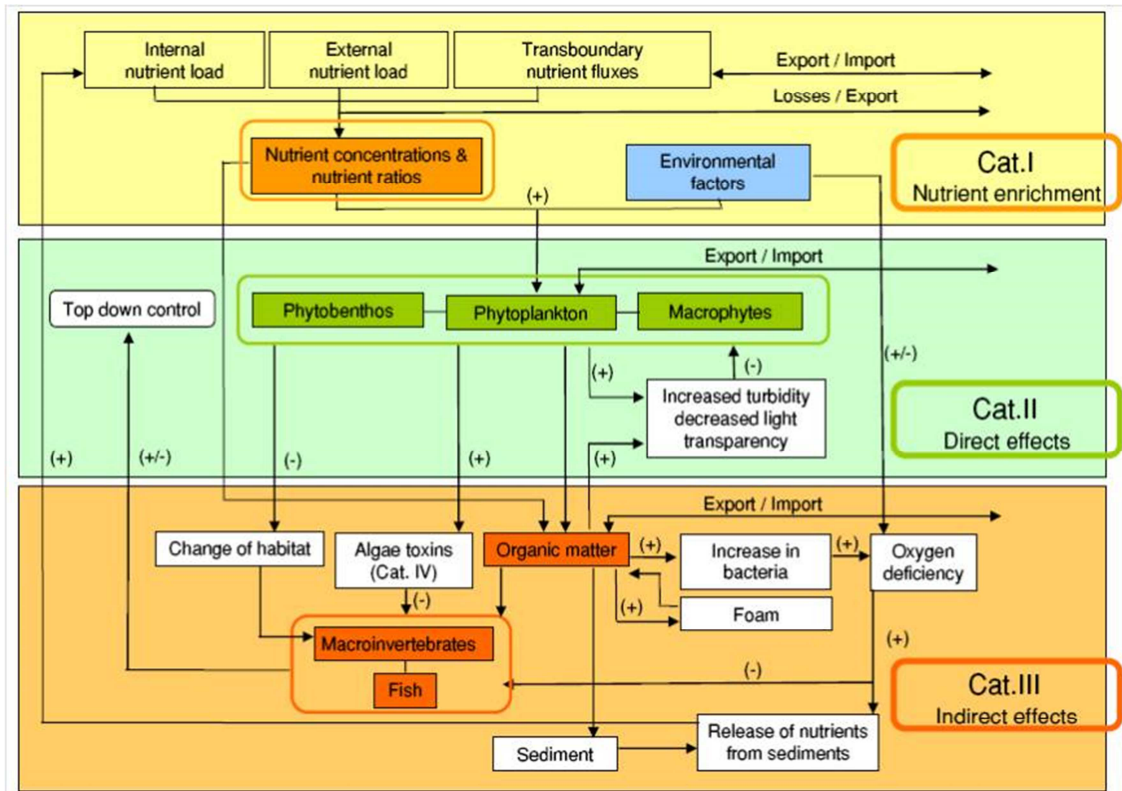


Figure 8. Interactions entre les différents éléments impliqués dans le processus d'eutrophisation. (+) renforcement du processus, (-) inhibition du processus. Cat. Catégories de la Procédure Commune d'évaluation de l'état d'eutrophisation d'OSPAR (Source : Claussen *et al.*, 2009).

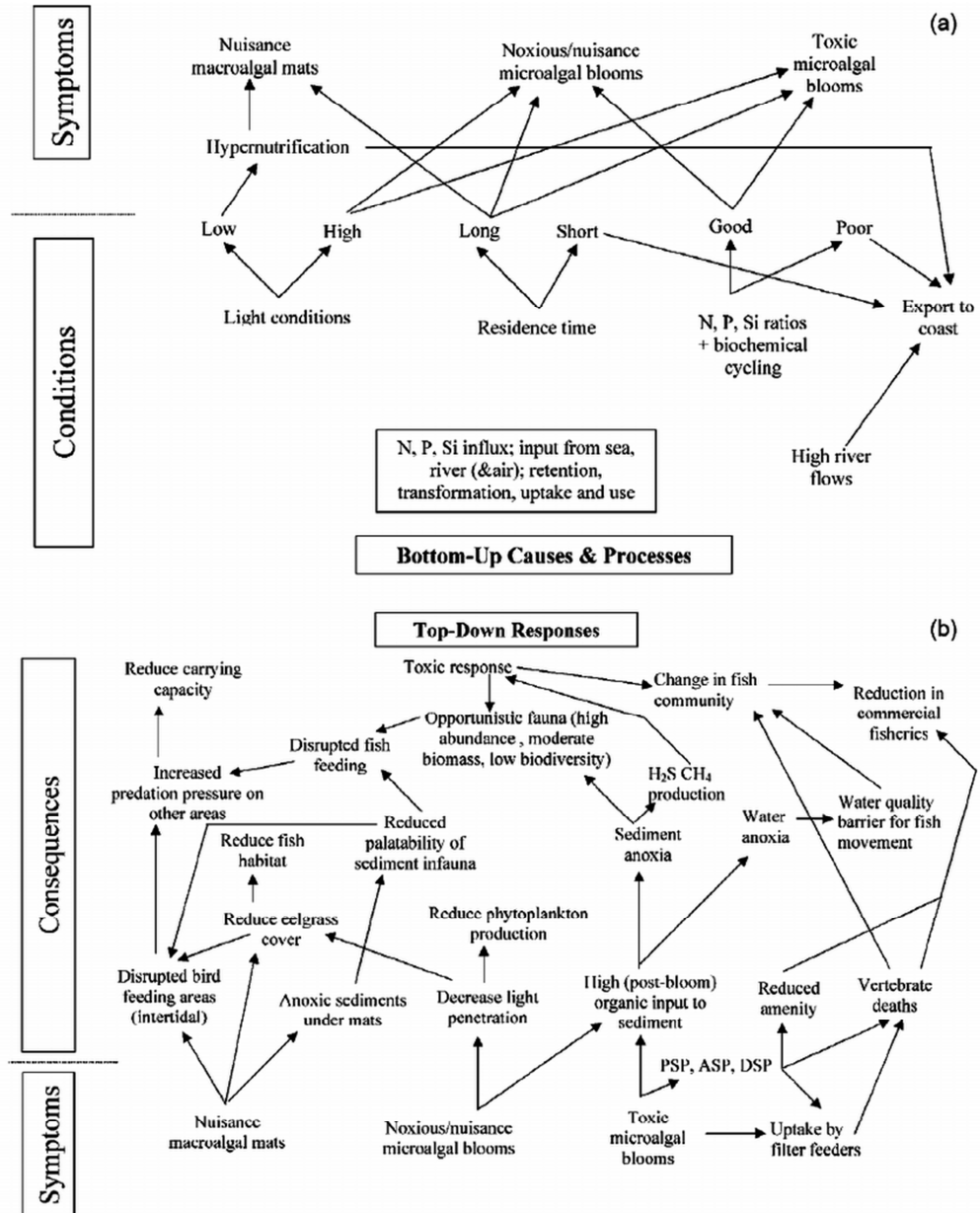


Figure 9. Modèle conceptuel (a) des causes et processus bottom-up des effets des apports de nutriments et (b) des réponses top-down des effets des apports de nutriments et de l'eutrophisation (Source : Elliott et De Jonge, 2002).

Une des explications supplémentaires de la méconnaissance du milieu et de son état de santé tient à la difficulté d'y effectuer des observations régulières. Les programmes d'observation et de surveillance proposent le plus souvent des fréquences de suivi bimensuelles ou mensuelles, rarement hebdomadaires. Les **approches à plus hautes fréquences (HF)** (de l'échelle infra-hebdomadaire à l'échelle infra-horaire) se faisaient et se font encore trop souvent sous forme d'opérations « coup de poing » lors de courtes périodes dans le cadre de programmes de Recherche. L'acquisition de mesures automatisées HF en mer de manière plus systématique et s'inscrivant dans la durée n'est réellement possible en mode opérationnel (par opposition au mode Recherche & Développement) que depuis quelques années et seulement pour quelques paramètres et dans certaines zones. Ces données acquises à haute fréquence fournissent (en compléments des données enregistrées à basse fréquence et/ou en lissant les signaux)

des informations d'une grande importance pour mieux comprendre la dynamique multi-échelle de la dynamique du phytoplancton et des systèmes côtiers considérés (Figures 10 et 11). Cloern (1996) illustre cette dynamique multi-échelle de la biomasse phytoplanctonique dans la baie de San Fransisco (Figure 11). Cet auteur met en avant les fluctuations tidales (échelle semi-diurne), le changement de patron de variation lié au démarrage de l'efflorescence (échelle hebdomadaire), les fluctuations saisonnières à long-terme (échelle interannuelle) et des ruptures pouvant correspondre à des changements majeurs (échelle pluriannuelle). Malgré ces constatations, la valorisation et le traitement optimisé de ces données HF restent faibles dans la littérature académique, en raison de multiples contraintes associées à ces bases de données : forte variabilité, large gamme d'échelle pour la variabilité des séries temporelles, nombreuses données manquantes (liées aux maintenances et épisodes de pannes des capteurs), nombreux paramètres à prendre en compte, obéissant à des forçages et processus différents... L'objectif de mon projet est donc également de contribuer au **développement et à la mise en œuvre de ces approches HF**, et de pouvoir appréhender les nombreuses contraintes qui y sont liées, en utilisant des méthodologies adaptées et normalisées, pouvant être appliquées aux différentes bases de données HF.

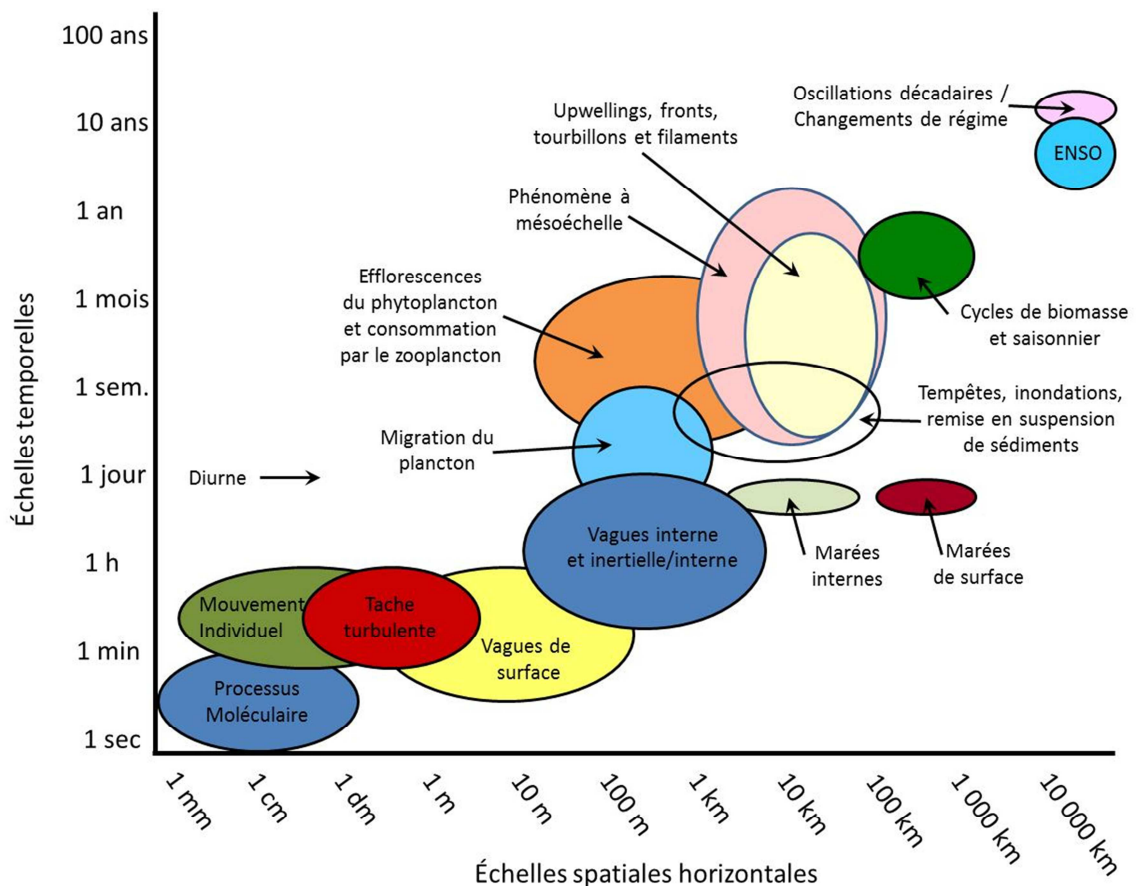


Figure 10. Échelles spatiales et temporelles (Log/log) des différents processus impliqués dans les efflorescences du phytoplancton (Traduction par Lefebvre A., d'après Dickey, 2003).

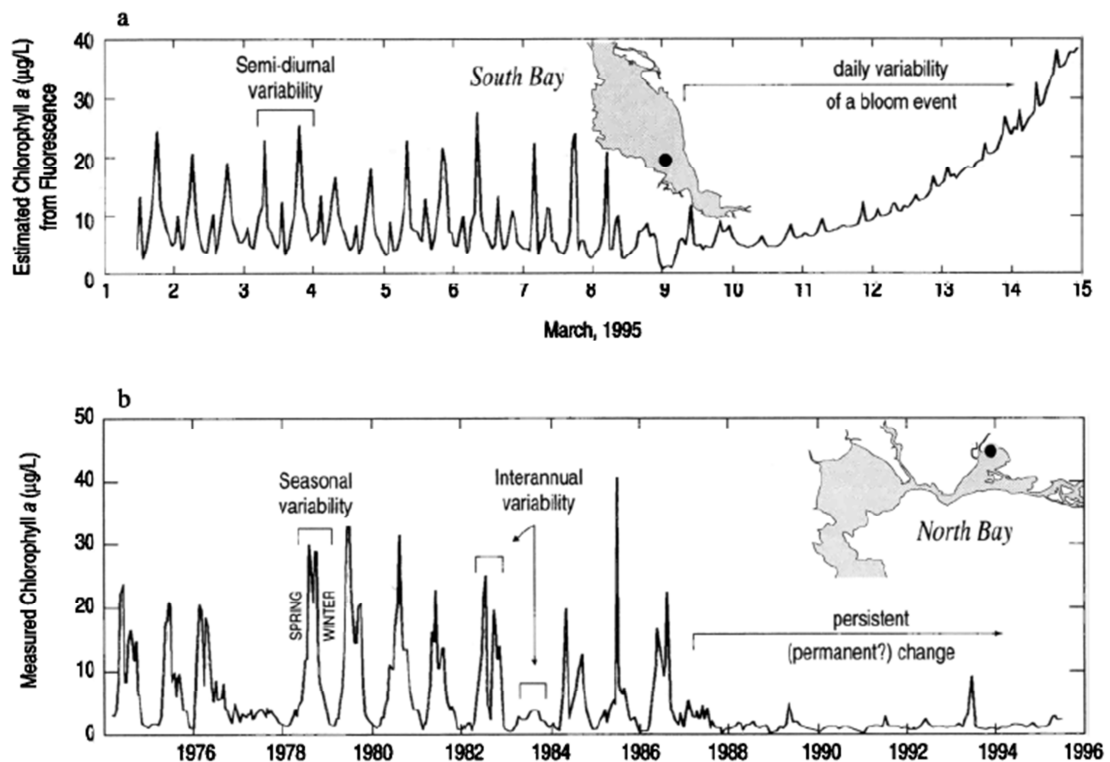


Figure 11. Illustrations des échelles temporelles impliquées dans les variations de la biomasse phytoplanctonique dans la baie de San Francisco (Cloern, 1996).

Les connaissances acquises via l'observation, la surveillance et les projets de recherche me permettent de contribuer activement à la mission d'**Appui aux Politiques Publiques** de l'Ifremer via des propositions scientifiques et techniques pour la définition des stratégies, des métriques et des indicateurs, du bon état écologique en soutien à la mise en œuvre de directives comme la Directive Cadre sur l'Eau (DCE, 2000/60/CE) ou la DCSMM (2006/56/CE) ou de conventions de mers régionales comme la convention d'Oslo et de Paris (OSPAR).

Via une collaboration avec les halieutes, il s'agit également de contribuer pour les volets Hydrologie et Plancton à l'**approche écosystémique** qui vise à améliorer les connaissances sur l'ensemble de la Manche de toutes les composantes de l'écosystème marin, en identifier les relations internes ainsi que les liens avec les facteurs climatiques et environnementaux et évaluer les impacts anthropiques afin de proposer des solutions de gestion de la ressource.

2.2. Présentation générale de la zone d'étude

L'océan et sa frange côtière sont des milieux complexes, en mouvement permanent, gouvernés par des mécanismes physiques, chimiques et biologiques à haute fréquence et courtes longueurs d'onde, très incomplètement observés, décrits et compris, soumis à des aléas naturels (*i.e.* changement climatique) et à des pressions anthropiques (*i.e.* usages en amont des bassins versants par l'agriculture, l'industrie,...) de plus en plus fortes. En particulier, les domaines littoral et côtier concentrent des usages multiples en mer et sur le littoral, où les populations se sont notablement densifiées.

La Manche et le sud de la Mer du Nord (Figure 12) sont des mers depuis longtemps fortement anthropisées (pêche, tourisme et activités de loisirs, extraction de granulats marins, circulation maritime, zones portuaires de premier plan, zones estuariennes dégradées, projets d'éoliennes off-shore en constituent une liste non exhaustive), présentant des enjeux économiques considérables et soumises à une multiplicité d'utilisateurs ayant des intérêts fréquemment antagonistes (Carpentier et Vaz, 2009 ; **R-52**). Malgré ces pressions, les ressources naturelles (halieutiques, conchylicoles mais également minérales) de ces zones suscitent bien des convoitises, au niveau national comme européen. La demande sociétale, institutionnelle (UE, Etat et collectivités territoriales) mais également société civile (pêcheurs, industriels, ONG...), concernant l'analyse des réponses de l'écosystème et de ses ressources aux différents types de contraintes, dont le changement climatique global, a évolué et ne cesse de croître (Carpentier et Vaz, 2009 ; **R-52**). Les questions posées concernent de plus en plus les interactions entre différentes espèces, entre stratégies d'exploitation et espèces exploitées, entre dégradation du milieu et écosystème, entre activités humaines conflictuelles, et les réponses attendues doivent intégrer l'ensemble de ces situations. La fragilité de cet écosystème, soumis à de fortes pressions anthropiques, impose d'améliorer la connaissance de cette zone maritime. En effet, il est essentiel que la France et les autres pays riverains aient une vision commune de la protection de la qualité de cet écosystème et mettent en place des outils d'aide à la réflexion et à la gestion des activités humaines pesant sur cette écorégion pour une exploitation durable de ses ressources.

L'écorégion Manche est une mer épicontinentale qui constitue une zone environnementale particulière, zone de transit entre les masses d'eau Atlantique et celles de la Mer du Nord. La région est soumise à un climat océanique tempéré, influencé par les courants atmosphériques humides et frais venant de l'Atlantique ou plus sporadiquement de la mer du Nord. Elle est caractérisée par son régime hydrodynamique induit par les courants de marée : un régime mégatidal (Anonyme, 1988). Cet hydrodynamisme intense conditionne la nature, la distribution et la dynamique des sédiments, ainsi que la structure, la répartition, la dynamique, le fonctionnement des compartiments biologiques. La Manche constitue une limite locale le long d'un gradient de distribution pour certaines espèces de poissons. Les échanges continus au sein de cette zone ouverte (biologiques, hydrologiques, ...) en font une zone remarquable en matière de nourriceries, de frayères et de voies de migrations. La plupart des espèces commerciales européennes y sont présentes et exploitées (ICES, 2008).

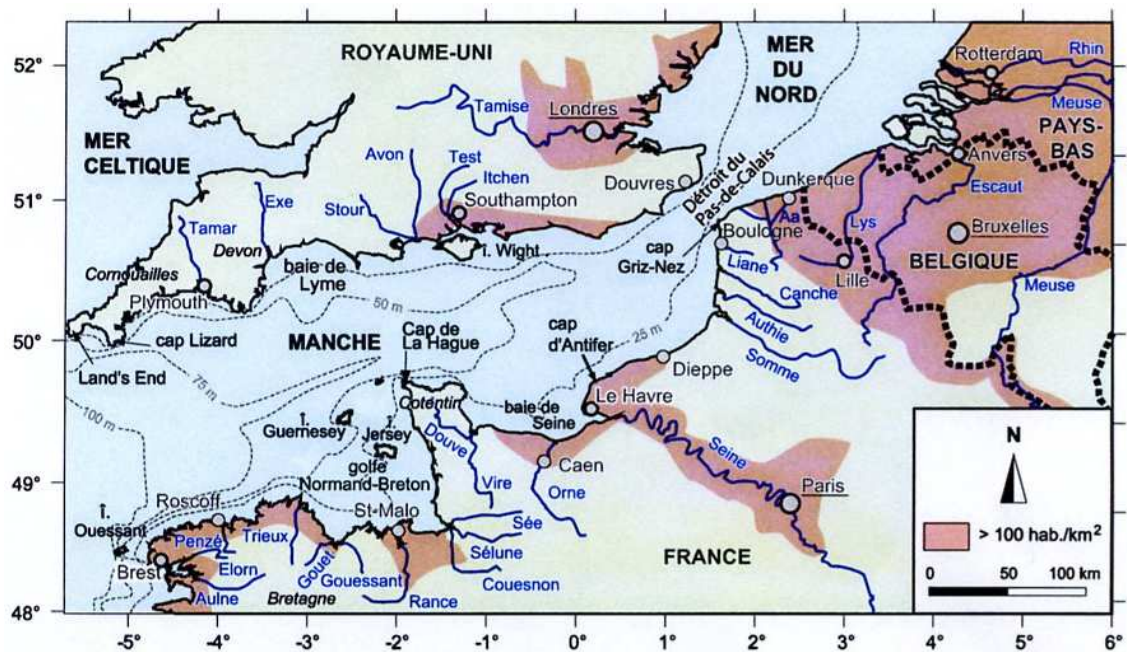


Figure 12. La Manche et la baie sud de la mer du Nord. En bleu, les principales sources d'apports à la mer.

En Manche orientale et plus particulièrement dans la zone du **détroit du Pas-de-Calais**, les courants engendrés par la marée sont alternatifs et parallèles à la côte. Le détroit forme un étranglement entre la Manche orientale et la baie sud de la mer du Nord, ce qui induit une augmentation importante de l'intensité des courants de marée à ce niveau (Anonyme, 1988). La durée du courant de flot est moins longue que celle du courant de jusant, mais son intensité plus grande provoque un courant résiduel portant au nord-est, d'environ 2,7 milles nautiques par jour. Le flux annuel moyen des masses d'eau est donc orienté de la Manche vers la mer du Nord en raison de la résiduelle de marée (Pingree et Maddock, 1977), mais également en raison de la différence de niveau de la mer entre les deux bassins maritimes (Prandle, 1978) et enfin, en raison des vents dominants de secteur sud-ouest (Pingree et Griffith, 1980 ; Salomon et Breton, 1991). Si les déplacements principaux, orientés dans l'axe de la Manche orientale et grossièrement parallèles à la côte, sont intéressants en raison des flux induits, ils le sont également parce qu'ils sont le reflet d'une anisotropie de la diffusion turbulente en Manche. Les coefficients de mélanges longitudinaux sont dix fois supérieurs aux coefficients de mélanges transversaux, d'où l'existence de structures parallèles à la côte (Pingree *et al.*, 1975). Ainsi entre la baie de Seine et le détroit du Pas-de-Calais, entre 3 et 5 milles des côtes, la transition avec les eaux du large peut ainsi prendre l'aspect d'une véritable zone frontale (Brylinki et Lagadeuc, 1990, Sournia *et al.*, 1990 ; Brylinki *et al.*, 1991 ; Dupont *et al.*, 1991) . Le long des côtes françaises, il apparaît ainsi une masse d'eau bien individualisée délimitée sur sa « rive gauche » par la zone frontale et sur sa « rive droite » par le littoral d'où le nom de « fleuve côtier » couramment utilisé pour la caractériser. Plus généralement il s'agit d'une zone marine sous influence des eaux douces (ROFI : Region Of Freshwater Influence). Cette structure va jouer un rôle essentiel dans le contrôle des échanges entre la côte et le large.

Ma zone d'étude principale, la Manche orientale et le détroit du Pas-de-Calais, représente **une zone atelier exceptionnelle** pour l'étude la dynamique du phytoplancton, de la qualité de l'eau en général et l'étude de l'eutrophisation en

particulier. En effet, cette zone constitue le lieu de passage obligé des masses d'eau (et de tout ce qu'elles peuvent contenir) qui transitent de l'Atlantique vers la mer du Nord ce qui permet d'aborder les aspects transfrontaliers du point de vue purement géographique (transition de la France vers la Belgique) comme du point de vue environnemental (transition de la Manche vers la mer du Nord). Cette zone est prise en étau entre deux systèmes fortement anthropisés, la baie de Seine et le complexe Rhin - Meuse - Escaut et, est elle-même impactée par les apports du second fleuve le plus important au niveau de la façade de la Manche orientale, la Somme, comme de rivières de moindre importance (l'Aa, la Liane, la Canche, l'Authie) (Figure 12).

Comme nous l'avons déjà souligné, le bassin oriental de la Manche est une mer épicontinentale à régime macrotidal qui génère des courants de marée rapides sensiblement parallèles à la côte et un courant résiduel en direction du nord-est. Cette dynamique est sous le contrôle des fortes contraintes hydrodynamiques qui caractérisent l'écosystème de la Manche et qui sont à l'origine d'une homogénéisation des masses d'eau sur la verticale, empêchant ainsi l'établissement d'une thermocline estivale. L'étude de l'hétérogénéité verticale et horizontale des masses d'eau côtière dans le cadre de la mise en œuvre des réseaux REPHY / SRN permet de conclure à une faible hétérogénéité verticale pour les radiales de Dunkerque et de Boulogne-sur-Mer. En baie de Somme, une légère stratification peut apparaître au niveau des points Atso et Mer2. Celle-ci est dans tous les cas négligeable par rapport à l'hétérogénéité horizontale le long de la radiale. Ces résultats sont conformes à ceux proposés par Gentilhomme et Lizon (1998), Seuront et Lagadeuc (1998), Seuront *et al.* (1999, 2002), Seuront (2005) pour des sites proches et justifient notre stratégie d'échantillonnage basée presque exclusivement sur des prélèvements en sub-surface.

2.3. Contribution à l'évolution de l'observation de l'environnement marin

Cette section est destinée à mettre en évidence ma contribution à l'évolution du système d'observation et de surveillance de l'environnement marin en Manche orientale et dans la baie sud de la mer du Nord en décrivant les systèmes conventionnels dits basse-fréquence (BF) mis en œuvre dans cette zone avant mon recrutement à l'Ifremer, puis ma contribution à leurs évolutions et/ou à la mise en place de systèmes de mesures automatisées à haute fréquence (HF) et aux développements méthodologiques associés. Cette section propose également un zoom sur les aspects modélisation hydrodynamique/biogéochimique et couleurs de l'eau. Les résultats acquis via ces différentes approches sont surtout développés dans la section 2.4.

2.3.1. De la basse fréquence ...

Avant 1992, le suivi des nutriments sur le littoral était réalisé épisodiquement par l'intermédiaire du RNO (Réseau National d'Observation) ou du RNC (Réseau National de Contrôle). La nécessité de surveiller plus finement et sur une longue période les variations de concentration en sels nutritifs du milieu littoral a conduit l'Agence de l'Eau Artois-Picardie et l'Ifremer à mettre en place, en 1992, le SRN (Suivi Régional des Nutriments) (**CReg-2.**) sur la façade du littoral Nord Pas-de-Calais / Picardie. Les objectifs de ce suivi sont d'évaluer l'influence des apports continentaux sur le milieu marin (sels azotés, phosphates, silicates) et leurs conséquences sur d'éventuels

processus d'eutrophisation. Il a pour but également d'estimer l'efficacité des stations d'épuration et des politiques d'aménagement et de gestion de la zone côtière et plus généralement l'éventuelle élimination de tels rejets. L'acquisition régulière des données permet l'établissement d'un suivi à long terme de l'évolution de la qualité des eaux littorales des trois radiales situées au large de Dunkerque, de Boulogne-sur-Mer et de la Baie de Somme permettant de prétendre à pouvoir déconvoluer les effets des changements à grande échelle, des changements liés aux activités anthropiques, plus régionaux.

L'échantillonnage est réalisé au niveau de trois systèmes caractéristiques de la Manche orientale ou de la baie sud de la Mer du Nord : Baie de Somme, Boulogne-sur-Mer, Dunkerque. Les radiales sont constituées de 3 ou 4 points de prélèvements positionnés selon un gradient côte-large (Figure 13). Les points côtiers des radiales de Dunkerque et de Boulogne-sur-Mer ainsi que le point Atso de la radiale de la baie de Somme sont les points du REPHY. Le SRN correspond ainsi à une extension vers le large du REPHY avec acquisition de paramètres complémentaires.

- La radiale de Dunkerque caractérise un système côtier de faible profondeur où dominant des apports industriels et où la faible pente des bassins versants est responsable d'écoulements continentaux lents.
- La radiale de Boulogne-sur-Mer est représentative d'un système côtier sous influence d'une structure frontale générée par les apports de la Baie de Seine et où dominant des rejets d'origine agricole.
- La radiale de Baie de Somme caractérise un système estuarien où se concentre une activité conchylicole et agricole importante.

Ces trois systèmes sont structurés hydrodynamiquement et sédimentairement par un régime mégatidal.

Suite à des modifications au niveau du chenal de navigation en Baie de Somme, un repositionnement du point Mimer a été nécessaire en 2004. Le suivi au point Mer1 a été suspendu en 2014 en raison d'un certain niveau de redondance de résultats avec le point Mer2.

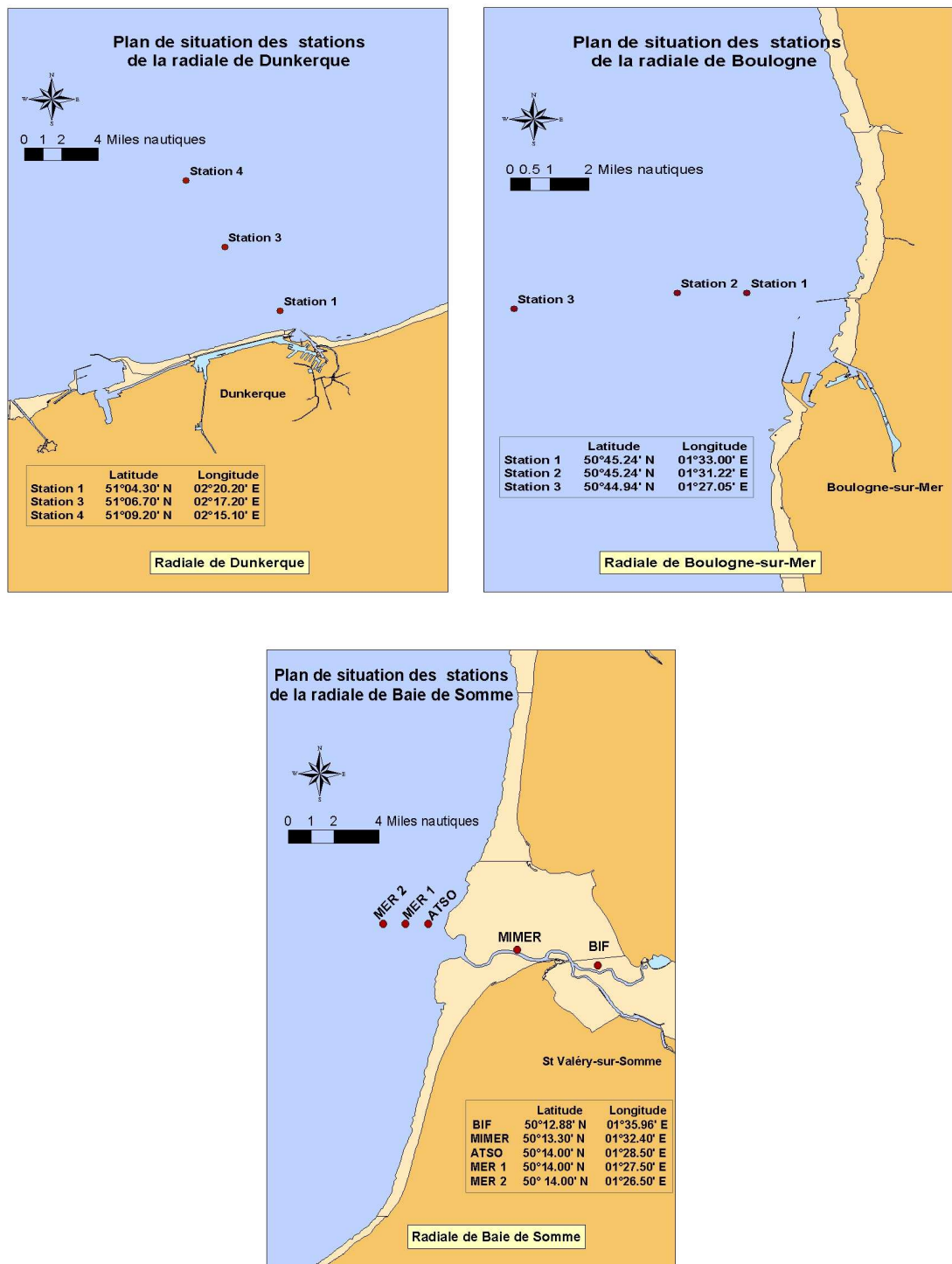


Figure 13. Localisation et coordonnées géographiques des points de prélèvements pour les radiales REPHY / SRN de Dunkerque, de Boulogne-sur-Mer et de la baie de Somme.

Pendant de nombreuses années, la restitution des résultats acquis dans le cadre du SRN se faisait sous forme d'une sorte de catalogue des données acquises pour l'année N en cours avec quelques explications quant aux variations observées à l'échelle saisonnière pour les paramètres physico-chimiques et une approche basée sur les indices de Sanders et de Shannon pour expliquer l'évolution de la diversité du phytoplancton (à partir de

1996). Mon implication comme contributeur au rapport (2000, 2001) puis comme coordonnateur / responsable scientifique du SRN (à partir de 2002) s'est traduite par des changements au niveau de la présentation des résultats et par l'ajout d'informations et d'analyses complémentaires (voir le bilan des contributions dans la section 3) :

- Prise en compte dès 2002 de l'évolution pluriannuelle (de l'année N-4 à l'année N) de l'abondance du phytoplancton pour étudier de manière plus approfondie la variabilité interannuelle,
- Intégration en 2003 des produits dérivés des images satellites (estimation de la concentration en chlorophylle-*a* obtenues à partir des mesures faites par satellite via le capteur MODIS (Gohin *et al.*, 2002, Gohin *et al.*, 2008 (**Art-5.**)) afin de pouvoir remettre les schémas de variation observés localement dans un contexte plus global, à méso-échelle,
- Présentation des séries temporelles (SLT - Série à Long Terme) et des boîtes de dispersion (de 1992 à l'année N) à partir de 2004 afin de mieux comprendre les évolutions à long-terme, de mettre en évidence les anomalies et de bien resituer l'année N dans un contexte plus globale,
- Concrétisation et montée en puissance de l'approche visant à étudier les tendances à long-terme au niveau des compartiments Hydrologie et Phytoplancton (analyses approfondies des SLT et initiation d'une dynamique de formation par la recherche (**Art-6.**, **Art-10.**, **Art-11.**, **O-2.**), encadrements de stagiaires, de thèses, de CDD et de post-docs) et approche s'orientant progressivement vers une étude plus précise de l'eutrophisation entre la frontière belge et le sud de la baie de Somme,
- Acquisition de données complémentaires sur la verticale via la mise en œuvre de profils de sonde (YSI 6600 V2) à partir de 2007 afin de mieux caractériser la structure des masses d'eau, notamment en baie de Somme,
- Interprétation de l'analyse des limitations potentielles de la croissance du phytoplancton par l'azote, le phosphore et la silice à partir de 2009 (**Art-6.**).

Une autre source de données environnementales pour la baie sud de la mer du Nord est constituée par une action du projet Ifremer « Impacts des grands aménagements » (IGA) dédiée à la surveillance écologique et halieutique du Centre Nucléaire de Production d'Électricité de Gravelines (CNPE Gravelines) (**CReg-1.**) mis en place dans les années 80 et que j'ai coordonnée entre 2002 et 2007.

Le site de Gravelines est situé à l'ouest de la Mer du Nord, à proximité du Détroit du Pas de Calais. Cette situation, alliée à la faible profondeur des eaux, a pour conséquence un hydrodynamisme important (Anonyme, 1968). L'apport continental le plus proche est constitué par l'Aa, petit fleuve côtier qui draine l'arrière-pays (région de Saint-Omer) et la plaine maritime. En raison de la très faible altitude de cette plaine, les écoulements à la mer sont contrôlés par des écluses. Il en est de même pour les deux autres exutoires de la région : Dunkerque (canal Exutoire) et Calais (Canaux de Marck, de la Rivière Neuve et de Saint-Omer). L'influence de ces cours d'eau n'est pas prépondérante sur la qualité de l'eau de mer transitant par la centrale. Les dessalures significatives observées sur le site ont lieu par temps sec, quand le vent de nord-est, établi sur de longues périodes, modifie les courants et amène sur le site des eaux de la côte belge (Belgrano *et al.*, 1990).

Le CNPE de Gravelines est composé de six tranches d'une puissance unitaire de 900 MW. Le circuit de refroidissement est alimenté en eau de mer prélevée dans l'avant-port de Dunkerque et son débit est de 40 m³ par seconde et par tranche. Le débit nominal total du rejet est ainsi de 240 m³ par seconde. L'eau réchauffée est rejetée dans un canal à ciel ouvert qui se déverse à la côte.

Depuis 1984, des installations aquacoles utilisent cette eau tiède pour l'élevage de bars et de daurades.

Les quatre points définis lors des études antérieures (canal d'aménée, canal de rejet, contrôle avec échauffement résiduel de 3 à 4 °C dans le panache de rejet, et référence hors panache) (Figure 14) sont étudiés simultanément dans deux situations annuelles différentes (printemps et fin de l'été).

Des prélèvements hebdomadaires sont également réalisés depuis les berges aux points canal d'aménée et canal de rejet. Ils concernent la bactériologie (vibrions) et l'étude de la chloration. Le phytoplancton et le zooplancton sont également échantillonnés au canal d'aménée, en particulier lors des périodes de prolifération de certaines espèces.

La surveillance du zooplancton halieutique comprend quatre campagnes :

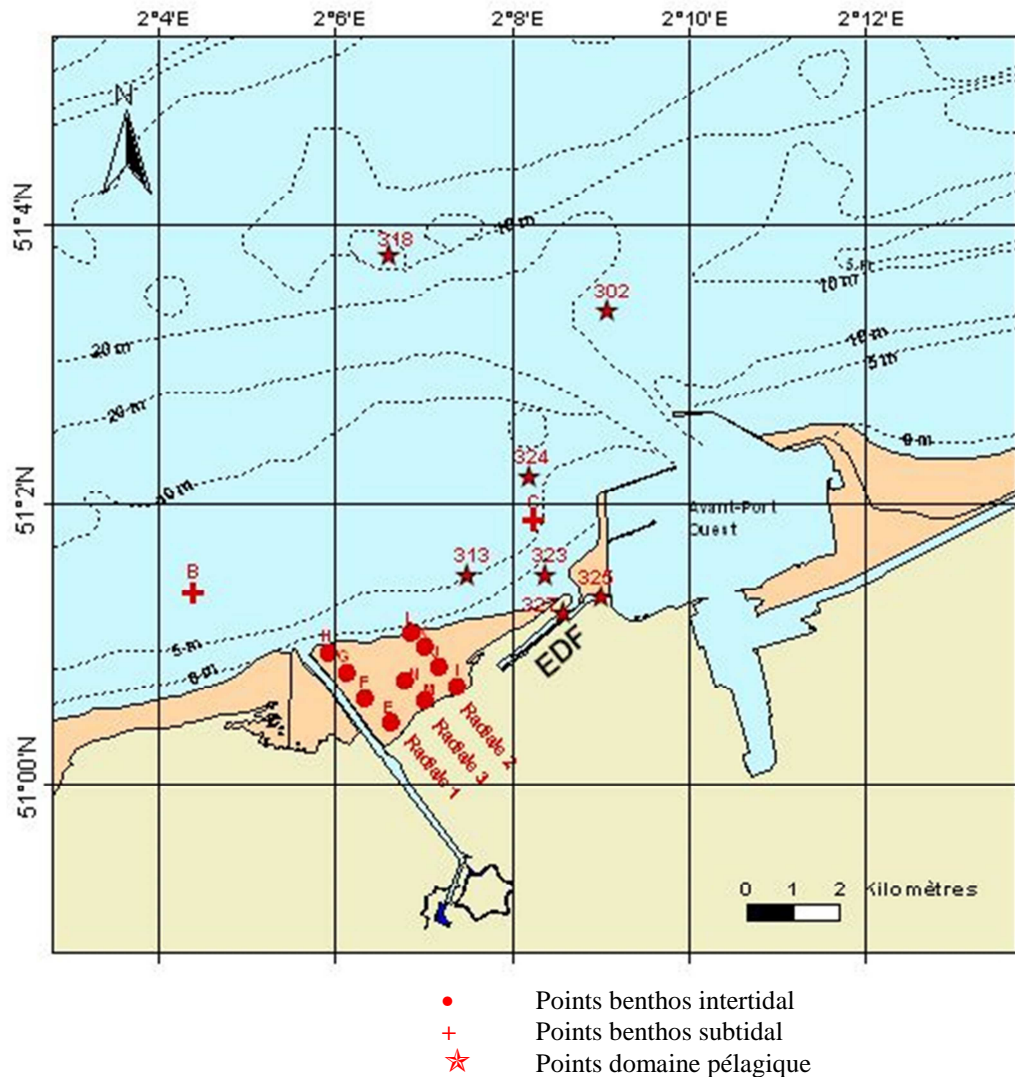
- deux campagnes à quatre points en mer (entre mars et mai) selon un gradient côte-large dans le milieu récepteur.
- deux campagnes de deux points couvrant la largeur du pont au canal d'aménée.

En zone intertidale, une campagne annuelle comprenant deux radiales de quatre points et une radiale à deux points de hauts niveaux est réalisée en été.

En zone subtidale, la surveillance du peuplement à *Abra alba* consiste en la réalisation de quatre campagnes de deux points, l'un non impacté (Point B), l'autre potentiellement impacté (Point C) par le fonctionnement de la centrale.

Mon implication plus forte pour le volet « phytoplancton » déjà initiée lorsque j'assurai la coordination de l'action (2002 à 2007 ; **R-4.**, **R-10.**, **R-14.**, **R-22.**, **R-28.**, **R-33.**, **R-40.**, **R-45.**) est toujours d'actualité. La surveillance écologique du phytoplancton mise en œuvre dans cette étude dans le contexte particulier des activités d'exploitation du CNPE de Gravelines, a pour objectifs :

- la connaissance de la biomasse, de l'abondance et de la composition du phytoplancton marin des eaux côtières, qui recouvre notamment celle de la distribution spatio-temporelle des différentes espèces phytoplanctoniques, le recensement des efflorescences exceptionnelles telles que les eaux colorées ou les développements d'espèces toxiques ou nuisibles susceptibles d'affecter l'écosystème, ainsi que du contexte hydrologique afférent,
- la détection et le suivi des espèces phytoplanctoniques productrices de toxines susceptibles de s'accumuler dans les produits marins de consommation ou de contribuer à d'autres formes d'exposition dangereuse pour la santé humaine.



Station (Réf. Quadrige)	Latitude	Longitude	Libellé
302	51°3'40 N	2°9'10 E	Référence 02 = large
313	51°1'50 N	2°7'50 E	Côte : Pt 1 halieutique
318	51°3'80 N	2°6'60 E	Référence 18 : Pt 3 halieutique
323	51°1'50 N	2°8'40 E	Côte : Pt pélagique
324	51°2'20 N	2°8'20 E	Contrôle ou Médian
325	51°1'38 N	2°9'10 E	Canal d'amenée
327	51°1'26 N	2°8'60 E	Canal de rejet

Figure 14. Localisation des points de prélèvements tous domaines d'études confondus.

Ainsi, depuis 2007, j'assure la valorisation des données pour ce compartiment aussi bien pour les besoins contractuels que pour répondre à des objectifs scientifiques d'amélioration des connaissances (**R-50.**, **R-58.**, **R-65.**, **R-74.**, **R-83.**, **R-92.**, **R-99.**, **R-107.**, **ArtS-3.**). En effet, les données acquises maintenant depuis plus de trente ans constituent l'une des plus longues séries à long terme au niveau national français et sont transmises comme une série de référence au niveau européen (groupe de travail Écologie Microbienne et Phytoplanctonique du Conseil International pour l'Exploitation de la Mer – CIEM/ICES ; <http://www.wgpme.net/>). L'exploitation de cette série a déjà permis de mettre en évidence une évolution significative de la température de l'eau en réponse aux changements globaux (**Art-3.**). Les données font également l'objet d'une

valorisation spécifique par le CIEM (ICES Phytoplankton and Microbial Plankton Status Report). Des actions de valorisation complémentaires sont programmées pour le volet phytoplancton. Il sera question d'étudier les changements à long terme de la biomasse phytoplanctonique, de la composition en terme de taxons dominants au regard des modifications environnementales liées à des processus régionaux ou plus globaux, naturels ou d'origine anthropique (**ArtS-3**).

2.3.2. ... vers la haute fréquence

La prise de conscience générale des problèmes d'environnement, notamment au niveau du littoral, conduit à renforcer la surveillance qui s'y exerce. Par l'expérience acquise au cours de nombreuses années dans l'exploitation des réseaux de surveillance de l'environnement, l'Ifremer a mis en évidence le besoin de développer des systèmes de surveillance automatisée de l'environnement et des effets directs et indirects des activités humaines sur le milieu marin. Les développements technologiques concernant les capteurs physico-chimiques permettent la réalisation de réseaux de stations instrumentées autonomes, effectuant des mesures à fréquence élevée et rapidement disponibles pour les utilisateurs (site web). Depuis les années 90, le concept des stations MAREL a été validé puis décliné selon différentes familles de produits adaptés aux contraintes environnementales ainsi qu'aux demandes des utilisateurs.

Des phénomènes hydrobiologiques, à haute et à basse fréquence, fondamentaux pour le fonctionnement de l'écosystème marin côtier se déroulent sur le littoral du Nord-Pas-de-Calais. L'information fournie par des campagnes en mer avec les inconvénients qu'elles supposent est insuffisante pour la compréhension de ces phénomènes qui conditionnent le déroulement des successions écologiques en milieu pélagique et qui influent à terme sur les peuplements benthiques. De ce fait, les campagnes effectuées dans le cadre des programmes de recherche et d'observation du milieu marin actuels ne suffisent pas à combler ce déficit.

Certains phénomènes biologiques sont visibles à méso-échelle, ils se produisent en fait sur l'ensemble d'un bassin. Par exemple, les blooms de *Phaeocystis* se produisent en Manche orientale et en mer du Nord et présentent plusieurs maximums qui se matérialisent par la présence de mousse à la surface de l'eau et sur les plages. La périodicité actuelle d'observation bi-hebdomadaire ne peut pas rendre compte de l'amplitude réelle du phénomène, ni de son déroulement entier. De plus, nous avons une très mauvaise connaissance de ce qui précède et de ce qui suit les blooms de *Phaeocystis*. Cette lacune ne peut être comblée que par une acquisition en continu de mesures hydrobiologiques. Le SRN (Suivi Régional de Nutriments) ne répond que partiellement à l'attente des chercheurs et des décideurs.

Le littoral du Nord-Pas-de-Calais est soumis à l'influence de plusieurs fleuves (Somme, Authie, Canche, Liane). Lors des crues de ces fleuves des apports de nutriments et des dessalures importantes peuvent être mis en évidence. La compréhension de ces événements est essentielle pour la compréhension des processus côtiers. La connaissance fine à haute fréquence est indispensable dans une mer à régime mégatidal où les dessalures, les apports de nutriments peuvent se faire sporadiquement et de manière plus ou moins intense via des vidanges d'estuaires lors du baissant et/ou en réponse aux précipitations ; cela nécessite donc une fréquence d'observation supérieure à celle de la demi-marée.

Enfin, les océanographes ont en général une meilleure connaissance du fonctionnement de l'écosystème marin quand les conditions météorologiques sont bonnes pour acquérir des vérités terrain. Nous n'avons qu'une connaissance fragmentaire des phénomènes qui se passent en cas de mauvais temps. Ceci est particulièrement vrai dans le Nord-Pas-de-Calais. L'acquisition de mesures régulières doit permettre de renforcer les connaissances et d'y intégrer la "jouissance" des masses d'eau que peuvent produire le brassage et le mélange intenses qui apparaissent lors des périodes de mauvais temps.

Le système Manche orientale Mer du Nord est caractérisé par la présence de deux masses d'eaux d'origine différente : (i) tellurique pour les eaux côtières (le Fleuve Côtier) qui subissent les apports des estuaires normands et picards et (ii) celles qui proviennent du centre Manche pour des eaux qui cheminent parallèlement au fleuve Côtier, vers le large. Étant donnée la complexité du système Manche Est - Pas-de-Calais - Baie Sud de la Mer du Nord, il importe de s'intéresser à l'évolution des eaux côtières et du large dans la partie amont de ce système.

2.3.2.1. Mesures HF en point fixe

C'est dans ce contexte que le projet **MAREL Carnot** (Mesures Automatisées en Réseau de l'Environnement Littoral) a vu le jour. J'ai ainsi coordonné pour l'Ifremer des actions du CPER « Étude et observation de l'écosystème côtier de la Manche orientale : le bloom de *Phaeocystis* et ses effets sur l'écosystème » (2001-2007) (**CReg-3.**, **CReg-4.**) qui ont abouti à l'installation de ce système dans la zone côtière boulonnaise (Figure 15) (**R-9.**, **R-16.**). J'assure depuis cette mise en œuvre le rôle de responsable scientifique MAREL Carnot (en binôme avec un responsable technique).

Mon rapport bilan n° 1 édité en 2006 intègre les différentes étapes de mise en place du système depuis les études avant implantation jusqu'à l'inauguration du site le 25 novembre 2004 (**R-31.**). Depuis cette date, en dehors des valorisations purement scientifiques qui seront développées dans la section suivante, un bilan annuel et des études spécifiques sont édités (**R-37.**, **R-42.**, **R-47.**, **R-60.**, **R-67.**, **R-79.**, **R-80.**, **R-87.**, **R-94.**, **R-101.**, **R-105.**, **R-113.**). A l'occasion des dix ans de cette station de mesure automatique, Schmitt et Lefebvre (2016) (**O-4.**) ont organisé un colloque sur l'instrumentation haute fréquence pour l'observation et la surveillance de l'environnement marin, qui s'est déroulé à Boulogne-sur-Mer les 12 et 13 juin 2014. L'objectif du colloque et donc de l'ouvrage de Schmitt et Lefebvre (2016) (**O-4.**) est de présenter un bilan des systèmes de mesures à haute résolution à l'échelle nationale française (de l'installation à la mise en œuvre en passant par les aspects logistiques et techniques) et de proposer un aperçu des méthodes d'explorations, d'analyses et de modélisation des données qui en sont issues.

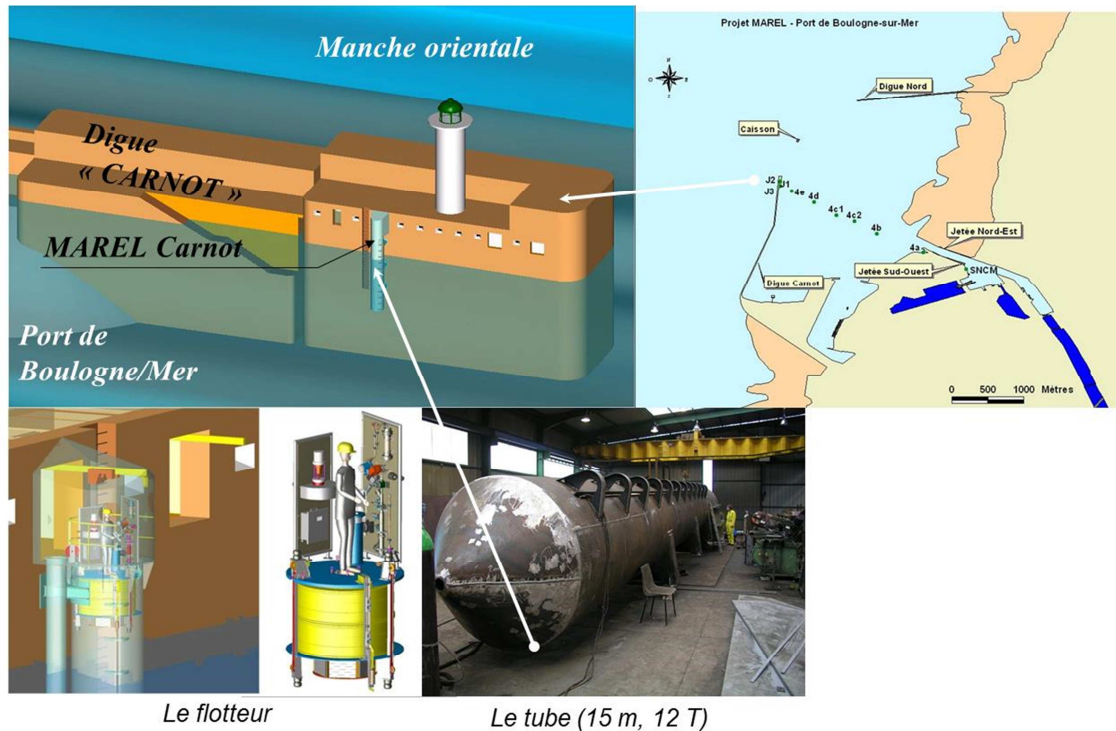


Figure 15. Localisation de la station de mesures instrumentées à haute fréquence MAREL Carnot. Détails du flotteur et de son tube porteur.

Initialement prévue pour être une station purement côtière, les contraintes techniques et logistiques (alimentation en énergie, résistance aux intempéries, protection contre les éventuelles collisions avec des navires,...) ont fait que le système a été implanté sur la face interne de la digue Carnot. Ceci est tel que la station est ainsi la plupart du temps sous influence des eaux côtières, et elle peut également permettre de visualiser les modifications des caractéristiques physico-chimiques et biologiques de cette zone en réponse à des apports d'eau douce venant de la Liane et/ou de tout autre activité portuaire (exemple des activités de dragage). MAREL Carnot constitue ainsi le point d'observation le plus côtier de la radiale SRN de Boulogne-sur-Mer et présente l'avantage de permettre un suivi en temps (quasi) réel des modifications de cet environnement (Figure 16).

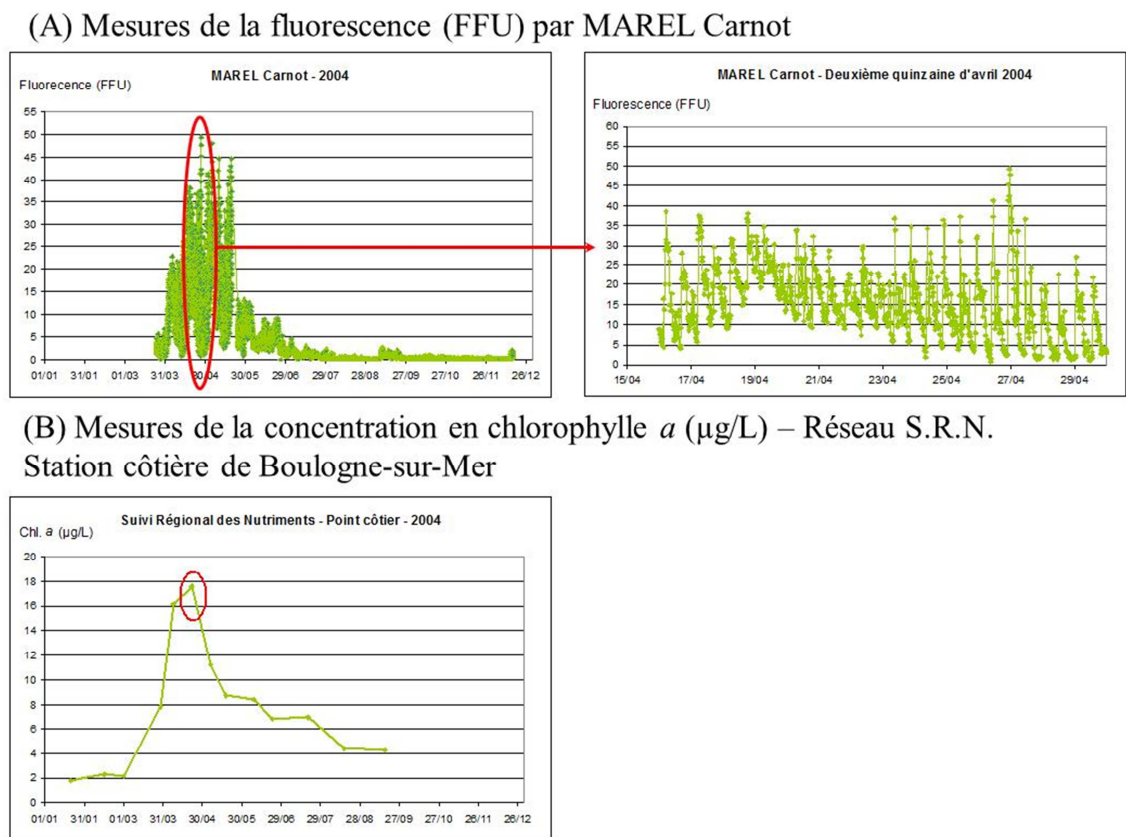


Figure 16. Valeur ajoutée de la mesure à haute fréquence de la fluorescence par MAREL Carnot (A) par rapport à une approche conventionnelle basse-fréquence comme mise en œuvre pour le SRN (B).

Les objectifs spécifiques régionaux qui ont ainsi motivé l'implantation de la station MAREL Carnot sont :

- Étude de la dynamique du phytoplancton dans un milieu côtier anthropisé et soumis à l'influence d'une structure frontale (ROFI : Region of Fresh Water Influence) - étude de la phénologie du bloom et des facteurs responsables de l'initiation, de la durée, de l'amplitude et de la terminaison du bloom,
- Étude du rôle des apports chroniques et impulsions de nutriments sur le développement de la communauté phytoplanctonique en Manche orientale, dans le contexte du bloom quasi-monospécifique de *Phaeocystis*,
- Étude de la dynamique de développement de la prymnésiofycée *Phaeocystis*, taxon nuisible à forte biomasse (HAB-HB), et de ses conséquences sur l'écosystème (Eutrophisation).
- Étude des conséquences du développement massif de *Phaeocystis* sur les efflorescences de *Pseudo-nitzschia spp.*, algue nuisible potentiellement toxique (HAB-Tox) et éventuelles conséquences pour la conchyliculture et l'aquaculture.

Entre 2004 et 2014, le cœur du système était constitué d'une cellule de mesure regroupant plusieurs capteurs (Annexe 2). L'originalité du système était le pompage de l'eau à travers la zone où elle est analysée, avec une chloration de celle-ci lorsqu'il n'y a pas de cycle de mesure. La chloration de l'eau de mer par électrolyse protège les capteurs contre le développement de bio-fouling. C'est donc cette chloration qui rend possible la bonne tenue dans le temps des capteurs qui restent en place sans intervention

de maintenance pendant trois mois théoriquement. Le système MAREL Carnot enregistrerait, toutes les vingt minutes, la température de l'air et de l'eau et la salinité de cette dernière, l'oxygène dissous, la fluorescence, la turbidité, le pH, l'humidité relative et la radiation disponible pour la photosynthèse (P.A.R.). Les concentrations en sels nutritifs (nitrate, silicate et phosphate) étaient mesurées toutes les douze heures. L'ensemble de ces données était transmis deux fois par jour au Centre Ifremer Manche Mer du Nord de Boulogne-sur-Mer par liaison GSM ; ensuite débutaient la validation et le traitement des données.

La station automatisée MAREL Carnot regroupe des éléments électroniques, informatiques et mécaniques conçus dans les années 90. Le vieillissement général qui affecte tout particulièrement les systèmes exposés à l'environnement marin a imposé dès 2014 le remplacement d'un certain nombre d'éléments qui n'étaient plus fonctionnels. Par ailleurs, l'obsolescence de bon nombre de composants électroniques a conduit à remplacer le système de mesure par un nouvel ensemble automate/cellule de mesure.

Le cœur du système se compose donc maintenant des éléments suivants :

- un automate de contrôle mesure de type MAREL ESTRAN,
- une pompe de circulation (pompage de l'eau sur la sonde),
- un débitmètre pour le contrôle de la pompe,
- un chlorateur pour la production de chlore par électrolyse,
- une sonde multi-paramètres de type MP6 nke (Annexe 2 et figure 17).

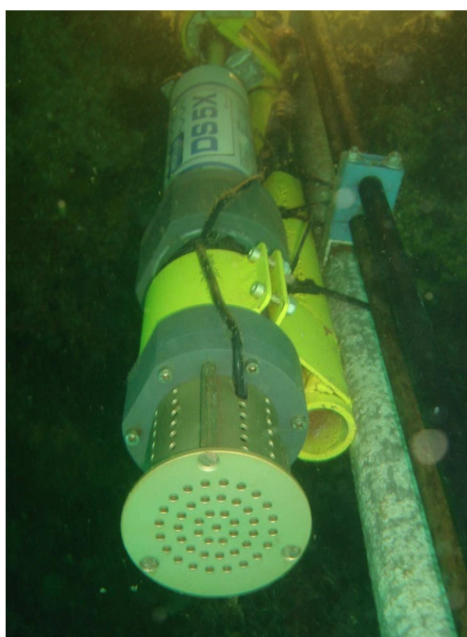


Figure 17. Système de mesure immergé en position sur sa perche.

La phase de jouvence du système doit se poursuivre en 2016 et en 2017 dans le cadre du CPER MARCO (**Creg-5.**) (Voir la section dédiée aux perspectives) pour permettre l'acquisition et la bancarisation, la mise à disposition des autres paramètres physico-chimiques et biologiques indispensables à ce jour.

2.3.2.2. Mesures HF en route

Après une phase de renforcement de l'observation en zone côtière via le système MAREL Carnot et considérant l'impossibilité d'avoir une autre station plus au large (problème d'alimentation en énergie, de résistance aux intempéries et risque de collision

nautique principalement) alors le recours à un autre type de système s'est imposé. Le projet **InterReg IVA 2 Mers intitulé DYMAPHY** (Development of a DYnamic observation system for the assessment of MARine water quality, based on PHYtoplankton analysis) (**CEur-1.**) dont j'assurai la coordination en ce qui concerne l'implication de l'Ifremer a ainsi permis, entre autres, de doter mon laboratoire d'un autre système de mesures automatisées autonomes à haute fréquence : le Pocket Ferry Box (4H-JENA, bbe Moldaenke). Mes activités étaient liées à l'activité 1, sous-action 4 (Implementation and test of automated system for water quality assessment). L'objectif était de proposer/développer et mettre en œuvre des systèmes de mesures à haute résolution spatiale et/ou temporelle afin de mieux comprendre la dynamique des blooms phytoplanctoniques, en lien avec la dynamique des paramètres environnementaux associés (en terme de pressions, d'état ou de réponses) et donc plus généralement il s'agissait d'envisager l'étude de la qualité de l'environnement à des échelles de temps et d'espace qui couvrent un ensemble de phénomènes et de processus clefs impliqués dans les blooms phytoplanctoniques.

Mon objectif était de proposer un système de mesures à haute résolution spatiale et temporelle, multiparamètre, pouvant être facilement mis en œuvre sur des navires de différentes tailles et de niveaux d'équipements scientifiques hétérogènes (alimentation en énergie et en eau, place disponible, accès internet, ...). Le système devait permettre l'acquisition des paramètres de base de l'observation et de la surveillance de la qualité de l'environnement marin (au minimum, la température, la salinité, la concentration en oxygène, la turbidité, le pH, la biomasse phytoplanctonique). Ce système devait par ailleurs pouvoir être facilement connecté à d'autres appareils de mesures (sonde multiparamètre, cytomètre en flux,...) afin de permettre des analyses complémentaires.

Mon choix s'est porté sur le **Pocket Ferry Box (PFB)** développé par 4H-JENA engineering GmbH (<http://www.4h-jena.de/>) (Figures 18 et 19). Les contraintes de développement et de mise en œuvre, le coût et les caractéristiques de ce système étaient conformes aux objectifs de DYMAPHY. Le PFB est donc un système portable, facilement intégrable sur différents navires (< 27 kg). Il possède son propre système d'alimentation et de positionnement, les différentes opérations de mise en route, de suivi des mesures, de sauvegarde des données se font à partir d'un ordinateur intégré. La fréquence de mesure est fixée à une minute pour l'ensemble des paramètres.

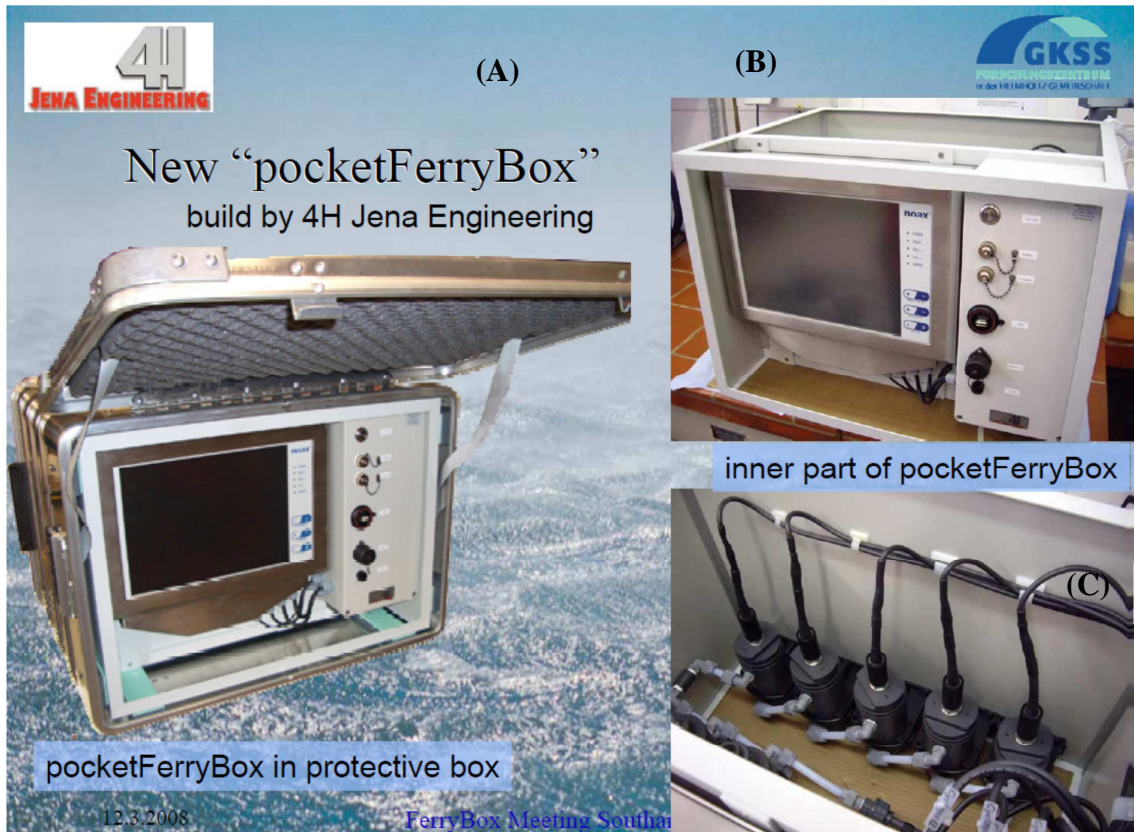


Figure 18. Le Pocket Ferry Box de 4H-JENA dans sa configuration de base, (A) vue de face dans sa boîte de protection pour le transport, (B) hors de sa boîte et (C) vue de dessus (circuit de circulation de l'eau et chambre de passage hébergeant les capteurs) .

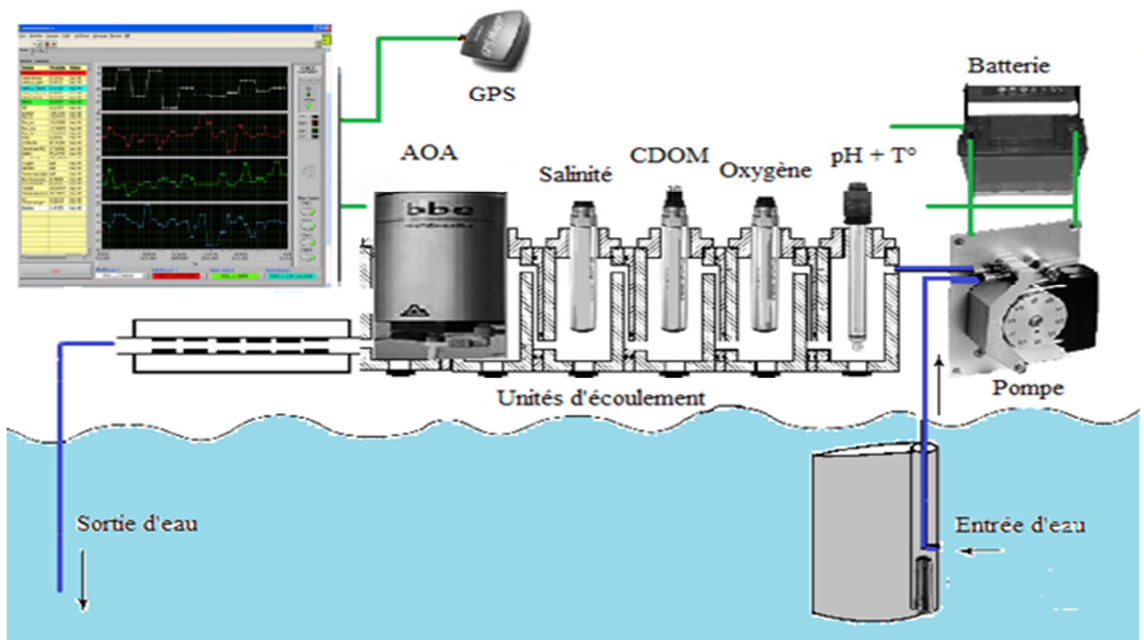


Figure 19. Schéma de circulation de l'eau de mer dans le Pocket Ferry Box et écran de contrôle et de visualisation des résultats (en haut à gauche).

Une description plus détaillée de ce genre de système est proposée par Schroeder *et al.* (2008). Pour résumer, le PFB permet le pompage de l'eau de mer qui transitera via des chambres de mesures devant différents capteurs avec un débit de l'ordre de 3-4 litres/min. Le volume intérieur du système ne permettant d'accueillir qu'un nombre limité de capteurs, mon choix s'est porté sur les équipements de l'annexe 2. Les données acquises sont présentées en temps réel sur l'écran de l'ordinateur (programme de gestion écrit par 4H-JENA en LabView, National instruments).

Afin de compléter le PFB, une sonde multiparamètre Ysi 6600 V2 a été couplée au système afin (i) de vérifier la fiabilité des mesures du PFB (double lecture pour certains paramètres) et (ii) de compléter la liste des paramètres acquis (turbidité notamment) (en 2014, un turbidimètre SeaPoint a été intégré au PFB). Cette sonde mesure à une fréquence définie par l'utilisateur la température ($^{\circ}\text{C}$), la conductivité (mS/cm), la salinité, le pH, la turbidité (NTU), la concentration en chlorophylle-a ($\mu\text{g/l}$) et la concentration en oxygène dissous (mg/l) (Annexe 2). La sonde est connectée au circuit d'alimentation en eau de mer du PFB via le système de couplage Flow Cell (Figure 20).

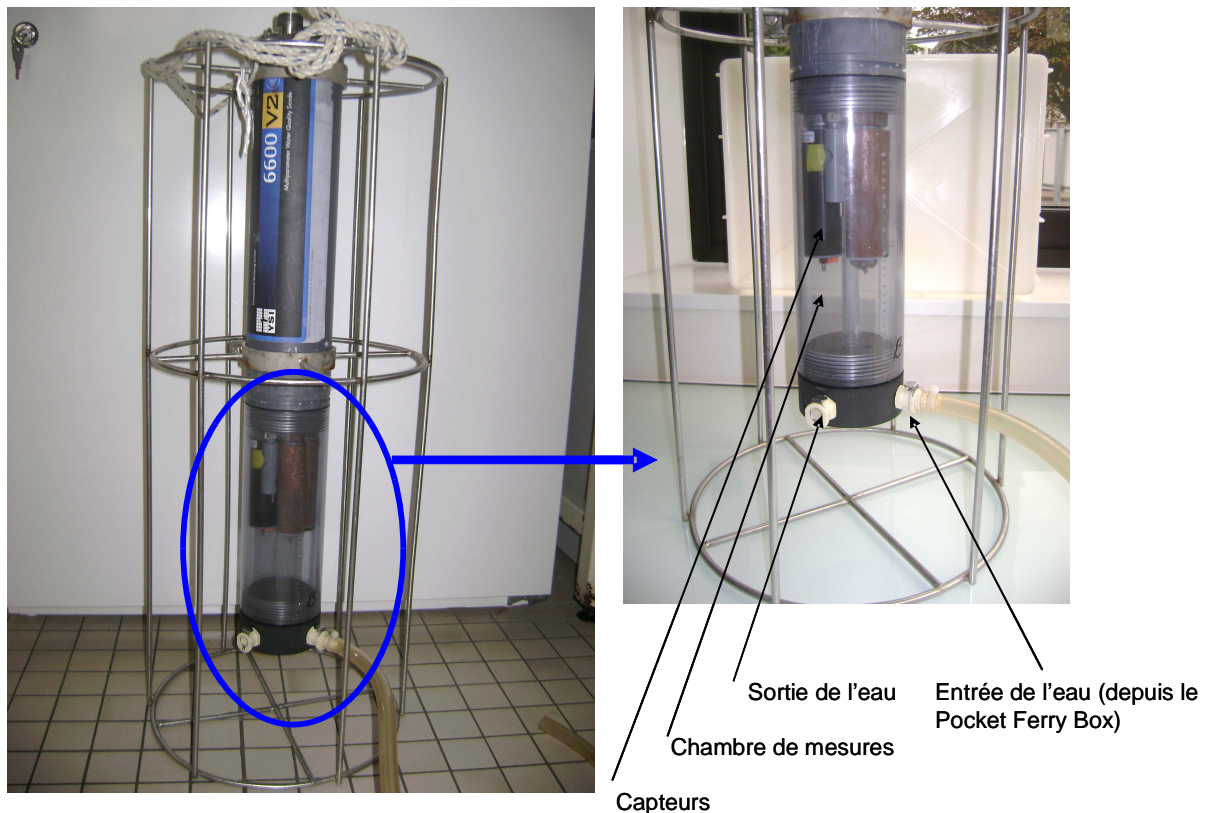


Figure 20. Système de couplage Flow Cell permettant de connecter la sonde Ysi 6600 V2 et le Pocket Ferry Box.

Par ailleurs, afin de proposer un système allant au-delà de la mesure de la fluorescence totale, le PFB a été couplé à un fluorimètre spectral. En effet, les masses d'eaux côtières sont composées d'une grande diversité phytoplanctonique représentée par différents groupes d'algues, les plus communes étant les bleues-vertes (Cyanophycées), les vertes (Chlorophycées), les rouges (Rhodophytes) et les jaunes-marron (contenant entre autres les Cryptophytes, les Bacillariophytes ou Diatomées, les Haptophytes, les Prymnésiophycées telles *Phaeocystis sp.*, les coccolithophoridés et les Dinophytes (dinoflagellés)). Il a été établi que la fluorescence chlorophyllienne est majoritairement

émise par la chlorophylle-*a* contenue dans le Photosystème II (PSII) des antennes périphériques des individus phytoplanctoniques (Beutler *et al.*, 2002). Chacun des groupes est caractérisé par des pigments photosynthétiques différents et a donc des spectres de fluorescence distincts, ce qui permet de révéler la structure de la communauté phytoplanctonique étudiée. Les pigments sont divisés en chlorophylles (a, b et c), caroténoïdes (α , β), phycobiliprotéines (phycocyanine et phycoérythrine) et xanthophylles. Ce sont ces propriétés qui ont été exploitées pour le développement de l'AOA (**Algae Online Analyzer**) par bbe Moldaenke (<http://www.bbe-moldaenke.de/>).

L'AOA mesure toutes les minutes la fluorescence des microalgues. Le principe de la mesure est basé sur la détermination du spectre de fluorescence et de la cinétique de fluorescence des algues. Les différentes classes d'algues (au sens spectral) peuvent être différenciées par leurs pigments et par conséquent par leurs réponses à différentes couleurs. Chaque algue a sa propre empreinte (fingerprint) qui correspond à un schéma d'évolution spécifique selon lequel elle réagit en fonction de différentes longueurs d'onde d'excitation ((450, 525, 570, 590 et 610 nm) (Figure 21).

La différenciation des classes d'algues est rendue possible via l'application d'un algorithme développé par Beutler *et al.* (2002), Ruser *et al.* (1999). L'algorithme identifie la distribution des classes spectrales par rapport à la concentration totale de chlorophylle-*a* (Chl-*a*). Il est alors possible d'obtenir la concentration des différentes classes en équivalent Chl-*a* ($\mu\text{g.l}^{-1}$). Dans le jargon bbe, ces différentes classes sont : green algae, blue-green algae, cryptophyceae and brown algae (*i.e.* diatomées, dinoflagellés) (Figure 22). L'AOA permet également de créer des empreintes spécifiques via des mesures *in situ* ou en culture. Pour compenser l'influence de la turbidité et notamment des substances jaunes (CDOM - matière organique dissoute colorée) sur la mesure de la fluorescence, une mesure de correction à 370 nm est effectuée.

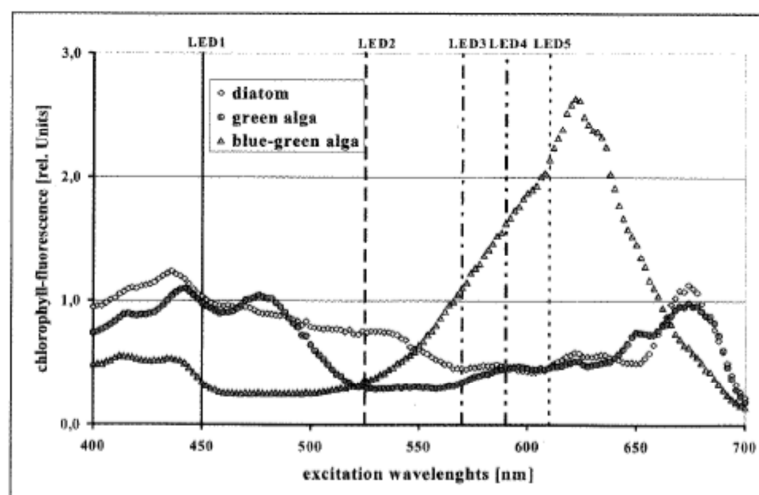


Figure 21. Spectre d'excitation de quelques Bacillariophytes (diatomées), chlorophycées (green algae) and cyanophycées (blue-green algae) pour une longueur d'onde d'émission de 720 nm. Les cinq longueurs d'onde d'excitation de l'AOA (via des LEDs) sont indiquées afin d'illustrer la notion d'empreinte spécifique à une classe spectrale (source : Ruser *et al.*, 1999).

Afin de faciliter le déploiement en mer de ce système compact de mesures à haute résolution, l'AOA a été intégré au Pocket Ferry Box. Lors des premiers déploiements du PFB couplé à l'AOA, un problème majeur a été remonté aux constructeurs. Dans sa configuration de base, l'AOA était piloté par le logiciel du PFB et les fichiers contenant les données brutes exprimées en nm issues des analyses spectrales étaient exportés au format texte, ce qui rendait impossible l'obtention de nouvelles concentrations pour des groupes différents en modifiant la combinaison des empreintes. Par exemple, lorsque l'appareil était déployé avec une configuration en "Original Fingerprints : Green, Blue-Green, Diatoms et Crypto" et que les échantillons discrets lus au microscope inversé révélés la présence de *Phaeocystis*, il était impossible de modifier les empreintes *a posteriori* afin de supprimer l'empreinte "Green" et la remplacer par l'empreinte "*Phaeocystis*". Ces échanges avec le constructeur ont permis de trouver une solution qui consiste à piloter le PFB via son logiciel dédié développé par 4H-JENA alors que l'AOA est désactivé de ce logiciel pour être piloté par son propre logiciel développé par la compagnie bbe.

Des tests quant aux performances de reconnaissance par l'AOA de signatures spectrales de différentes cultures ou d'échantillons naturels ont été réalisés lors des exercices d'intercalibrations (Activité 1 du projet) qui ont eu lieu à Lowestoft (24/03/2011), Boulogne-sur-Mer (08/06/2011) ou lors d'expérimentations spécifiques à l'Ifremer (23/02/2011) ou à la Maison de la Recherche en Environnement Naturel (UMR 8187 CNRS LOG) (06/04/2013).

Par ailleurs, il a été nécessaire d'ajouter de nouvelles empreintes pour *Phaeocystis globosa* et pour *Pseudo-nitzschia* (Figure 22) au regard de l'importance de ces deux taxons au sein de la communauté phytoplanctonique de la Manche orientale et de la Mer du Nord, et des conséquences potentielles ou avérées de leur présence sur le fonctionnement (ou plutôt le dysfonctionnement) des écosystèmes pélagiques et/ou benthiques voire sur la qualité des produits de la mer et par conséquent sur la santé humaine (production de toxines par *Pseudo-nitzschia*).

Parameters of fit (2011-03-24)

Offsets LEDs: filtrated water distilled water

F	1	11.093	2	3.3564	3	3.4712	4	3.3331	5	9.3363	UV	16.953
F0	1		2		3		4		5		UV	—
FM	1		2		3		4		5		UV	—

global corr. factor 1

Algae classes

fit type	name	factor LEDs					UV	standard deviation of LEDs					UV
		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
<input checked="" type="checkbox"/>	A Green Algae	1.313	0.249	0.417	0.308	2.417	2.793	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
<input checked="" type="checkbox"/>	A Bluegreen	0.955	1.041	2.217	1.431	0.237	1.259	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
<input checked="" type="checkbox"/>	A Diatoms	7.149	0.794	0.746	0.633	6.972	6.647	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
<input checked="" type="checkbox"/>	A Cryptophyta	4.115	1.578	1.056	1.202	3.129	3.149	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
<input type="checkbox"/>	A Phaeocystis	1	1	1	1	1	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
<input type="checkbox"/>	A Pseudonitzschia	4.49748	0.50878	0.48567	0.45056	4.50818	1.87941	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
<input type="checkbox"/>	Y #6	1	1	1	1	1	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
<input checked="" type="checkbox"/>	Y Yellow substances	3.165	0.298	0.13	0.201	4.574	15.185	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Figure 22. Copie d'écran de la fenêtre de configuration des empreintes à utiliser lors des mesures avec l'AOA. (A) Empreintes "constructeur". (B) Zone pour l'ajout de nouvelles empreintes "utilisateur" : *Phaeocystis*, *Pseudo-nitzschia* ont été ajoutées pour les besoins de DYMAPHY.

Tous les navires n'étant pas équipés d'une alimentation en eau de mer adaptée aux besoins scientifiques, un **système de prélèvement d'eau de sub-surface** a été développé via une collaboration entre mon laboratoire et le laboratoire Comportement des Structures en Mer (Ifremer) de manière à permettre un échantillonnage en continu de l'environnement en s'affranchissant des perturbations provoquées par le passage du navire qui impactent les résultats acquis par certains capteurs (l'exemple le plus évident est l'impact du brassage de l'eau sur la concentration en oxygène dissous). L'objectif était de permettre de déployer un système de prélèvement sur des embarcations ne possédant pas de système intégré d'alimentation en eau de mer et que le tout (PFB/AOA et système de prélèvement) soit facilement transportable d'un site à un autre, ne prenne pas trop de place sur le bateau et soit manipulable par deux personnes au maximum. Ce dispositif est basé sur l'utilisation d'un panneau divergent flottant à la surface et muni d'un ombilical permettant de pomper de l'eau à 1,5 m à 2 m de profondeur jusqu'à une vitesse de l'ordre de 6 nœuds (Figure 23). Des essais au bassin à houle et courant du centre Ifremer Manche Mer du Nord (Figure 24) et en mer ont permis de valider le bon fonctionnement de ce dispositif en vue d'une utilisation généralisée pour un déploiement en mer.

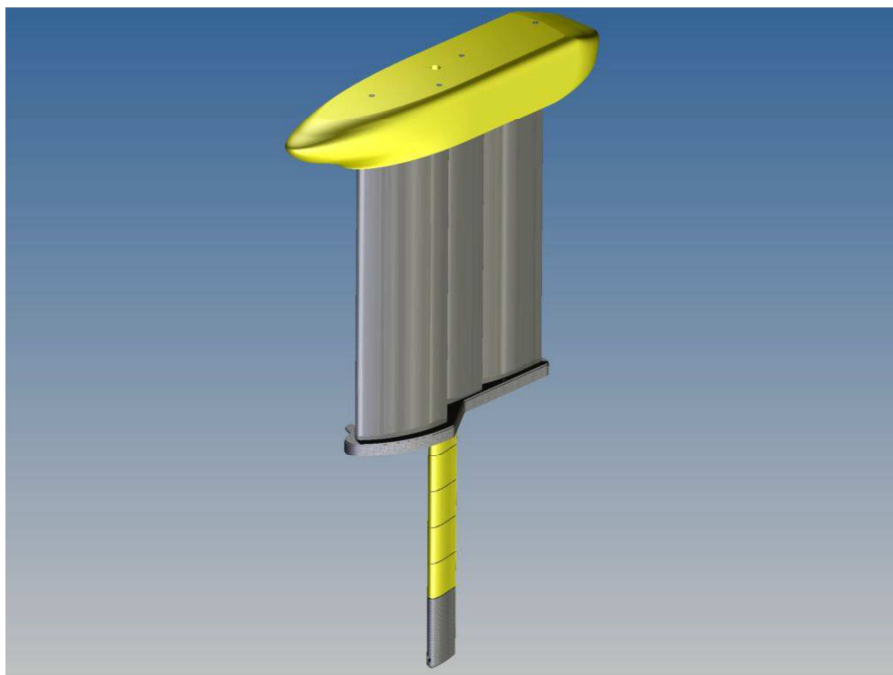


Figure 23. Prototype du système de prélèvement d'eau associé au Pocket Ferry Box pour un échantillonnage en continu et à haute résolution en sub-surface en dehors des perturbations provoquées par le déplacement du navire.

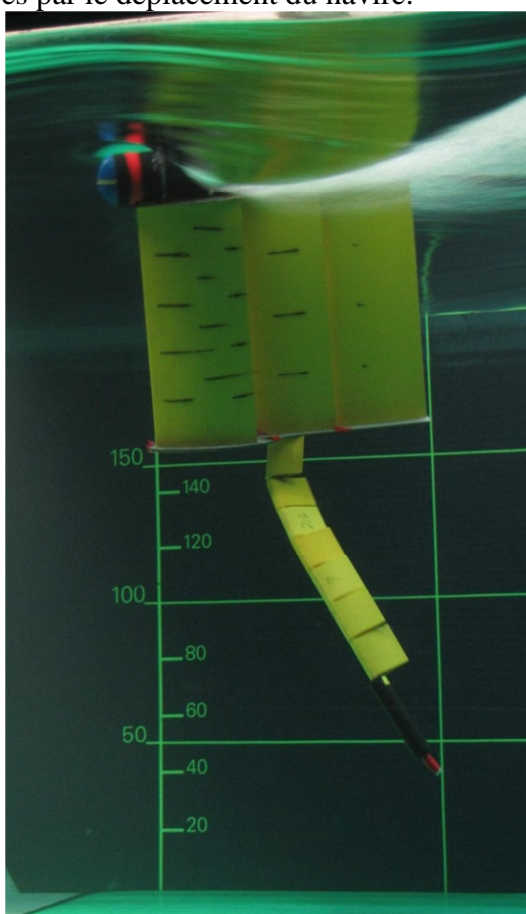


Figure 24. Le système de prélèvement en vue latérale dans le bassin à houle et courant du centre Ifremer Manche Mer du Nord (Laboratoire Comportement des Structures en Mer).

Le système de mesures à haute résolution spatiale et temporelle déployé lors des campagnes communes du projet DYMAPHY (Activités 3 du projet) est présenté dans sa configuration définitive sur les figures 25 et 26.

C'est également dans le cadre du projet DYMAPHY que j'ai pu collaborer avec l'UMR LOG (F. Artigas *et coll.*), le CEFAS (V. Creach *et coll.*), le MIO (M. Thyssen *et coll.*) afin de permettre un couplage du système PFB/AOA avec un cytomètre en flux (Figure 26). Les premiers essais de couplage ont eu lieu lors de la campagne commune PROTOOL / DYMAPHY en mai 2011 (Figure 26). Il s'agit ainsi de compléter cette approche taxonomique préliminaire (identification de quatre classes spectrales de phytoplancton) par une approche au niveau cellulaire et permettant d'envisager l'étude du pico- et du nanophytoplancton. C'est également dans cette configuration que le système est mis en œuvre lors des campagnes halieutiques écosystémiques de type IBTS, CGFS/CAMANOC depuis 2013.

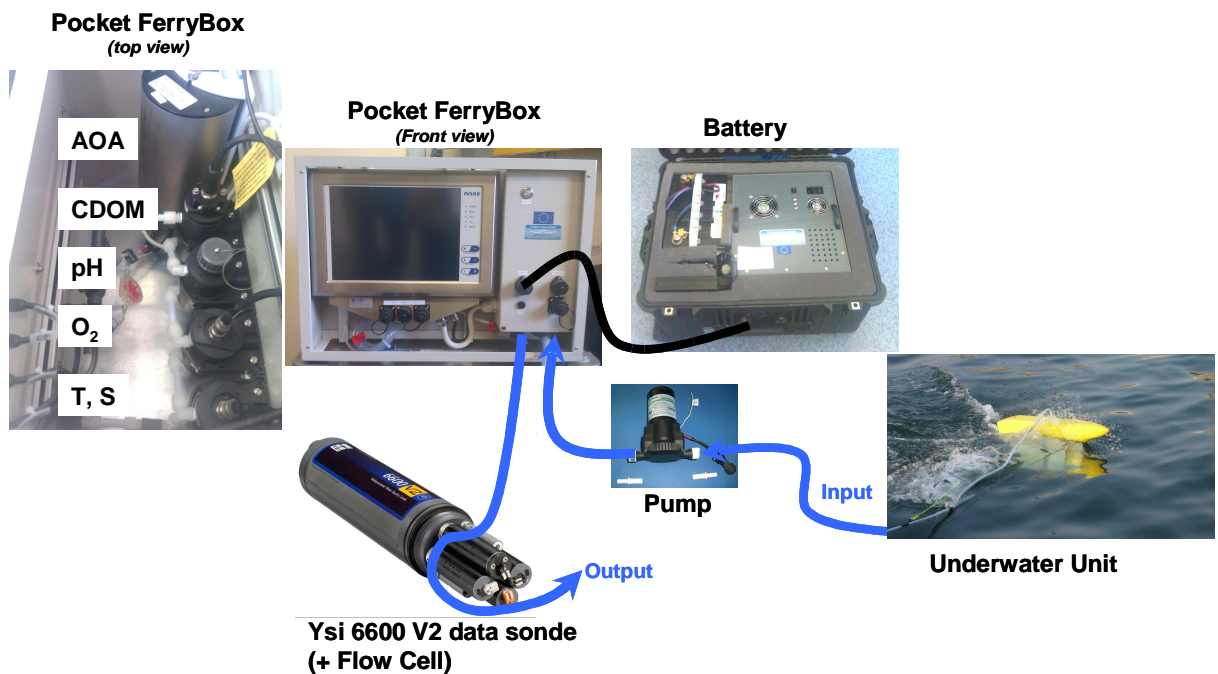


Figure 25. Le système de mesure à haute résolution dans sa configuration définitive et tel que déployé lors des campagnes océanographiques du projet DYMAPHY à partir d'embarcation ne possédant pas de système intégré d'alimentation en eau de mer.

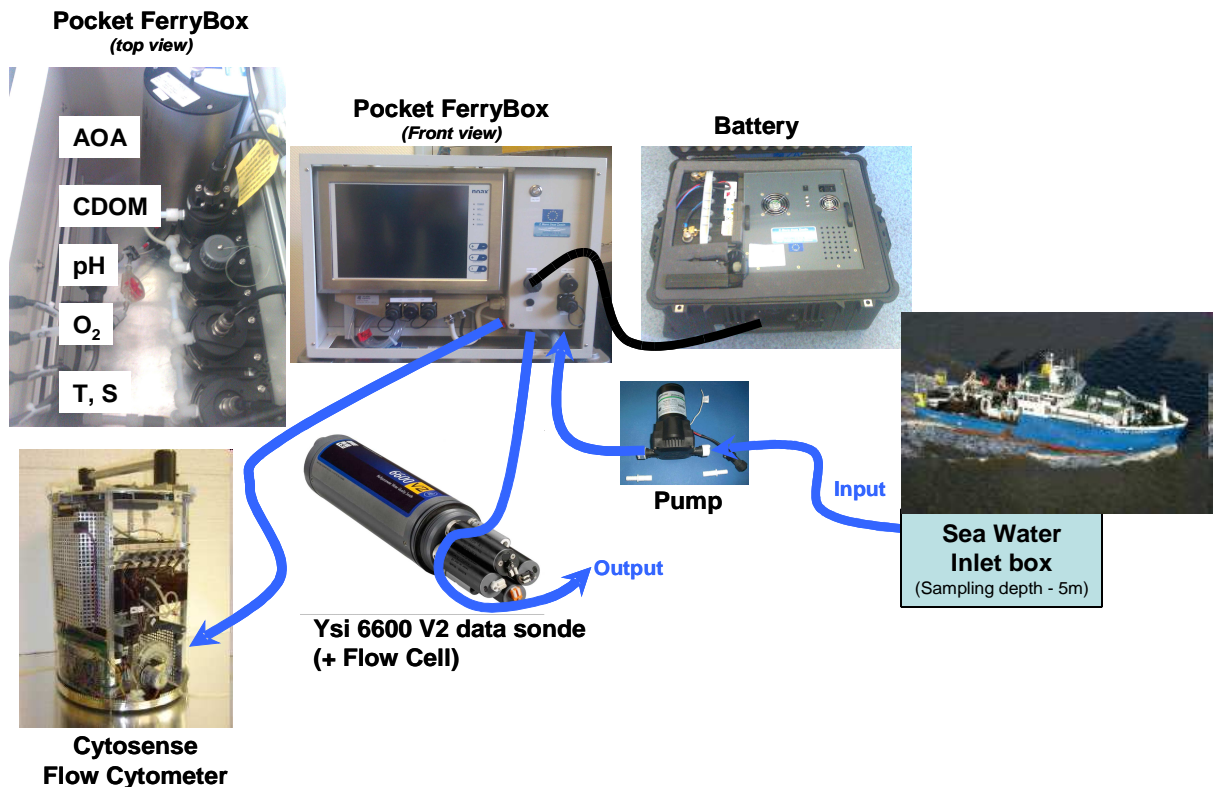


Figure 26. Le système de mesure à haute résolution dans sa configuration définitive et tel que déployé lors des campagnes océanographiques du projet DYMAPHY à partir d'embarcation possédant un système intégré d'alimentation en eau de mer (Exemple de la mission FP7 PROTOOL / DYMAPHY à bord du RV Cefas *Endeavour*, 8 au 12 mai 2011).

2.3.2.3. Numérisation et analyses d'images

L'autre volet de ma recherche destiné à mieux comprendre la dynamique des efflorescences phytoplanctoniques (voir section 2.4.) a permis de caractériser l'évolution de la biomasse, de la structure de la communauté phytoplanctonique. Après avoir mieux défini sa dynamique, sa phénologie, et dans la logique du développement d'un système numérique intégré d'observation, l'étape suivante est de considérer les possibilités offertes par les méthodes indirectes complémentaires au dénombrement du phytoplancton par microscopie inversé. Les objectifs sont de permettre une identification plus rapide pour augmenter la résolution spatiale et/ou temporelle grâce à l'optimisation du temps d'analyse, tout en permettant d'étendre la gamme de taille des particules identifiées, de considérer de nouveaux attributs du phytoplancton pour au final relier les différents estimateurs qui en découleront (abondance cellulaire, biovolume, biomasse,...). En effet, une meilleure connaissance de la composition, de l'abondance, mais aussi de la structure de taille et la définition de groupes fonctionnels est essentielle pour une meilleure compréhension des fonctions de l'écosystème et des transferts d'énergie vers les niveaux trophiques supérieurs (Chavez *et al.*, 2011).

Ainsi, en parallèle de la démarche de l'UMR LOG (F. Artigas *et coll.*) de développer une approche basée sur la cytométrie en flux, j'ai eu l'opportunité de contribuer au développement d'une autre méthode pour l'identification du phytoplancton en prenant en 2013 la responsabilité scientifique du projet Ifremer dédié à la numérisation du phytoplancton et au traitement par le logiciel ZooPhytoimage (CNat-4.) initié en 2008

par l'Ifremer en collaboration avec l'Université de Mons (Be), l'ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques), puis plus récemment avec l'UMR LOG et l'ULCO/LISIC (Laboratoire d'Informatique Signal et Image de la Côte d'Opale - EA 4491).

L'identification du phytoplancton par microscopie inversée selon la méthode Utermöhl (1958) (NF EN 15204) nécessite un niveau d'expertise taxonomique élevé, prend plusieurs heures, peut être source d'erreurs non quantifiables (fatigue, biais observateurs,...). L'analyse comme le stockage des échantillons sont limités dans le temps empêchant souvent tout retour en arrière ou nouvelle utilisation des échantillons afin de répondre à de nouveaux besoins. Les évolutions technologiques, incluant l'augmentation des capacités de calcul des ordinateurs personnels, permettent d'envisager une autre approche basée sur la numérisation des échantillons et l'identification quasi-automatique des groupes taxonomiques (parfois jusqu'au niveau de l'espèce). Afin de répondre aux besoins et aux exigences de l'Ifremer (fortes contraintes liées à la mise en œuvre du REPHY) du point de vue de l'observation et de la surveillance du phytoplancton, la stratégie était initialement d'utiliser le FlowCam (Fluid Imaging Technologies, Inc., USA) pour le volet numérisation et d'optimiser le système de reconnaissance d'images via l'utilisation du logiciel ZooPhytoImage développé par l'Université de Mons. Après une première phase d'optimisation de la numérisation et de développement logiciel et de tests sur des échantillons de l'Atlantique (2008-2011) piloté par les laboratoires Ifremer de Nantes et d'Arcachon, j'ai donc intégré puis pris le pilotage scientifique du projet pour une deuxième phase (2012-2015) dans la logique de la progression de mon projet de recherche et de la dynamique scientifique et technique engagée via les collaborations mises en place via les différents projets régionaux, nationaux ou européens dans lesquels j'étais impliqué (CPER, PNEC, InterReg notamment).

Le FlowCam combine deux approches : la cytométrie en flux et la microscopie photonique (Figure 27). L'échantillon est introduit dans le système puis entraîné vers une chambre ou cellule de flux en verre grâce à une pompe seringue. L'échantillon peut alors être observé via deux types de grossissement : 4X ou 10X, associés, respectivement, à une cellule de flux de 300 et 100 μm d'épaisseur (pour une optimisation de la profondeur de champ). Une LED assure l'illumination de la cellule alors qu'une caméra N&B haute résolution (1280 x 960) va permettre l'acquisition de l'image et des paramètres associés qui seront alors transformés en vignettes, regroupées en collage (optimisation de la capacité de stockage de l'information). Initialement, le système est livré avec le logiciel Visual Spread Sheet qui permet de définir les paramètres d'acquisition et de mesures des images mais qui ne permet pas d'obtenir une classification des particules à un niveau hiérarchique donc taxinomique donné. Ceci a donc conduit au développement du logiciel ZooPhytoImage par l'Université de Mons selon un cahier des charges défini par l'Ifremer (Consortium représenté par les laboratoires Ifremer de Boulogne-sur-Mer, de Nantes et d'Arcachon). Ce logiciel permet ainsi de piloter l'acquisition et les mesures des images, et permet en plus d'avoir accès à des outils de classification automatique des objets donc des particules phytoplanctoniques. La classification des objets est faite sur la base d'un set d'apprentissage. En dehors de la coordination scientifique de ce projet, mon implication a donc également consisté (i) à mettre en place les moyens humains nécessaires (encadrements de CDD, de stagiaires) pour l'optimisation du set d'apprentissage pour la Manche et la baie sud de la mer du Nord, puis pour le développement du module complémentaire de dénombrement des cellules au sein des colonies en raison

notamment de l'importance de *Phaeocystis* et de *Pseudo-Nitzschia* dans cette zone d'étude (R-91., R-97., R-98., R-106., R-109.), et (ii) à communiquer sur les résultats (CI-31., CI-36., CN-35., CN-37., CN-38., CN-43., CN-44.).

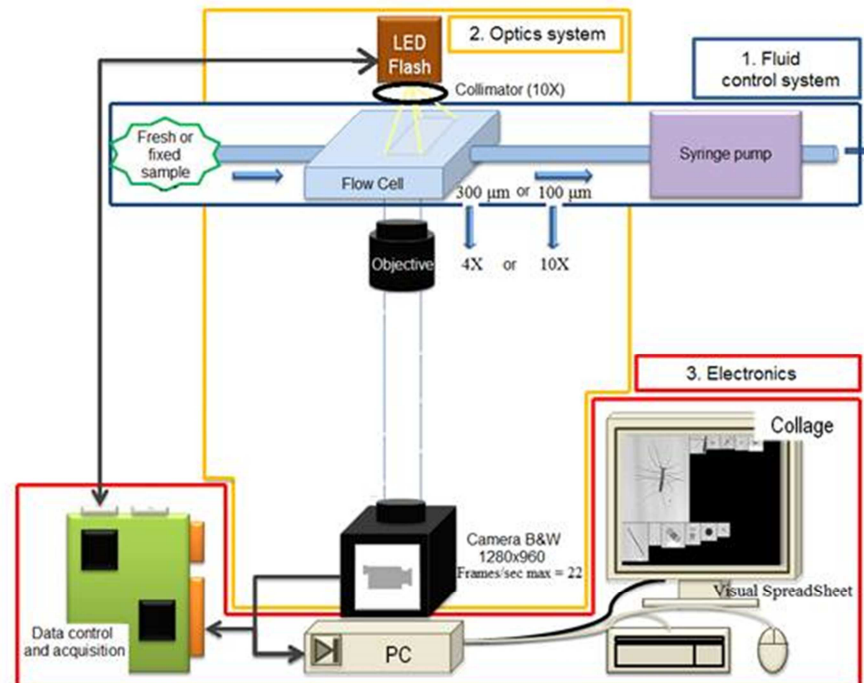


Figure 27. Les différents éléments du système de numérisation des échantillons du phytoplancton : le FlowCam (Fluid Imaging Technologies, Inc., USA).

La nouvelle dynamique engagée par les différents partenaires du projet depuis 2012 a permis de voir se concrétiser la version opérationnelle V6 de l'outil de numérisation/classification ZooPhytoImage à la fin de l'année 2015. Cette interface permet de gérer toutes les étapes de création du set d'apprentissage, de création du modèle de reconnaissance, de numérisation des images et de classification via une interface conviviale grâce à un poste informatique à peine plus puissant que la normale (microprocesseur multi-cœur rapide et processeur multithreads, 4 Go de mémoire RAM, disque dur SSD, carte graphique rapide et optimisée permettant l'affichage de 280×1024, ou 1600×1200 pixels ou plus avec une profondeur de couleur 24/32 bit (millions de couleurs), associée à un écran haute qualité d'au moins de dix-neuf pouces et d'un système de sauvegarde adapté (plusieurs To)) (Lefebvre et Wacquet, 2013 (R-91.) ; Wacquet et Lefebvre, 2014 (R-97.) ; Wacquet *et al.*, 2014 (R-98.) ; Grosjean et Wacquet, 2016). Cette version possède un module spécifique pour le dénombrement des colonies, puisque dans sa version antérieure le problème était qu'une colonie était assimilée à une particule, ce qui aboutissait à une sous-estimation systématique de l'abondance cellulaire dans les milieux dominés par les cellules coloniales comme notre zone d'étude. Par ailleurs, la phase de validation de la classification a été optimisée par recours à un apprentissage actif et à une correction de l'erreur au fur et à mesure que le taxonomiste classe les vignettes douteuses qui lui sont proposées automatiquement par le système d'une manière probabiliste.

Avant d'envisager toute utilisation du système FlowCam/ZooPhytoImage en recherche et pour l'observation, la surveillance, une étape clef est de proposer un système de

référence (un set d'apprentissage) qui constituera le pilier de l'algorithme de reconnaissance et permettra ainsi une identification puis une classification optimale. Mon équipe a ainsi contribué à créer un set d'apprentissage spécifique à la Manche et à la baie sud de la mer du Nord.

Ce set est composé de 40 groupes représentant les 4 696 particules triées et classées manuellement : 29 groupes phytoplanctoniques, 8 groupes de débris et bulles, 3 groupes liés au zooplancton (larves, mues, individus adultes). L'algorithme Random Forest fournit le meilleur taux global de reconnaissance : 79,37 % pour les 40 groupes. Grosjean *et al.* (2004), Grosjean et Denis (2013) ont démontré la supériorité de cet algorithme pour les applications liées au package ZooPhytoImage en le comparant à d'autres méthodes : l'analyse discriminante linéaire, les k plus proches voisins, le réseau de neurones, l'apprentissage par quantification vectorielle, les arbres de partitionnement. Pour notre set d'apprentissage, le taux d'erreur est très variable d'un groupe à l'autre (Tableau 1), compris entre 4,98 % pour *Asterionellopsis glacialis* et 62,5 % pour les *Protopéridinium* parmi les groupes phytoplanctoniques. On peut noter dans le tableau 1 que les taux d'erreurs les plus élevés concernent généralement les groupes les moins bien renseignés, ne contenant que quelques dizaines de particules.

Tableau 1. Taux d'erreur de reconnaissance (algorithme Random Forest) par groupe avec le set Manche - baie sud de la mer du Nord. Le nombre de particules dans le groupe considéré est donné entre parenthèses.

A.glacialis	4,975 (201)	Paralia_spp	25,806 (93)
C.danicus	5,128 (117)	Ciliophora_small	30,508 (59)
D.fragilissimus	5,128 (195)	Gyrodinium_spp	33,784 (74)
P.micans	5,195 (77)	Dark	33,854 (192)
Pleuro_Gyro_empty	6,015 (133)	B.rhombus	34,314 (102)
D.brightwellii	6,132 (212)	C.curvisetus	34,759 (187)
G.flaccida	6,283 (191)	Pleuro_Gyro_small	35,000 (60)
Bubble	6,311 (206)	Ciliophora_big	38,298 (47)
Pleuro_Gyro_spp	8,333 (192)	short_thin	42,553 (94)
Clear	10,490 (143)	N.longissima	43,478 (23)
Rhizo_Probo_spp	12,565 (191)	Thalassiosira_colonies	48,529 (68)
L.danicus	13,018 (169)	Mues	53,333 (30)
Pseudo_nitzschia_spp	13,714 (175)	Chaetoceros_spp	53,543 (127)
B.sinensis	14,554 (213)	G.striata	56,863 (51)
P.globosa	16,810 (232)	C.socialis	58,621 (58)
T.nitzschioides	18,605 (172)	Thalassiosira_cells	58,621 (29)
Granular	19,820 (111)	G.delicatula	58,696 (46)
Black_opaque	20,442 (181)	Protoperidinium_spp	62,500 (24)
Fiber	20,915 (153)	membranous	67,391 (46)
Zooplankton_spp	22,222 (18)	Larva	100,000 (4)

Malgré des taux d'erreurs élevés, certains groupes seront néanmoins bien classés en raison d'un équilibre entre les faux positifs (FP) et les faux négatifs (FN) (Figure 28). En effet, divers indicateurs de performance du set sont à considérer :

- Le Recall ou sensitivity ou taux de vrais positifs. Il correspond à la proportion de particules correctement identifiées dans un groupe donné par rapport au nombre

total de particules appartenant réellement à ce groupe. Il n'indique cependant pas le nombre de particules incorrectement classées dans ce groupe.

- La Précision est une mesure de l'exactitude ou de la fidélité de l'outil de reconnaissance. C'est la proportion de particules d'un groupe donné correctement reconnues. Pour une précision de 1, on peut conclure que toutes les particules attribuées à un groupe donné appartiennent effectivement à ce groupe. En revanche, la précision n'indique pas le nombre de particules devant être dans ce groupe mais qui ne le sont pas.

Le F-score (Precision vs recall) donne des informations sur le poids des FP et des FN. Plus le F-score est élevé, meilleure est la reconnaissance. Par ailleurs, la position du F-score est porteuse d'informations. Un déplacement du F-score vers la droite (gauche) indique que $FP > FN$ ($FP < FN$) ; le recall est par conséquent plus élevé (faible), ce qui implique une potentielle sur-estimation (sous-estimation) de l'abondance des particules dans le groupe considéré.

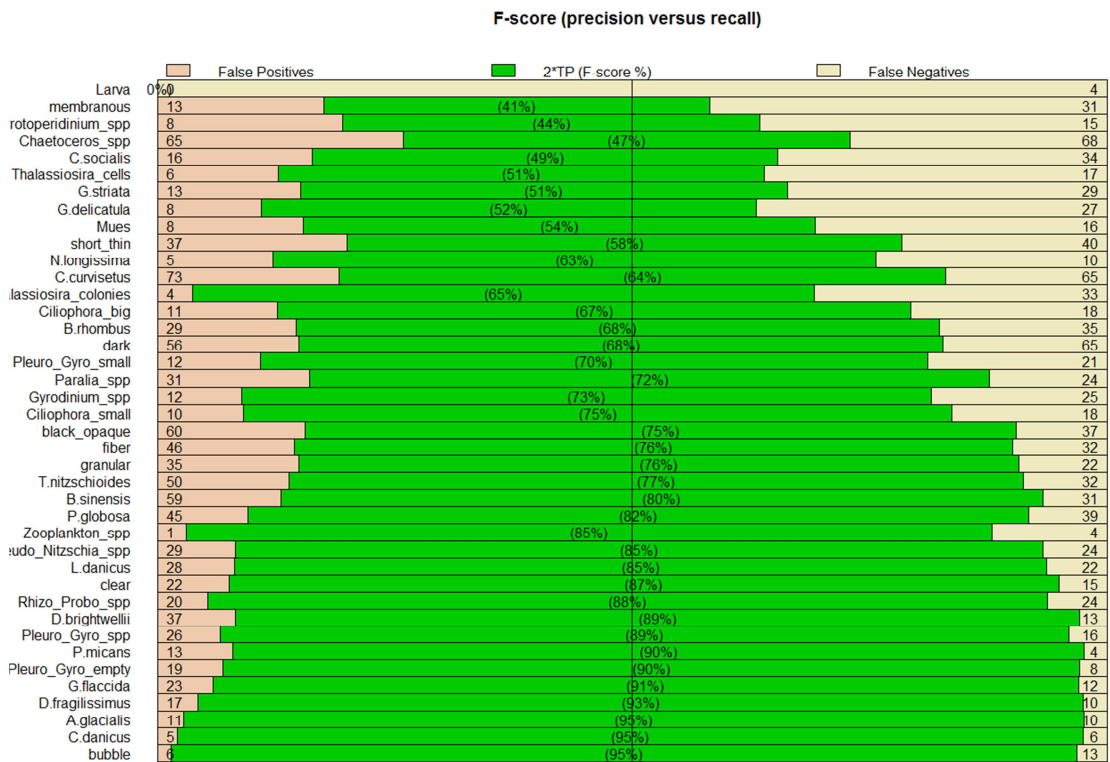


Figure 28. Faux positifs (FP), faux négatifs (FN) et F-score pour chacun des 40 groupes du set de reconnaissance Manche - baie sud de la mer du Nord.

L'étude plus fine des sources d'erreurs est permise grâce à la matrice de confusion moyenne obtenue par validation croisée (10 x) des résultats issus de la classification par l'algorithme Random Forest (Figure 29). Sans détailler l'ensemble des résultats, on peut noter par exemple une forte confusion entre des taxons sensiblement différents comme *Chaetoceros curvisetus* (n° 01) et *Thalassionema nitzschioides* (n° 02), ainsi qu'entre des taxons proches comme *Biddulphia rhombus* (n° 03) et *B. sinensis* (n° 04), eux-même confondus avec les particules Black-opaque (n° 05). Parmi les espèces nuisibles, on constate une confusion entre *P. globosa* (n° 13) et les groupes clear (n° 33) et fiber (n° 11). Ceci s'explique par les caractéristiques de la forme coloniale de *P. globosa* qui, en plus, de par sa taille, ne peut être incluse en totalité dans une vignette (Figure 30). Le

taxon *Pseudo-nitzschia* (n° 09) est également confondu avec le groupe short-tin (n° 10), *Leptocylindrus danicus* (n° 06) et Rhizo-Probo-spp (*Rhizosolenia* et *Proboscia*) (n° 07). Globalement, on peut conclure que ce n'est pas le critère taille, potentiellement très hétérogène au sein d'un groupe, qui induira le plus de confusion. Celle-ci sera davantage liée à des similitudes de forme et de teinte de cellules (influence de l'aspect clair ou sombre des cellules de forme proche, absence de distinction des fenêtres claires entre les cellules en colonie) en raison notamment du recours à un objectif x4.

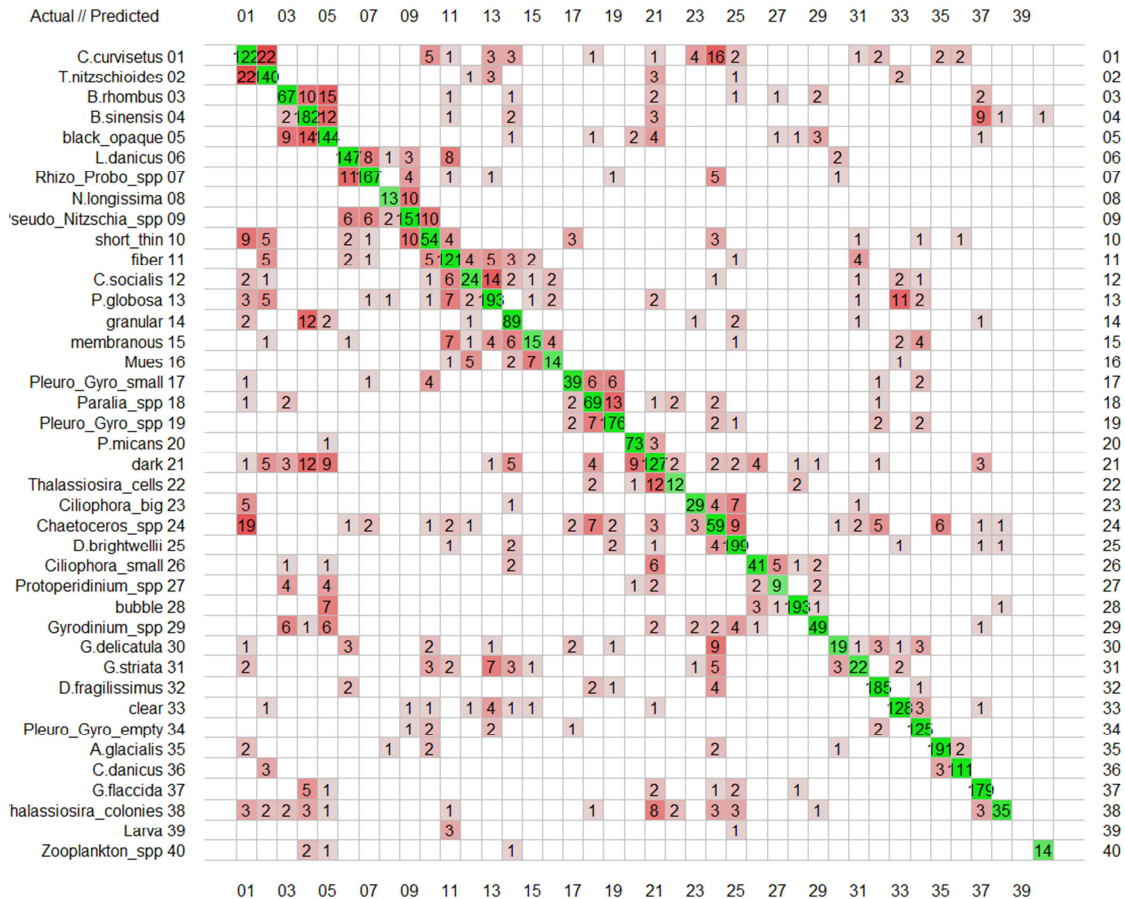


Figure 29. Matrice de confusion moyenne (validations croisées x 10) pour les 40 groupes du set Manche - baie sud de la mer du Nord.

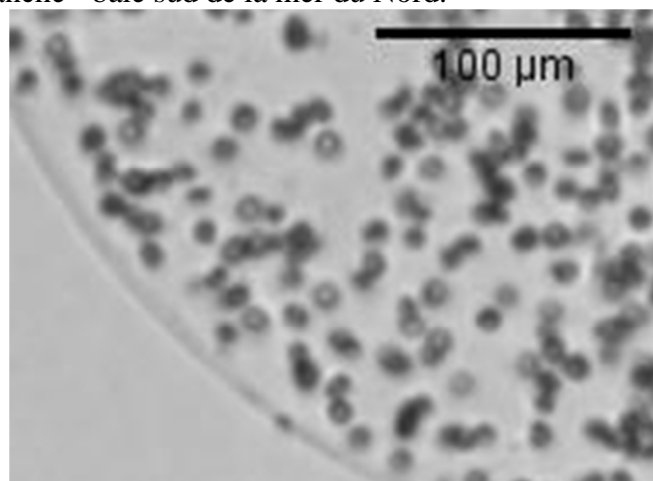


Figure 30. Colonie de *Phaeocystis globosa* dans une vignette acquise par le système FlowCam (objectif x4, cellule de flux de 300 µm d'épaisseur et 3 mm de long).

Le set d'apprentissage Manche - baie sud de la mer du Nord, à l'instar de qui a été fait pour le set Manche - Atlantique, mérite donc d'être amélioré avant un passage en mode opérationnel (Neaud-Masson *et al.*, 2016 (**R-109**)). Cette optimisation passera par une homogénéisation du nombre de particules dans les groupes pouvant présenter un risque de confusion afin d'éviter le sur-apprentissage d'un groupe par rapport à un autre. De plus, le nombre de particules dans chacun des groupes devra également pouvoir être représentatif de la variabilité naturelle de ce groupe (en terme de taille, forme, niveau de gris, ...). D'autres opérations d'optimisation consisteront en des ajouts ou suppression de vignettes, ou en des modifications de groupes (par exemple, en fusionnant ou en séparant différents groupes d'une même unité taxonomique si une grande confusion est constatée entre ces différents groupes ou avec d'autres groupes).

Mon rôle de pilote scientifique du projet vise également à assurer une veille technologique, et plus particulièrement de suivre l'état d'avancement du développement d'un nouveau système par mes collègues du Laboratoire Détection, Capteurs et Mesures (LDCM) (F. Colas *et coll.*) de l'Ifremer de Brest, afin d'envisager les possibilités qu'offre ce nouveau système au regard de nos contraintes. L'acquisition d'images et des attributs associés par le FlowCam se doit de présenter le meilleur rapport qualité d'images / temps d'acquisition des images. En l'état, le projet a permis de définir un protocole standardisé avec utilisation de l'objectif x4 pour une durée d'acquisition de 12 minutes pour un volume imagé de 10 ml. Le recours à l'objectif x10 afin d'améliorer la qualité des images multiplie par un facteur de l'ordre de 16 le temps d'acquisition des images et n'est donc pas compatible avec notre volonté d'optimisation du temps afin de pouvoir analyser davantage d'échantillons. C'est pourquoi l'équipe du LDCM développe le FastCam dont le principe de fonctionnement est le même que celui du FlowCam mais il est équipé d'une caméra haute résolution plus rapide (340 contre 22 images par seconde), d'un système optique amélioré x10 couplé à une cellule de mesure de 100 μm d'épaisseur et d'un système de gestion des flux de données optimisé. Dans cette configuration, l'acquisition d'un volume imagé se fait en 15 minutes et le système est considéré comme opérationnel. La possibilité d'en faire un produit industriel est à l'étude. Le déploiement du système dans le cadre du REPHY ou pour les besoins de la recherche nécessite encore la création d'un set d'apprentissage spécifique au FastCam.

2.3.3. Développement d'outils d'analyses numériques

Les activités de surveillance de l'environnement marin impliquent l'acquisition de données basse fréquence (BF) sur le long terme et la gestion de l'environnement qui doit en résulter conduit les acteurs à demander des outils d'aide à l'interprétation des données, à l'estimation de tendances et à la détection de ruptures afin de qualifier les masses d'eaux, les classer pour vérifier l'efficacité (ou non) des plans de gestion et de restauration mis en œuvre.

Le passage de la basse fréquence vers la haute fréquence est tel que les méthodes d'analyses de données classiquement utilisées par les biologistes écologues pour mettre en évidence des différences saisonnières ou annuelles sur la base de jeux de données limités à des matrices simples (fréquence d'échantillonnage mensuelle à hebdomadaire au mieux, soit de la basse fréquence - BF) ne permettent pas d'extraire de façon optimale l'information contenue dans les données haute fréquence (HF). La mesure HF implique également que la moindre défaillance de capteurs, la moindre intervention technique sur le système provoquent un trou dans la série de données, ce qui fait que la

première règle d'application de la plupart des méthodes statistiques standards d'analyses des séries temporelles, à savoir la régularité des observations, est violée. Les phases de validation et de qualification des données, indispensables afin d'assurer une utilisation de données de qualité, sont rendues très complexes en raison de la taille des matrices HF (plusieurs dizaines à centaines de milliers d'instant X nombre de paramètres étudiés). Ainsi, il est courant que les utilisateurs de données HF dégradent l'information en ayant recours à des moyennes et n'utilisent que quelques paramètres voire limitent leur approche à des analyses univariées ou bivariées au mieux. D'autres utilisent la donnée HF pour des périodes de temps restreintes et sur une sélection de paramètres afin de mieux comprendre un épisode particulier (exemple de l'étude de l'effet d'un coup de vent sur la disponibilité des nutriments et la croissance du phytoplancton). Il apparaît un décalage entre les progrès technologiques ayant permis le déploiement des systèmes HF et le développement de méthodes d'analyses des bases de données spécifiques qui en résulte. Par ailleurs, la plupart des biologistes écologues utilisateurs des données HF ne sont pas, par définition, des statisticiens et par conséquent l'amélioration des connaissances que devrait permettre la montée en puissance de la HF est limitée par la disponibilité d'outils clefs en main du type « l'analyse des données HF pour les nuls ».

Face à ce constat, mon projet de recherche intègre également un volet dédié au développement méthodologique et au développement d'interfaces utilisateurs présentées dans les sections suivantes. Pour atteindre mes objectifs, en dehors de ce que je pouvais développer au regard des forces en présence au sein de mon laboratoire, j'ai mis en place une collaboration renforcée avec le laboratoire LISIC de l'ULCO allant jusqu'à proposer entre 2014 et 2016 une convention d'accueil d'un chercheur de ce laboratoire (Dr. Émilie Poisson-Caillault, maître de conférences).

2.3.3.1. Analyses statistiques exploratoires et détection des ruptures et des tendances

La détection des tendances dans les séries de données relatives à l'hydrologie et à la qualité de l'eau a reçu une attention toute particulière ces dernières années pour des raisons purement scientifiques de développement méthodologique comme pour une meilleure évaluation du statut écologique des masses d'eaux marines (Smetacek et Cloern, 2008 ; Goberville *et al.*, 2011a, b ; Kitsiou & Karydis, 2011). L'évaluation des tendances est d'un intérêt particulier puisque les changements environnementaux de ces dernières décennies peuvent avoir un caractère inhabituel en raison d'une modification des forçages d'origine anthropique avec des conséquences sur l'environnement en général, incluant les impacts sur l'exploitation des ressources marines vivantes. Les séries temporelles sont essentielles pour l'étude des effets biologiques directs et indirects des pressions anthropiques en tant que tels ou pour définir des conditions de référence ou une ligne de base pour les investigations futures. Ce type d'approche est particulièrement utile pour les scientifiques et les gestionnaires de l'environnement dans le contexte de la mise en œuvre de directives européennes (Directive Cadre sur l'Eau, DCE, 2000/60/UE ; Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin, DCSMM, 2008/56/UE) ou de conventions de mers régionales comme OSPAR (2003).

Dans bon nombre de ces études sur les données de qualité des eaux, des tests statistiques paramétriques ou non-paramétriques sont appliqués afin de détecter des tendances dans les paramètres environnementaux afin d'expliquer les changements de qualité et par conséquent dans le fonctionnement des écosystèmes. Les tests paramétriques sont considérés comme plus robustes que les tests non paramétriques mais ils nécessitent le recours à des séries de données indépendantes et distribuées normalement. Les tests

non-paramétriques imposent seulement que les données soient indépendantes et peuvent tolérer l'existence de valeurs extrêmes ou manquantes.

Le groupe intersessionnel sur l'eutrophisation (ICG-EUT) d'OSPAR dont je fais partie depuis 2002 a été mandaté pour mettre à jour la Procédure Commune d'évaluation de l'état d'eutrophisation des masses d'eaux de la zone OSPAR (nord-est Atlantique) (OSPAR, 2002, 2005). Partie intégrante de cette procédure, l'évaluation des tendances doit permettre d'identifier si les paramètres environnementaux clefs des zones à problème potentiel ou à problème avéré au regard de l'eutrophisation évoluent dans la bonne direction, celle de l'amélioration de la qualité, indiquant alors que les mesures prises pour la lutte contre l'eutrophisation sont efficaces.

Par ailleurs, la mise en œuvre de la DCSMM implique le développement de critères et de standards méthodologiques pour permettre une approche harmonisée, pertinente à l'échelle des différents états membres pour l'évaluation de l'atteinte ou non du Bon État Écologique (BEE).

Dans ce contexte et face à l'hétérogénéité, la variété à la fois des différentes sources de données et des méthodes d'analyses statistiques, il apparaît un besoin important d'unifier les méthodes, au minimum, au sein d'une directive, d'une convention afin de pouvoir comparer les résultats entre des masses d'eaux adjacentes, transfrontalières. Ainsi, Devreker et Lefebvre (2014) (**Art-12.**) ont proposé un package développé sous R (R Development Core Team, 2012). Ce package répond à la tâche «Development of methodologies for temporal trend assessment» de l'ICG-EUT et est désormais proposé aux états membres OSPAR comme outil de référence pour l'évaluation des tendances lors de l'application de la Procédure Commune. L'interface a également été proposée à la communauté du Service d'Observation en Milieu Littoral (SOMLIT) et du Résomar (Réseau des Stations Marines) afin de permettre une valorisation harmonisée des données issues de ce réseau (**CN-49.**, **CN-53.**).

L'objectif de ce package TTAinterfaceTrendAnalysis est de mettre à disposition de l'utilisateur non statisticien un outil d'analyse exploratoire des données et de détection robuste des tendances (tests non-paramétriques de la famille Kendall) utilisable via une interface conviviale et intuitive (Figure 31), et avec un encadrement par des messages d'aide ou des recommandations en fonction des options choisies. L'interface permet de générer des tableaux, des figures (Figure 32) qui sont automatiquement sauvegardés dans un répertoire de travail défini par l'utilisateur, ce qui lui permet de construire rapidement un document de travail.

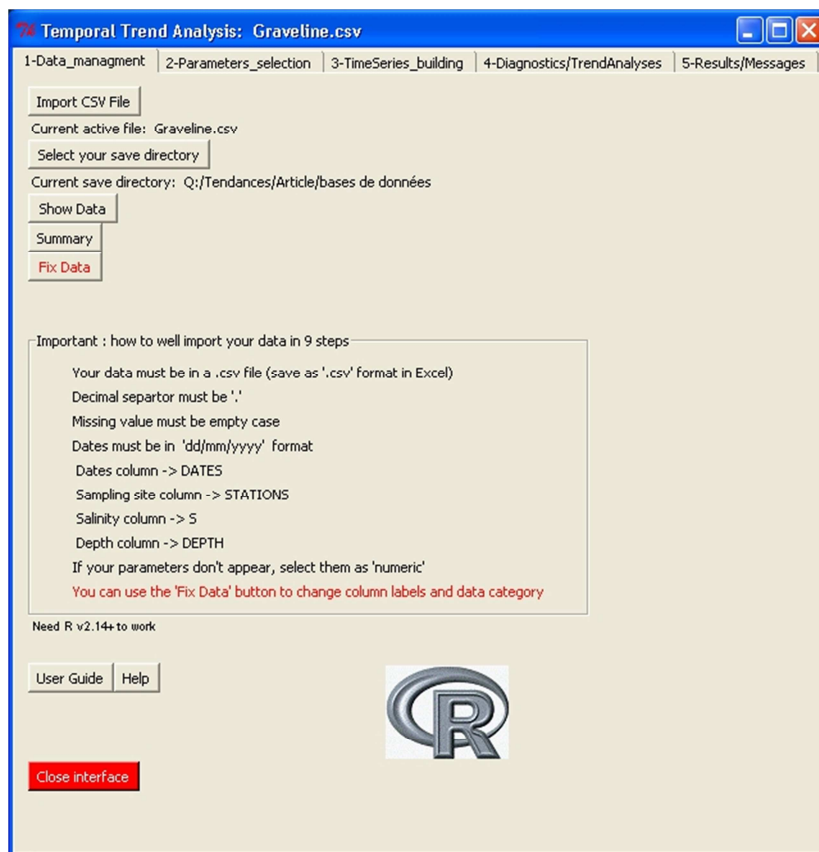


Figure 31. Capture d'écran de la page d'accueil du package R TTAinterfaceTrendAnalysis à partir de laquelle l'utilisateur va importer des données puis se laisser guider pour une analyse exploratoire et une détection des ruptures et des tendances.

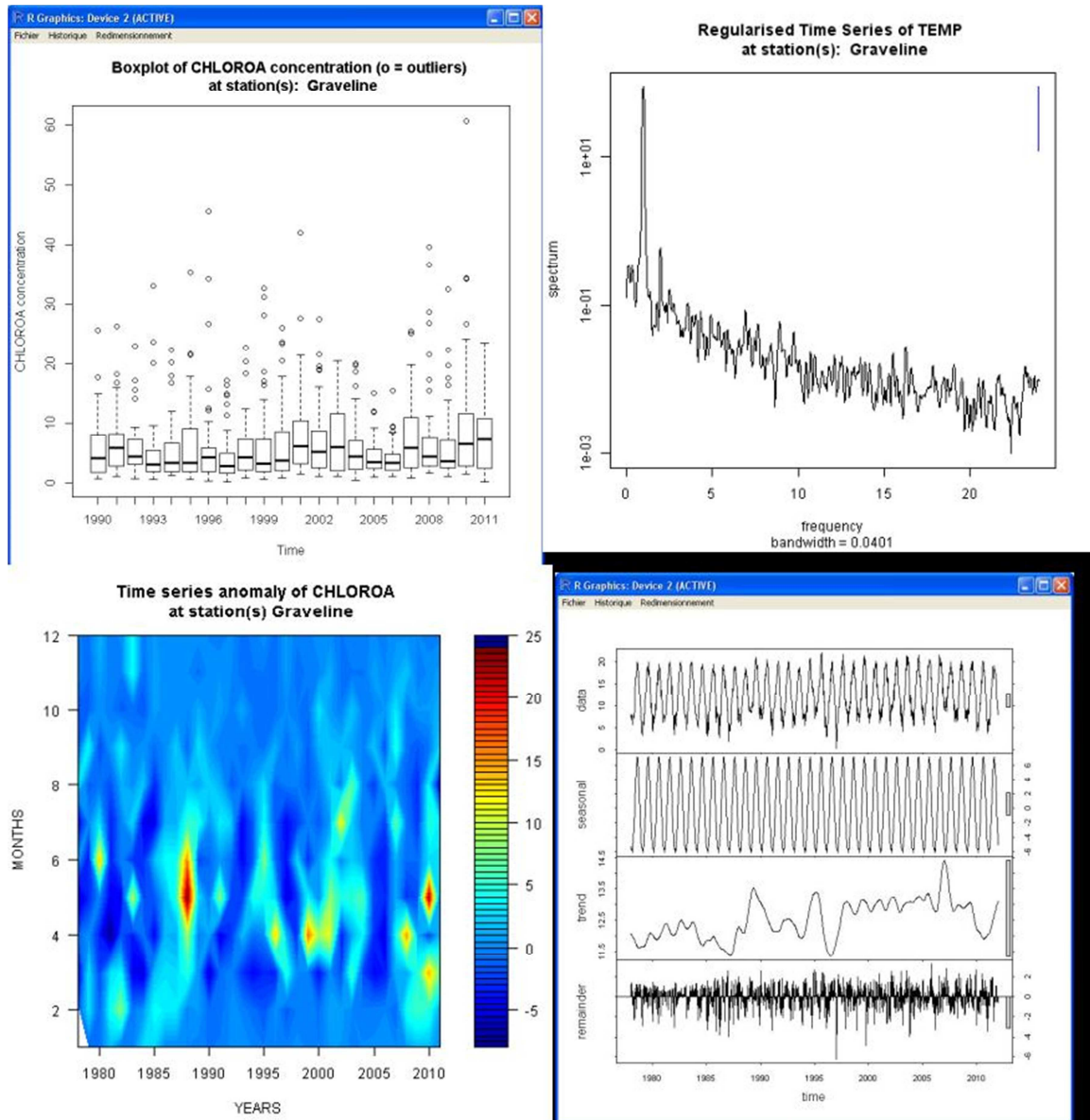


Figure 32. Exemples de graphiques générés par le package R TTAinterfaceTrendAnalysis (de gauche à droite, et de haut en bas : boîtes à moustache, analyse spectrale, anomalies, décomposition de la série temporelle).

2.3.3.2. Importation et fusion des fichiers multi-sources de données brutes Hautes Fréquences

Mes analyses des séries BF sont systématiquement faites à partir d'extraction des données via la base de données de référence pour les données physico-chimiques et biologiques de description de l'environnement, Quadrigé2 (http://envlit.ifremer.fr/resultats/base_de_donnees_quadrigé/presentation) dont le format du fichier d'extraction est stable, standardisé et permet ainsi de procéder rapidement à des analyses statistiques.

Pour les séries HF, la phase de prétraitement des données est plus fastidieuse, ce qui m'a conduit à développer et/ou proposer le développement de routine d'importation/fusion de fichiers de différentes sources (*i.e.*, de différents capteurs). L'objectif principal est de pouvoir analyser les données issues du Pocket Ferry Box (PFB) couplé à l'Algae Online Analyzer (AOA) en considérant les données acquises par

les différents systèmes du navire de recherche halieutique Thalassa. Ces données complémentaires correspondent à des données de température et de salinité (thermosalinomètre Seabird SBE45), de fluorescence (fluorimètre Turner), de direction et de vitesse du vent, de pression atmosphérique, de position, de direction et de vitesse du navire notamment. Lors des campagnes, ces données sont initialement stockées de manière automatique dans la base CASINO.

L'interface R intitulé FBDataM (Ferry Box Data Management) développé par Lefebvre et Devreker (outil interne Ifremer) (Figure 33) permet donc d'importer les données brutes (fichiers csv) du PFB, de l'AOA et de CASINO, puis d'effectuer un alignement temporel (les capteurs n'effectuent pas leurs acquisitions au même instant hh:mm:ss d'où la nécessité de travailler au niveau hh:mm avec arrondi ou par intervalle de temps). La cohérence du positionnement géographique proposée par le PFB est vérifiée en fonction de celle proposée par CASINO.

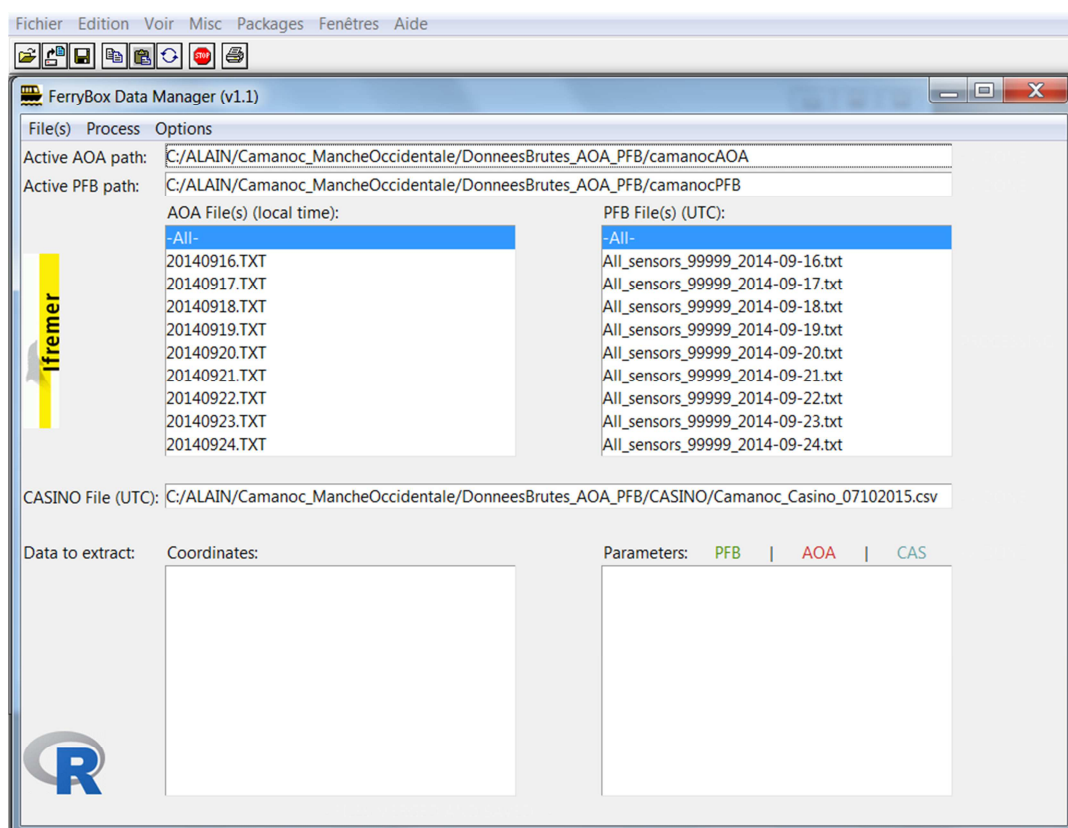


Figure 33. Capture d'écran de l'interface R du package FBDataM (Ferry Box Data Management) permettant l'importation, la fusion des fichiers du Pocket Ferry Box (PFB), de l'Algae Online Analyzer (AOA) et de la base CASINO du navire de recherche halieutique Thalassa.

Après mise au format des données des différentes sources, le package FBDataM permet également :

- de proposer une régression linéaire entre paramètres,
- de faire un diagramme Température / Salinité, afin d'identifier rapidement des masses d'eaux différentes,
- de faire la figure de l'évolution de la concentration totale en $\mu\text{g Chl-}a\cdot\text{L}^{-1}$, ainsi que la proportion relative de chacune des quatre classes spectrales mesurées par l'AOA (Figure 34).

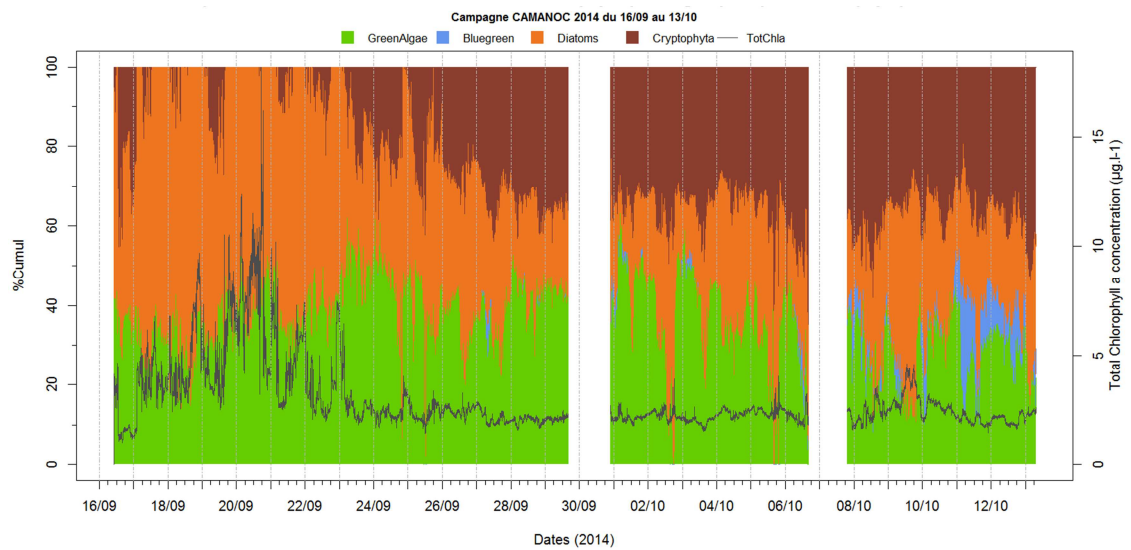


Figure 34. Exemple de figure générée par l'interface R FBDataM : évolution de la concentration totale en $\text{eq.}\mu\text{g Chl-}a.\text{L}^{-1}$ (courbe noire), ainsi que la proportion relative de chacune des quatre classes spectrales mesurées par l'AOA (Zones blanches : données manquantes).

2.3.3.3. Classification et modélisation d'états environnementaux

Les données issues des systèmes de mesures HF constituent des bases de données très importantes nécessitant des méthodes et des moyens de calculs non conventionnels. Ces bases sont également caractérisées par l'absence de certaines données qui génèrent alors des trous plus ou moins longs dans les séries (périodes de maintenance, défaillances des capteurs, problèmes de transmission des données, qualité douteuse des données,...).

De ce constat, on peut aisément identifier les priorités pour le traitement numérique de ces bases de données HF. Il s'agira de mieux gérer des matrices de données de taille très importante (plusieurs dizaines voire centaines de milliers d'instant X nombre de paramètres mesurés), de proposer des outils d'aide à la validation et à la qualification des données, de proposer des adaptations ou des développements de méthodes de complétion et de régularisation des séries afin, au final, d'exploiter de manière optimale les informations contenues dans ces séries HF pour pouvoir tendre vers la prédiction des événements à venir. Le tout devra se faire via des approches multi-variées afin de tenir compte de la complexité des interactions entre les paramètres environnementaux, des effets pressions/impacts.

Les objectifs sont donc (Figure 35) :

- de pouvoir identifier (semi) automatiquement sans connaissance *a priori* les événements habituels, récurrents, même s'ils sont d'amplitude, de durée différentes,
- de mettre en évidence les événements extrêmes et/ou rares,
- de caractériser la dynamique de passage d'un état environnemental vers un autre en tenant compte de l'aspect multi-paramètre,
- de prédire l'évolution du système.

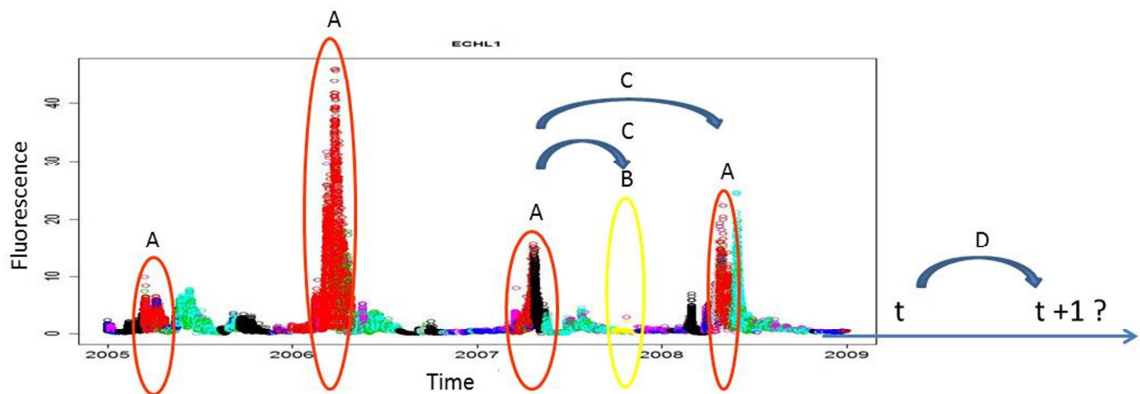


Figure 35. Évolution de la fluorescence mesurée par MAREL Carnot : identification des principaux états environnementaux et des éléments de dynamique à caractériser par classification et modélisation : (A) Événements courants mais d'amplitude, de durée variables, (B) Événements rares ou extrêmes, (C) dynamique entre les états et (D) prédiction des états.

Ce travail a été entrepris dans le cadre du projet InteReg IVA 2 Mers DYMAPHY (CEur-1.) et la plupart des développements a été réalisé lors de la thèse de Kévin Rousseuw (2014) (Th-2., J.Th-4.).

Pour atteindre ces objectifs, deux méthodes s'offrent à nous. La première consiste à explorer toutes les segmentations possibles par détection de ruptures séquentielles suivie d'une classification des segments générés. La méthode la plus connue dans ce groupe de méthodes est la classification hiérarchique. Son succès est très lié au fait que l'utilisateur ne doit rien paramétrer et que le résultat de l'analyse est très visuel. Cependant, son utilisation est limitée à des jeux de données peu volumineux en raison de sa complexité du calcul quadratique. La seconde méthode la plus utilisée est le k-means qui nécessite un certain paramétrage par l'utilisateur et qui dans sa version courante impose de prédéfinir le nombre de groupes. D'une manière générale, Keogh et Lin (2005) démontrent que les méthodes de classification basées sur l'extraction de sous-séquences par une fenêtre mobile donnent des résultats (sortie) indépendants des données de l'entrée et que le résultat ainsi obtenu n'est pas plus différent de ce qui aurait été obtenu par hasard. Afin d'éviter les biais liés à ces méthodes, un deuxième groupe de méthodes, que nous utiliserons, consiste à détecter des changements structurels par classification suivie d'une caractérisation temporelle. Les méthodes d'apprentissage automatique des états, notamment les arbres de décisions (Borcard *et al.*, 2011 ; Gorsky *et al.*, 2010) associent les branches d'un arbre hiérarchique aux critères de segmentations alors que les feuilles représentent les états. Or ces feuilles correspondent à des états caractéristiques d'observations d'inertie minimale basées sur des hypothèses de seuils multivariés non utilisables dans notre approche puisque l'état majeur que représente le bloom principal présente une énorme variabilité d'amplitude. La forte structuration temporelle de la dynamique phytoplanctonique est telle qu'elle peut être appréhendée comme un chemin à travers des états environnementaux guidés à la fois par les observations et leurs enchaînements. Cette dynamique correspond alors à un graphe connecté dont un nœud représente un état environnemental et un arc de connexion représente la possibilité de passer d'un état à un autre. Le modèle de Markov caché (HMM) est donc particulièrement bien adapté à la modélisation de ce type de processus stochastique (Rabiner, 1989 ; Caillault *et al.*, 2005), ce qui nous a conduit à les considérer en priorité pour une application à l'étude de la dynamique du

phytoplancton. La spécificité de notre approche est d'hybrider le HMM avec une méthode de classification non supervisée, sans apprentissage (uHMM - unsupervised Hybrid Markov Model).

La première étape de notre travail a été de démontrer la valeur-ajoutée du recours à une méthode de classification spectrale au regard de ce qui est habituellement couramment utilisé pour partitionner des groupes de données biologiques structurées différemment dans l'espace ou dans le temps. Nous avons ainsi testé trois méthodes :

- la méthode de classification hiérarchique, très populaire en biologie, avec la méthode de la variance minimale de Ward. Les groupes sont définis par l'utilisateur en considérant une coupe du dendrogramme ainsi construit à un niveau donné, considéré comme pertinent.
- La méthode du K-means, généralement préférée à la méthode générale du maximum de vraisemblance plus difficile à paramétrer. Le K-means est particulièrement bien adapté aux jeux de données globulaires. Il est basé sur la minimisation de la somme des carrés intra-groupes et utilise le centre du groupe pour modéliser les données.
- La méthode de classification spectrale qui donne plus de latitude en termes de formes des jeux de données et qui applique le K-means non pas sur l'espace brut mais sur un nouvel espace spectral dans lequel les données sont linéairement séparables. Cet espace est composé de K valeurs propres extraites de la matrice Laplacienne de similarité de Zerlnik et Perona. L'algorithme de classification spectrale est basé sur la minimisation du critère de coupe normalisé, c'est-à-dire avec maximisation de la somme des similarités intra-groupes et minimisation de la somme des similarités entre-groupes. Il est bien adapté aux groupes avec des connectivités locales point à point et n'est pas dépendant d'une distribution gaussienne des données.

Les détails de la comparaison de ces méthodes sont développés par Rousseeuw *et al.* (2013) (**AC-1.**), Rousseeuw (2014 - **Th-2.**), Rousseeuw *et al.* (2015) (**Art-9.**). Ces auteurs concluent que pour les données convexes, les trois méthodes permettent de différencier les trois groupes théoriques de données (Figure 36 a). Pour des données de forme plus complexe, la méthode de classification spectrale est la seule qui permet de différencier les trois groupes (Figure 36 b, c). Par ailleurs, pour les bases de données volumineuses, les méthodes de classification hiérarchique et par K-means sont très vite limitées en termes de capacité calculatoire, alors que le recours à un algorithme adapté est envisageable avec la méthode de classification spectrale.

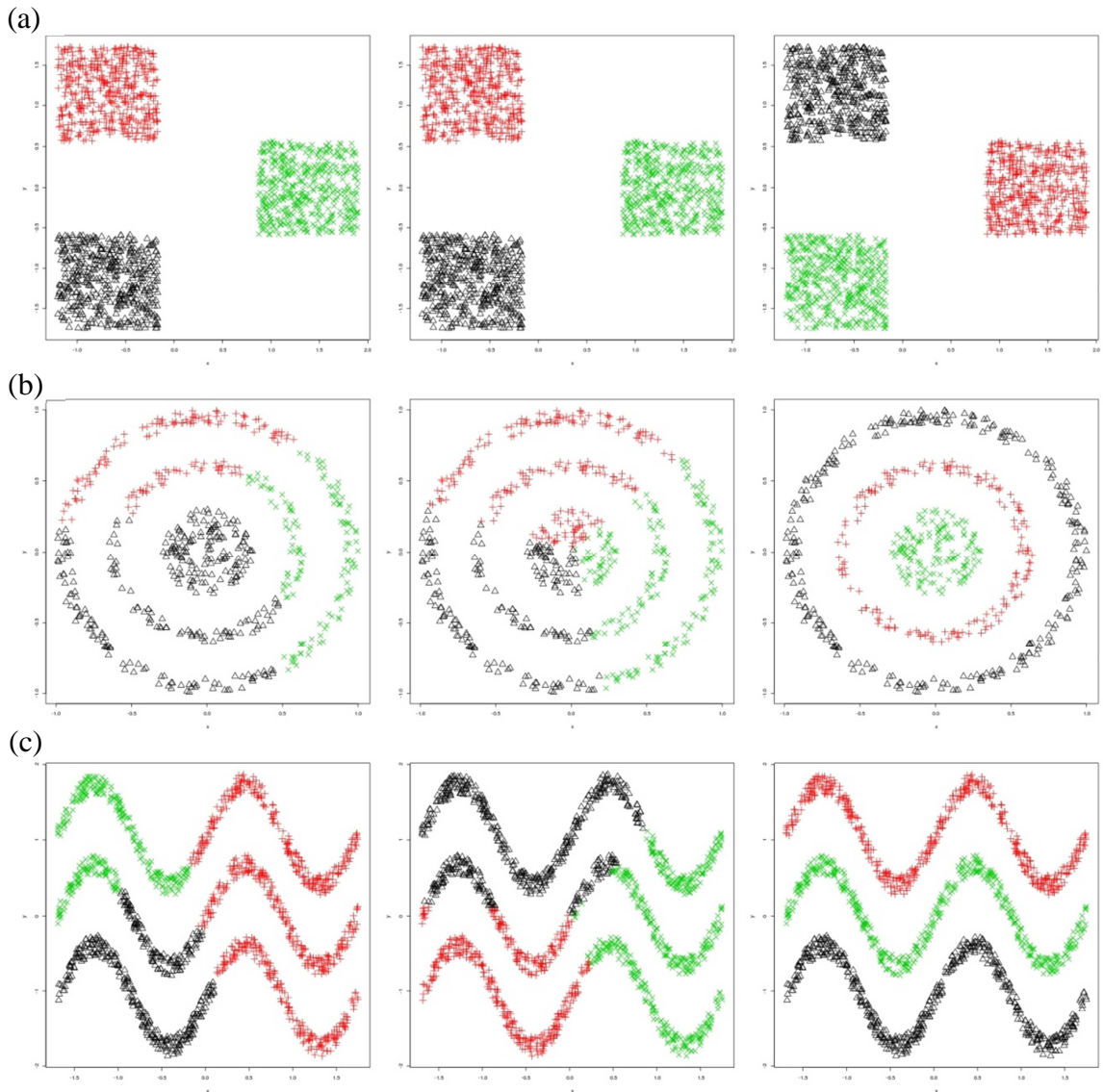


Figure 36. Illustration des capacités de séparation par la méthode de classification hiérarchique, par un K-means et par classification spectrale de trois types de jeux de données différemment structurés dans l'espace de classification (a) 3 groupes carrés de données compactes, (b) 3 groupes avec 1 boule et 2 cercles, et (c) 3 signaux ondulants avec connectivité.

Par la suite, les différentes étapes de notre approche de classification et de modélisation (Rousseeuw, 2014 ; Rousseeuw *et al.*, 2015) (**Th-2.**, **Art-9.**) sont les suivantes :

- Étape 1 : Phases de prétraitement et de détection des états par classification non-supervisée (Figure 37).

Les données sont alignées temporellement afin de tenir compte des décalages (de quelques secondes à quelques minutes) lors des mesures par les différents capteurs. Afin de rendre régulière la série de données, une méthode simple de complétion a été utilisée. Pour les nutriments, une copie des valeurs de concentrations est réalisée sur un intervalle de 12 heures, par moyenne mobile sur 40 points. Pour les autres paramètres, une moyenne mobile sur 500 points a été utilisée : 500 points représentent ainsi une période d'une semaine représentant l'échelle temporelle moyenne d'une efflorescence du phytoplancton ; la série est également considérée comme stationnaire sur cette

période ce qui justifie le recours à la moyenne mobile. Les données sont finalement normalisées (données centrées et réduites) si les variables considérées sont différentes en terme d'étendue en prenant garde de ne pas introduire de variables qui prendraient alors un certain poids sans toutefois contenir beaucoup d'information.

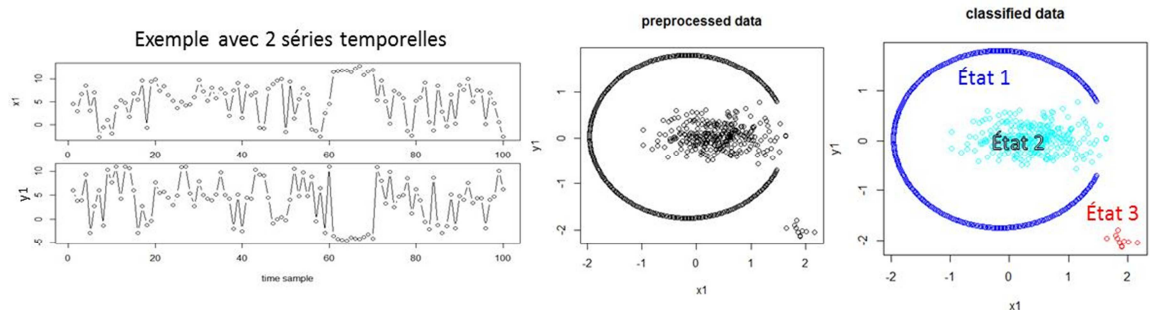


Figure 37. Modélisation et classification : Étape 1 : Prétraitement des données afin de pouvoir représenter le nouvel espace lié aux variables x_1 et y_1 puis faire la classification.

- Étape 2 : Phase de caractérisation des états via les symboles (V) (Figure 38).

La génération des symboles se fait par quantification vectorielle (Debyeche *et al.*, 2007 ; Ko *et al.*, 2008) des données prétraitées. Il s'agit de cartographier l'espace des attributs par des états représentatifs que sont les symboles afin de pouvoir réduire la taille de la matrice de données et donc de pouvoir appliquer l'algorithme de classification possédant des contraintes de coût calculatoire et de mémoire. La quantification vectorielle permet de réduire le nombre de données en conservant leur propriété de masses, de géométrie et les points isolés. La temporalité n'est absolument pas prise en compte lors de cette phase. Ce dernier élément est essentiel dans notre approche : nous souhaitons obtenir des états environnementaux non structurés par le temps mais par la géométrie des données. La méthode utilisée pour la génération des symboles est celle du K-means rapide auto-réglé (Self Tuning Fast K-means - STFKM) (Schindler *et al.*, 2011 ; Rousseeuw, 2014) (**Th-2.**) afin d'optimiser le coût calculatoire et d'automatiser la recherche du nombre de groupes K.

Les états sont générés via une classification non supervisée des symboles. A cette étape, la classification peut se faire via l'algorithme K-means de Hartigan-Wong (1979) ou via l'algorithme de classification spectrale de Ng-Jordan-Weiss (2002). Pour des données environnementales dont la dynamique est guidée par des processus stochastiques, non linéaires et non stationnaires, la classification se fera par la méthode de classification spectrale et le nombre d'états optimal sera calculé en utilisant le critère du gap (écart entre les valeurs propres). Après classification des M symboles, les labels sont affectés aux données observées.

Un état n'est pas caractérisé par une combinaison unique des paramètres. Il n'existe pas de notion de seuil pour définir un état. Par conséquent, l'espace est divisé en blocs (par quantification vectorielle) qui représentent ainsi M symboles (V). Un état peut donc être représenté par plusieurs symboles (Figure 38 : l'état 1 en bleu contient les symboles V1, V2, V3,...) et deux états peuvent apparaître dans le même bloc (Figure : les états 1 bleu et 2 cyan sont dans les blocs V11 et V23) d'où la nécessité de reprendre le séquençage afin de distinguer les états le long du continuum temps.

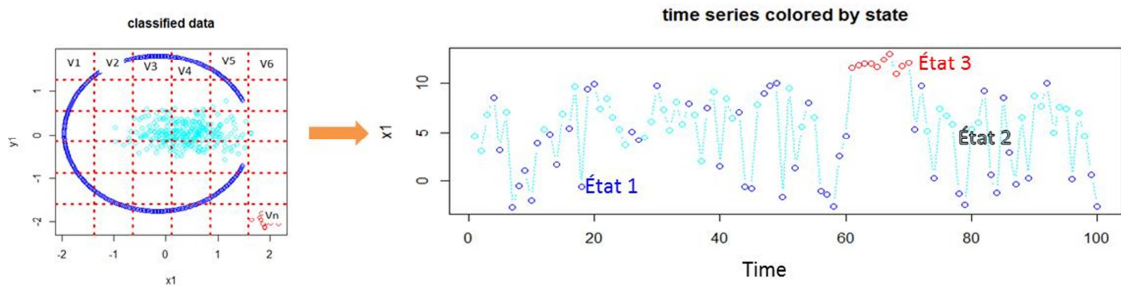


Figure 38. Modélisation et classification : Étape 2 : Caractérisation des états via les symboles (V) et séquençement.

- Étape 3 : Phase de caractérisation de la dynamique entre les symboles, les états (Figure 39).

Cette étape correspond à la phase de construction du modèle hybride de Markov caché non supervisé (uHMM) par classification spectrale, noté $\lambda = \lambda(N, M, \pi, A, B)$. Les paramètres du MMC à estimer selon un critère de maximum de vraisemblance sont le nombre d'états distincts (N), le nombre (M) de symboles distincts (V), les lois de transition entre les états et les lois d'émission de ces états, la caractérisation de ces états (π, A, B) (Rousseuw, 2014 ; Rousseuw *et al.*, 2015) (**Th-2., Art-9.**). La spécificité de notre approche est de définir les paramètres du modèle sans utiliser de base labellisée ou fixée avec une information *a priori* mais d'utiliser les données disponibles afin de les partitionner selon des critères de séparation optimale entre les groupes obtenus. Cette stratégie vise à limiter l'intervention de l'utilisateur afin que la construction du uHMM soit la plus indépendante possible du « dire d'experts » et la plus proche possible des signaux sous-jacents et de leurs aléas, d'où le terme non supervisé. Quoiqu'il en soit, la taille très importante des bases de données HF limite considérablement les possibilités de labellisation.

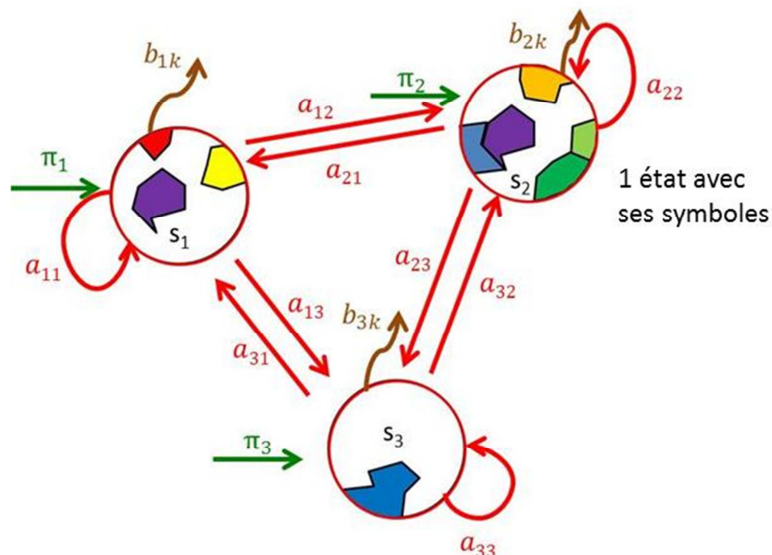


Figure 39. Modélisation et classification : Étape 3 : Caractérisation de la dynamique entre les symboles, les états (a : probabilité de transition, b : probabilité d'émission et π : distribution initiale). Un état (le cercle) est constitué d'un ou plusieurs symboles (polygones à l'intérieur du cercle).

- Étape 4 : Phase de prédiction (Figure 40).

Le modèle va permettre de prédire l'état dans lequel se trouve une nouvelle donnée ou les états d'une séquence de nouvelles données. L'affectation des symboles aux nouvelles données entrantes est réalisée par l'algorithme du plus proche voisin. Puis, la recherche de la séquence d'états optimale est faite grâce à l'algorithme de Viterbi (1967). Le système de décision propose l'estimation d'une nouvelle donnée uniquement lorsque l'observation de cette nouvelle donnée est cohérente vis-à-vis du symbole assigné. Il rejettera toute nouvelle donnée éloignée de la quantification de l'espace appris afin de ne pas donner de fausses estimations.

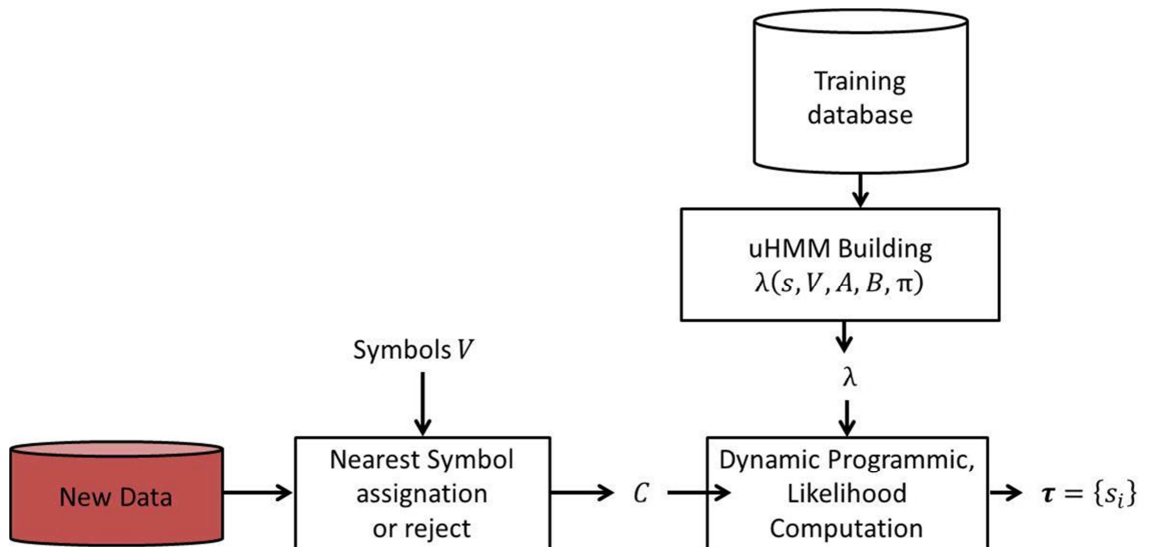


Figure 40. Modélisation et classification : Étape 4 : Prédiction.

Notre objectif étant de mettre à disposition de la communauté scientifique et des gestionnaires de l'environnement des outils conviviaux d'analyses des données HF, nous avons développé sur la base de la méthode de classification et de modélisation présentée ci-dessus une interface R sous forme du package uHMM (<https://cran.r-project.org/web/packages/uHMM/index.html>) (Poisson-Caillault *et al.*, 2016) (**R-112.**), qui contient à la fois des fonctions de visualisation, de classification et de modélisation de séries temporelles mais aussi une interface utilisateur. Ainsi tout utilisateur sans compétence de programmation informatique ou de classification/modélisation peut reproduire l'ensemble des travaux de la thèse de Kevin Rousseeuw (2014 ; **Th-2.**), de Rousseeuw *et al.* (2015) (**Art-9.**) ou ceux présentés à ASLO 2015 sur les campagnes du projet DYMAPHY (**CI-34.**) qui feront à terme l'objet d'une publication dans une revue à comité de lecture (**ArtS-3.**). Cette interface (Figure 41) fournit l'ensemble des résultats et outils statistiques d'analyse sous forme de tableaux, de figures (Figure 42) automatiquement sauvegardés dans l'espace de travail défini par l'utilisateur.

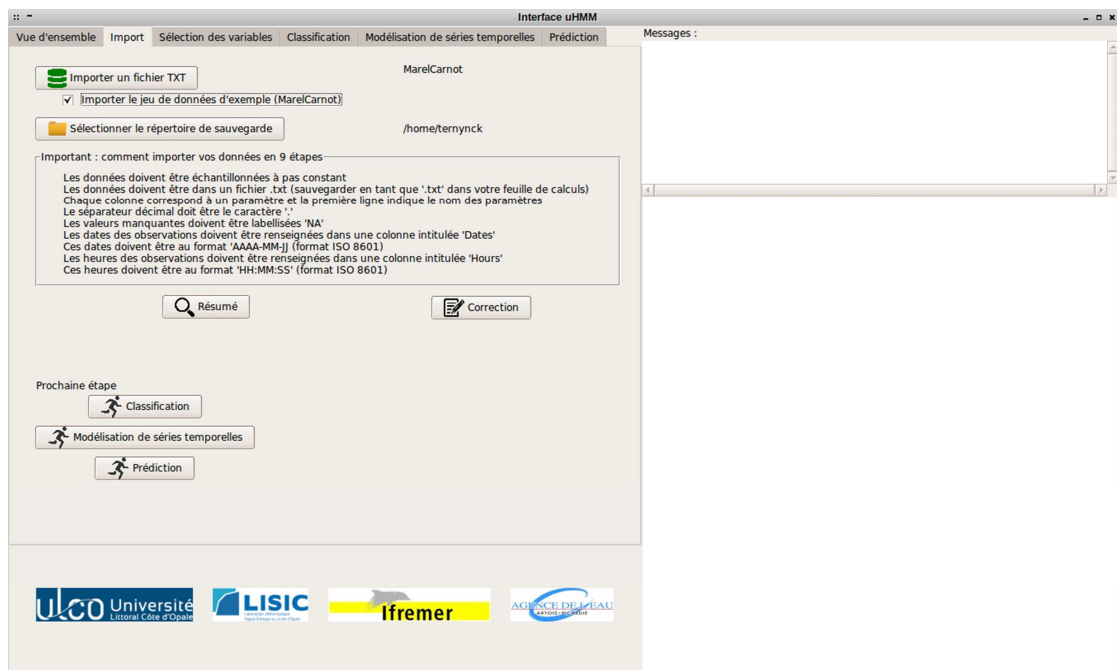


Figure 41. Captures d'écran de l'interface uHMM (unsupervised Hybrid Markov Modeling) avec les six onglets permettant l'importation des données, la sélection des variables, la classification, la construction du modèle de Markov caché et la prédiction des états environnementaux.

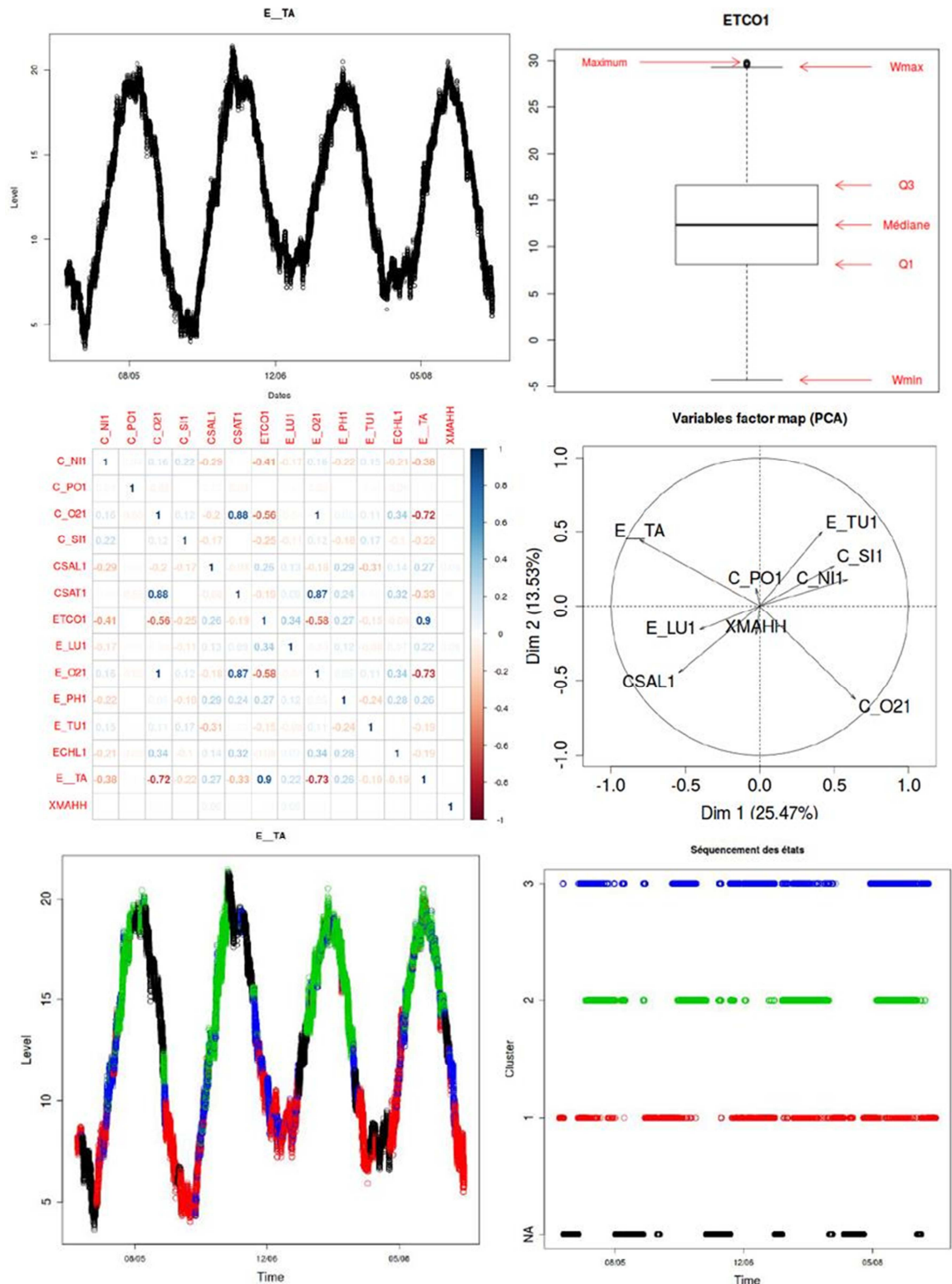


Figure 42. Exemples de figures générés par l'interface uHMM (de gauche à droite et de haut en bas) : série brute de données, boîte à moustache, matrice des corrélations, axes 1 et 2 de l'Analyse en Composante Principale, identification par un code couleur de la succession des différents clusters (= états environnementaux) sur la série brute, séquencement des états obtenus par classification.

2.3.4. Modélisation hydrodynamique/biogéochimique

Après un changement d'échelle temporelle (de la BF vers la HF), mon projet se doit d'envisager un changement d'échelle spatiale (en dehors de celui entrepris par des mesures HF via le PFB). C'est pourquoi dans le contexte des projets PNEC Chantier Manche orientale - sud mer du Nord, thème 1 (**CNat-1.**, **CN-10.**, **CN-13.**) et LITEAU II (**CNat -2.**), que j'ai coordonnés pour l'Ifremer (**R-21.**, **R-23.**, **R-34.** **R-46.**, **CN-6.**, **CN-8.**, **CN-13.**), j'ai tenté de développer au sein de mon laboratoire la compétence de modélisation hydrodynamique et biogéochimique en m'associant avec mes collègues modélisateurs de l'Ifremer, de l'Université P. & M. Curie, de l'Université Libre de Bruxelles et de l'Unité de Gestion du Modèle Mathématique de la Mer du Nord (UGMM). C'est dans ce contexte que j'ai pu co-construire le projet puis co-encadrer et contribuer au travail de thèse de M^{elle} A. Vanhoutte-Brunier (2002-2005) (**Th-1.**) avec A. Ménesguen (Ifremer).

Une gestion rationnelle et durable du littoral doit reconnaître ce milieu comme le dernier maillon d'une chaîne d'écosystèmes aquatiques qui se succèdent à travers tout le réseau de drainage de son bassin versant, depuis les ruisseaux de tête de bassin jusqu'aux zones estuariennes et côtières. Le milieu littoral est ainsi le réceptacle des flux de matière qui résultent de l'ouverture des cycles dans les systèmes terrestres du bassin aménagé par l'homme. Les flux qui parviennent au milieu marin dépendent en outre du fonctionnement des écosystèmes dulçaquicoles et estuariens, et des processus de transformation, de rétention et d'élimination qui s'y produisent. C'est donc une vision d'ensemble du fonctionnement de ce continuum d'écosystèmes qui doit être développée pour fonder l'aménagement durable du milieu littoral. Des outils opérationnels couvrant l'ensemble de ce continuum manquent encore dans bien des cas, car le développement de la recherche en cette matière a trop souvent été entravé par les clivages qui ont longtemps existé entre la communauté scientifique des océanographes et celle des limnologues. Les progrès permis dans ce sens grâce, par exemple, au programme PIREN-Seine du CNRS, au chantier PNEC Baie de Seine, au projet LITEAU I ont motivé les équipes impliquées historiquement de proposer une extension de la zone atelier baie de Seine vers la Manche et la mer du Nord afin de « rejoindre » les équipes belges pour entreprendre un travail à la fois sur le continuum bassin-versant-zone côtière mais également sur le continuum baie de Seine - mer du Nord. En effet, il est souhaitable d'étendre l'approche de modélisation à l'ensemble de la bande côtière française de la Manche-est, puis belgo-néerlandaise de la Mer du Nord, zones largement influencées dans leur fonctionnement écologique par les apports de la Seine, de la Somme et de l'Escaut. Les bassins versants correspondants, de superficies respectives de l'ordre de 70 000, 7 000 et 20 000 km², concentrent en effet 30 % de la population de la France, 40 % de son activité industrielle et 40 % de sa production agricole d'une part, 60 % de la population de la Belgique, 65 % de son activité industrielle et 50 % de sa production agricole d'autre part. En Mer du Nord, l'eutrophisation de la bande côtière a stimulé la prolifération spécifique de colonies de *Phaeocystis*, responsable d'accumulations de mousse sur les côtes (Lancelot *et al.*, 1987 ; Cadée & Hegeman, 1991 ; Rousseau *et al.*, 1994). La Belgique, très touchée par le phénomène, développe depuis de nombreuses années plusieurs programmes d'étude et de modélisation de ce cas particulier d'eutrophisation. Sur la côte du Nord, Pas-de-Calais, ce phénomène est également régulièrement observé ces dernières décennies (Maillard-Quisthoudt, 1988 ; Gentilhomme & Lizon, 1998 ; Lefebvre *et al.*, 2011 (**Art-6.**)).

De même que sur les bassins versants, l'outil mathématique permettant la simulation 3D des cycles de la matière et des nutriments en mer côtière est à un stade de maturité qui permet d'en envisager l'application systématique à de vastes zones marines et sous un forçage climatique et anthropique quelconque.

C'est ainsi que les équipes se sont associées dans la cadre des consortiums mis en place dans LITEAU II, le chantier PNEC Manche-est et les projets Belges (du type AMORE), et dans le contexte biologique de la prolifération de *Phaeocystis*, afin de répondre aux attentes des instances nationales françaises et internationales, proposant de répondre à deux objectifs principaux : (i) Quelles sont les causes naturelles et les synergies anthropogènes responsables de l'apparition des blooms de *Phaeocystis* en Manche orientale et en Mer du Nord ? et (ii) Quelles sont les conséquences des blooms de *Phaeocystis* sur l'écosystème marin et pour ses usagers, en Manche orientale et en Mer du Nord ?

Sur la zone Manche-est / baie sud de la mer du Nord, le couplage des connaissances acquises sur les milieux terrestre et marin doit permettre d'évaluer quantitativement :

- la part respective de chaque fleuve dans l'eutrophisation d'une zone marine cumulant les apports de plusieurs sources ;
- le lien entre l'eutrophisation de la bande côtière et les orientations de l'agriculture, de l'aménagement des zones humides, la politique de traitement des eaux usées dans le bassin, ou tout simplement certains phénomènes sur lesquels l'homme est moins directement influent comme les variations interannuelles de pluviométrie ;
- l'impact sur le milieu marin des aménagements successifs qui ont modifié profondément le cadre et le fonctionnement des estuaires ;
- les temps de réponse du système global aux modifications de ses contraintes, compte tenu, notamment, des stocks accumulés dans les sédiments et les aquifères.

La particularité de ce projet était de proposer le recours à différents modèles afin de bénéficier du meilleur de chacun en fonction de la question abordée et/ou de les coupler. Ces modèles sont MIRO (Lacroix *et al.*, 2004 ; Lancelot *et al.*, 2005, 2006ospar), ECO-MARS3D (Ménèsquen et Hoch, 1997 ; Ménèsquen *et al.*, 2006) et SENEQUE RIVERSTRAHLER (Billen *et al.*, 1994 ; Ruelland *et al.*, 2007).

Pour répondre à ces attentes, la stratégie de ce projet était de réaliser les simulations des cycles biogéochimiques de l'azote, du phosphore et du silicium sur les bassins versants de la Somme et de l'Escaut et à les valider sur les séries de mesures disponibles, notamment quant à la simulation réaliste de l'évolution passée des flux de nutriments à l'exutoire. Il s'agissait également de fournir ces chroniques de flux simulées en entrée des modèles 3D de la Manche-Mer du Nord méridionale en cours de mise au point à l'Ifremer et à l'UGMM et à valider sur les années récentes les répartitions observées des nutriments et des blooms phytoplanctoniques marins. Finalement, l'ensemble des modèles des 3 bassins versants et de la Manche-Mer du Nord a été mis en œuvre pour tester divers scénarios d'évolution future et à fournir ainsi une aide à la décision en matière de gestion du milieu littoral et du bassin versant qui l'influence.

La modélisation de l'eutrophisation fait l'objet d'un travail spécifique du groupe ICG-EMO d'OSPAR (Intersessional Correspondance Group - Eutrophication Modelling), très lié aux actions de l'ICG-EUT dont je fais partie. Des recommandations méthodologiques (données nécessaires, limites d'utilisation, interprétation des résultats,...) ont été proposées par ce groupe et peuvent ainsi contribuer à la mise en

œuvre de cet outil pour les besoins de la DCSMM (Lenhart *et al.*, 2012). En effet, au-delà de la description de l'état écologique actuel des eaux marines et de l'amélioration des connaissances en général, la modélisation (via, par exemple, le modèle ECO-MARS 3D, qui correspond au couplage d'un modèle hydrodynamique et d'un modèle biogéochimique (Figures 43 et 44), de maille de 4 km de côté, avec discrétisation verticale sur 12 niveaux sigma) apporte une réelle valeur ajoutée pour la caractérisation du Bon État Ecologique de la DCSMM, le développement des indicateurs pour les différentes sous-régions marines par le développement de scénarios d'évolution pour les paramètres suivants fortement liés à la problématique de l'eutrophisation :

- concentration en azote (N) inorganique dissous,
- concentration en phosphore (P) inorganique dissous,
- rapport N/P des formes inorganiques dissoutes,
- chlorophylle totale,
- rapport diatomées/dinoflagellés,
- oxygène dissous au fond,
- transparence de l'eau.

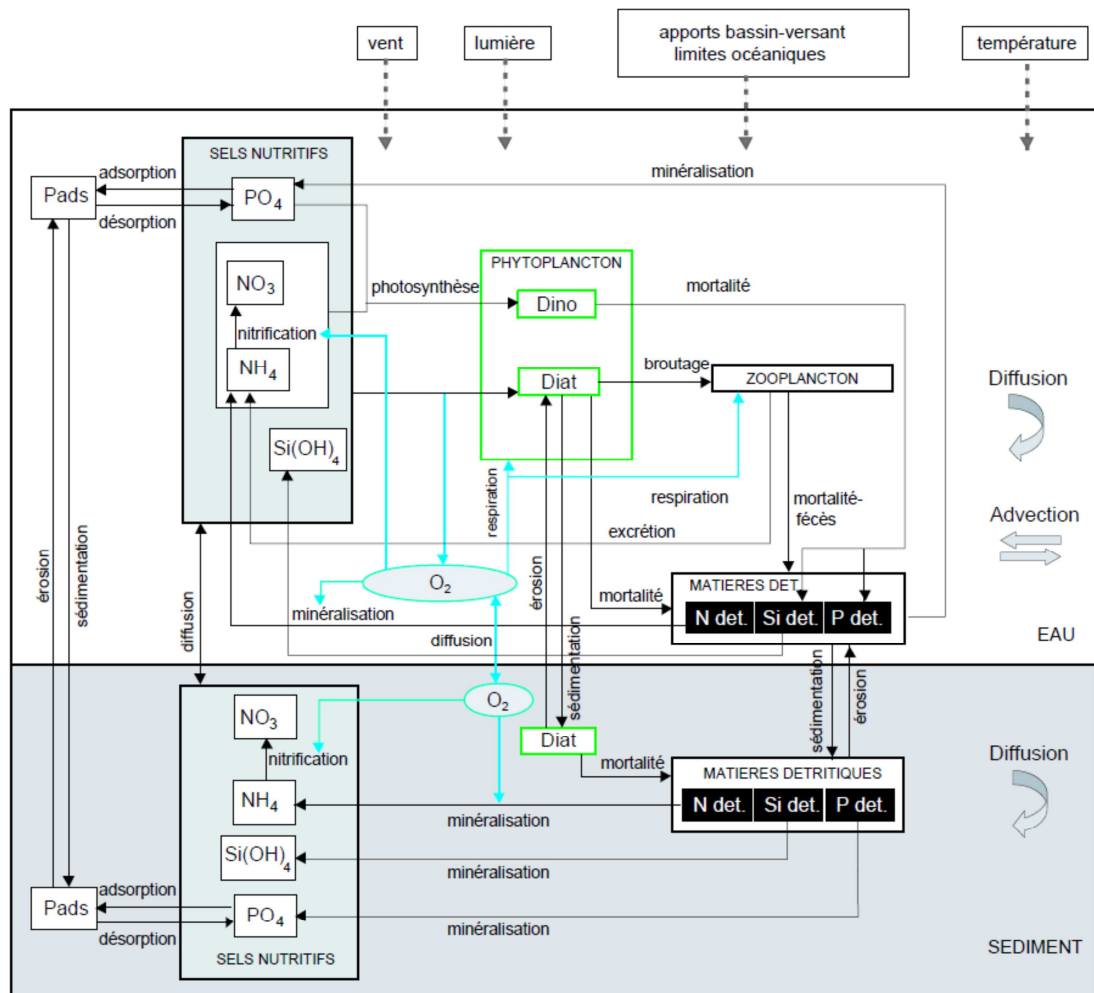


Figure 43. Schéma conceptuel des cycles d'éléments simulés dans le modèle ECO-MARS 3D (source : Vanhoutte-Brunier A.) : flux entre les variables d'état.

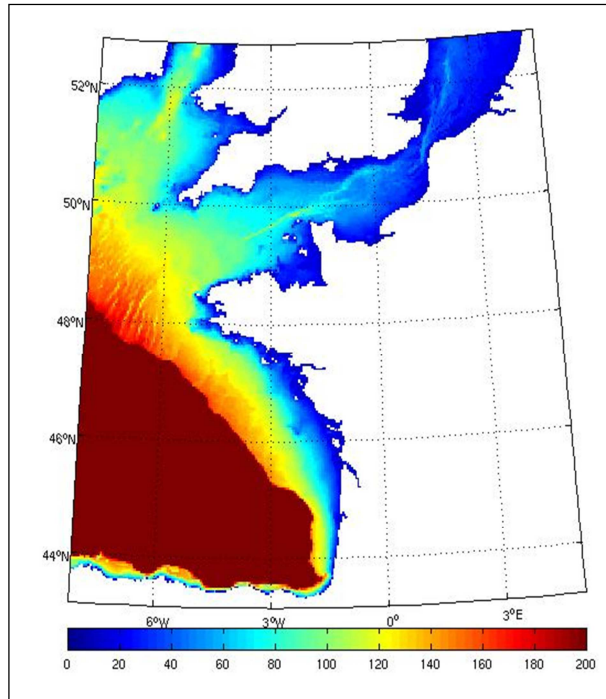


Figure 44. Emprise spatiale du modèle ECO-MARS 3D appliqué à l'échelle de la Manche et du Golfe de Gascogne (emprise dite MANGA) (source : A. Ménesguen).

A ce jour, je ne m'implique plus directement dans les activités de modélisation hydrodynamique et biogéochimique, mais mon mandat de pilote scientifique pour le volet Eutrophisation de la DCSMM fait que je suis avec intérêt le développement de ce type d'outil et les résultats produits afin d'argumenter en connaissance de cause en faveur de la modélisation dans les groupes de travail et les instances concernées.

2.3.5. Couleurs de l'eau

Au même titre que la modélisation, les produits dérivés des images satellites permettent une approche à méso-échelle afin de remettre dans un contexte plus global les résultats acquis par les approches conventionnelles BF ou via les systèmes HF.

Mon implication dans la mise en œuvre de cet outil consiste en une collaboration avec F. Gohin (Ifremer) qui assure le développement et la mise à disposition des produits de télédétection. Pour cet outil, je ne suis qu'un utilisateur final bien que je contribue indirectement à leur mise en œuvre via la fourniture des données *in situ* indispensables à la calibration et la validation des algorithmes.

Les produits de télédétection aujourd'hui disponibles de façon opérationnelle pour l'observation et la surveillance sont la température de surface, la concentration en chlorophylle-*a* en surface (Figure 45) et la turbidité en surface. Les produits de télédétection ont été identifiés comme pertinents pour répondre au besoin de la DCE (Gohin *et al.*, 2008 ; **Art-5.**) et lors des travaux préliminaires à l'établissement de l'État Initial des sous-régions marines de la DCSMM afin de mettre en place le programme de surveillance dédié. Les données des satellites sont au cœur des moyens de surveillance que l'Union Européenne met en œuvre dans son ambitieux programme de GMES (Global Monitoring for Environment and Security), en particulier à travers sa composante marine nommée MyOcean.

Les résultats de l'estimation de la concentration en chlorophylle-*a* sont couramment utilisés pour les besoins de valorisations des données des réseaux SRN et IGA. Plus récemment les données HF acquises lors des campagnes en mer du projet DYMAPHY ont été également utilisées afin de contribuer à la validation de l'algorithme PHYSAT (Thyssen *et al.*, 2015 ; **Art-8.**). Par ailleurs, mon implication dans la DCE, dans OSPAR et dans la DCSMM fait que je suis particulièrement attentif aux possibilités qu'offre ce genre de produits.

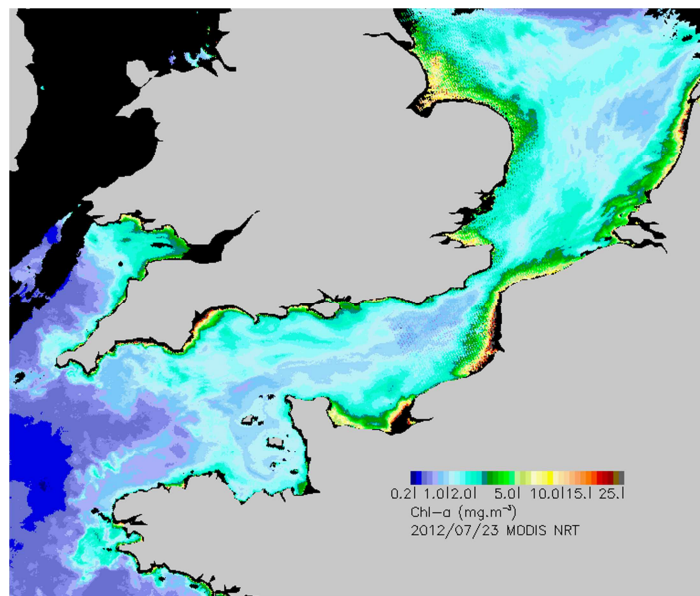


Figure 45. Estimation de la concentration en chlorophylle-*a* par le capteur MODIS (algorithme OC5 IFR) (Masque noir : terre ou couverture nuageuse) (source : F. Gohin).

2.3.6. Conclusions

L'évolution de l'observation et de la surveillance de l'environnement marin de la basse fréquence vers la haute fréquence à laquelle j'ai contribué ces dernières années permet de disposer de plateformes et d'outils qui, associés à ceux mis en place par les collaborateurs et partenaires de mon laboratoire, permettent d'envisager un suivi de l'évolution de l'environnement marin à des échelles de temps et d'espace complémentaires pour répondre aux besoins d'amélioration des connaissances scientifiques comme aux besoins de surveillance imposés par la réglementation (Directives Européennes et déclinaisons nationales, Conventions de mers régionales).

Les outils numériques développés sous R sont, ou seront, disponibles pour la communauté scientifique et les gestionnaires de l'environnement. L'objectif n'est pas de proposer un modèle unique mais de permettre d'optimiser les phases d'analyse exploratoire des données et certaines approches plus complexes (analyses des tendances, classification et modélisation) afin de pouvoir consacrer davantage de temps à d'autres développements. Pour les gestionnaires, il s'agit de disposer d'outils intuitifs afin de permettre une meilleure communication entre eux et les scientifiques dans une société avide d'informations et de plus en plus exigeante en terme de compréhension de l'évolution de notre environnement et des prise de décision qui doivent être les plus pertinentes possibles en considérant un ratio coût/bénéfice optimal pour une restauration d'un environnement qui subit encore les conséquences du développements des activités humaines en zones côtières.

Les **questionnements scientifiques généraux** motivant l'orientation de mon projet de recherche de la BF vers la HF peuvent ainsi être synthétisés de la manière suivante :

- Enjeu global de la collecte de données par des systèmes d'observations pérennes pour l'amélioration des connaissances sur les écosystèmes marins côtiers tempérés anthropisés en tenant compte des interactions d'échelles contrôlant leurs évolutions et via l'interprétation des différents schémas de variabilité en déconvoluant les effets d'origine anthropique de la variabilité naturelle afin d'anticiper les nouveaux risques environnementaux et/ou sanitaires,
- Étude de la relation Pression/Impacts - rôle des apports de nutriments sur les proliférations massives de certains taxons du phytoplancton et effets directs et indirects sur l'écosystème,
- Étude du lien entre la prolifération de certains taxons nuisibles (par la production de forte biomasse ou de toxines) et de l'état d'eutrophisation des eaux marines,
- Lien entre biogéochimie, production et diversité du phytoplancton,
- Étude des effets des variations environnementales naturelles et anthropiques sur les variables biologiques endogènes et exogènes,
- Optimisation des stratégies et des performances des programmes d'observation et de surveillance - développement des observatoires marins, anticipation pour la mise en œuvre de nouveaux outils pour tendre vers une surveillance numérique de l'environnement,
- Utilisation des systèmes HF et des outils numériques associés pour proposer des stratégies adaptatives lors des campagnes océanographiques afin de ne plus échantillonner que selon des modalités définies *a priori* et de pouvoir s'adapter à des changements à petites échelles de temps et d'espace,
- Développements méthodologiques pour le traitement des données multi-paramètres haute fréquence,
- Développement de système d'alerte quant à l'évolution de la qualité de l'environnement marin en temps (quasi) réel,
- Validation/calibration des modèles couplés hydrodynamique/biogéochimie et des algorithmes à l'origine des produits dérivés des images satellites,
- Contribution à la modélisation de la dynamique du phytoplancton et de l'évolution de sa biodiversité à différentes échelles de temps et d'espace, pour mieux comprendre la complexité des processus mis en jeu et leurs interactions et pour mieux comprendre les événements passés, présents et anticiper les évolutions,
- Contribution aux exigences réglementaires en termes de suivi de la qualité de l'environnement marin (DCE, DCSMM, OSPAR, Barcelone) - développement d'indicateurs, diagnostic de l'état du milieu, degré d'atteinte du bon état écologique,
- Contribution à l'évolution réglementaire et aux évolutions des dispositifs de suivi associés,
- Anticipation des nouveaux enjeux de la Recherche.

La section suivante vise à présenter mes contributions, nos contributions, aux questionnements ci-dessus en proposant les principaux résultats et éléments de conclusions acquis au cours de la période 2000-2016.

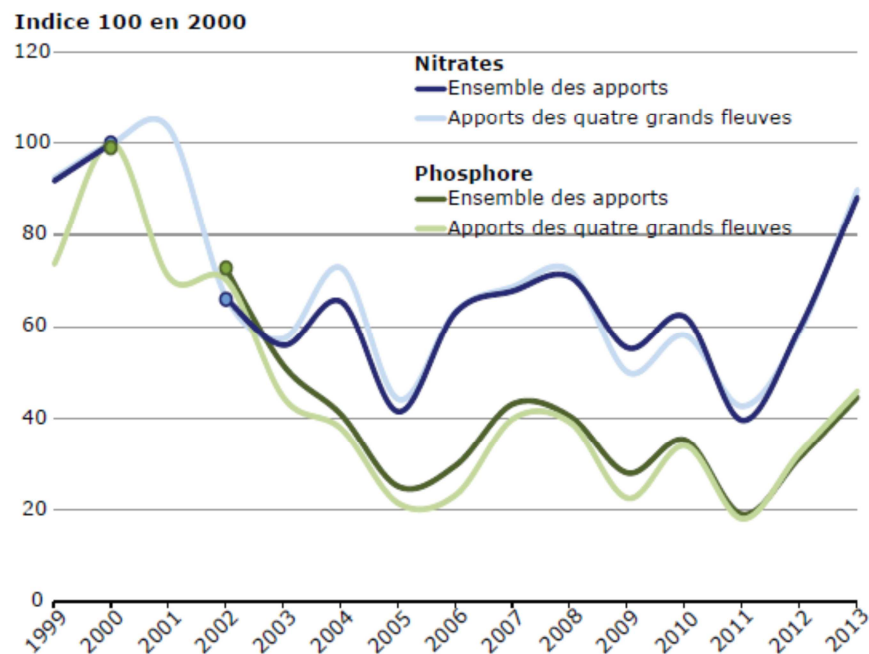
2.4. Dynamiques environnementale et phytoplanctonique

2.4.1. Les nutriments

2.4.1.1. Flux de nutriments

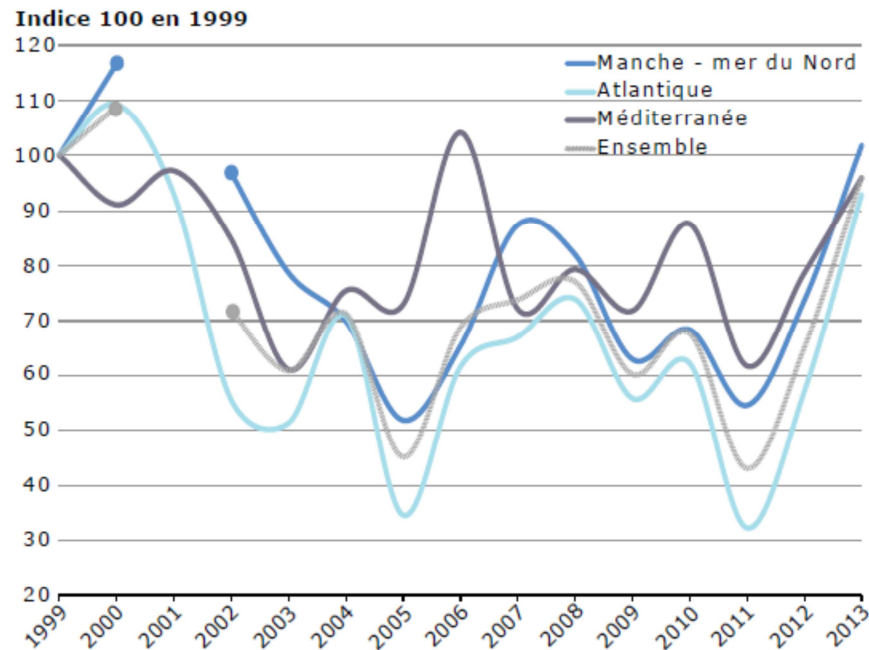
Les nutriments constituent un groupe de paramètres essentiels à la compréhension du processus d'eutrophisation puisqu'ils représentent la pression majeure qui peut initier, sous certaines conditions hydrologiques, hydrodynamiques et biologiques, une augmentation excessive de la biomasse végétale pouvant provoquer des dysfonctionnements de l'écosystème.

Dans un bilan de 2015, l'Observatoire National de la Mer et du Littoral (ONML) propose une estimation de l'évolution des flux à la mer pour le nitrate et le phosphore entre 1999 et 2013 (Figure 46) (http://www.onml.fr/onml_f/Evolution-des-flux-de-nutriments-a-la-mer) qui met en évidence une évolution complexe sans réelle tendance à long-terme après le début des années 2000 plutôt marquée par une diminution des flux de phosphore. L'ONML estime que la façade Manche - mer du Nord a reçu 33 % et 26 % des flux totaux, respectivement, d'azote et de phosphore au cours de cette période. Rapportés aux surfaces drainées, les flux d'azote sont plus importants au niveau de la façade Manche - mer du Nord (Figure 47).



Agences de l'Eau-Schapi, banque Hydro, Medde.
Traitements : RTrend® et SOeS.

Figure 46. Évolution des flux de nitrate et de phosphore à la mer entre 1999 et 2013 sur la base des mesures réalisées au niveau de la Seine, la Loire, la Garonne et le Rhône (données normalisées avec un indice 100 pour l'année 1999).



Agences de l'Eau-Schapi, banque Hydro, Medde.
Traitements : RTrend® et SOeS.

Figure 47. Évolution des flux d'azote (nitrate) entre 1999 et 2013 et par façade maritime sur la base des mesures réalisées au niveau de la Seine, la Loire, la Garonne et le Rhône (données normalisées avec un indice 100 pour l'année 1999).

A l'échelle du bassin Artois-Picardie, les apports fluviaux en nutriments ont fait l'objet de diverses estimations (Chaussepied *et al.*, 1989 ; Delesmont *et al.*, 1993 ; Carpentier, 1999 ; Prygiel *et al.*, 2000). Toutefois, ces estimations ont été réalisées à partir de données débitmétriques de la DIREN. Cet organisme fonctionnant principalement avec une stratégie d'alerte de crues, les données fournies s'appuient sur des stations de mesure de débits situées très à l'intérieur des terres, parfois jusqu'à quelques dizaines de kilomètres. J'ai ainsi initié dans le cadre du CPER 2000-2007 (**CReg-4.**) une étude visant à quantifier l'importance des apports continentaux en éléments nutritifs afin de mieux comprendre le rôle de ces apports dans le déclenchement, l'extension et la fin du bloom de *Phaeocystis globosa* (**R-17.**) mais en proposant une stratégie basée sur des mesures hebdomadaires des concentrations et des débits les plus en aval possible afin de tenir compte au mieux de l'influence des apports anthropiques vers le milieu côtier. Hébert *et al.* (2004) (**R-17.**) montrent, qu'en dehors des apports de la Somme, la Canche et l'Authie jouent un rôle majeur dans les apports de nutriments du bassin versant Artois-Picardie vers la zone côtière. Par ailleurs, ces résultats mettent en évidence une sous-évaluation des débits estimés via une stratégie amont pouvant mener à une sous-estimation des flux de nutriments par rapport à ceux estimés via une stratégie aval (Figures 48 et 49). Par conséquent, un facteur correctif doit être utilisé lors des calculs des flux de nutriments à la mer.

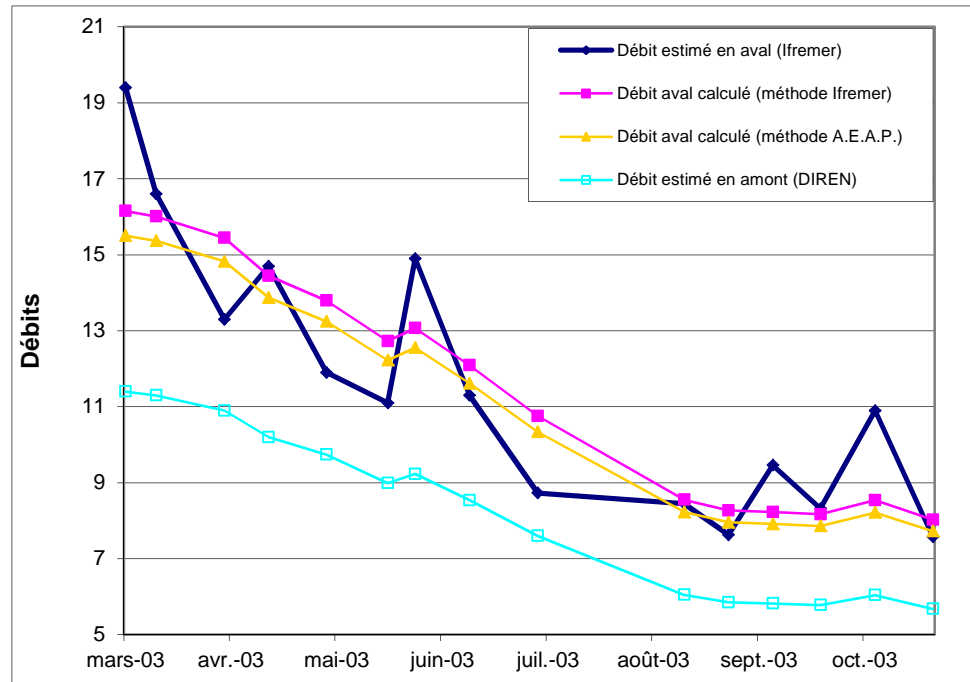


Figure 48. Comparaison des débits estimés ou calculés par différentes méthodes pour l'Authie.

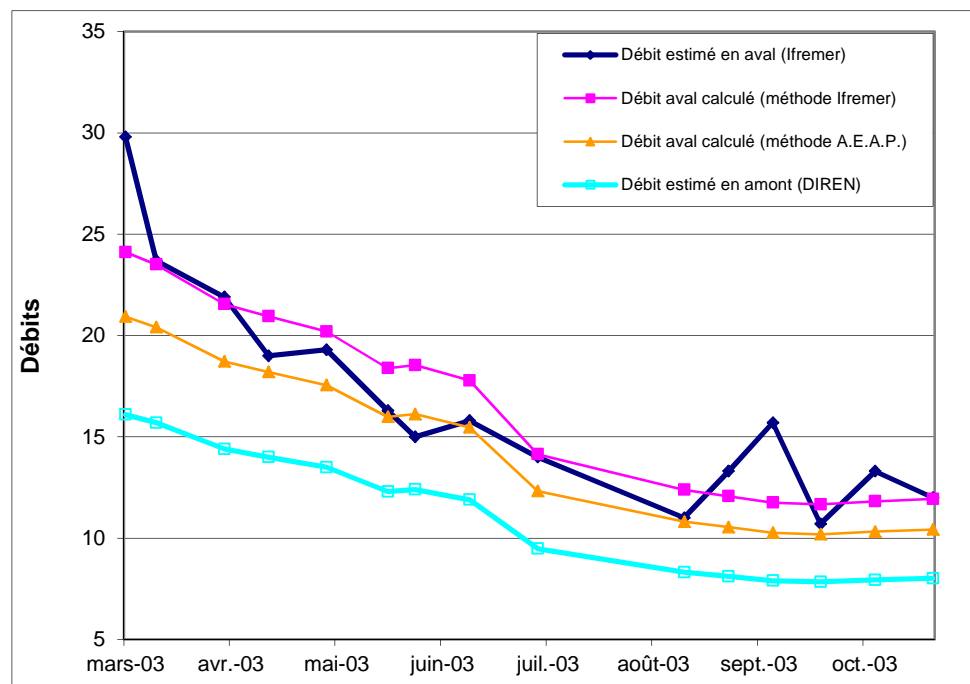


Figure 49. Comparaison des débits estimés ou calculés par différentes méthodes pour la Canche.

Concernant la Canche et l'Authie, la relation constante obtenue pour l'azote et le phosphore est typique de systèmes karstiques où les apports souterrains dominent. Dans le cas de la silice, un phénomène de dilution est observé. Ce type de relation peut être rencontré lorsque les eaux souterraines, prépondérantes en étiage, sont beaucoup plus concentrées que les eaux de surface (Pourriot et Meybecq, 1995). Les fortes concentrations en silice observées pour ces deux rivières seraient donc la conséquence

de fortes teneurs des nappes les approvisionnant. Au niveau des rivières du Boulonnais (Slack, Wimereux et Liane), une décroissance exponentielle de la relation concentration/débit est observée pour chaque nutriment étudié. Ce comportement, fréquemment observé à l'aval de rejets ponctuels, correspond à des phénomènes de dilution (Pourriot et Meybecq, 1995) et est à mettre en relation avec le régime torrentiel de ces cours d'eau. Cette relation permet également de mettre en évidence et d'expliquer les fortes concentrations, associées à des débits très réduits, obtenues durant la période estivale pour la majorité des éléments.

A l'échelle de la Manche orientale, il faut noter que ces apports restent néanmoins inférieurs à ceux de la Seine qui apporte en moyenne, pour un débit moyen interannuel de $413 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$: $90\,700 \text{ T} \cdot \text{an}^{-1}$ d'azote total, $46\,300 \text{ T} \cdot \text{an}^{-1}$ de silice et $8\,000 \text{ T} \cdot \text{an}^{-1}$ de phosphore dissous (Aminot *et al.*, 1998). Les flux moyens de nutriments (1998-2003) pour l'Escaut sont de $31,3 \cdot 10^3 \text{ T} \cdot \text{an}^{-1}$ NID, $0,57 \cdot 10^3 \text{ T} \cdot \text{an}^{-1}$ PID et $26,2 \cdot 10^3 \text{ T} \cdot \text{an}^{-1}$ Si (**R-46**).

2.4.1.2. Concentrations en nutriments dans les eaux marines

2.4.1.2.1 Variabilité saisonnière

Les concentrations en ammonium sont caractérisées par un troisième quartile systématiquement inférieur à $4 \mu\text{mol/L}$ pour les trois radiales (Tableau 2). Elles peuvent être plus exceptionnellement supérieures à $10 \mu\text{mol/L}$ à Dunkerque et en Baie de Somme. Le cycle saisonnier est peu marqué, mais on relève des concentrations supérieures plutôt en fin d'année.

Tableau 2. Paramètres de tendance centrale et de dispersion pour la concentration en ammonium ($\mu\text{mol/L}$) pour les points des radiales de Dunkerque (DK1, DK3, DK4), de Boulogne-sur-Mer (BL1 à 3) et de la baie de Somme (Bif, Mimer, Atso, Mer1, Mer2) sur la période 1992-2014.

	Min	Q1	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Q3	Max	n
DK1	0,15	0,78	2,20	2,89	3,08	4,00	29,40	283
DK3	0,15	0,32	1,20	1,75	1,71	2,70	11,20	261
DK4	0,15	0,28	1,36	1,79	1,78	2,70	9,40	252
BL1	0,06	0,53	1,11	1,52	1,42	2,03	10,20	339
BL2	0,10	0,45	0,87	1,13	1,03	1,39	5,67	315
BL3	0,04	0,39	0,70	1,02	1,06	1,36	9,77	308
BIF	0,02	0,46	1,26	2,46	3,23	3,21	24,67	327
MIMMER	0,02	0,42	1,15	2,20	2,94	3,15	24,18	247
ATSO	0,02	0,40	0,95	2,19	3,83	2,75	30,70	326
MER 1	0,02	0,21	0,61	1,77	3,78	2,21	35,42	302
MER 2	0,05	0,15	0,47	1,35	2,86	1,29	33,06	296

Les concentrations en nitrite sont faibles et leur étude est rendue difficile en raison de l'aspect fugace de cet élément lors des réactions de nitrification / dénitrification. Les concentrations maximales sont inférieures à $4 \mu\text{mol/L}$ quelle que soit la radiale considérée (Tableau 3). Les valeurs sont plus élevées en début et en fin de cycle.

Tableau 3. Paramètres de tendance centrale et de dispersion pour la concentration en nitrite ($\mu\text{mol/L}$) pour les points des radiales de Dunkerque (DK1, DK3, DK4), de Boulogne-sur-Mer (BL1 à 3) et de la baie de Somme (Bif, Mimer, Atso, Mer1, Mer2) sur la période 1992-2014.

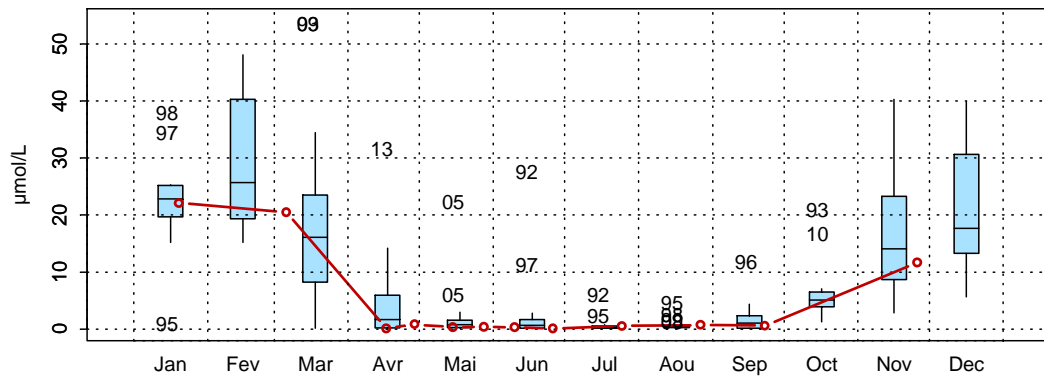
	<i>Min</i>	<i>Q1</i>	<i>Médiane</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart-type</i>	<i>Q3</i>	<i>Max</i>	<i>n</i>
DK1	0,02	0,10	0,29	0,42	0,45	0,58	2,84	278
DK3	0,01	0,05	0,21	0,33	0,36	0,51	2,40	262
DK4	0,02	0,05	0,20	0,35	0,44	0,50	3,78	253
BL1	0,04	0,10	0,22	0,30	0,27	0,42	1,92	336
BL2	0,01	0,08	0,19	0,28	0,29	0,40	2,03	317
BL3	0,01	0,07	0,21	0,31	0,37	0,40	3,69	310
BIF	0,01	0,19	0,39	0,50	0,48	0,61	3,86	324
MIMER	0,05	0,17	0,36	0,40	0,29	0,57	1,85	247
ATSO	0,01	0,13	0,28	0,35	0,29	0,49	1,98	321
MER 1	0,02	0,08	0,25	0,31	0,27	0,45	1,79	304
MER 2	0,01	0,06	0,21	0,28	0,27	0,43	2,04	295

La forme azotée majoritaire est donc l'azote nitrique (le nitrate) dont l'évolution saisonnière est très marquée avec des valeurs maximales en hiver, une rupture au printemps, entre mars et avril, pour tendre vers des concentrations minimales en période estivale (Tableau 4 et figure 50). Le gradient côte - large est plus ou moins important en fonction des saisons et des années mais il est toujours décroissant vers le large. Le schéma d'évolution saisonnière est donc le même pour les stations intermédiaires et du large de chaque radiale, bien que les amplitudes soient différentes.

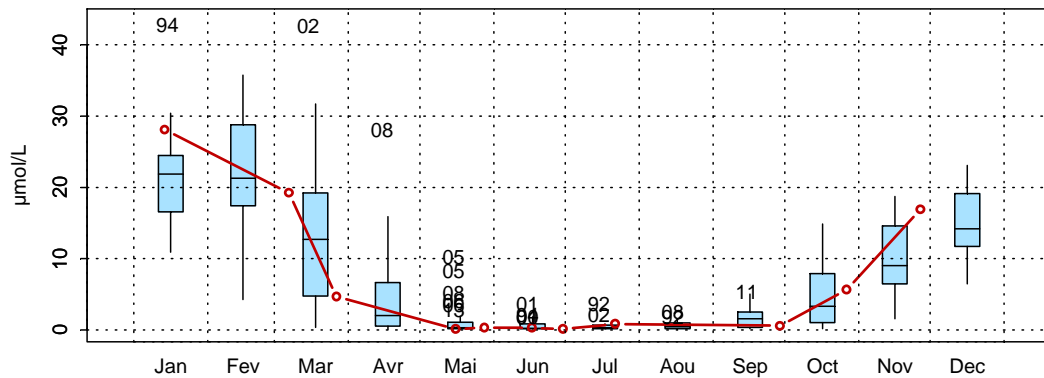
Tableau 4. Paramètres de tendance centrale et de dispersion pour la concentration en nitrate ($\mu\text{mol/L}$) pour les points des radiales de Dunkerque (DK1, DK3, DK4), de Boulogne-sur-Mer (BL1 à 3) et de la baie de Somme (Bif, Mimer, Atso, Mer1, Mer2) sur la période 1992-2014.

	<i>Min</i>	<i>Q1</i>	<i>Médiane</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart-type</i>	<i>Q3</i>	<i>Max</i>	<i>n</i>
DK1	0,10	0,50	2,40	9,18	12,00	15,57	54,01	262
DK3	0,05	0,15	2,15	7,07	9,20	11,83	39,80	260
DK4	0,05	0,30	2,20	6,72	8,60	11,10	40,64	249
BL1	0,05	0,30	1,89	7,00	9,15	11,97	43,31	320
BL2	0,05	0,15	1,57	5,92	7,55	11,02	43,78	313
BL3	0,05	0,15	1,71	5,26	7,19	8,62	63,64	305
BIF	0,05	2,75	12,06	17,47	18,37	27,01	132,31	321
MIMER	0,15	2,12	8,47	14,24	14,41	23,53	63,33	245
ATSO	0,05	1,69	6,60	12,18	13,09	20,03	56,09	316
MER 1	0,05	0,84	4,92	10,75	13,00	18,27	55,91	301
MER 2	0,05	0,55	3,31	9,39	11,47	16,48	50,90	293

1001022 - Point 1 Dunkerque - Variations saisonnières 2014 Azote nitrique (nitrate)
Boxplots calculés sur la période : 1992 - 2014



2003002 - Point 1 Boulogne - Variations saisonnières 2014 Azote nitrique (nitrate)
Boxplots calculés sur la période : 1992 - 2014



3006001 - At so - Variations saisonnières 2014 Azote nitrique (nitrate)
Boxplots calculés sur la période : 1992 - 2014

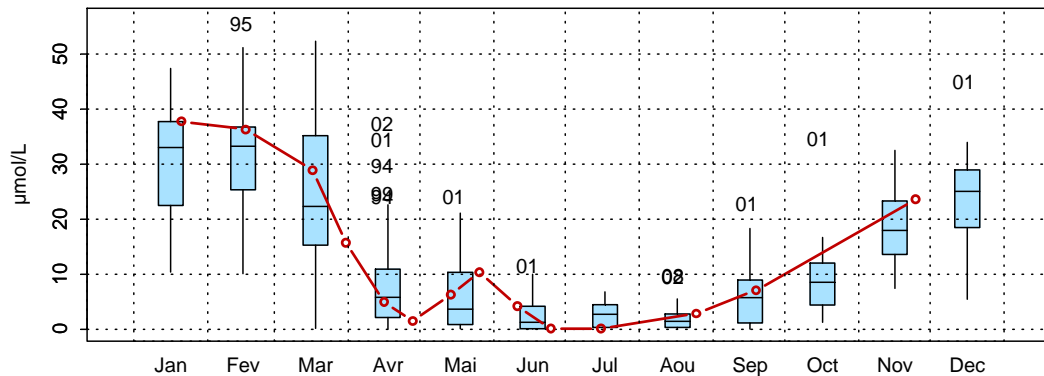


Figure 50. Boîtes de dispersion pour la concentration en nitrate ($\mu\text{mol/L}$) pour le point côtier des radiales de Dunkerque (DK1), de Boulogne-sur-Mer (BL1) et de la baie de Somme (Atso) pour la période 1992-2014 (En rouge : évolution de la concentration pour l'année 2014 ; xx : année exceptionnelle pour le mois considéré).

Les concentrations en phosphate sont généralement plus élevées en début et en fin d'année (automne, hiver) (Tableau 5 et figure 51). Une chute des concentrations s'observent souvent entre le mois de février et le mois de mars. Les valeurs estivales sont faibles. Le gradient côte - large est décroissant.

Tableau 5. Paramètres de tendance centrale et de dispersion pour la concentration en phosphate ($\mu\text{mol/L}$) pour les points des radiales de Dunkerque (DK1, DK3, DK4), de Boulogne-sur-Mer (BL1 à 3) et de la baie de Somme (Bif, Mimer, Atso, Mer1, Mer2) sur la période 1992-2014.

	<i>Min</i>	<i>Q1</i>	<i>Médiane</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart-type</i>	<i>Q3</i>	<i>Max</i>	<i>n</i>
DK1	0,05	0,20	0,46	0,61	0,75	0,80	9,80	278
DK3	0,05	0,20	0,43	0,52	0,38	0,78	2,00	261
DK4	0,05	0,20	0,45	0,52	0,42	0,75	2,69	251
BL1	0,05	0,15	0,30	0,46	0,43	0,66	3,10	336
BL2	0,05	0,15	0,34	0,46	0,40	0,69	2,40	317
BL3	0,05	0,16	0,36	0,44	0,37	0,61	2,30	309
BIF	0,05	0,19	0,40	0,95	2,53	0,87	31,50	319
MIMER	0,05	0,20	0,42	0,59	0,57	0,83	4,73	246
ATSO	0,05	0,13	0,29	0,45	0,43	0,66	3,03	321
MER 1	0,05	0,13	0,30	0,47	0,49	0,70	3,46	303
MER 2	0,05	0,10	0,31	0,45	0,49	0,67	3,32	297

Le cycle saisonnier de la concentration en silicate est très marqué avec des valeurs importantes en début et en fin d'année et des concentrations minimales en période estivale (Tableau 6 et figure 52) faisant suite à une chute brutale des concentrations entre février et mars. Le gradient côte - large est décroissant. Le schéma d'évolution saisonnière est le même pour les stations intermédiaires et au large de chaque radiale, bien que les amplitudes soient différentes.

Tableau 6. Paramètres de tendance centrale et de dispersion pour la concentration en silicate ($\mu\text{mol/L}$) pour les points des radiales de Dunkerque (DK1, DK3, DK4), de Boulogne-sur-Mer (BL1 à 3) et de la baie de Somme (Bif, Mimer, Atso, Mer1, Mer2) sur la période 1992-2014.

	<i>Min</i>	<i>Q1</i>	<i>Médiane</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart-type</i>	<i>Q3</i>	<i>Max</i>	<i>n</i>
DK1	0,10	1,13	3,40	5,42	6,00	7,21	35,20	279
DK3	0,10	0,40	1,60	3,48	4,58	4,39	26,00	261
DK4	0,10	0,40	1,65	3,37	4,32	4,67	25,90	253
BL1	0,10	0,29	1,59	3,29	4,01	4,62	19,01	335
BL2	0,10	0,10	1,47	2,67	3,22	3,91	18,90	315
BL3	0,10	0,10	1,59	2,44	2,89	3,55	16,50	308
BIF	0,10	1,65	4,14	8,41	10,58	12,81	108,78	323
MIMER	0,10	1,30	4,42	7,18	7,49	11,41	32,10	247
ATSO	0,10	1,03	3,67	6,39	6,96	10,20	41,00	322
MER 1	0,10	0,72	3,03	5,28	5,96	8,11	32,27	304
MER 2	0,10	0,59	2,34	4,52	5,54	6,78	45,78	298

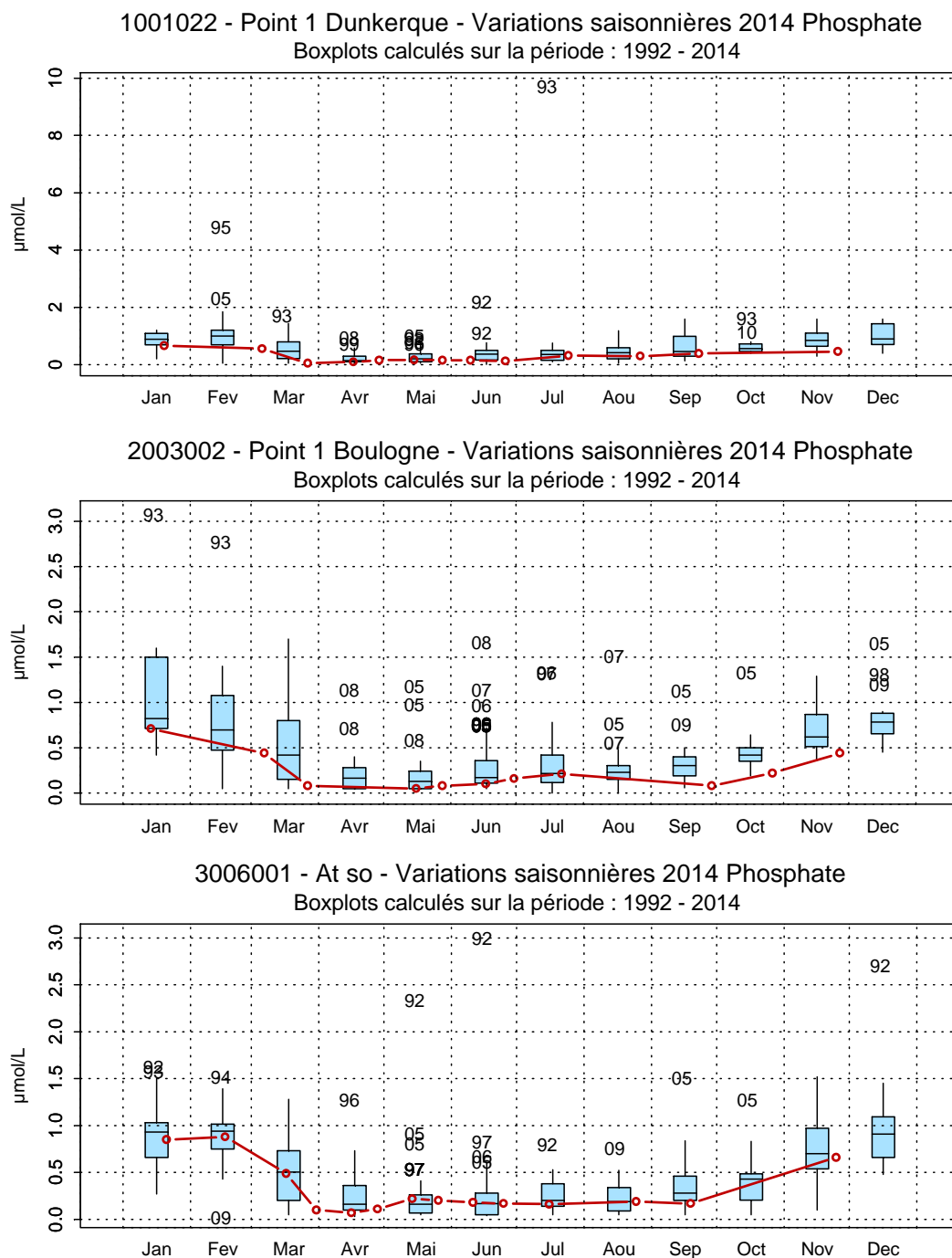


Figure 51. Boîtes de dispersion pour la concentration en phosphate ($\mu\text{mol/L}$) pour le point côtier des radiales de Dunkerque (DK1), de Boulogne-sur-Mer (BL1) et de la baie de Somme (Atso) pour la période 1992-2014 (En rouge : évolution de la concentration pour l'année 2014 ; xx : année exceptionnelle pour le mois considéré).

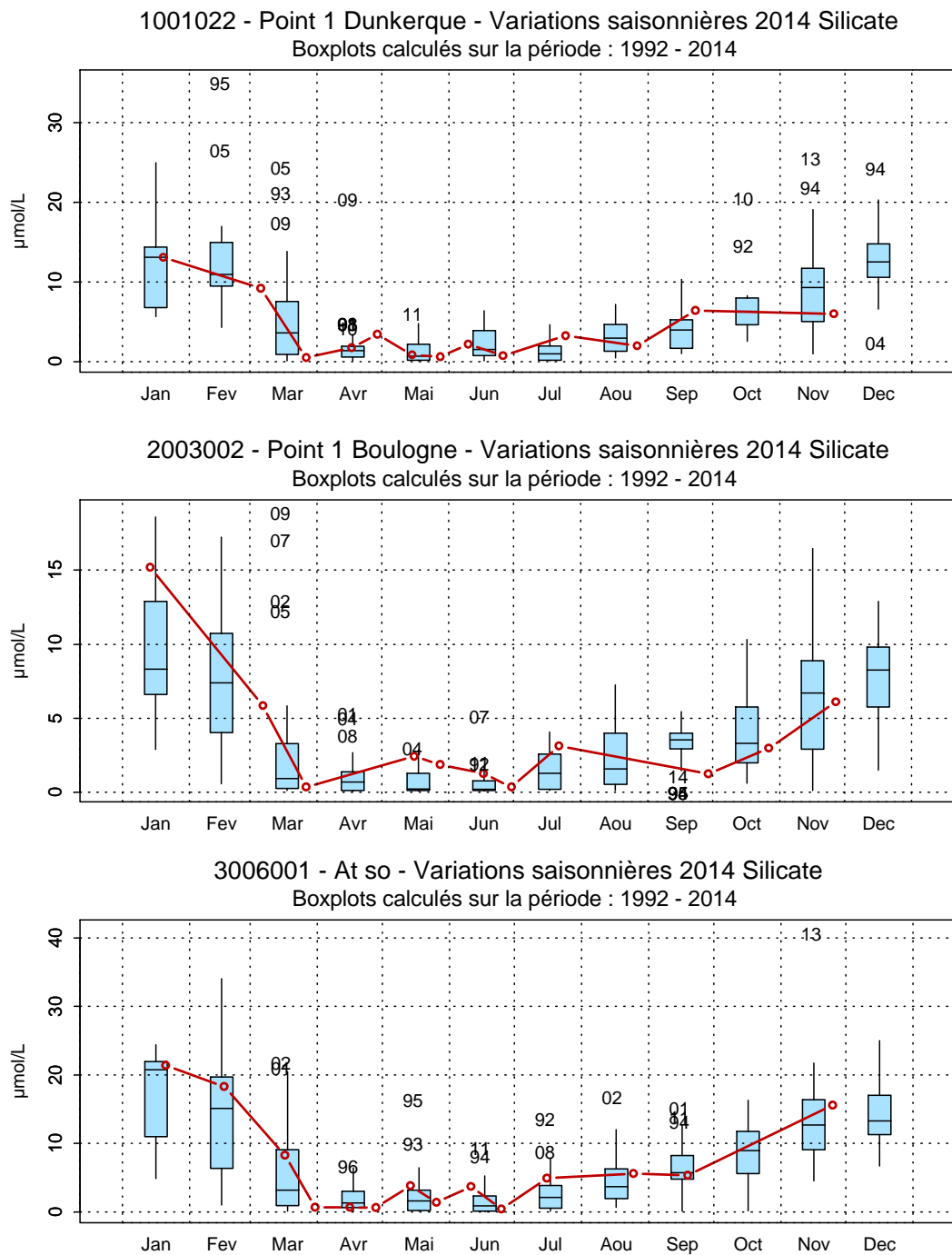


Figure 52. Boîtes de dispersion pour la concentration en silicate ($\mu\text{mol/L}$) pour le point côtier des radiales de Dunkerque (DK1), de Boulogne-sur-Mer (BL1) et de la baie de Somme (Atso) pour la période 1992-2014 (En rouge : évolution de la concentration pour l'année 2014 ; xx : année exceptionnelle pour le mois considéré).

2.4.1.2.2 Limitation potentielle de la croissance du phytoplancton par les nutriments

En dehors du suivi de l'évolution des concentrations en nutriments, les rapports Si/N ou N/P sont calculés afin d'aborder la notion de limitation potentielle de la production de biomasse. En effet, selon Redfield *et al.* (1963) et Brzezinski (1985), la composition élémentaire du phytoplancton en carbone : azote : silice : phosphore (C : N : Si : P) est proche de 106 : 16 : 16 : 1. Le rapport N/P dans le phytoplancton serait donc égal à 16 et le rapport Si/N serait égal à 1. Il est généralement accepté que le rapport molaire entre l'azote et le phosphore (N/P) dans l'eau de mer est approximativement le même que dans le phytoplancton, ce qui permet alors une croissance « optimale » du phytoplancton. Si le rapport N/P est inférieur à 16, l'azote est alors potentiellement en carence dans le milieu et la croissance du phytoplancton peut alors être limitée. Inversement, si le rapport N/P est supérieur à 16, le phosphore est alors potentiellement limitant pour la croissance du phytoplancton. De même, si le rapport Si/N est inférieur à 1, le silicate est alors potentiellement en carence dans le milieu et la croissance du phytoplancton (les diatomées) peut alors être limitée. Au contraire, si le rapport Si/N est supérieur à 1, l'azote est alors potentiellement en carence dans le milieu et la croissance du phytoplancton peut alors être limitée. A titre d'exemple, les limitations potentielles au cours de l'année 2014 sont présentées sur la figure 53.

Notre zone atelier est donc caractérisée par des limitations potentielles par la silice, le phosphate, et plus rarement par l'azote en raison de sa présence en excès. Comme le soulignent Elser *et al.* (2007) dans leur méta-analyse des réponses des écosystèmes aux apports de nutriment, il apparaît que ce sont les effets synergétiques des enrichissements combinés en azote et en phosphore qui vont être déterminants. La silice joue inévitablement un rôle essentiel comme support à la croissance des diatomées. Plutôt qu'une simple dépendance aux modifications des concentrations en nutriments, ce sont les rapports et les formes de nutriments qui vont pouvoir expliquer les efflorescences phytoplanctoniques en général, et les efflorescences des taxons nuisibles en particulier. En effet, certaines études suggèrent que la quantité et le taux de production de toxines seraient fortement liés aux rapports des nutriments (Fehling *et al.*, 2004 ; Graneli *et al.*, 2006). Davidson *et al.* (2012) remettent en question cette hypothèse quant à l'importance des rapports des nutriments et suggèrent que ce sont les concentrations estivales de nutriments plutôt que les ratios qui vont être déterminants pour le contrôle de l'abondance phytoplanctonique, sans forcément favoriser les efflorescences nuisibles. Dans la mesure où les efflorescences majeures de *Phaeocystis* et de *Pseudo-nitzschia* ont lieu au printemps dans notre zone atelier (voir section 2.4.2.), cette généralisation n'est pas acceptable.

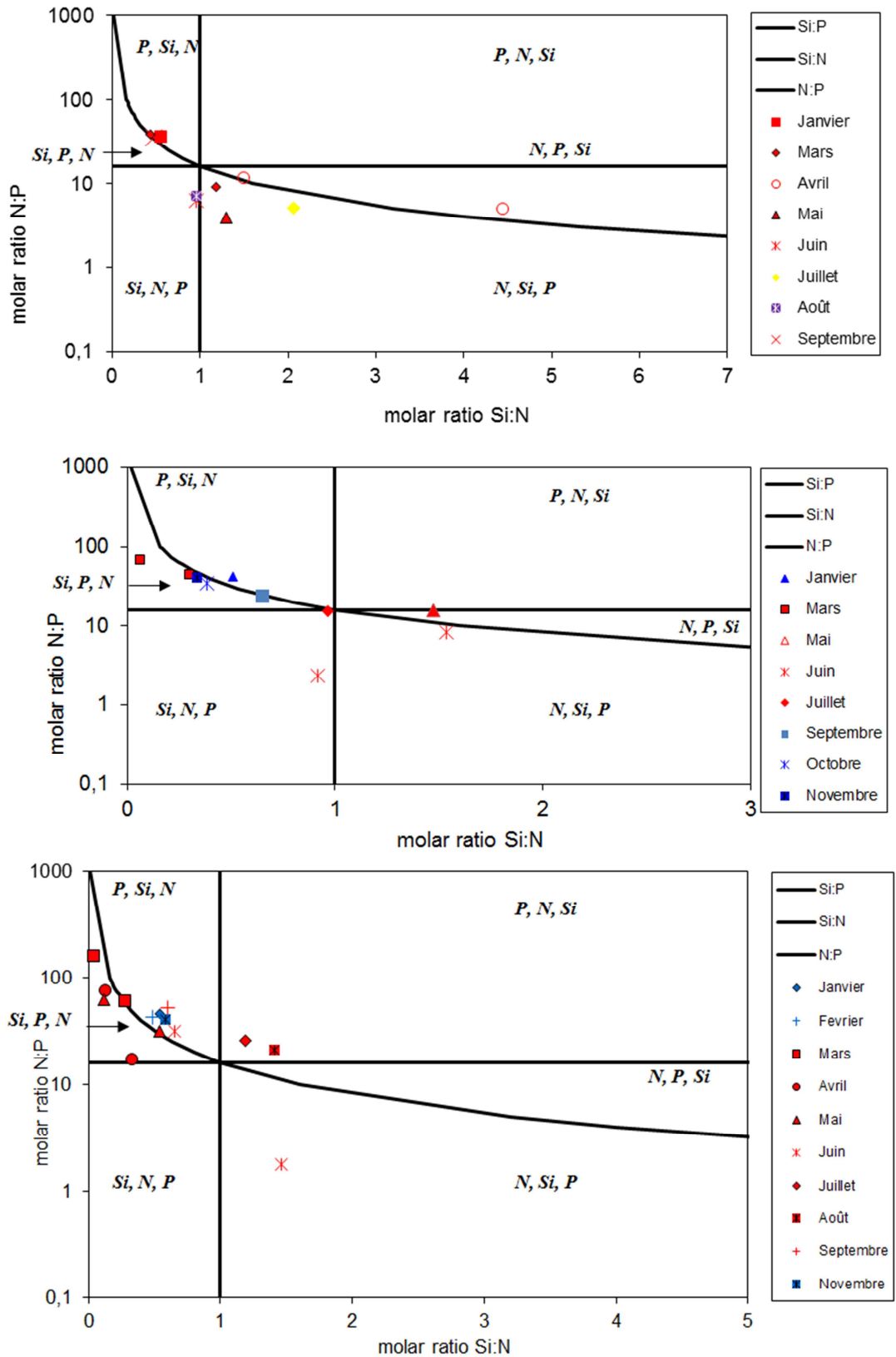


Figure 53. Évolution temporelle des éléments limitants pour le point côtier, de haut en bas, des radiales de Dunkerque (DK1), de Boulogne-sur-Mer (BL1) et de la baie de Somme (Atso) en 2014 (Chaque cadran définit une zone de limitation potentielle de la croissance du phytoplancton par N, P et Si dans l'ordre indiqué).

Cependant, cette approche basée sur les rapports de nutriments peut être critiquée puisque la limitation dépend de la composition phytoplanctonique, de la cinétique et des taux de régénération des nutriments (Del Amo *et al.*, 1997 ; Loyer *et al.*, 2006). C'est pourquoi Lefebvre *et al.* (2011) (**Art-6.**) proposent de confirmer ces résultats en considérant les constantes de demi-saturation bien que les valeurs proposées dans la littérature pour les populations phytoplanctoniques naturelles couvrent une vaste gamme de valeurs. Ainsi, pour les espèces marines, les constantes de demi-saturation varient entre 1 et 2 $\mu\text{mol/L}$ pour l'azote inorganique dissous (DIN), entre 0,1 et 0,5 $\mu\text{mol.l}^{-1}$ pour le phosphate et entre 1 et 5 $\mu\text{mol.l}^{-1}$ pour la silice (Escaravage *et al.*, 1999). Dans notre étude, les concentrations en phosphate sont fréquemment en-dessous ou proches du seuil de 1 $\mu\text{mol.l}^{-1}$ et suivent un gradient sud-nord croissant de la baie de Somme à Dunkerque. Afin de compléter cette étude, il serait souhaitable de considérer les possibilités d'utilisation de l'urée comme source d'azote pour le phytoplancton (Gentilhomme et Lizon, 1998) et, d'envisager également la prise en compte de la forme particulière du phosphore très sensible aux phénomènes d'absorption/désorption des sédiments, ainsi que des activités phosphatases alcalines qui sont considérées comme une voie alternative d'apport en phosphore pour *Phaeocystis globosa* (Lamy *et al.*, 2009).

2.4.1.2..3 Variabilité interannuelle, ruptures et tendances à long-terme

Lefebvre *et al.* (2011) (**Art-6.**) proposent une analyse des ruptures et des tendances pour les concentrations en nutriments pour la période 1992-2007 basée sur une méthode d'analyse simple et intuitive, la méthode des sommes cumulées (Ibanez *et al.*, 1993). Dans les eaux côtières de Dunkerque, la concentration en azote inorganique dissous (DIN) présente une tendance à la décroissance depuis les années 90 (Figure 54A). Les concentrations maximales en phosphate sont particulièrement importantes en 1993 et 1995, puis en 2005, et il n'apparaît pas de tendance monotone linéaire (Figure 54B). L'évolution de la concentration en silicate se fait par paliers avec des concentrations moyennes entre 1992 et 1994, en 2003, 2004, 2006 et 2007, puis supérieures à la moyenne de la série entre 1995 et 1999, en 2005 (Figure 54C).

Dans les eaux côtières de Boulogne-sur-Mer, la concentration en DIN est plutôt moyenne entre 1992 et 2001, puis inférieure à la moyenne entre 2003 et 2007, en dehors des augmentations importantes constatées en 1994 et 2002 (Figure 55A). La concentration en phosphate diminue entre 1992 et 2004, alors que les valeurs de 2005 à 2007 sont plutôt supérieures à la moyenne (Figure 55B). Le schéma d'évolution de la concentration en silicate est tel qu'il existe deux paliers, entre 1992 et 2000 puis entre 2001 et 2007, avec respectivement, des valeurs inférieures puis supérieures à la moyenne 1992-2007 (Figure 55C).

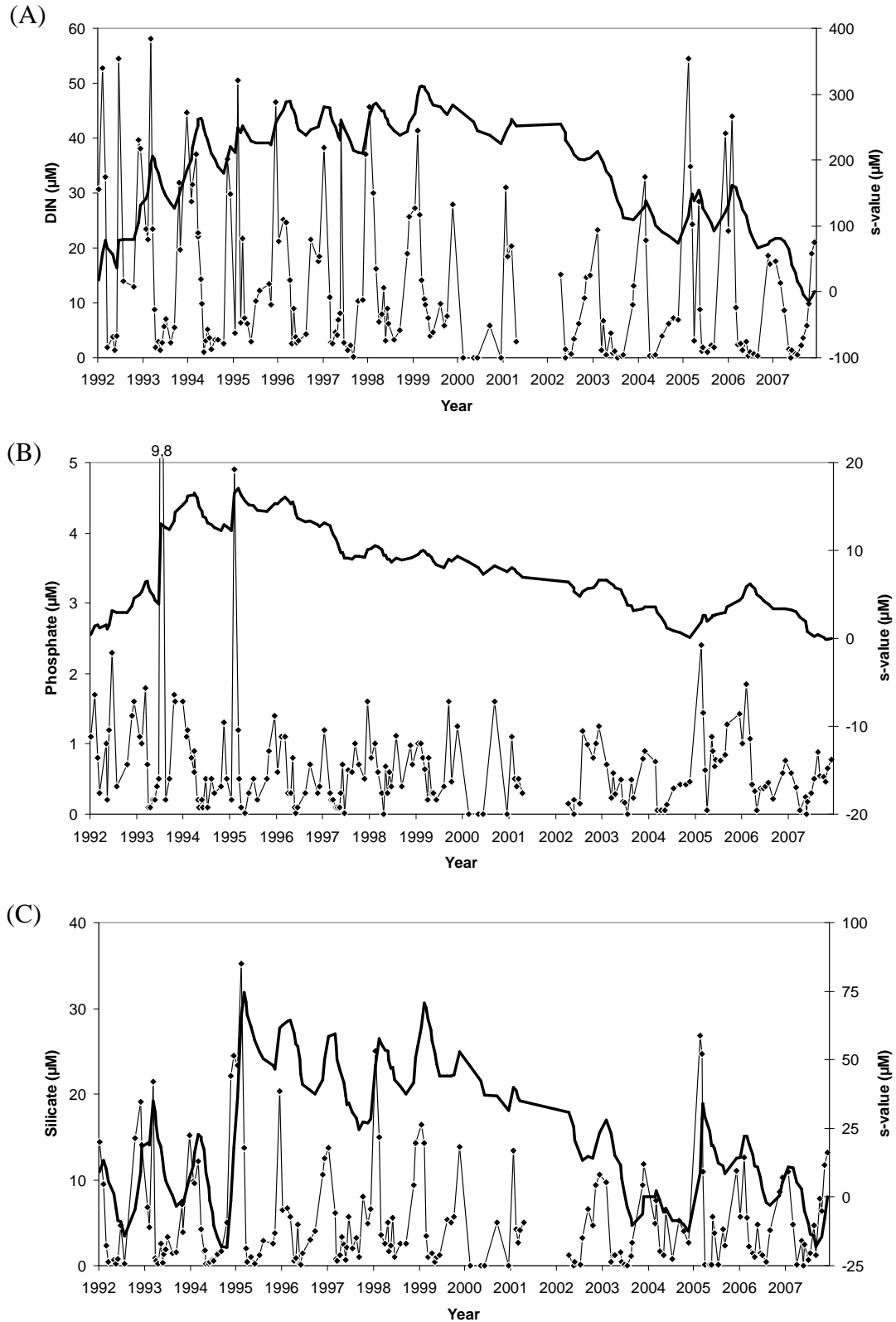


Figure 54. Évolution temporelle (1992-2007) de (A) la concentration en azote inorganique dissous (DIN en $\mu\text{mol.l}^{-1}$), (B) la concentration en phosphate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$), et (C) la concentration en silicate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) à la station côtière de la radiale de Dunkerque. Points et traits fins : série brute ; trait épais : courbe de la somme cumulée. L'axe de droite correspond aux s-values de la fonction cumulative dans la même unité que le paramètre considéré.

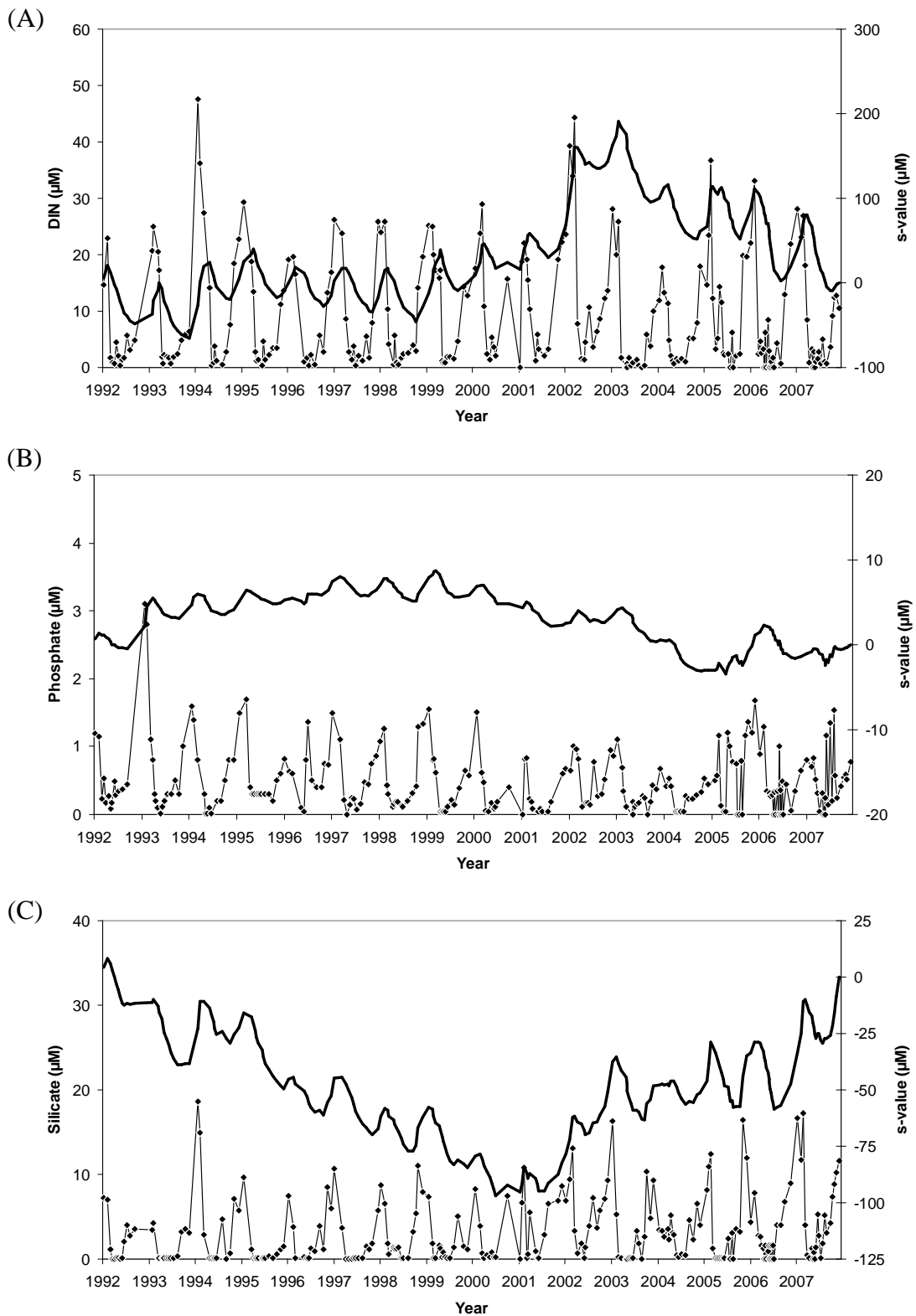


Figure 55. Évolution temporelle (1992-2007) de (A) la concentration en azote inorganique dissous (DIN en $\mu\text{mol.l}^{-1}$), (B) la concentration en phosphate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$), et (C) la concentration en silicate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) à la station côtière de la radiale de Boulogne-sur-Mer.

Points et traits fins : série brute ; trait épais : courbe de la somme cumulée. L'axe de droite correspond aux s-values de la fonction cumulative dans la même unité que le paramètre considéré.

Au niveau de la station côtière de la radiale de la baie de Somme, l'évolution de la concentration en DIN se fait par palier, avec des concentrations supérieures à la moyenne 1992-2007 entre 1992 et 1997, entre 1999 et 2002, et des concentrations inférieures à la moyenne en 1998, puis de 2003 à 2007 (Figure 56A). Les concentrations en phosphate sont très importantes en 1992 et 1993, légèrement supérieures à la moyenne en 1994 et 1995, puis elles sont moyennes pour le reste de la série. La fin de l'année 2005 est marquée par des concentrations élevées (Figure 56B). L'évolution de la concentration en silicate est marquée par une succession de paliers, avec des valeurs supérieures à la moyenne 1992-2007 entre 1993 et 1995, entre 2000 et 2002, des valeurs moyennes en 1992, 2006 et 2007, puis des valeurs inférieures à la moyenne entre 1996 et 1999, et entre 2002 et 2005 (Figure 56C).

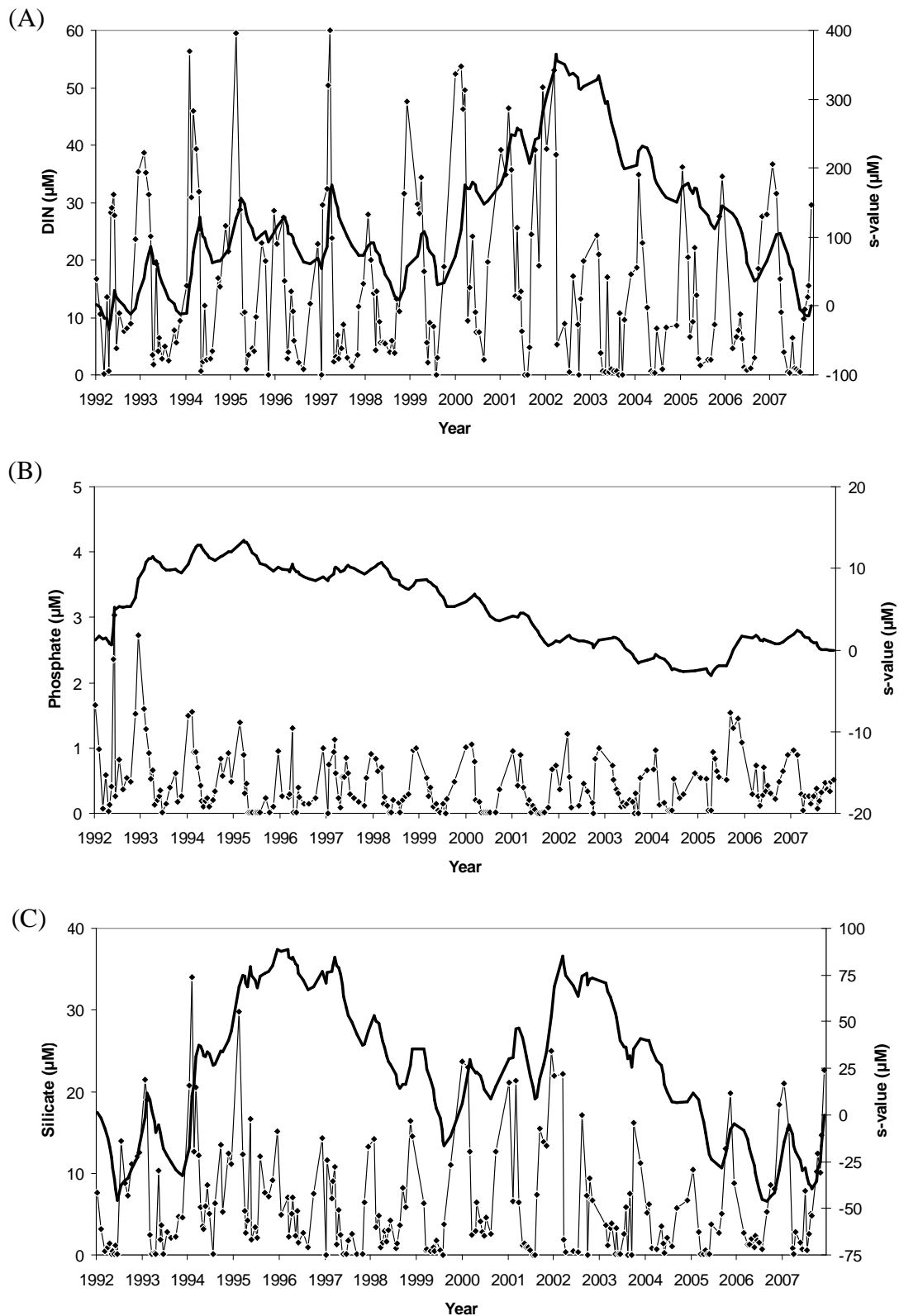


Figure 56. Évolution temporelle (1992-2007) de (A) la concentration en azote inorganique dissous (DIN en $\mu\text{mol.l}^{-1}$), (B) la concentration en phosphate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$), et (C) la concentration en silicate ($\mu\text{mol.l}^{-1}$) à la station côtière de la radiale de la baie de Somme.

Points et traits fins : série brute ; trait épais : courbe de la somme cumulée. L'axe de droite correspond aux s-values de la fonction cumulée dans la même unité que le paramètre considéré.

La politique de l'eau pour réguler les usages comme pour limiter les pollutions vers le milieu marin (dont les apports de nutriments) engagée depuis plusieurs décennies se traduit par des dizaines de mesures réglementaires dont la Directive Nitrate (91/676/CE), la Directive Eaux Résiduaires Urbaines (91/271/CE), la Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/CE) et plus récemment de la Directive Cadre sur l'Eau (2008/56/CE). Des stratégies de lutte contre l'eutrophisation, en particulier, sont également mises en œuvre dans le cadre de conventions comme la convention d'Oslo et de Paris (OSPAR) pour l'Atlantique nord-est. L'analyse de la série temporelle REPHY/SRN 1992-2007 réalisée par Lefebvre *et al.* (2011) (**Art-6.**) à l'échelle des radiales de Dunkerque, de Boulogne-sur-Mer et de la baie de Somme permet de mettre en évidence une diminution des concentrations en phosphore au niveau de ces systèmes et traduit donc l'efficacité des mesures de réduction de ce type d'apports, alors que l'évolution à long-terme des concentrations en silicate et en nitrate est plus complexe, sans réelle tendance monotone linéaire.

La tendance à la diminution des concentrations en phosphore a été observée à l'échelle de la zone OSPAR avec dans la plupart des cas atteinte dès 1995 de l'objectif de réduction de 50 % des apports de phosphore par rapport au niveau de 1985 (OSPAR, 2008a, b).

Le cycle global du silicium en milieu marin est régi par les flux entre réservoir dissous et réservoir particulaire (composante géologique = la silice lithogénique + composante biogéochimique = la silice biogène) (Quéguiner, 2016). Les apports de silice ne sont pas sous influence directe des activités humaines (sauf si un barrage vient à être installé dans un système à écoulement libre) puisqu'ils résultent majoritairement de l'érosion des roches. Ainsi, l'évolution par paliers observée pour les trois sites peut être liée à une évolution des débits des rivières adjacentes et/ou à des processus biologiques modifiant les communautés phytoplanctoniques donc les flux de silice biogène (depuis le bassin versant jusqu'en zone marine). L'eutrophisation dans les rivières peut en effet provoquer des rétentions de silice lors de la prolifération de diatomées et limiter ainsi les apports de silice en zone côtière lors de certaines périodes. Au contraire l'amélioration de la qualité de l'eau sur le bassin versant peut provoquer une augmentation des flux de silice vers la zone côtière. Ce type de schéma a été observé dans la baie sud de la mer du Nord, entre la Belgique et le Danemark, zone également de type ROFI sous influence de l'Escaut, de la Meuse, du Rhin, de l'Elbe (Prins *et al.*, 2012).

Pour le nitrate, l'absence de tendance décroissante, comme de l'atteinte de l'objectif de réduction de 50 % des apports (OSPAR, 2008a, b), est confirmée à grande échelle malgré les politiques de réduction de ces apports et s'explique par la complexité de la régulation des pertes en nutriments vers les eaux de surface liées aux activités domestiques, industrielles mais surtout agricoles (OSPAR, 2010). Cette absence de réponse s'explique également par un délai de réaction entre la mise en œuvre des mesures et la réponse de l'environnement, l'hystérésis, pouvant être de l'ordre de 10 à 30 ans en fonction des estimations et des écosystèmes considérés (OSPAR, 2009). Nous savons également que les variations climatiques et les changements globaux peuvent aussi contribuer à l'introduction d'une certaine incertitude quant à l'efficacité des mesures de gestion.

2.4.1.2..4 Apports atmosphériques de nutriments

La Manche et la mer du Nord apparaissent également comme des zones soumises à des apports conséquents d'azote via les retombées atmosphériques (Figure 57) (Paerl *et al.*, 2000 ; De Leeuw *et al.*, 2003).

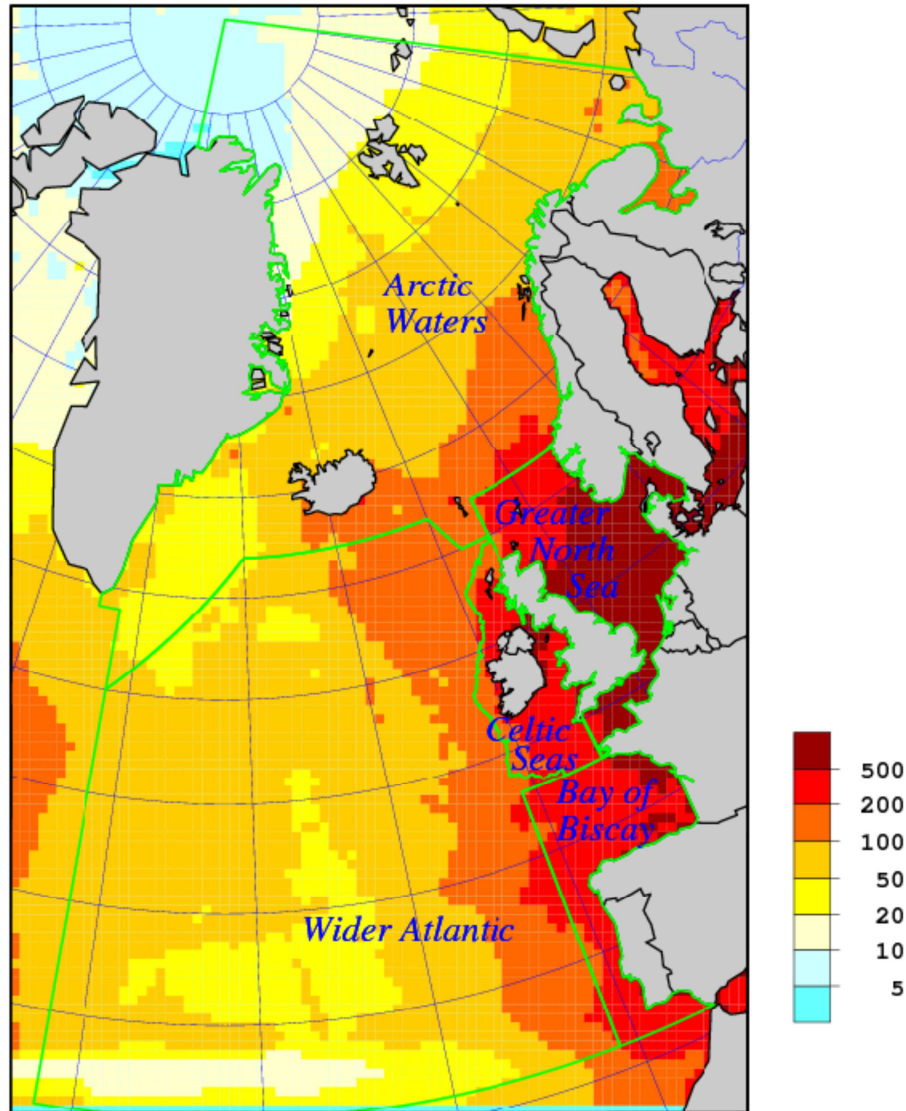


Figure 57. Modélisation des apports annuels d'azote total (oxydé et réduit) au niveau des zones OSPAR en 2004 (Unité : mg N.m⁻²) (Source : OSPAR, 2007).

Dans le cadre du chantier PNEC (CNat-1.), Boulart *et al.* (2006) (Art-4.) à partir de résultats acquis en 2003 et 2004 montrent une forte variabilité des concentrations en nutriments dans les eaux de pluie (0,1 à 52,1 µM DIN ; 0,1 à 4,2 µM DIP ; 0,1 à 5,2 µM Si) à l'échelle saisonnière. Les apports d'azote atmosphérique sont les plus importants en avril, mai et octobre 2003, c'est à dire lors de périodes caractérisées par des épisodes pluvieux faisant suite à des périodes plus sèches, favorisant ainsi l'accumulation des composés de l'azote dans la troposphère, qui seront alors lessivés par les précipitations. Lors de ces épisodes, typiquement anticycloniques, les vents sont faibles et de secteur nord-est ce qui favorisent les apports via le continent (activités industrielles et agricoles). Ces apports atmosphériques se produisent lorsque les concentrations en nutriments dans l'eau sont faibles, ce qui implique qu'ils peuvent contribuer au

développement phytoplanctonique. Boulart *et al.* (2006) (**Art-4.**) calculent que, respectivement, 60 % et 80 % des dépôts atmosphériques d'azote et de phosphore se produisent au cours de ces trois mois et qu'ils contribuent ainsi à la production primaire totale annuelle à hauteur de 3 %. Dans la baie sud de la mer du Nord, De Leeuw *et al.* (2003) estime cette contribution à 5,5 % alors qu'en méditerranée, elle est comprise entre 3 et 6 % (Guerzoni *et al.*, 1999). Récemment, Djambazov et Pericleous (2015) confirment que les apports atmosphériques de nutriments contribuent à accentuer l'eutrophisation en Manche orientale et en baie sud de la mer du Nord. A l'échelle du détroit du Pas-de-Calais, cette contribution atmosphérique doit faire l'objet d'une attention particulière en raison d'une circulation maritime qui est l'une des plus importantes du monde avec jusqu'à 800 navires par jour, qui ne peuvent que contribuer significativement à ces apports via les fumées de combustion issues du fonctionnement des moteurs.

2.4.2. Le phytoplancton

2.4.2.1. Biomasse phytoplanctonique

2.4.2.1.1 Variabilité saisonnière

La biomasse du phytoplancton est historiquement estimée via un proxy : la concentration en chlorophylle-*a* (Chl-*a*), qui représente une mesure simple et intégrative de la réponse de la communauté phytoplanctonique à un enrichissement par les nutriments (Buchanan, 1910 ; Harding, 1994 ; Devlin *et al.*, 2007). Lefebvre *et al.* (2011) (**Art-6.**) définissent les caractéristiques et les schémas de variations saisonnières de la chl-*a* en Manche orientale et en baie sud de la mer du Nord pour la période 1992-2007. Nous proposons ici d'étendre la période d'étude à 1992-2014 afin d'intégrer le maximum de variabilité interannuelle. Ainsi, l'évolution saisonnière de cette concentration est très marquée et la dynamique est sensiblement la même entre les trois sites étudiés, bien que les niveaux atteints puissent être très différents. Les valeurs sont faibles en janvier et février, puis augmentent brutalement en mars pour atteindre leur maximum en avril. Les plus fortes concentrations ($> 50 \text{ mg.m}^{-3}$) sont observées en baie de Somme, viennent ensuite les sites de Dunkerque puis de Boulogne-sur-Mer où le maximum de chl-*a* est le plus faible ($< 30 \text{ mg.m}^{-3}$) (Tableau 7). La concentration chute ensuite progressivement pour atteindre un minimum en fin de période estivale. Une augmentation moins importante peut être observée en automne (Figure 58). Ce schéma d'évolution peut être différent d'une année sur l'autre aussi bien en termes de dynamique que d'amplitude, ce qui est illustré par l'évolution de la concentration en chlorophylle-*a* de 2014 projetée sur la typologie 1992-2013 de la figure 58.

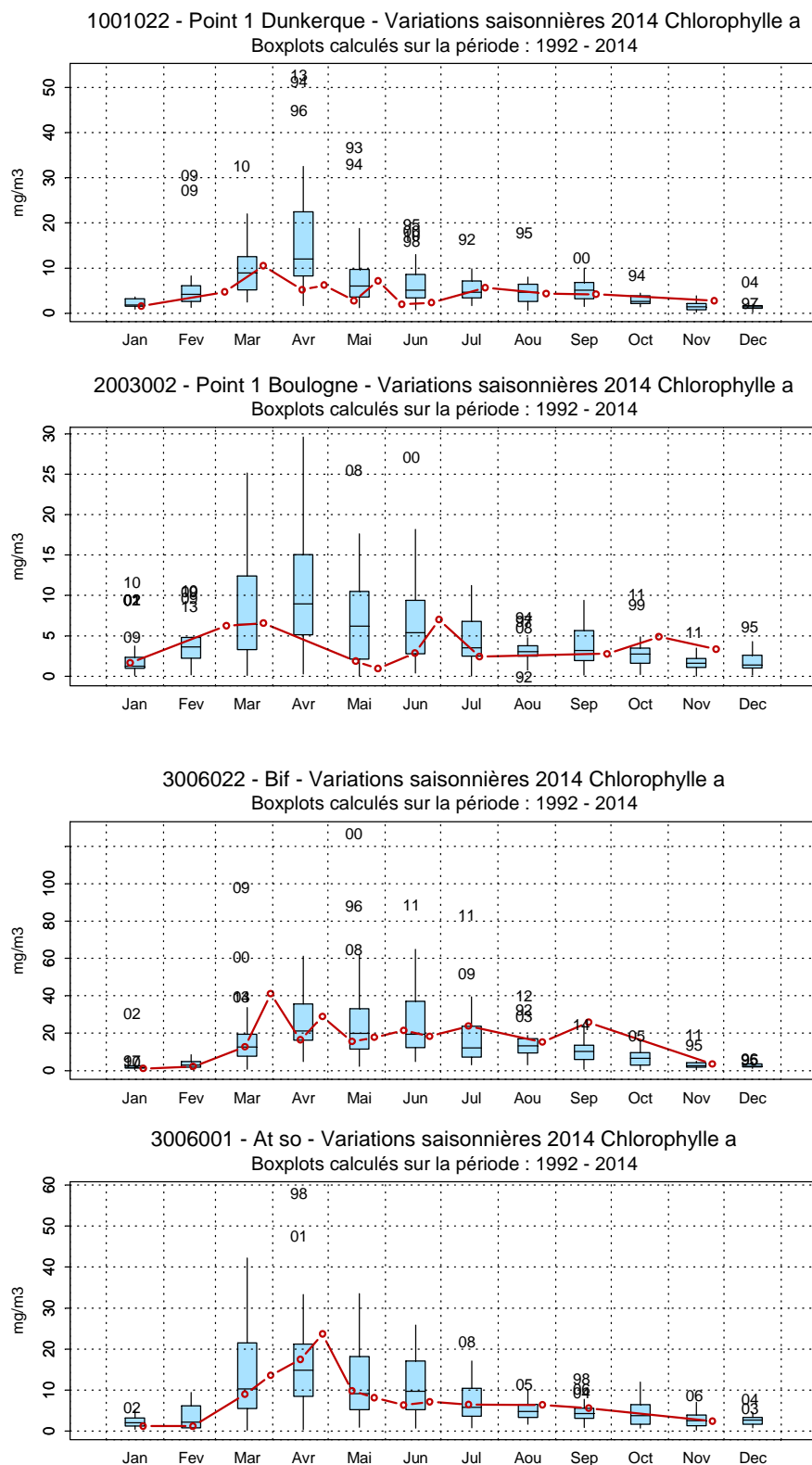


Figure 58. Boîtes de dispersion pour la concentration en chlorophylle-a ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) pour le point côtier des radiales de Dunkerque (DK1) et de Boulogne-sur-Mer (BL1), pour les points estuarien (Bif) et côtier (Atso) de la baie de Somme pour la période 1992-2014 (En rouge : évolution de la concentration pour l'année 2014 ; xx : année exceptionnelle pour le mois considéré).

Tableau 7. Paramètres de tendance centrale et de dispersion pour la concentration en chlorophylle-*a* ($\mu\text{g.l}^{-1}$) pour les points des radiales de Dunkerque (DK1, DK3, DK4), de Boulogne-sur-Mer (BL1 à 3) et de la baie de Somme (Bif, Mimer, Atso, Mer1, Mer2) sur la période 1992-2014.

	Min	Q1	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Q3	Max	n
DK1	0,24	2,54	4,84	7,31	7,94	8,89	53,18	288
DK3	0,26	2,09	3,55	5,71	5,69	7,27	31,00	260
DK4	0,05	1,54	2,70	3,97	4,00	4,71	29,20	252
BL1	0,05	1,76	3,53	5,49	5,15	7,83	29,60	325
BL2	0,05	1,20	2,42	3,64	3,57	4,75	19,22	312
BL3	0,05	0,80	1,39	2,27	2,43	2,70	16,32	303
BIF	0,32	4,73	12,18	16,87	17,71	20,86	128,16	321
MIMMER	0,19	4,01	8,85	13,40	13,65	18,23	79,28	245
ATSO	0,21	2,99	5,89	8,66	8,37	11,32	58,53	330
MER 1	0,08	2,24	4,97	6,86	6,44	9,14	39,15	303
MER 2	0,05	2,35	4,64	6,34	5,77	8,55	34,60	296

Les schémas d'évolution saisonnière de la chl-*a*, donc de la biomasse phytoplanctonique, proposés ici sont conformes aux schémas définis, par exemple, par Joint et Pomroy (1993), Breton *et al.* (2000), Schapira *et al.* (2008), Grattepanche *et al.* (2010). Il faut cependant noter que leurs conclusions sont tirées, la plupart du temps, de séries plus courtes, voire d'études ponctuelles, limitées dans le temps comme dans l'espace. Nos résultats intègrent à la fois la variabilité spatiale par l'étude de trois systèmes contrastés et la variabilité temporelle en se basant sur plus de vingt années de données. On peut également noter que cette dynamique d'évolution saisonnière de la biomasse phytoplanctonique n'apparaît pas si différente que cela entre des études menées au début des années 90 et celles faites plus récemment, alors que tout laisse penser que l'environnement est en train de subir des changements majeurs en réponse aux forçages anthropiques et au changement global. Les modifications peuvent ainsi ne pas être visibles en raison de la résolution insuffisante des programmes d'observation et/ou du fait que le patron de variation de la biomasse phytoplanctonique pourrait être sensiblement le même mais que les changements majeurs se feraient au niveau de la structure de la communauté.

2.4.2.1..2 Variabilité interannuelle, ruptures et tendances à long-terme

L'évolution à long-terme de la concentration en chlorophylle-*a* est sensiblement différente entre les trois radiales (Lefebvre *et al.*, 2011- **Art-6**). En zone côtière de Dunkerque, la tendance est à une diminution de cette concentration depuis le milieu des années 90, ce qui n'exclut pas la détection de concentrations maximales printanières particulièrement élevées ($> 20 \mu\text{g.l}^{-1}$) au cours des années 1993, 1994, 1996, 1999, 2001 et 2007 (Figure 59A). Dans la zone de Boulogne-sur-Mer, on peut observer une rupture au niveau de l'année 1998 qui correspond à une limite entre deux périodes, avec respectivement des concentrations inférieures puis supérieures à celles de la moyenne de la série (Figure 59B). Les valeurs les plus élevées ($> 20 \mu\text{g.l}^{-1}$) sont observées au cours des printemps 1994, 2000 et 2003. En zone côtière de la baie de Somme, l'année 1998 apparaît également être une année charnière séparant deux périodes avec, respectivement, des concentrations inférieures puis supérieures à la moyenne de la série

(Figure 59C). De fortes concentrations ($> 30 \mu\text{g.l}^{-1}$) sont mesurées aux cours des printemps 1993, 1994, 1998, 2001, 2002 et 2003.

Afin de mieux appréhender la dynamique à plus grande échelle et de remettre les données stationnelles dans un contexte environnemental plus large, les estimations de la concentration en chlorophylle-*a* obtenues à partir des mesures faites par satellite via le capteur MODIS (Gohin *et al.*, 2002, Gohin *et al.*, 2008 (**Art-5.**)) sont couramment utilisées pour obtenir une représentation à une échelle moins régionale et ainsi pouvoir situer les phénomènes observés lors des cycles de surveillance et pour chaque radiale à l'échelle de fonctionnement de l'écosystème de la Manche et de la baie sud de la mer du Nord. Un certain nombre d'images satellites ont été sélectionnées pour illustrer cette dynamique (Figure 60). Une couverture nuageuse trop importante ne permet pas l'acquisition des données par satellite, ainsi les images peuvent ne pas correspondre exactement aux périodes de minima et de maxima.

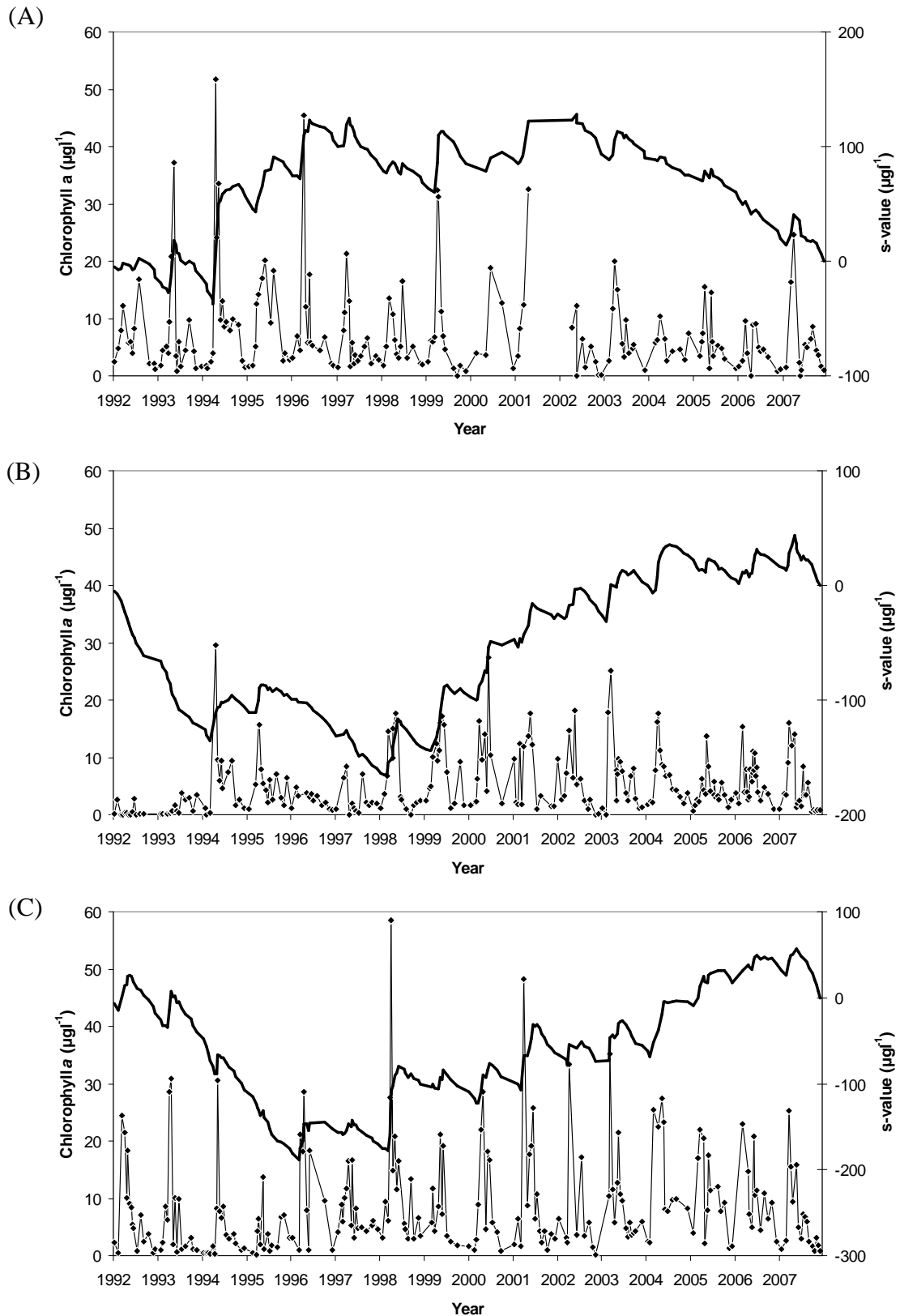


Figure 59. Évolution temporelle (1992-2007) de la concentration en chlorophylle-*a* ($\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$), à la station côtière de la radiale de Dunkerque (A), de Boulogne-sur-Mer (B) et la baie de Somme (C). Points et traits fins : série brute ; trait épais : courbe de la somme cumulée. L'axe de droite correspond aux s-values de la fonction cumulative.

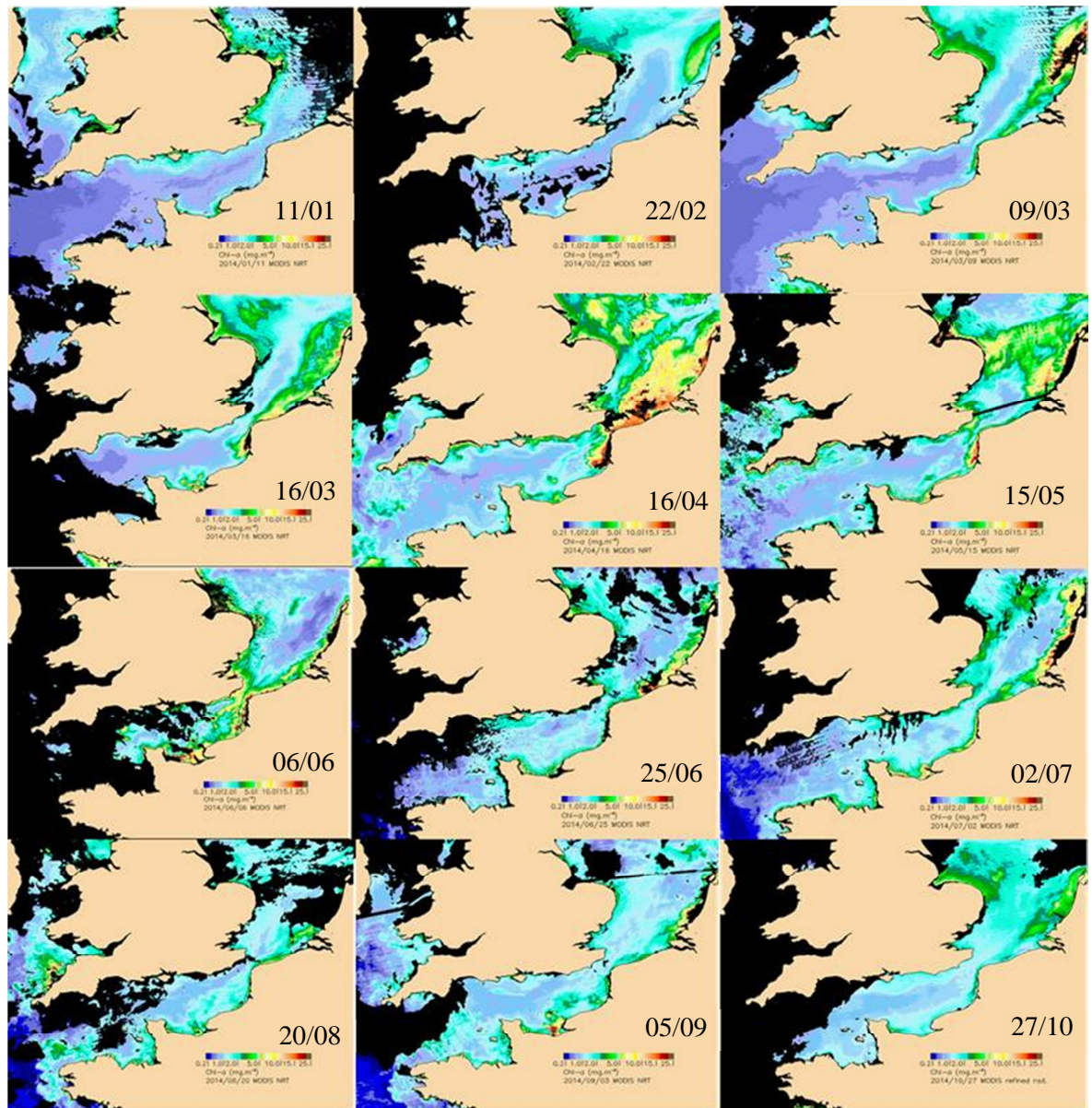


Figure 60. Illustration à méso-échelle de la dynamique de développement phytoplanctonique en 2015 via l'estimation de la concentration en chlorophylle-*a* par le capteur MODIS (algorithme OC5 IFR) (Masque noir : terre ou couverture nuageuse).

L'analyse des résultats observés en 2015 permet de clairement identifier les zones de plus forte biomasse phytoplanctonique et de préciser la dynamique de développement du phytoplancton à l'échelle de la Manche et de la baie sud de la mer du Nord. Ceci permet, à la variabilité spatiale et temporelle près, de proposer un schéma de fonctionnement à méso-échelle : l'initiation du développement d'une forte biomasse phytoplanctonique se fait en baie sud de la mer du Nord et dans la partie orientale des côtes anglaises en fin d'hiver-début de printemps. Le développement phytoplanctonique se généralise à presque toute la partie sud de la mer du Nord et à la Manche orientale en mars-avril. Les concentrations restent importantes dans la bande côtière en été, puis diminuent pour ne plus être localisées que dans les zones de panache des fleuves (Rhin, Somme, Seine). Cette plus forte production à proximité des fleuves, mais plus tardive,

s'explique par une limitation par la lumière en début de saison (en raison de fortes turbidités) bien que les nutriments soient disponibles. Ce type d'approche a également permis de définir les zones à enjeux pour lesquelles il est nécessaire de disposer de dispositifs de collecte de données pour le programme de surveillance de la DCSMM lié au descripteur 5 Eutrophisation (Lefebvre, 2013 - **R-86**).

Lorsque le milieu est fortement dominé par une espèce lors d'une période donnée comme dans notre zone d'étude avec *Phaeocystis globosa*, ce type de produits dérivés des images satellites permet également de définir une typologie à méso-échelle. La figure 61 illustre trois situations contrastées (années 1998, 2002 et 2003) de développement de *P. globosa* (abondance de 4.10^6 à 9.10^6 cellules par litre estimée au niveau de la radiale REPHY / SRN de Boulogne-sur-Mer) à l'échelle de la Manche et de la baie sud de la mer du Nord.

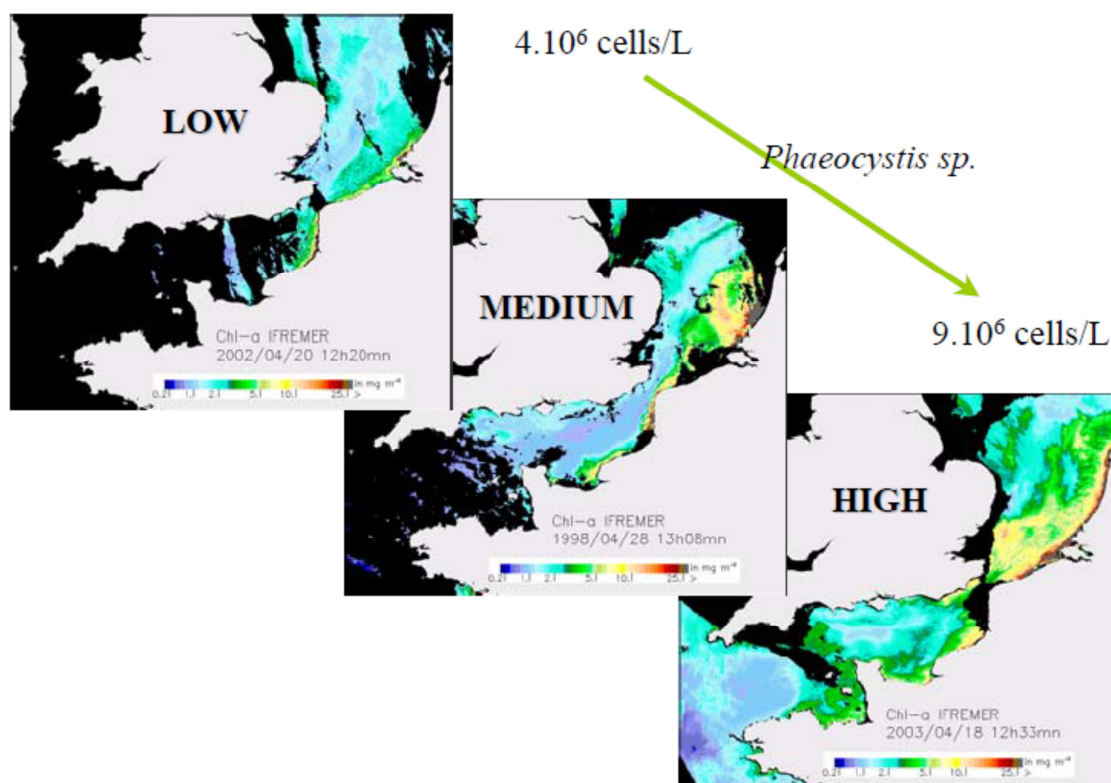


Figure 61. Typologie de trois intensités de développement de *Phaeocystis globosa* en Manche orientale et en baie sud de la mer du Nord via l'estimation de la concentration en chlorophylle-*a* par le capteur SeaWifs (algorithme OC5 IFR) (Masque noir : terre ou couverture nuageuse).

Afin de bénéficier des avantages de cette approche à méso-échelle et d'aller plus loin que l'estimation de biomasse globale du phytoplancton via le proxy qu'est la concentration en chlorophylle-*a* et lorsque la communauté phytoplanctonique est davantage diversifiée, Thyssen *et al.* (2015) (**Art-8**) proposent de caractériser la structure de la communauté phytoplanctonique en mer du Nord en ayant recours à une stratégie HF d'analyses du phytoplancton grâce à un cytomètre en flux (Cytosense, Cytobuoy b.v.) couplé au système Pocket Ferry Box/Algae Online Analyzer (voir la configuration du système dans la section 1.4.2.), pour ensuite tester les possibilités de contribution à l'amélioration des possibilités de discrimination des groupes fonctionnels phytoplanctoniques de la méthode PHYSAT (Alvain *et al.*, 2005, 2008). Cette stratégie

HF a été mise en œuvre dans le cadre d'une campagne commune FP7 PROTOOL / DYMAPHY (CEur-1.) à bord du navire de recherche *Endeavour* du CEFAS (UK) entre le 8 et le 11 mai 2011 (Figure 62).

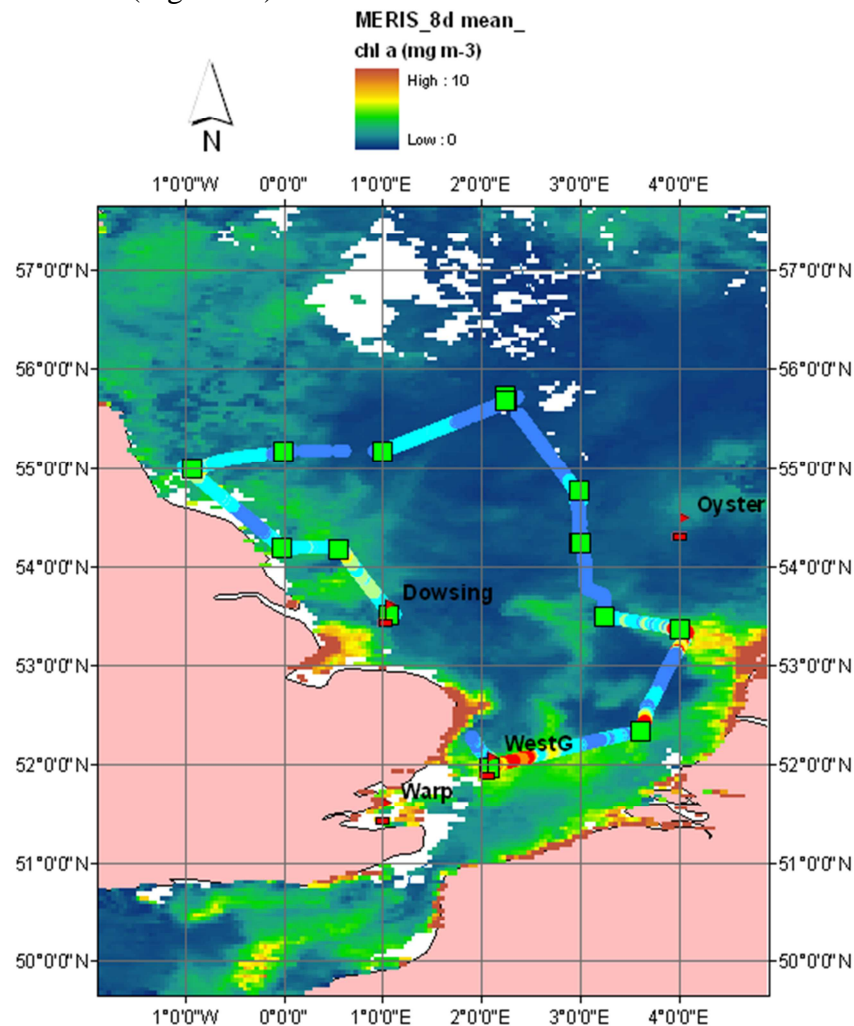


Figure 62. Trajet de la campagne commune FP7 PROTOOL / DYMAPHY à bord du navire de recherche *Endeavour* du CEFAS (UK) entre le 8 et le 11 mai 2011. Projection des valeurs de fluorescence acquises par mesures HF sur le produit MERIS d'estimation de la concentration en chlorophylle-*a* (source : R. Forster, CEFAS, UK).

Thyssen *et al.* (2015) (**Art-8.**) ont ainsi démontré pour la première fois la possibilité d'utiliser les données de cytométrie en flux pour labelliser les anomalies journalières PHYSAT. La généralisation de cette approche et son adaptation au cas des eaux turbides laissent présager d'une capacité d'identification de groupes fonctionnels clés à l'échelle de régions ou de sous-régions marines : diatomées, nanoeucaryotes, *Prochlorococcus*, *Synechococcus*, cellules de type *Phaeocystis*, coccolithophorides.

2.4.2.2. Structure de la communauté phytoplanctonique

L'évolution, comme la non-évolution, de la biomasse peut être accompagnée, ou dissimuler, des modifications de la structure de la communauté phytoplanctonique. Des augmentations de la biomasse chlorophyllienne lors d'eutrophisation sont généralement accompagnées de modification de cette structure en termes d'abondance totale, de richesse spécifique et de régularité (Tsirtis et Karydis, 1998 ; Garmendia *et al.*, 2013).

Par ailleurs, il s'avère important de combiner différentes métriques afin de développer des outils robustes d'évaluation de la qualité de l'eau, sachant que chaque métrique pourra avoir une sensibilité différente à différentes pressions.

Les résultats acquis dans le cadre des réseaux REPHY /SRN permettent, grâce à la fréquence d'échantillonnage mensuelle à bimensuelle et à un niveau de détermination taxonomique élevé (jusqu'à l'espèce pour certains taxons), de proposer une image fiable de la structure du phytoplancton et de son évolution en Manche orientale et en baie sud de la mer du Nord.

2.4.2.2.1 Évolution de l'abondance phytoplanctonique totale

L'évolution de l'abondance totale du phytoplancton est soumise à une forte variabilité saisonnière et interannuelle au niveau des trois radiales (Lefebvre *et al.*, 2011 ; **Art-6.**) (Figure 63). A Dunkerque, l'abondance totale fluctue entre $\sim 10^3$ et $\sim 4 \cdot 10^6$ cell.l⁻¹ au milieu des années 90, pour atteindre plus de $28 \cdot 10^6$ cell.l⁻¹ à la fin de la décennie. Elle diminue ensuite au début des années 2000 ($< 10^4$ cell.l⁻¹) afin d'augmenter de nouveau ($> 14 \cdot 10^6$ cell.l⁻¹) jusqu'à la fin de la période d'étude (2007). L'abondance phytoplanctonique totale est inférieure à la moyenne de la série 1992-2007 dans les années 90 (maximum de l'ordre de $10 \cdot 10^6$ cell.l⁻¹). Au début des années 2000, l'abondance est comprise entre 10^3 et $> 29 \cdot 10^6$ cell.l⁻¹. L'abondance totale est la plus forte en baie de Somme et les valeurs maximales sont observées entre 1992 et 2001 (plusieurs dizaines de millions de cellules par litre). Dans les années 2000, l'abondance totale est inférieure à la moyenne de la série 1992-2007.

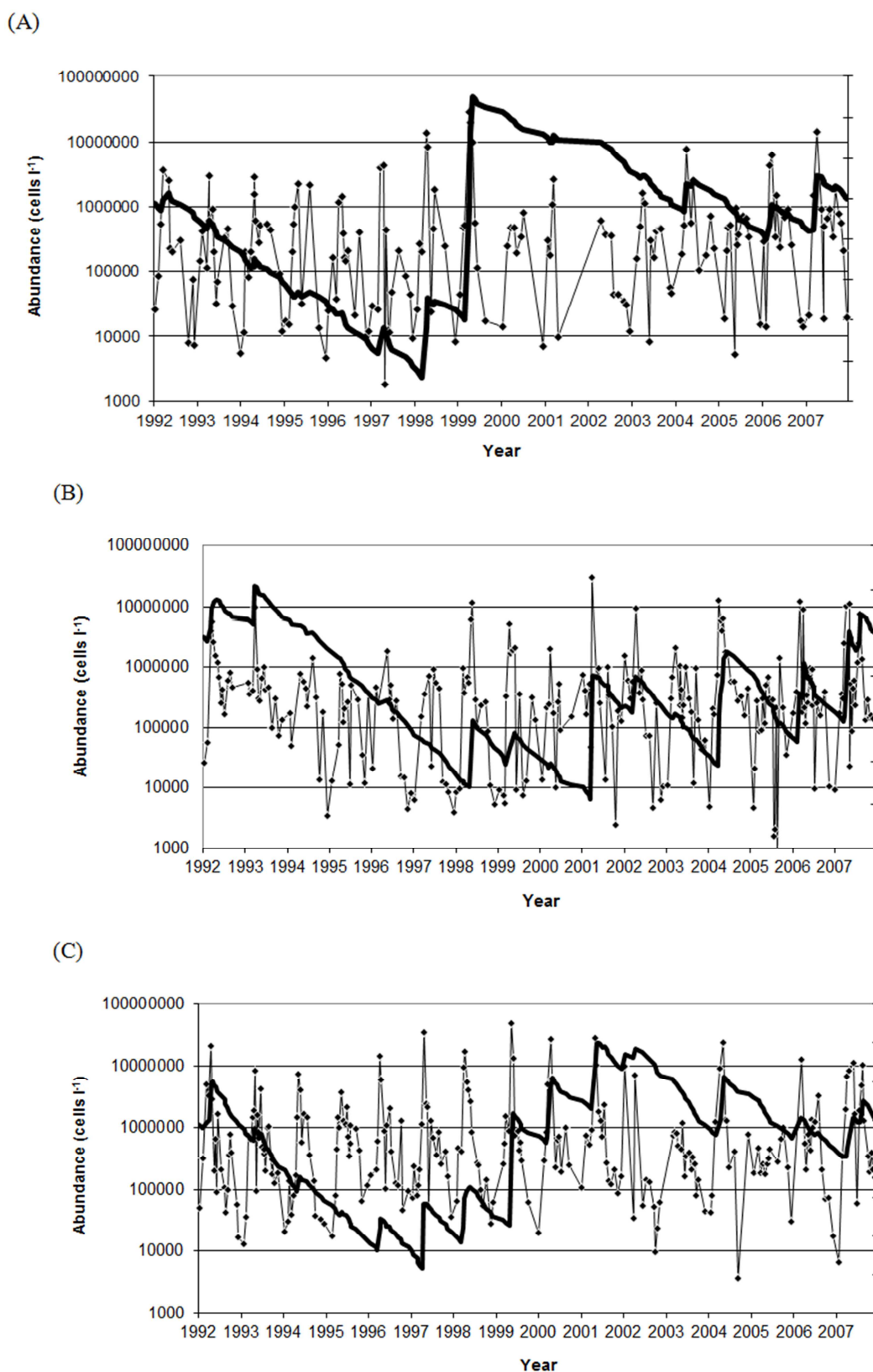


Figure 63. Évolution de l'abondance phytoplanctonique totale (cell.l⁻¹) au niveau de la station côtière des radiales de (A) Dunkerque (DK1), (B) de Boulogne-sur-Mer (BL1) et (C) de la baie de Somme (Atso) au cours de la période 1992-2007 (ligne noire en gras : courbe des sommes cumulées).

2.4.2.2.2 Richesse spécifique et diversité

La diversité indique la façon dont les éléments d'une communauté sont répartis entre les différentes catégories représentées dans un milieu. Souvent, cette notion de diversité recouvre deux aspects : la richesse et la régularité. Plus il y aura de catégories représentées par au moins un élément, plus l'indice de diversité sera élevé. Il s'agit des notions de :

- Richesse : c'est-à-dire le nombre de taxons distincts : on dénombre couramment les espèces (on parlera alors de diversité spécifique), dans d'autres cas, les genres (diversité générique), etc.
- Régularité : façon plus ou moins égale ou inégale selon laquelle les individus, pour un nombre de catégories données, se répartissent entre celles-ci.

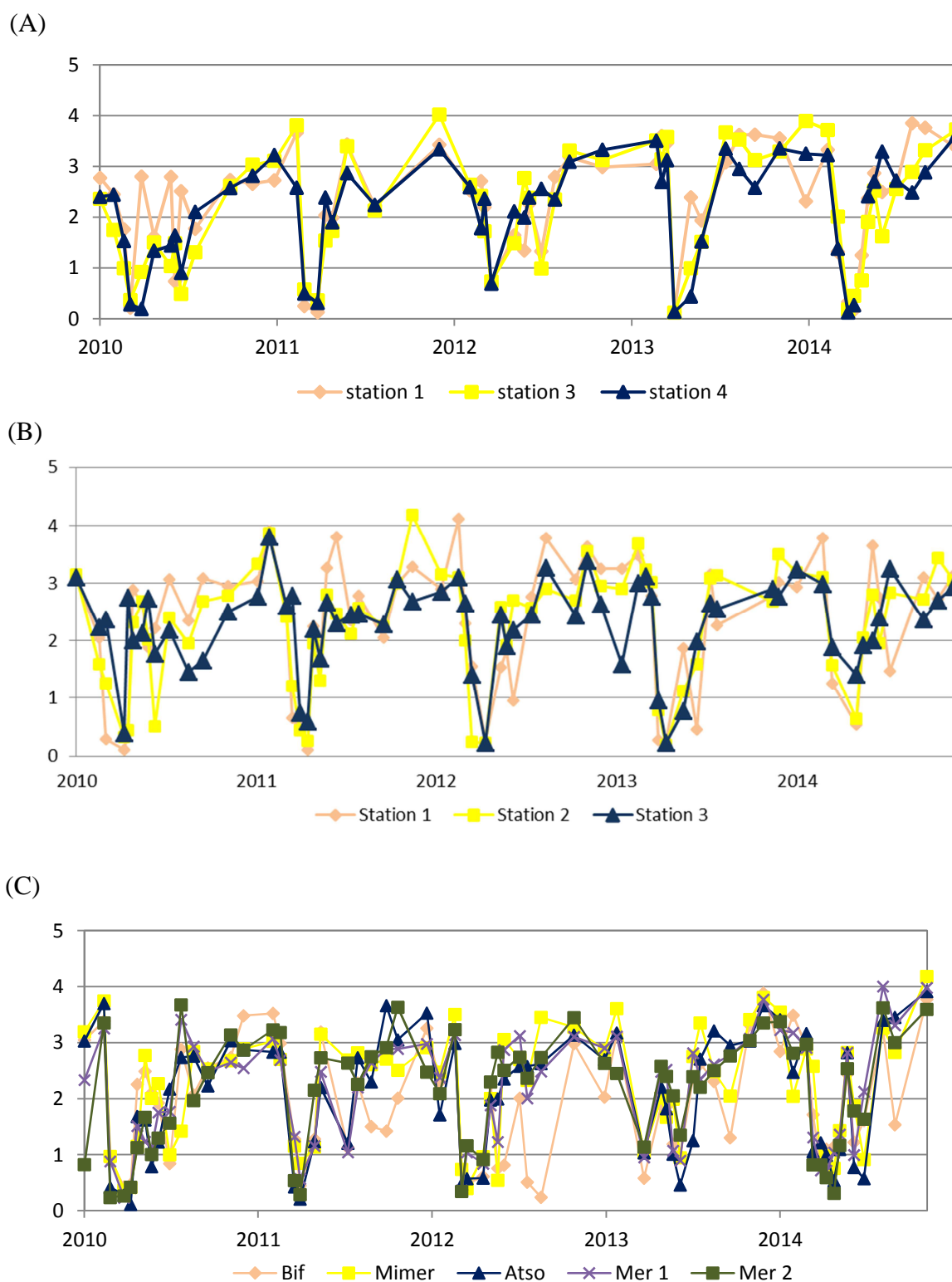
De ces deux notions, la notion de régularité est plus élaborée que le simple « nombre d'espèces ». Elle correspond cependant à l'intuition courante : si, parmi les espèces dénombrées, l'une d'entre elles (ou un très petit nombre) représente la plus grande partie des individus recensés, les autres étant beaucoup plus rares, on tend à dire que la communauté est peu diversifiée. Si, au contraire, on rencontre un grand nombre d'espèces moyennement abondantes, on tend à qualifier la communauté de « très diversifiée ». Plusieurs indices de diversité ont été proposés mais le plus utilisé est celui de Shannon, noté H :

$$H = -\sum P_i \log_2(P_i)$$

Avec P_i , la fréquence de l'espèce i dans l'échantillon, soit $P_i = (N_i / N)$ et N_i , l'effectif de l'espèce i dans l'échantillon et N l'effectif total ($\sum N_i = N$).

L'indice de diversité donne une information synthétique sur la richesse spécifique et l'équilibre du peuplement considéré. Toutefois, il dépend à la fois du nombre d'espèces et de leurs abondances relatives ; donc une faible valeur peut traduire deux situations différentes : d'une part, quand le nombre d'espèces est faible, d'autre part, quand le nombre d'espèces est élevé, mais quelques espèces dominent. Il est généralement admis que la diversité est faible lorsque l'indice de Shannon est proche de 0,5. On dit qu'elle est forte lorsque l'indice est voisin de 6.

Au cours de la période 2006-2014 (**R-104.**) et au niveau des différentes radiales, l'indice de Shannon présente un cycle saisonnier très marqué avec une chute brutale de l'indice au printemps (jusqu'à 0,1) et des valeurs de l'ordre de 3 à 4 le reste de l'année (Figure 64).



Les indices les plus faibles ou intermédiaires (valeurs fixées arbitrairement à 2) sont observés entre mars et mai, parfois en juin pour les radiales de Dunkerque et de Boulogne-sur-Mer, et parfois jusqu'en juillet et août en baie de Somme. La dynamique d'évolution est globalement la même de la côte vers le large, lorsqu'il s'agit de la chute brutale de l'indice. En dehors de cette période, la différence entre la valeur de l'indice au large et celle à la côte peut être, respectivement, de 16 %, 20 % et 15 %, pour les radiales de Dunkerque, de Boulogne-sur-Mer et de la baie de Somme (différence Mer2 - Atso).

Lefebvre *et al.* (2011) (**Art-6.**) et Hernández-Farinas *et al.* (2013) (**Art-7.**) montrent que la communauté phytoplanctonique de la Manche orientale et de la baie sud de la mer du Nord est dominée par les Bacillariophycées, les dinoflagellés et les Prymnésiophycées qui représentent 81 % de l'abondance totale. Les diatomées principales, en matière d'abondance, sont représentées par les genres *Guinardia*, *Chaetoceros*, *Rhizosolenia*, *Pseudo-nitzschia*, *Paralia*, *Skeletonema* et *Leptocylindrus*. Le groupe *Gymnodinium - Gyrodinium* représente les dinoflagellés. *Phaeocystis globosa* est le taxon principal des Prymnésiophycées. Il est responsable des fortes chutes de l'indice de Shannon entre mars et mai. En dehors de cette période, ce sont les diatomées qui dominent la communauté. Hernández-Farinas *et al.* (2013) (**Art-7.**) estiment que la contribution médiane de *Phaeocystis globosa* lors de la période comprise entre mars et mai (données 1992-2014) est de l'ordre de 74 à 90 % avec les plus fortes concentrations relevées à la côte.

Afin de mieux comprendre cette modification majeure de la diversité phytopanctonique, j'ai proposé dès 2005 dans le cadre d'un stage de master 2 (N. Guiselin) de définir une typologie de la succession des taxons phytoplanctoniques en se basant sur la méthode de classification TWINSPAN (Two-Way Indicator SPecies ANalysis) (Hill *et al.*, 1975) largement utilisée en phytosociologie et qui semble prometteuse en écologie marine (Rousseau, 2000 ; Vaz *et al.*, 2004). Les résultats de ce travail motiveront ma participation au montage du dossier et ma contribution à la thèse de Guiselin N. (**Th-3.**). Le principe de base de la méthode réside en une classification hiérarchique via un algorithme qui s'appuie sur une analyse factorielle des correspondances (AFC) de la matrice des données brutes (échantillons x espèces). Le premier axe de l'AFC sert de base pour séparer les groupes à la manière d'une ordination dichotomique. La procédure est itérative jusqu'à ce que la taille du groupe atteigne un jeu de données minimum. La matrice finale propose à la fois une classification et une ordination des données à partir de laquelle un dendrogramme peut être construit (Figures 65 et 66).

L'analyse TWINSPAN (Lefebvre, résultats non publiés) révèle que la composante majeure régissant la séparation des groupes n'est pas spatiale mais temporelle. Sur la base des 519 échantillons comptés, 4 assemblages peuvent être identifiés (groupes A à D de la figure 65), chacun présentant un ou plusieurs taxons caractéristiques d'une période donnée. Cette ordination/hiérarchisation de plus de 116 taxons confirme également que la communauté phytoplanctonique peut se résumer à 4 grandes groupes taxonomiques : les diatomées (69 taxons), les dinoflagellés (30 taxons), les Prymnésiophycées (2 taxons donc *Phaeocystis globosa*) et des microflagellés (Cryptophycées, Prasinophycées, Euglénophycées, Chlorophycées). L'assemblage monotaxonomique B représenté par *Melosira sp.*, est le résultat d'une dominance de ce taxon lors des hivers entre 1996 et 1999. Le groupe D est d'un intérêt particulier puisqu'il contient à la fois la Prymnésiophycée *Phaeocystis globosa* et les diatomées du genre *Pseudo-nitzschia*, ces deux taxons étant classés comme Harmful Algal Bloom (HAB), respectivement, à forte biomasse et potentiellement à l'origine de la production

de toxines amnésiantes. Une deuxième analyse TWINSPAN sur le groupe D permet dans un premier temps de différencier l'assemblage de *Phaeocystis globosa*, de celui des diatomées présentes lorsque que *P. globosa* ne domine pas la communauté (Figure 66). On sépare ainsi les assemblages D1 et D2 des assemblages D3 et D4.

Dans un deuxième temps, on remarque que la présence de *P. globosa* sera, ou pas, associée à celle de taxons du genre *Pseudo-nitzschia* (*P. sp.*, *P. delicatissima*, *P. seriata* de l'assemblage D4). Selon Sazhin *et al.* (2007), Verity *et al.* (2007) cette association entre *Phaeocystis* et *Pseudo-nitzschia* serait, soit directe (*Phaeocystis* offrant un site de fixation pour les « aiguilles » de *Pseudo-nitzschia* et/ou *Pseudo-nitzschia* servant de support permettant la transition du stade de cellule isolée vers le stade colonial de *Phaeocystis*), soit indirecte (Utilisation par *Pseudo-nitzschia* de la matière organique relarguée par *Phaeocystis* en phase de sénescence du bloom). Delegrange (2015) (**Th-7.**, **JTh-6.**) et Delegrange *et al.* (corrections en cours après demande de révision, **ArtS-1.**) mettent en évidence au niveau du site de Gravelines (**Creg-1.**), pour l'année 2012 et grâce à une analyse taxonomique approfondie par microscopie électronique à balayage, une faible diversité au sein du groupe des *Pseudo-nitzschia*. Selon ces auteurs, *P. delicatissima* dominerait au printemps, alors que *P. delicatissima*, *P. pungens* et *P. fraudulentata* seraient présentes en période estivale. *P. pungens* dominerait en automne. Ces auteurs via des expériences d'exposition concluent à l'absence de toxicité pour *P. delicatissima*, à la toxicité de *P. pungens* et ne peuvent conclure pour *P. fraudulentata*. Ils indiquent qu'il n'existe pas de relation linéaire entre l'abondance cellulaire des formes potentiellement toxiques et la concentration en acide domoïque dans l'eau.

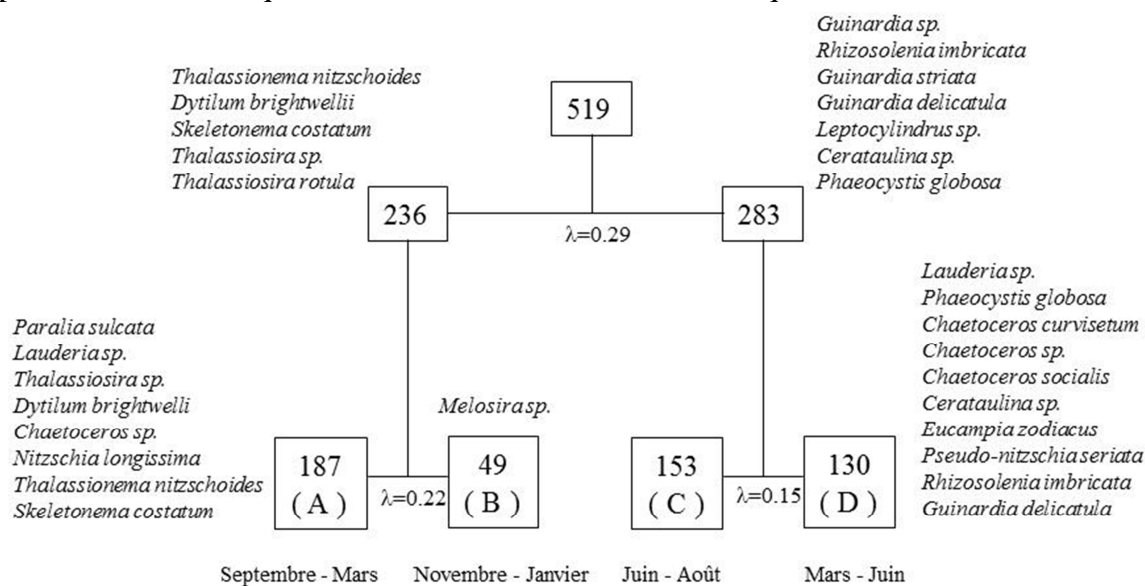


Figure 65. Classification TWINSPAN de la communauté phytoplanctonique de la radiale de Boulogne-sur-Mer (1992-2004).

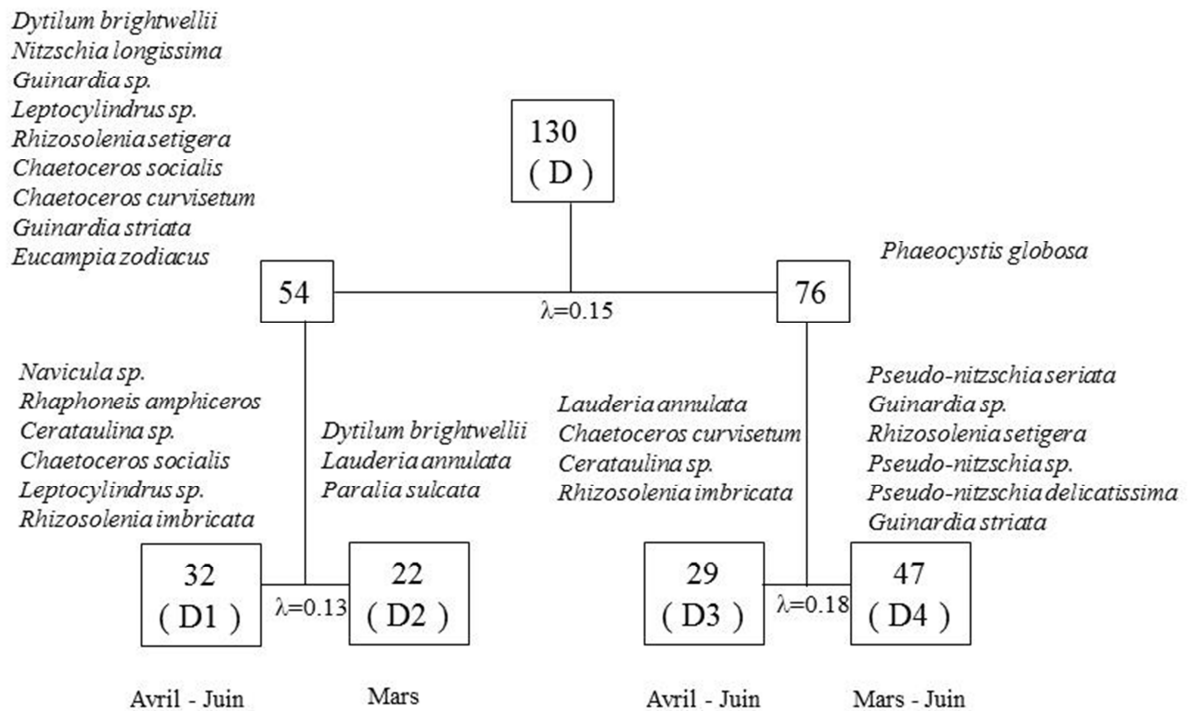


Figure 66. Classification TWINSpan à partir du groupe D de la communauté phytoplanctonique de la radiale de Boulogne-sur-Mer (1992-2004).

Au cours de la période 1992-2004, les diatomées contribuent à hauteur de 47 % de l'abondance totale annuelle, contre 52 % pour *Phaeocystis globosa*. Lefebvre *et al.* (2011) (**Art-6.**) montrent que la proportion relative de ces groupes présente une forte variabilité interannuelle, ainsi qu'une hétérogénéité spatiale mineure de sa dynamique (Figure 67). La contribution relative de *P. globosa* à l'abondance totale est la plus importante en baie de Somme, où cette Prymnésiophycée contribue à plus de 50 % à l'abondance totale plus fréquemment (11 années sur 16) au niveau de la station côtière (Atso). Globalement, les diatomées sont dominantes au début des années 90 puis sont progressivement dominées par *P. globosa* à la fin de la décennie. Dans les années 2000, le schéma est moins net ; les périodes de dominance alternent davantage. Ceci n'est pas en accord avec les conclusions de Gomez et Souissi (2008) qui, sur la base de l'étude d'une série plus courte (1998-2005), concluent à une régression de *P. globosa* dans les années 2000 en raison de la dé-eutrophisation de la mer du Nord.

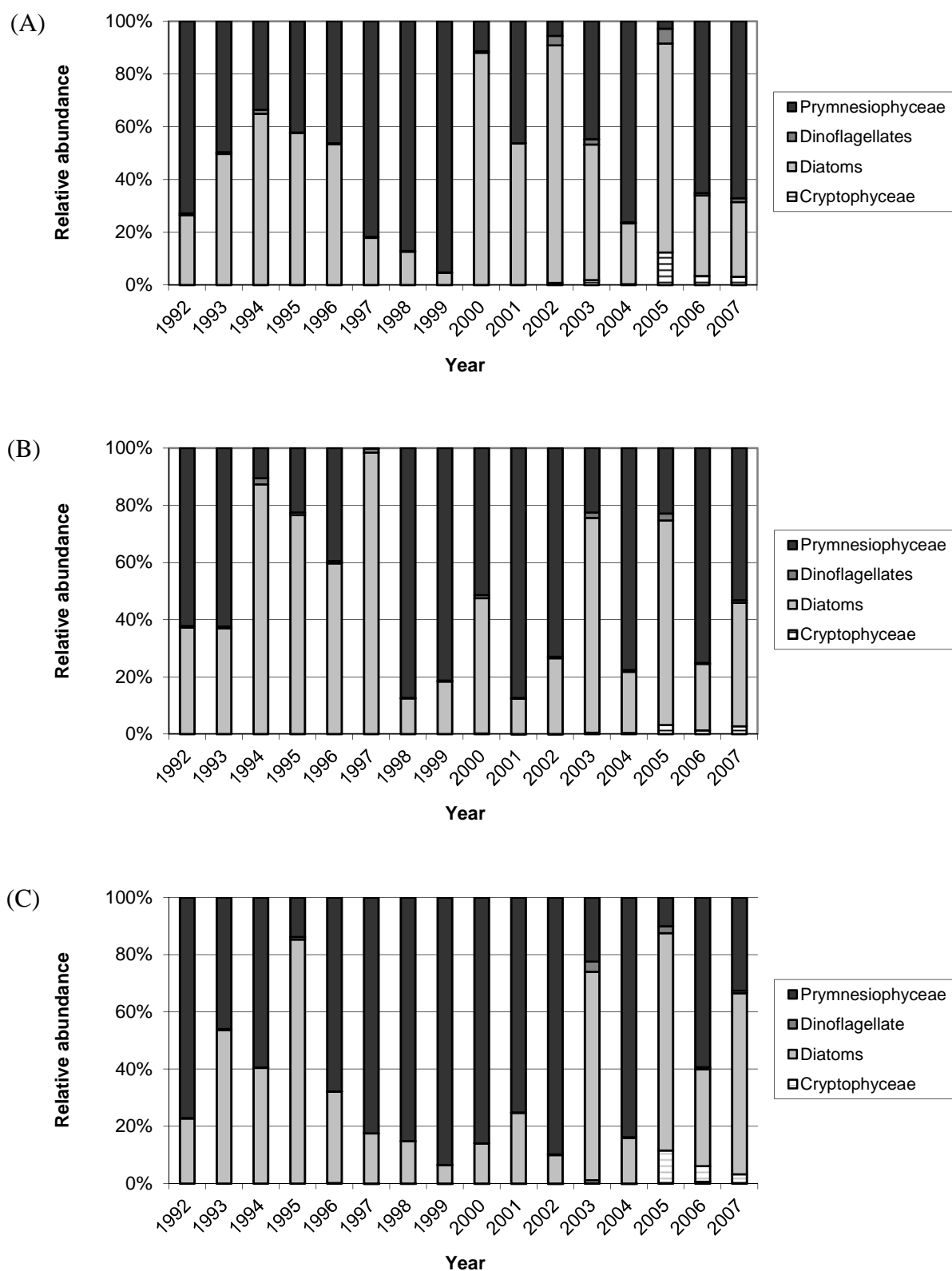


Figure 67. Évolution de la proportion relative des principaux groupes phytoplanctoniques (Prymnésiophycées, Dinoflagellés, Diatomées, Cryptophycées) au niveau des stations côtières des radiales de Dunkerque (A), de Boulogne-sur-Mer (B) et de la baie de Somme (C) entre 1992 et 2007.

Quelle que soit la radiale considérée, les abondances maximales de *P. globosa* sont largement au-dessus des seuils de 10^6 cell.l⁻¹ et de 4.10^6 cell.l⁻¹ définis, respectivement, par OSPAR (2009) et Lancelot *et al.* (2009) comme limites au-delà desquelles des dysfonctionnements de l'écosystème peuvent être observés (Tableau 8). La dominance de *Phaeocystis globosa* et les abondances exceptionnelles relevées certaines années vont donc avoir des conséquences néfastes sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes benthique et pélagique (Lancelot et Rousseau, 1994) induisant des conséquences sévères aux niveaux environnementale et biogéochimique (Lancelot *et al.*, 1987 ; Wassman, 1994).

Tableau 8. Paramètre de tendance centrale et de dispersion pour l'abondance de *Phaeocystis globosa* entre 1992 et 2007 au niveau des radiales de Dunkerque (DK1, DK3 et DK4), de Boulogne-sur-mer (BL1 à BL3) et de la baie de Somme (Atso, Mer2).

	Dk1	Dk3	Dk4	B11	B12	B13	Atso	Mer2
Min.	500	1 500	6 402	2 250	400	1 330	1 000	3 000
Q1	10 2900	54 000	28 800	68 270	28 270	23 125	104 000	129 400
Moy.	3 248 667	2 330 827	2 653 913	2 446 989	1 764 897	933 377	4 732 894	3 710 762
Méd.	772 740	361 960	225 000	516 700	225 000	163 300	651 000	803 500
Q3	3 219 250	1 896 000	2 824 000	1 800 975	1 442 600	926 812	5 576 000	3 990 000
Max.	28 233 000	1 488 000	22 032 000	29 850 000	12 290 000	8 932 400	48 932 800	3 639 600
N	44	53	45	70	63	55	77	69

Sur la base d'une classification hiérarchique (algorithme de Ward) sur les indices de diversité de Bray-Curtis, Lefebvre *et al.* (2011) (**Art-6.**) proposent une classification des années en fonction de la dominance, ou non, de *Phaeocystis globosa* (Tableau 9). L'écosystème peut ainsi se trouver dans trois états majeurs : système dominé par *P. globosa*, système dominé par les diatomées et système intermédiaire. Le premier état est le plus risqué en termes de conséquences néfastes sur l'environnement. A l'échelle des 16 années d'observation de cette étude, cet état apparaît majoritairement. Certaines différences peuvent apparaître entre les stations.

Tableau 9. Typologie de la communauté phytoplanctonique entre 1992 et 2007 au niveau des radiales de Dunkerque (DK1, DK3 et DK4), de Boulogne-sur-mer (BL1 à BL3) et de la baie de Somme (Atso, Mer2).

	Système dominé par <i>Phaeocystis globosa</i>	Système dominé par les diatomées	Système intermédiaire
Dk1	1992, 1997-1999, 2004, 2006, 2007	2000, 2002, 2005	1993-1996, 2001, 2003
Dk3	1995, 1997-1999, 2003, 2004, 2006, 2007	2000, 2002, 2005	1992-1994, 1996, 2001
Dk4	1993, 1995-1999, 2004, 2006, 2007	1992, 2000, 2002,	1994, 2001, 2003, 2005
Bl1	1998, 2001, 2004, 2006, 2007	1994-1997, 2000, 2003, 2005	1992, 1993, 1999, 2002
Bl2	1995, 1998, 1999, 2001, 2002, 2004, 2006, 2007	1996, 1997	1992, 1993, 1994, 2000, 2003, 2005
Bl3	1998, 2004, 2006, 2007	1996, 1997, 2000	1992-1995, 1999, 2001- 2003, 2005
Atso	1992, 1997-2001, 2004	1995, 2003, 2005	1993, 1994, 1996, 2002, 2006, 2007
Mer2	1992, 1998-2002, 2007	2005	1993-1997, 2003, 2004, 2006

Hernández-Farinas *et al.* (2013) (**Art-7.**) proposent de préciser ce schéma d'évolution à long-terme en utilisant des groupes phytoplanctoniques construits sur l'unité taxonomique la plus basse et la plus pertinente possible, en l'occurrence le Genre (Cottingham et Carpenter, 1998), pour les analyses multivariées. Ils identifient ainsi 91 unités taxonomiques sur la période 1992-2011. L'élimination des taxons rares (fréquence d'occurrence < 3 ans) aboutit à la sélection de 62 unités taxonomiques. L'Analyse Triadique Partielle (ATP) de ces données permet de confirmer l'existence de changement au sein de la communauté phytoplanctonique au cours de cette période. L'ATP met en évidence deux périodes principales quelle que soit la radiale considérée : 1992-2001 et 2002-2011. La seconde période peut également être décomposée en deux sous-périodes : 2002-2007 et 2008-2011. Ces résultats confirment l'existence d'une forte structuration temporelle de la communauté. Globalement, l'abondance de *Pseudo-nitzschia* augmente au cours de cette période, alors que d'autres diatomées comme *Guinardia*, *Coscinodiscus* - *Stellarima* voient leur abondance diminuer. Les dinoflagellés *Amphidinium*, *Alexandrium* et *Polykrikos* sont caractéristiques de la deuxième grande période. *Heterocapsa*, *Torodinium* ainsi que *Eutreptiella* (Euglénoïde) sont communs lors de la deuxième sous-période. Parmi les diatomées, *Melosira* et *Stephanopyxis* sont communes lors des premières années du suivi et plus rares après

2002. Des changements d'abondance de certaines unités taxonomiques sont observés. Il n'existe pas d'évolution significative de l'abondance de *Phaeocystis* en baie de Somme, alors qu'elle augmente légèrement à Dunkerque et à Boulogne-sur-Mer. Parmi les dinoflagellés, l'abondance du groupe des *Gymnodinium-Gyrodinium* montre une tendance croissante significative entre 2002 et 2007 (doublement de l'abondance en échelle log). Ces changements au sein de la communauté phytoplanctonique sont conformes à ceux observés en Manche occidentale par Widdicombe *et al.* (2010). En mer du Nord, une augmentation similaire de l'abondance des dinoflagellés a été constatée depuis la fin des années 90 en raison d'une diminution de l'abondance de certains taxons zooplanctoniques (Alvarez-Fernandez *et al.*, 2012). Cette relation entre les modifications d'abondance phytoplanctonique et la pression de prédation mériterait d'être approfondie dans notre zone atelier (voir la section dédiée aux perspectives).

2.4.2.2.3 Phénologie

Après avoir défini les caractéristiques générales de la communauté phytoplanctonique en matière de composition, d'évolution globale saisonnière comme à long-terme, ainsi qu'après avoir contribué à mieux définir à méso-échelle les zones à enjeux au regard de l'évaluation de l'eutrophisation (zone de forte production de biomasse phytoplanctonique) via les produits dérivés des images satellites et de la modélisation, il apparaît nécessaire de mieux caractériser la phénologie des efflorescences afin, à terme, de mieux définir les paramètres de contrôle des efflorescences, de mieux appréhender la relation pression/impacts. La phénologie, c'est-à-dire l'étude des modifications des caractéristiques temporelles (début, fin et amplitude) d'événements biologiques périodiques peut fournir des indications très intéressantes quant au changement climatique puisque la température va potentiellement influencer tous les processus biologiques du niveau cellulaire au niveau de la biosphère (Schwartz, 2003 ; Hughes, 2000). De nombreuses études ont rapporté des modifications significatives du timing et de l'amplitude des efflorescences algales en réponse au changement climatique. La plus couramment citée est celle d'Edwards et Richardson (2004). Selon Cadée (1986), Cadée et Hegeman (1986), le bloom de phytoplancton et de *Phaeocystis*, en particulier, peut être retardé de 3 à 6 semaines lorsque les conditions ne sont pas favorables. Le timing du bloom va influencer sa forme. En général, les blooms précoces sont supposés se développer plus lentement (moins de lumière, température moins élevée) et durer plus longtemps. Notre idée de départ était de définir des formes typiques d'efflorescences (évolution de la biomasse) associées à des informations quant à leurs durées, leurs intensités, puis d'associer ces formes à une succession de taxons et à des paramètres environnementaux de contrôle et/ou d'effets. Au regard des résultats acquis via les programmes BF, nous nous attendons à trouver des groupes de formes caractéristiques d'un type d'efflorescence donc de conditions environnementales.

Pour cela, nous avons considéré la nécessité de recourir à une série nous permettant d'avoir accès à la fois à l'information quant à la biomasse mais aussi la composition de la communauté phytoplanctonique et dont la fréquence d'échantillonnage serait au minimum, conforme aux préconisations faites pour optimiser un programme d'observation du phytoplancton, à savoir une fréquence hebdomadaire. Les méthodes ont été appliquées sur les données 1989-2014 du projet IGA Gravelines (**Creg-1**). Le recours à une différentiation mathématique du début du bloom, de son intensité maximale et de sa durée est plutôt rare (Mieruch *et al.*, 2010). Beaucoup de propositions de phénologie sont basées sur une approche visuelle lors de laquelle les auteurs définissent les étapes clefs en identifiant des pics, des creux, des points d'inflexion dans

les séries de données. Dans la continuité de notre approche visant à développer et/ou à « détourner » l'utilisation de méthodes numériques afin de répondre à nos objectifs, la méthode du FULCRUM proposée par Kromkamp et Van Engeland (2010) (somme cumulée des données de chlorophylle-*a* en fonction du temps) nous semblait être une piste intéressante. Elle permet de caractériser rapidement et facilement les paramètres principaux de la dynamique d'une efflorescence (date de début et de fin, date du maximum de biomasse) via l'ajustement d'un modèle sigmoïde à la concentration en chl-*a*. Les résultats sont plutôt décevants dans la mesure où il n'apparaît pas de schéma global, ni de différence d'évolution du modèle sigmoïde dans la logique des résultats obtenus à partir des données BF REPHY / SRN, c'est-à-dire avec des évolutions par paliers permettant de différencier catégoriquement des groupes d'années consécutives présentant une phénologie proche (Figure 68). D'autres essais basés sur la méthode de décomposition EMD (Empirical Mode Decomposition) sont tout aussi décevants. Il n'apparaît aucune tendance et les fréquences les plus caractéristiques ne sont que le reflet des variations saisonnières. Une classification spectrale des valeurs cumulées de la concentration en chlorophylle-*a* permet d'identifier cinq groupes parmi lesquels deux sont dominants. Cependant, il n'apparaît ni dynamique dans la succession de ces groupes, ni régularité.

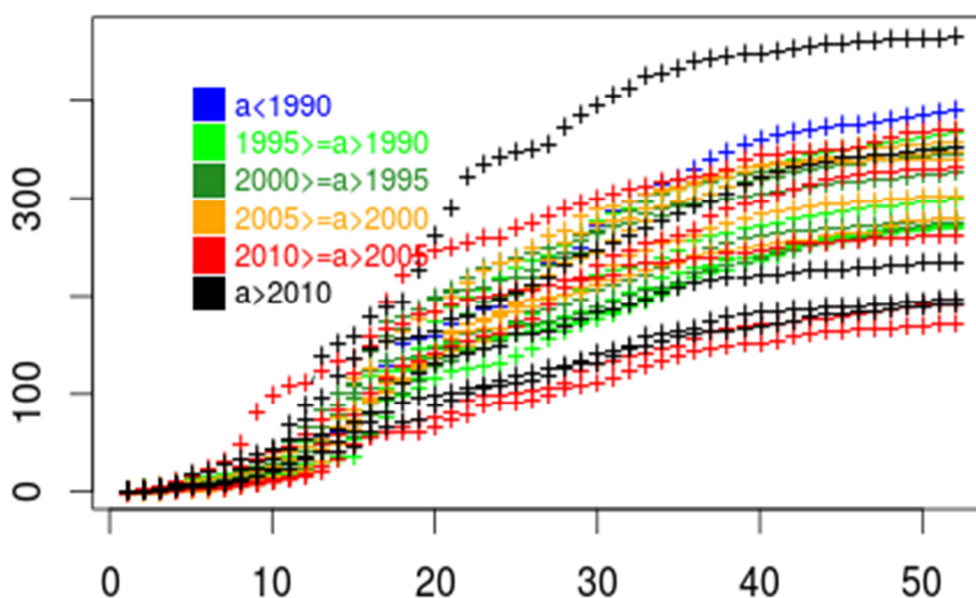


Figure 68. Évolution de la somme cumulée de la concentration en chlorophylle-*a* pour chacune des années entre 1989 et 2014 pour le point « canal d'amenée » de la série IGA Gravelines.

Par conséquent, Lefebvre et Caillault (en préparation ; **ArtS-3., CN-54.**) proposent de définir une typologie de la succession des taxons phytoplanctoniques et de caractériser sa dynamique, sa phénologie en Manche orientale et dans la baie sud de la mer du Nord sur la base d'une méthode d'identification d'événements récurrents par mélange de Gaussiennes. Nous avons construit une méthode automatique de recherche du nombre de gaussiennes basée sur l'algorithme normalmixEM du package mixtools (Benaglia *et al.*, 2009) via une optimisation d'un critère de reconstruction. Les méthodes de type Expectation-Maximisation étant non exactes (l'optimum local est fonction de l'initialisation), le process est répété afin de récupérer le modèle le plus stable (répétable) et qui répond le plus favorablement au critère de reconstruction. Ce critère de reconstruction est basé sur des mesures de similarités et de déformations acceptables.

L'approche consiste à considérer l'évolution à long-terme de la biomasse du phytoplancton (via la concentration en chlorophylle-*a*) comme une succession de Gaussiennes dont les caractéristiques statistiques correspondent à des critères phénologiques (Figure 69). Les valeurs de $x-\mu$, -2σ et $+2\sigma$ correspondent, respectivement, au maximum de l'efflorescence, au début et à la fin de l'efflorescence.

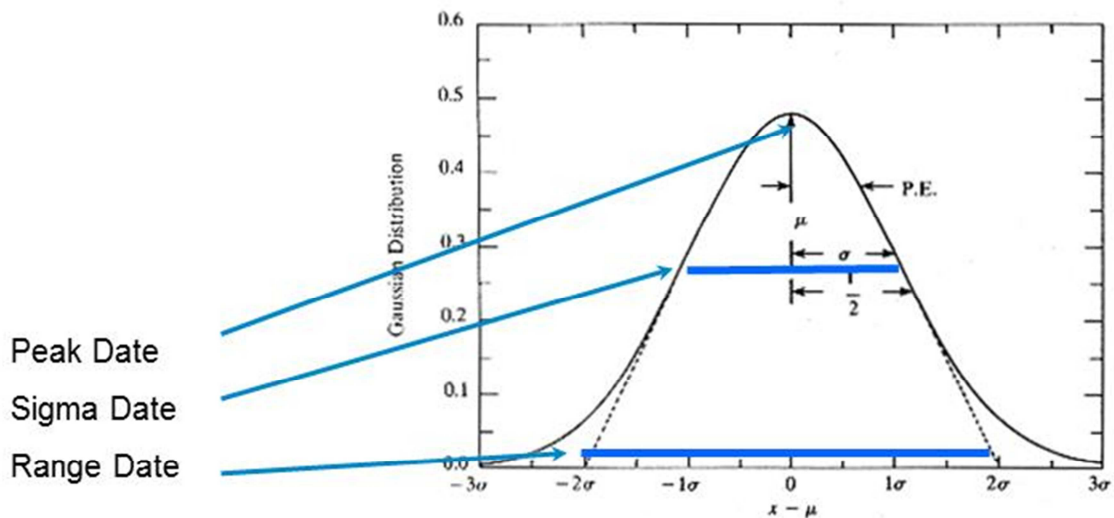


Figure 69. Exemple de distribution Gaussienne. Caractéristiques utilisées pour définir l'évolution de la biomasse du phytoplancton (concentration en chlorophylle-*a*) afin de produire une typologie de la phénologie des efflorescences phytoplanctoniques.

A partir de ces caractéristiques, il est alors possible de définir des mélanges de Gaussiennes correspondant chacun à une période donc à une liste de taxons caractéristiques (identification des taxons représentant 95 % de l'abondance totale pour une période définie) et un indice de diversité. Dans un deuxième temps, la méthode va consister à comparer chaque modèle annuel au modèle à long-terme (la climatologie) qui sert de référence afin de mettre en évidence des éventuels écarts à la normale (Figure 70).

La phase de pré-traitement des données consiste à procéder à un alignement temporel (1 série chlorophylle-*a* + comptage associé par semaine) puis à une imputation des données manquantes de chlorophylle-*a* via une moyenne mobile pondérée (poids plus élevé affecté aux données directement antérieures et consécutives) et avec deux passages (moyenne des imputations dans l'ordre chronologique puis anti-chronologique afin d'être indépendant de la temporalité des données). Les premières analyses permettent de définir un modèle, une climatologie 1989-2014 qui présente sept Gaussiennes (G1 à G7) (Tableau 10). Un cycle annuel moyen de développement du phytoplancton correspond ainsi à la succession de sept communautés phytoplanctoniques. Par exemple, le groupe G1 se développe entre les semaines 1 et 7, présente un maximum de concentration en chlorophylle-*a* entre la semaine 2 et la semaine 3. L'indice de diversité de Shannon au cours de cette période évolue entre 0,6 et 3,8. Cette période est caractérisée par la co-dominance de 22 taxons dont 12 représentent 95 % de l'abondance globale.

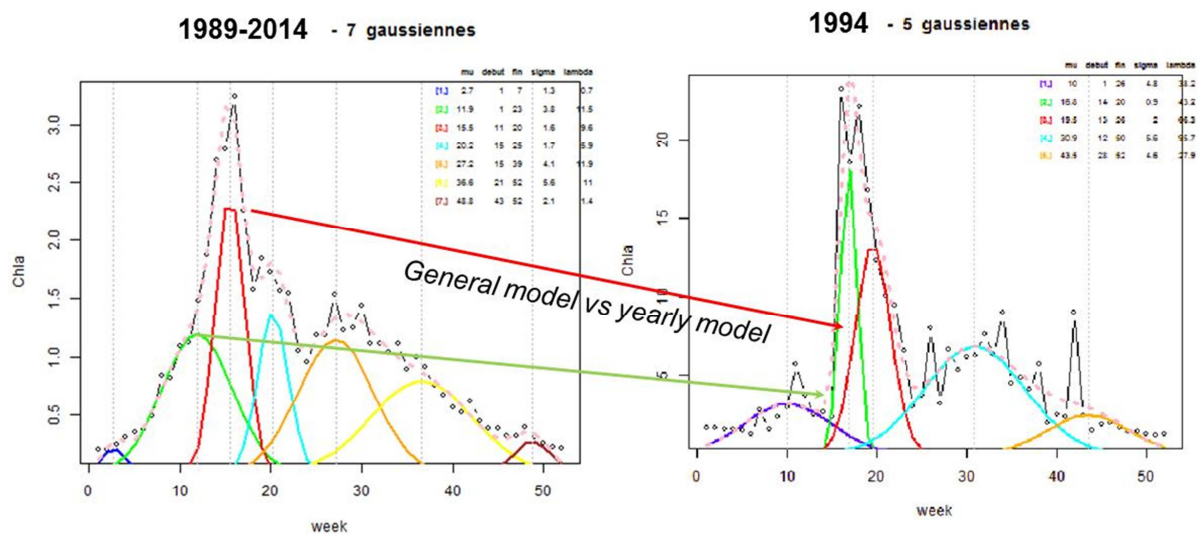


Figure 70. Définition du modèle 1989-2014 de l'évolution de la biomasse phytoplanctonique par un mélange de 7 Gaussiennes et comparaison au modèle annuel 1994 à 5 Gaussiennes afin de mettre en évidence les écarts en termes de successions et de phénologie.

Tableau 10. Caractéristiques du modèle de développement phytoplanctonique 1989-2014.

#	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
Peak date	2.6	11.8	15.4	20.2	27.1	36.5	48.8
Range dates	1-7	1-23	11-20	15-25	15-39	21-52	43-52
Sigma-dates	1-4	8-16	13-17	18-22	23-31	30-42	40-51
Shannon index	0.6	0.5	0.5	0.6	0.5	0.3	0.1
(min/median/max)	2.6 3.8	2.1 3.7	2.1 3.7	2.6 3.9	3.0 4.3	2.8 4.0	2.0 4.5
#m Taxon	22	36	30	27	38	44	26
#m Taxon =95 % nbre cell/L	12	8	1.5	4	14	17.5	14.5

Chaque groupe est caractérisé par la présence de taxons plus ou moins spécifiques (Tableau 11). Les groupes 2, 3 et 4 sont caractéristiques de l'efflorescence de *Phaeocystis globosa*. La composition de chacun de ces groupes est le reflet de la variabilité de la dynamique de son efflorescence (précocité, retard, amplitude forte ou faible) ainsi que des taxons accompagnateurs. Le groupe 3 représente davantage ce qui est défini habituellement comme la période caractéristique, « naturelle » du bloom à *Phaeocystis*. L'occurrence de ce taxon est de 21 sur 26 années pour cette période et il contribue énormément à l'abondance cellulaire totale (#m Taxon = 1,5). Les espèces

accompagnatrices caractéristiques de cette période sont moins nombreuses (Tableau 11).

Tableau 11. Composition taxonomique des 7 groupes (g1 à g7) définis par le modèle de mélange de Gaussiennes 1989-2014, dénombrés au moins une fois et contribuant à 95 % de l'abondance totale. Entre parenthèse : nombre d'occurrences du taxon au cours de la période considérée.

Dominant species (95 % total cell/L)	
g1	"Melosira + Paralia sulcata" (17) , "Skeletonema costatum" (4), "Thalassionema nitzschioides" (2), "Rhaphoneis + Delphineis", "Nitzschiaceae", "Phaeocystis"
g2	"Phaeocystis" (18) , "Guinardia + delicatula + flaccida" (2), "Thalassiosiraceae" (2), "Asterionella glacialis", "Thalassionema nitzschioides", "Rhizosolenia imbricata + styliformis", "Skeletonema costatum"
g3	"Phaeocystis" (21) , "Guinardia + delicatula + flaccida" (2), "Guinardia striata", "Chaetoceros", "Rhizosolenia imbricata + styliformis"
g4	"Phaeocystis" (16) , "Guinardia + delicatula + flaccida" (7) , "Rhizosolenia imbricata + styliformis", "Pseudonitzschia seriata (= Nitzschia seriata)", "Protoctista"
g5	"Rhizosolenia imbricata + styliformis" (6), "Leptocylindrus sp. + danicus + curvatus" (5), "Guinardia + delicatula + flaccida" (4), "Chaetoceros socialis + radians" (3), "Phaeocystis", (2), "Chaetoceros" (2), "Dytilum + brightwellii", "Asterionella glacialis", "Rhizosolenia setigera + R. pungens", "Leptocylindrus minimus"
g6	"Leptocylindrus minimus"(4), "Leptocylindrus sp. + danicus + curvatus" (3), "Cryptophyceae"(3), "Rhizosolenia imbricata + styliformis"(3), "Chaetoceros socialis + radians"(2), "Chaetoceros"(2), "Dytilum + brightwellii", "Guinardia + delicatula + flaccida", "Asterionella glacialis", "Phaeocystis", "Pseudo-nitzschia delicatissima", "Protoctista", "Eucampia + Climacodium + zodiacus", "Chaetoceros curvisetus + debilis + pseudocurvisetus"
g7	"Melosira + Paralia sulcata"(13) , "Pennales"(2), "Skeletonema costatum"(2), "Plagiogramma"(2), "Achnanthes", "Thalassiosiraceae", "Thalassionema nitzschioides", "Guinardia striata", "Rhizosolenia imbricata + styliformis", "Chaetoceros socialis + radians".

L'application de cette méthodologie sur chacune des années prise séparément permet de mettre en évidence des différences significatives par rapport à cette typologie 1989-2014. Ainsi, nous pouvons mettre en évidence des scénarios d'évolution de la biomasse phytoplanctonique structurés par des mélanges Gaussiens de 5 à 15 groupes (résultats non présentés). A ce stade, il s'agit maintenant de considérer les paramètres physico-chimiques acquis lors de ce suivi IGA afin de pouvoir définir des combinaisons de paramètres (dé)favorables au développement de tel ou tel groupe.

Lefebvre et Caillault (en préparation ; **ArtS-3.**, **CN-54.**) proposent ainsi une méthode numérique innovante et automatisée de complétion floue (data fuzzy-completion) associée à la définition de mélanges de Gaussiennes pour définir une typologie des efflorescences basée sur des caractéristiques dynamiques et phénologiques. Le nombre de Gaussiennes ainsi défini pourra servir de base à l'initialisation du modèle de Markov (voir sections 2.3.3.3 et 2.4.5.) afin de pouvoir passer de l'observation à la prédiction de la dynamique des efflorescences phytoplanctoniques.

2.4.3. Facteurs de contrôle proximaux, effets directs et indirects

L'aspect dynamique du contexte environnemental et de l'organisation spatio-temporelle à différentes échelles des compartiments biologiques, des habitats peut être mieux défini, mieux compris grâce au recours à la modélisation couplée hydrodynamique / biogéochimie. La modélisation permet d'étudier la réactivité et la sensibilité des

systèmes aux fluctuations des paramètres et des processus, aux apports anthropiques et aux forçages météorologiques. Les modèles bénéficient des évolutions de stratégie d'observation *in situ* et des développements des produits dérivés des images satellites pour les phases de validation et de calibration, ainsi que pour le développement de certains modules de calcul. Dans le cadre des projets PNEC (CNat-1.) et Liteau II (CNat-2.), les modules concernant les nutriments et *Phaeocystis* ont fait l'objet d'une attention particulière, le but ultime étant de modéliser les processus physiques et biologiques en Manche et dans la baie sud de la mer du Nord en vue de décrire la dynamique de *Phaeocystis* et des blooms phytoplanctoniques en général et, de préciser la part des apports des fleuves français dans le phénomène d'eutrophisation au niveau national comme au-delà en tenant compte des flux transfrontaliers. Bien entendu, le recours à la modélisation permet, lorsque le fonctionnement du système est mieux compris à l'instant présent, d'envisager de créer des situations passées afin de mieux comprendre les évolutions, comme de créer des scénarios d'évolution à venir en fonction des conditions de forçage (pressions naturelles, pressions négatives liées aux activités anthropiques, pressions positives liées à la mise en place de mesures de gestion de l'environnement).

Afin de mieux comprendre les pressions en termes d'apports de nutriments au milieu marin, le projet LITEAU II (Nat-1. - voir section 1.4.4.) a permis la reconstitution des flux apportés au cours des 50 dernières années. La figure 71 illustre les résultats du calcul des flux d'apport au milieu marin de la Seine, de l'Escaut et de la Somme, calculés par le modèle Riverstrahler pour les 50 dernières années. Pour les 3 bassins, un scénario pristine et un scénario (« 2015 ») correspondant au traitement de tous les effluents urbains avec déphosphatation (90 %) et élimination de l'azote (70 %) ont été calculés pour une hydrologie sèche et une hydrologie humide, respectivement.

Dans les 3 bassins, une augmentation considérable des flux d'azote est mise en évidence lors de la seconde moitié du XX^{ième} siècle, augmentation que les mesures énergiques prévues pour le traitement des effluents urbains et industriels ne peuvent que très partiellement corriger. Les flux d'azote, dominés par les apports diffus en provenance des sols agricoles, sont très dépendants de l'hydrologie, ce qui explique l'importance des variations interannuelles. En ce qui concerne le phosphore, l'accroissement depuis les années 1950 est spectaculaire. La tendance est toutefois à la baisse depuis le milieu des années 1980 en raison de la généralisation des pratiques de déphosphatation des effluents urbains. Les apports de silice, largement dominés par les apports diffus, mais relativement indépendants des pratiques agricoles, apparaissent peu modifiés par rapport aux valeurs pristines. La Somme, à cause de sa lithologie dominée par la craie, est le bassin qui exporte proportionnellement le moins de silice.

La figure 72 montre les rapports molaires de ces flux annuels et les compare aux rapports de Redfield représentant les besoins de la croissance algale. Les tendances sont identiques sur les bassins de la Seine et de l'Escaut. Les rapports N/P élevés qui caractérisaient les apports pristines et 'traditionnels' de ces fleuves ont considérablement décliné lors de la seconde moitié du XX^{ième} siècle pour atteindre des niveaux où l'azote est devenu potentiellement limitant par rapport au phosphore. A partir des années 1980, la tendance s'inverse et l'on retrouve progressivement une situation où le phosphore devient plus limitant que l'azote en milieu marin. La Somme peu peuplée et par là très contaminée en nitrate et peu en phosphore, ne semble jamais avoir pu connaître de carence relative en azote par rapport au phosphore. En ce qui concerne les apports de silice, un déficit par rapport à l'azote et au phosphore au regard des besoins de la croissance des diatomées, apparaît vers 1950 pour l'Escaut, sans doute

un peu avant pour la Seine. Récemment, la diminution rapide des flux de phosphore provoque une remontée du rapport Si/P.

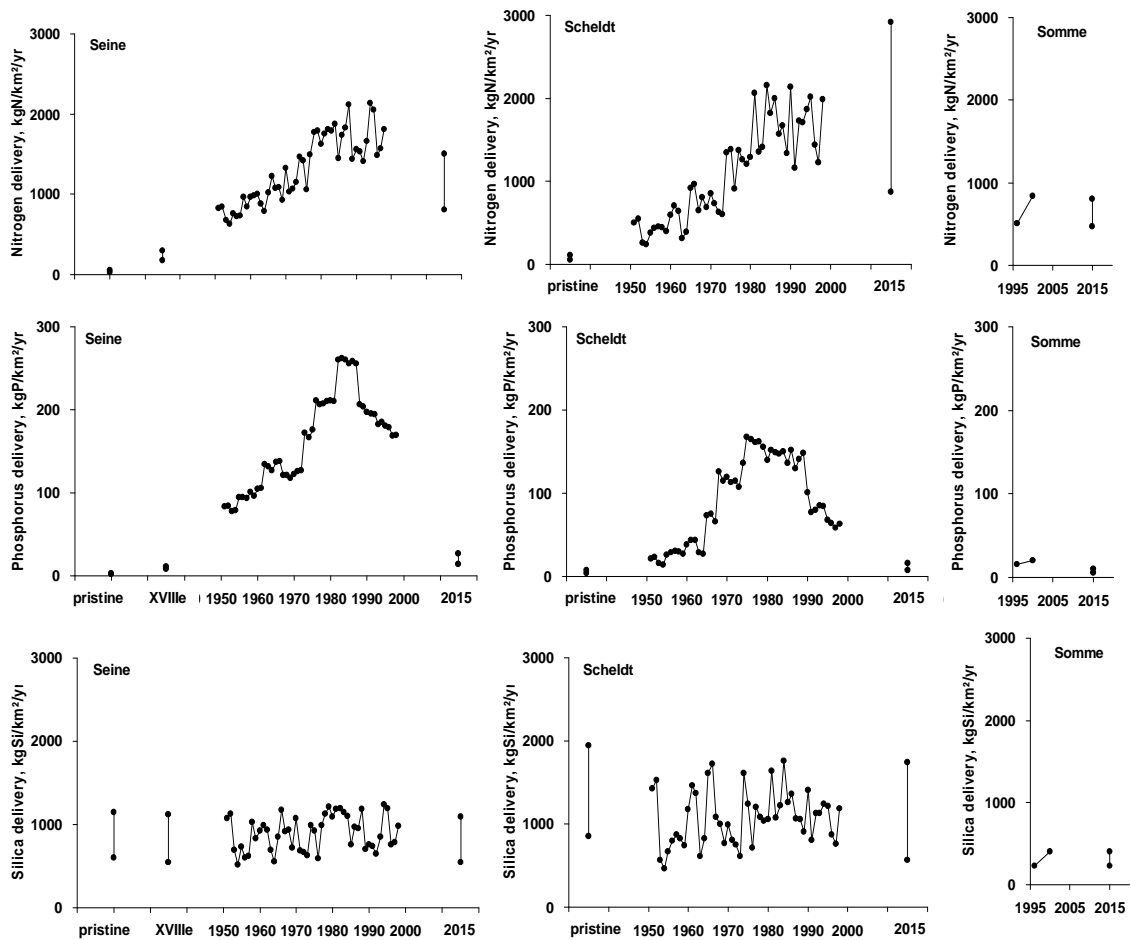


Figure 71. Flux annuels d'azote, de phosphore et de silice apportés par la Seine, l'Escaut (Scheldt) et la Somme calculés par le modèle Riverstrahler pour un état pristine, pour un état rural traditionnel (XVIII^{ième}), pour les années et selon un scénario prospectif 2015 (réduction des rejets de matière organique (90 %), de phosphore (90 %) et d'azote (70 %)).

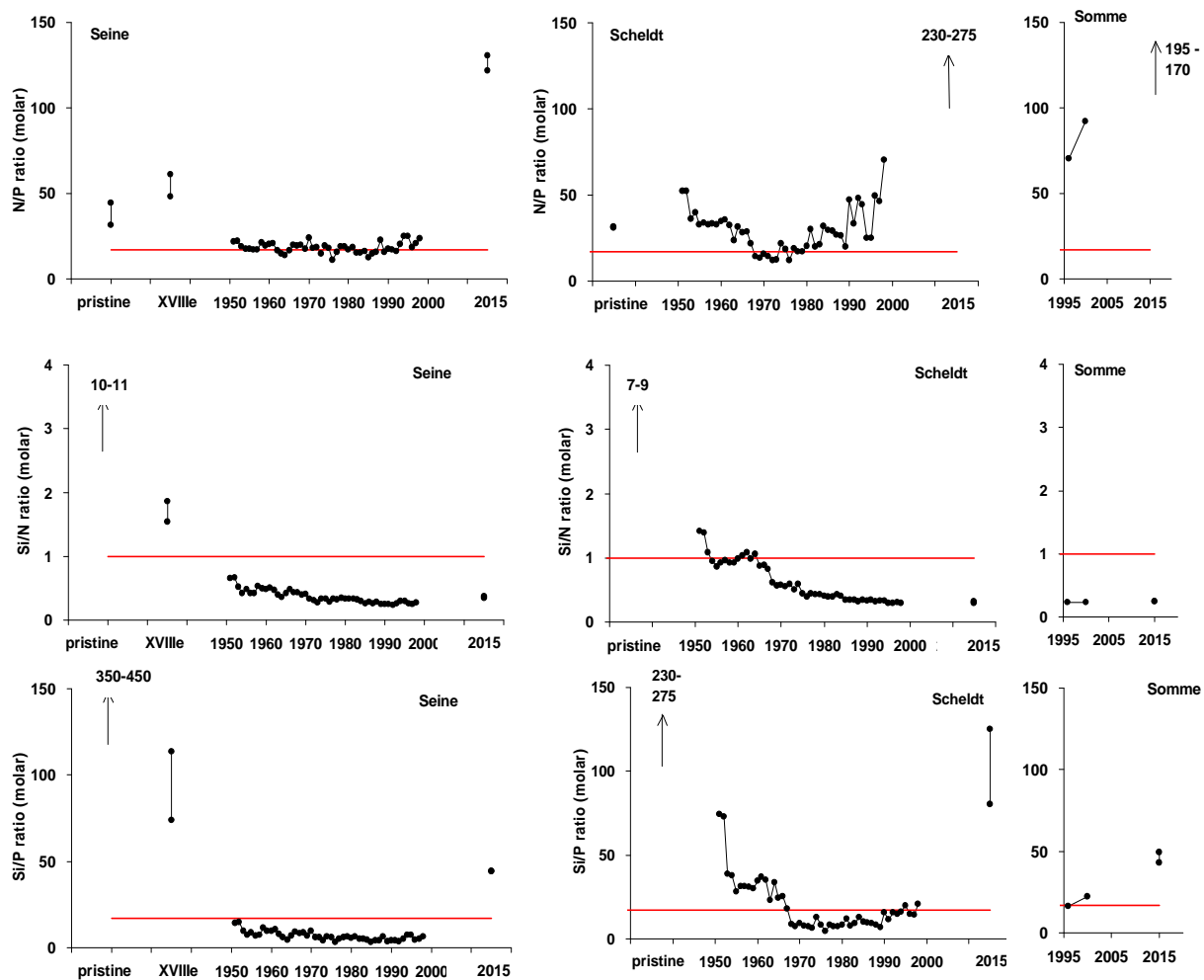


Figure 72. Rapports molaires des flux annuels de nutriments apportés par la Seine, l'Escaut (Scheldt) et la Somme calculés par le modèle Riverstrahler pour un état pristine, pour un état rural traditionnel (état de fin XVIII^{ième}), pour les années et selon un scénario prospectif 2015 (réduction des rejets de matière organique (90 %), de phosphore (90 %) et d'azote (70 %)) (Trait rouge : Rapports de Redfield).

Les nutriments en provenance des bassins-versants gagnent les eaux côtières et sont transportés sur de longues distances au gré de la circulation marine. Les efforts de gestion menés sur les rivières doivent être entrepris en fonction de leur impact sur la production locale. Cette problématique est délicate en cas d'apports en provenance de plusieurs sources. Du fait d'une circulation résiduelle orientée vers le nord-est, la quantification de l'importance des rejets à la zone côtière française (par la Seine et la Somme principalement) sur les efflorescences phytoplanctoniques observées en baie sud de la mer du Nord est depuis longtemps une question importante. Connaître l'origine de l'azote intégré dans la biomasse planctonique présente l'intérêt de pouvoir déterminer quels sont les rejets fluviaux sur lesquels doivent être portés les efforts de réduction de flux. Les équipes des projets LITEAU II et PNEC *Phaeocystis* ont ainsi décidé de ne pas aborder cette problématique par des études hydrodynamiques et des estimations de dilution des masses d'eau, mais ils ont mis en œuvre une méthode de traçage des sources d'azote initialement utilisée pour l'étude des sources d'azote impliquées dans les développements massifs de la macroalgue *Ulva* en rade de Brest

(Ménèsquen *et al.*, 2006) et transposé au modèle ECO-MARS 3D (**R-34.**, **R-46.**, **CN-6.**, **CN-8.**, **CN-10.**, **CN-13.**). Ménèsquen A., Cugier P., Vanhoutte-Brunier A. et Lefebvre A. (résultats non publiés) estiment grâce à cette méthode la part d'azote inorganique dissous (NID) d'origine française qui transite par le détroit du Pas-de-Calais (Tableau 12).

Tableau 12. Évaluation par la méthode de traçage de l'azote de Ménèsquen *et al.* (2006) des flux d'azote (N) et des flux d'azote marqué* (N^T) qui transite par le détroit du Pas-de-Calais (en milliers de tonnes par an) (* Le marquage revient à affecter une « nationalité » à une source d'azote en fonction de sa source : Atlantique, France (f), Belgique).

	N (10³ t N an⁻¹)	N^T (10³ t N an⁻¹)	fN^T (%) = N^T / N
NID	147	60,4	41
Diatomées	21,7	8,47	39
<i>Phaeocystis globosa</i>	0,73	0,41	56
N total	272	104	38

Les fleuves français apparaissent ainsi responsables à hauteur de 38 % du flux d'azote qui transite par le détroit. La part d'azote d'origine Atlantique est largement majoritaire dans le flux d'azote entrant en mer du Nord par la limite sud.

La technique de traçage permet d'estimer la proportion d'azote d'origine française intégrée dans la biomasse des groupes phytoplanctoniques. Au moyen du modèle, le bilan de l'azote d'origine française intégré dans la biomasse de diatomées et de *Phaeocystis* est réalisé au terme de l'année 1999 (Figure 73).

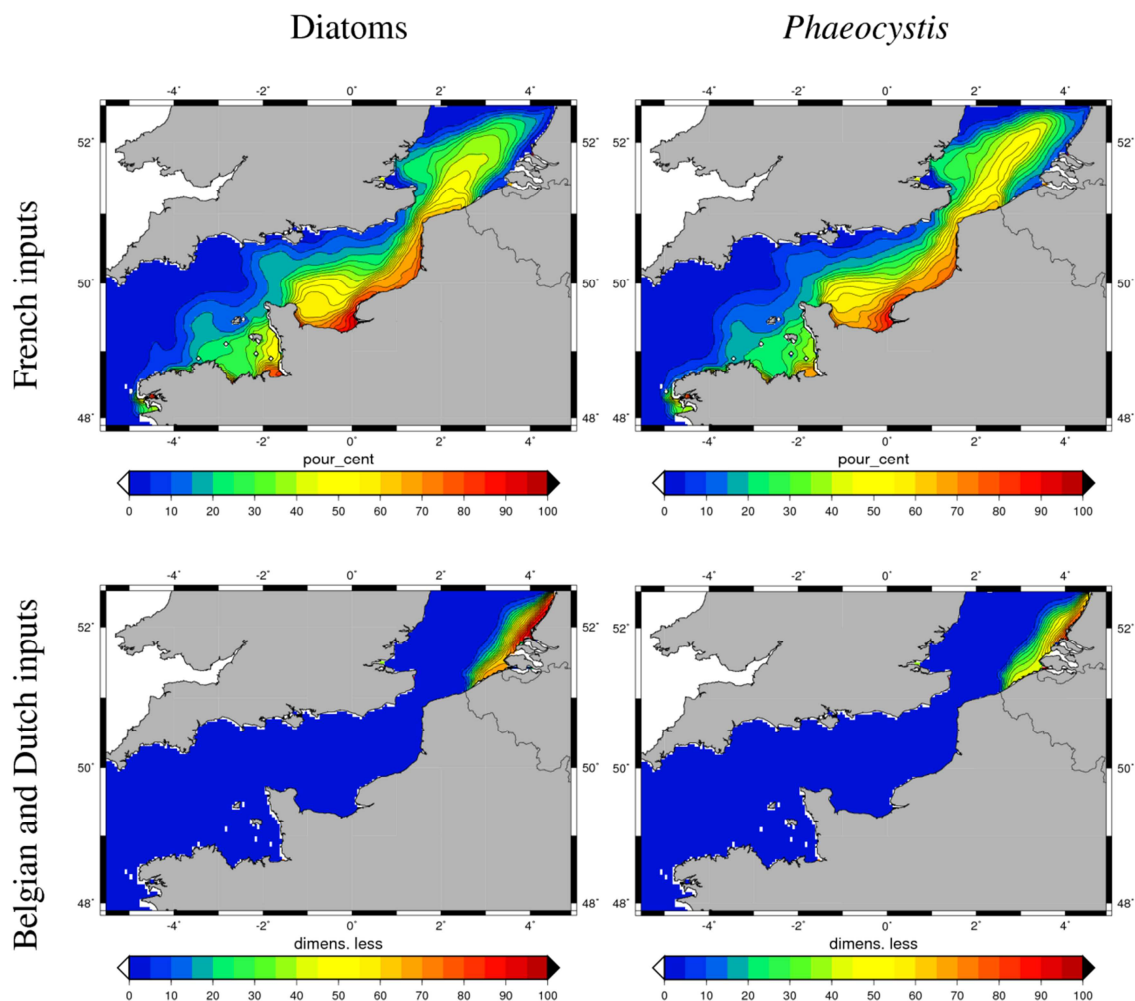


Figure 73. Pourcentage d'azote d'origine française (fN^T) intégré dans la biomasse phytoplanctonique des diatomées et de *Phaeocystis* (année 1999).

Ce type de représentation graphique fournit une vision intégrée de l'influence des nutriments en provenance des fleuves français sur la production primaire. Au centre de la Mer du Nord, le signal des fleuves français est fort. Il faut relativiser cette information au regard de l'importance de la production primaire et du gradient décroissant de la côte vers le large mis en évidence dans les sections précédentes. Dans la zone côtière où la concentration maximale en *Phaeocystis* simulée est supérieure à $10 \cdot 10^6 \text{ cell.l}^{-1}$ (Figure 74), l'influence des apports des fleuves « français » est inférieure à 20 %. Pour avoir une information précise et chiffrée, des calculs ont été réalisés dans les boîtes B et F (Figure 75).

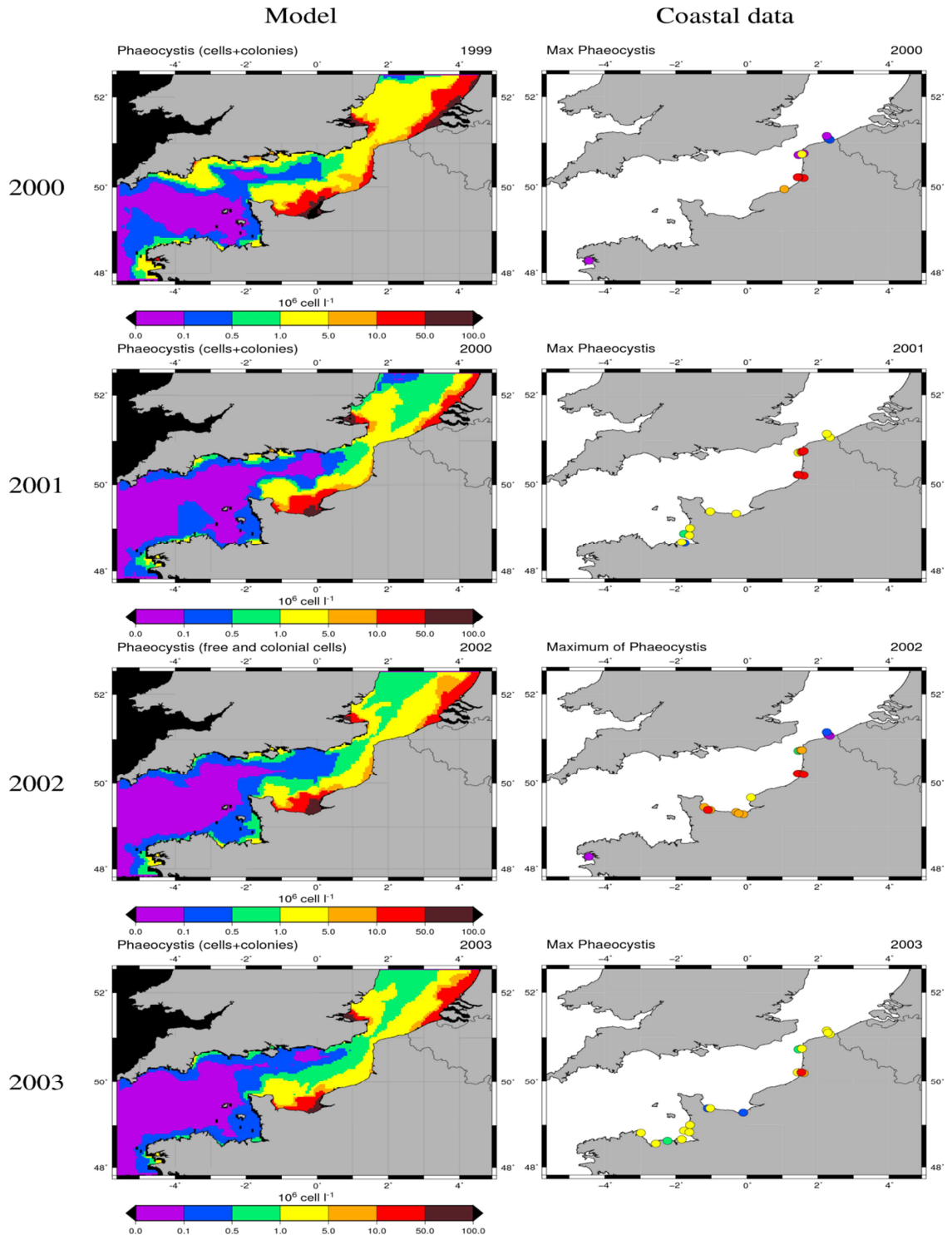


Figure 74. Concentrations cellulaires maximales de *Phaeocystis globosa* simulées par ECO-MARS3D (à gauche) et échantillonnées le long du littoral français (réseaux REPHY et SRN, à droite)

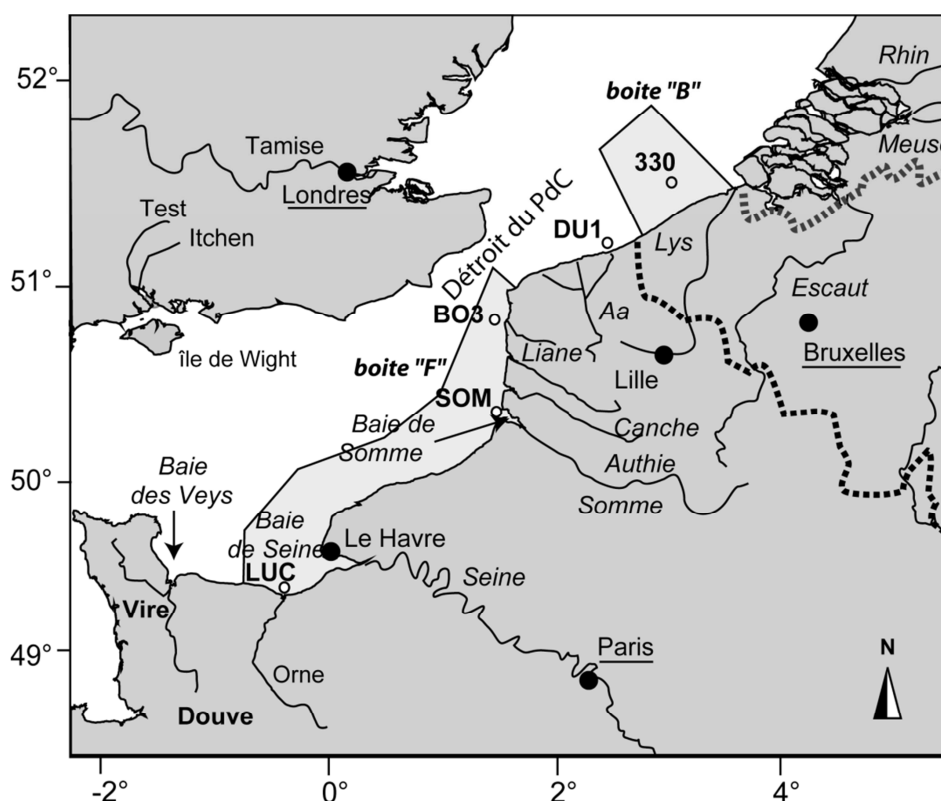


Figure 75. Points de validation du modèle ECO-MARS 3D (LUC, SOM, BO3 et DU1 des réseaux RHLN, REPHY et SRN) et délimitation de boîtes « B » : zone de compétence maritime belge, et « F » : zone côtière française de Manche orientale pour l'étude du devenir de matière.

Le tableau 13 fournit la proportion annuelle moyenne en azote des deux origines étudiées (F et B) dans deux compartiments de l'écosystème : le nitrate et les *Phaeocystis*.

Tableau 13. Pourcentage annuel moyen de nitrate (N-NO₃) et d'azote de colonies de *Phaeocystis globosa* (N-Pg) de diverses origines dans différentes zones du domaine modélisé (représentées sur la figure 35).

	$fN-NO_3^T$ d'origine « F » (%)	$fN-NO_3^T$ d'origine « B » (%)	$fN-Pg-c^T$ d'origine « F » (%)	$fN-Pg-c^T$ d'origine « B » (%)
boîte F	70	0	80	0
boîte B	29	22	10	40
Fluxes Dover Strait	41	0	56	0

En moyenne sur une année, le nitrate provient à 70 % des fleuves français et à 30 % des apports océaniques. L'azote incorporé dans les colonies de *Phaeocystis* au niveau de la zone côtière française proviendrait à 80 % des rivières françaises. Seuls 10 % de l'azote des rivières françaises serait incorporé dans les colonies de *Phaeocystis* au niveau de la zone côtière belge. Ceci contraste avec un fort taux annuel de nitrate d'origine française

au large de la côte belge. En fait, les flux de nutriments qui transitent en Manche orientale sont potentiellement maintenus à la côte en raison de l'existence du fleuve côtier. Dans le détroit du Pas-de-Calais, les masses d'eaux côtières plus riches en nutriments sont projetées vers le large par effet de cap au niveau du cap Gris-Nez. Elles rejoignent donc la circulation centrale de la Manche et ne vont pas impacter de manière conséquente les eaux côtières belges.

La proportion de nitrate issu des fleuves français $fN-NO_3^T$ est sensiblement identique au niveau de la station 330 (39 % du NO_3) et au niveau du détroit du Pas-de-Calais (41 % du NO_3).

Sur l'ensemble de la simulation, le nitrate est en moyenne à 29 % d'origine française dans la boîte « B ». En moyenne, sur l'année, l'influence des fleuves français est même supérieure dans la boîte B à celle des fleuves belgo-néerlandais (29 % et 22 %, respectivement). L'influence des rivières françaises est donc importante dans l'axe central de la baie sud de la mer du Nord. Le long des côtes belges et hollandaises, où la production de *Phaeocystis* est très importante, la part de cette production liée aux apports des rivières françaises est inférieure à 30 %. L'influence de la résiduelle du courant est importante lorsque les panaches de l'Escaut, de la Seine et du Rhin n'ont pas leur étendue maximale. Mais la production de colonies de *Phaeocystis* est majoritairement due à l'influence des apports de la Lys, de l'Escaut, de la Meuse et du Rhin, contrairement à ce que les résultats pour le nitrate auraient pu laisser penser. En effet, leur influence est même supérieure d'un facteur 2 (22 % vs 10 % pour les apports d'origine B et F, respectivement). Ceci signifie qu'au moment du bloom de *Phaeocystis*, l'étendue du panache des fleuves belgo-néerlandais est maximale et que ces derniers influent donc de manière prépondérante sur la production phytoplanctonique printanière. Ce résultat est en conformité avec les conclusions de Breton *et al.* (2006) basées sur l'étude de séries temporelles de données *in situ* acquises en zone côtière belge. Cependant, selon ces auteurs, cette étendue du panache des fleuves, et par conséquent les apports de nutriments, pourront être modulés par des effets climatiques (notamment ceux liés aux variations provoquées par l'Oscillation Nord Atlantique - NAO) (voir section 2.4.4).

Ces considérations sur la relation entre la succession phytoplanctonique et les conditions environnementales nous renvoient inévitablement vers l'incontournable mandala de Margalef (1978) qui a ouvert la voie à l'écologie du phytoplancton en proposant de définir des groupes fonctionnels qui sont représentatifs de l'adaptation de différentes formes de vie à des habitats spécifiques. Margalef définit ainsi un espace à quatre cadrans en fonction de l'affinité des diatomées et des dinoflagellés à se développer dans des conditions données de concentrations en nutriments inorganiques et de turbulence. Pour lui, une succession phytoplanctonique classique va suivre une route partant du cadran caractérisé par une forte turbulence et des concentrations élevées en nutriments vers le cadran opposé avec une faible turbulence et de faibles concentrations en nutriments. Ce concept sera adapté par Reynolds (1988), Smayda et Reynolds (2001), Reynolds *et al.* (2002) qui considèrent l'occurrence de groupes fonctionnels (ensembles de taxons aux caractéristiques morphologiques et physiologiques proches, sans considération taxonomique et associés aux stratégies Rudérale, de Compétition et Stress-tolérante) en interactions avec différents niveaux de nutriments et de turbulence indépendamment de leurs cycles saisonniers. Au regard de la structure de la communauté phytoplanctonique et de sa dynamique temporelle mis en évidence dans la section 2.4.2.2, il apparaît très difficile de proposer un schéma type de la succession

phytoplanctonique en Manche orientale et en baie sud de la mer du Nord en tenant compte de ces concepts. Il est difficile d'affecter telle ou telle succession à la route classique ou à la route menant vers les efflorescences nuisibles du mandala de Margalef, tout comme il est difficile de proposer un schéma de transition logique entre les stratégies R, C et S de Reynolds et collaborateurs (l'affectation d'un taxon à l'une des stratégies dépend du rapport Surface/Volume et de la dimension linéaire maximale). Il apparaît en fait des routes alternatives, des chevauchements, des mélanges de taxons de stratégies différentes. Un même taxon peut même présenter différentes stratégies en fonction de son morphotype. Guiselin (2010) (**Th-3.**) indique, par exemple, que les colonies de *Phaeocystis globosa* sont des stratégies S, alors que les formes libres (cellules coloniales libres et flagellés diploïdes et haploïdes) sont des stratégies C.

Afin de mieux comprendre la succession des taxons, leur coexistence, leur exclusion et quelles sont les conditions environnementales qui la contrôlent, quelle est la tolérance des taxons phytoplanctoniques aux changements environnementaux, donc *in fine* pour mieux comprendre la diversité de ce compartiment, le recours à la notion de niche constitue une autre étape importante de mon projet. La niche est définie par Hutchinson (1957) comme l'espace de conditions environnementales dans lequel une espèce est capable de persister. L'espèce occupe ainsi théoriquement un hypervolume (Margalef et Reynolds proposent donc un hypervolume à deux dimensions) dont les axes correspondent à tous les facteurs environnementaux nécessaires à sa survie. C'est la niche fondamentale. Les interactions de cette espèce avec son environnement font que l'espace réellement occupé et qui lui permet de croître n'est pas la niche fondamentale mais la niche réalisée. La dynamique de succession phytoplanctonique va être telle que chaque espèce va se développer selon les caractéristiques de sa niche, et va alors modifier son milieu pour le rendre favorable, ou pas, pour une autre espèce. Ce type d'approche suit ma logique d'augmentation de la complexité des informations considérées. En effet, après avoir fait évoluer le système d'observation de ma zone atelier de la BF vers la HF, puis après avoir caractérisé la biomasse phytoplanctonique globale, puis la composition du phytoplancton via un indice synthétique de diversité, via des approches ataxonomiques, par espèces ciblées ou par grands groupes, l'étape ultime est de pouvoir appréhender les réponses de la communauté phytoplanctonique à la variabilité environnementale, d'origine naturelle comme anthropique, à l'échelle des espèces. Cependant, que ce soit par la méthode conventionnelle (microscopie inversée) comme par les méthodes complémentaires (FlowCam, par exemple), il est d'ores et déjà évident qu'à ce jour l'approche au niveau taxonomique le plus élevé est un vœu pieux. C'est pourquoi une approche fonctionnelle basée sur les traits est recommandée pour d'abord simplifier l'étude de la diversité puis pour compléter le niveau d'information issu de l'analyse des niches (Litchman *et al.*, 2008, 2010). L'opportunité d'aborder la thématique de la diversité fonctionnelle et de l'approche basée sur les traits m'a été donnée via une collaboration récente avec S. Lefebvre (UMR LOG, Wimereux) dans le cadre de la thèse de S. Karasiewicz (**Th-9.**) dédiée à l'étude des réponses de la communauté phytoplanctonique aux changements globaux et leurs effets sur le fonctionnement de l'écosystème. Karasiewicz *et al.* (**CI-42.**, **CI-43.**, **CI-44.**) estiment les niches réalisées pour les diatomées et pour *Phaeocystis globosa* par une version améliorée de la méthode OMI (Outlying Mean Index). Deux situations contrastées d'amplitude du bloom de *P. globosa* sont caractérisées par deux trajectoires environnementales et deux communautés de diatomées différentes dont les principales caractéristiques sont résumées dans le tableau 14.

Tableau 14. Principales caractéristiques biotiques et abiotiques lors de deux situations contrastées d'intensité du bloom de *Phaeocystis globosa* en zone côtière de Boulogne-sur-Mer.

Intensité du bloom de <i>P. globosa</i>	Faible	Forte
Début du bloom de <i>P. globosa</i>	Tardif	Précoce
Température	-	+
Salinité	-	+
Turbidité	+	-
Stock ammonium hivernal	+	-
Stock phosphate hivernal	+	-
Compétition avec les diatomées	+	-

Ces résultats sont proches de ceux de Hernández-Farinas *et al.* (2015) qui, sur la base d'une approche similaire mais étendue aux sites de Dunkerque et de la baie de Somme, concluent que la lumière, la température, la richesse spécifique et les concentrations en nutriments sont les principaux facteurs qui contrôlent la dynamique du phytoplancton et la structure de la communauté.

En ce qui concerne l'importance de la lumière comme facteur de contrôle des efflorescences de *Phaeocystis* en particulier, Peperzak *et al.* (1998) définissent un seuil d'intensité lumineuse minimale à partir duquel l'initiation du bloom est possible en mer du Nord. L'analyse des données du PAR mesuré dans l'air par le système MAREL Carnot entre 2005 et 2009 (Lefebvre, résultats non publiés) montrent que l'augmentation des valeurs printanières suit un schéma relativement stable avec très peu de variabilité interannuelle, ce qui contraste avec la forte variabilité des dates d'apparition de *Phaeocystis*. Le seuil (arbitraire) des $100 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ est dépassé à la fin du mois de février chaque année. Cette approche mérite d'être approfondie. Alors que la question de l'importance de la lumière pour l'initiation des efflorescences phytoplanctoniques en général ne doit même pas se poser (voir également la section 2.4.5.), son rôle sur l'initiation du bloom de *Phaeocystis* en Manche orientale ne paraît pas déterminant.

Après avoir mieux défini une partie des facteurs de contrôle des efflorescences phytoplanctoniques, une étape essentielle lorsque l'on étudie l'eutrophisation est de considérer les effets directs et indirects de la présence de la biomasse en excès et/ou de la présence de certains taxons.

L'accumulation de mousses sur le littoral lors de la phase de sénescence du bloom de *Phaeocystis globosa* va provoquer un apport massif de matière organique. Le rôle du compartiment bactérien apparaît comme essentiel pour la dégradation de cette matière organique (Becquevort *et al.*, 1998 ; Lamy *et al.*, 2009). Spilmont *et al.* (2005) (**Art-2.**) mesurent également au niveau de la communauté benthique intertidale en Manche orientale (estran sableux de Wimereux, proche de la radiale REPHY / SRN de Boulogne-sur-Mer) de forts taux de respiration corrélés positivement à l'abondance de la communauté bactérienne présente sur les mousses et une augmentation du taux de nitrification. Par conséquent, si l'on considère le schéma de Van Beusekom et Diel-Christiansen (2009) en matière de transfert d'énergie et de nutriments au sein du réseau trophique (Figure 76), nous pouvons en conclure que la phase de sénescence du bloom de *Phaeocystis globosa* ne sera pas caractérisée par un fonctionnement classique du réseau trophique avec une chaîne de transfert d'énergie, dite courte, et une production du microphytoplancton qui sera directement transférée vers les niveaux trophiques

secondaires (herbivores) et supérieurs. En fait, la majorité de la production sera transférée via les flagellés hétérotrophes et les ciliés via le mésozooplancton vers les niveaux trophiques supérieurs. La modification de la communauté phytoplanctonique, et notamment le changement du rapport de dominance entre *Phaeocystis* et les diatomées, va affecter le régime alimentaire et la reproduction des copépodes, ce qui pourra également expliquer une hétérogénéité de la distribution d'abondance du zooplancton (Daro *et al.*, 2008) et contribuer davantage à des modifications des transferts d'énergie entre les compartiments. Finalement, cette chaîne de transfert, dite longue, permettra ainsi d'alimenter davantage de niveaux mais l'énergie transmise vers les niveaux trophiques supérieurs sera moindre en raison de sa dissipation au cours du transfert. En matière de flux de carbone et d'azote à grande échelle spatiale, cet impact de l'accumulation de mousse devra être considéré dans les bilans.

Par ailleurs, Spilmont *et al.* (2009) montrent que la présence de *P. globosa* (i) a également un impact négatif significatif sur la production primaire et le taux de croissance de l'algue *Saccharina latissima* au niveau des estrans rocheux et (ii) provoque une anoxie au niveau des sédiments estuariens induisant des mortalités au niveau de la communauté benthique. Plus généralement, *P. globosa* provoque donc une modification des flux d'azote dans le sédiment et donc vers le compartiment pélagique. La réduction de la diversité et de l'abondance au niveau du macrozoobenthos pendant la phase d'accumulation de mousse peut amener à des changements au niveau du réseau trophique estuariens. Cependant, il faut noter que les systèmes benthiques et la plupart des organismes concernés reviennent à un mode de fonctionnement classique quelques semaines après cette phase.

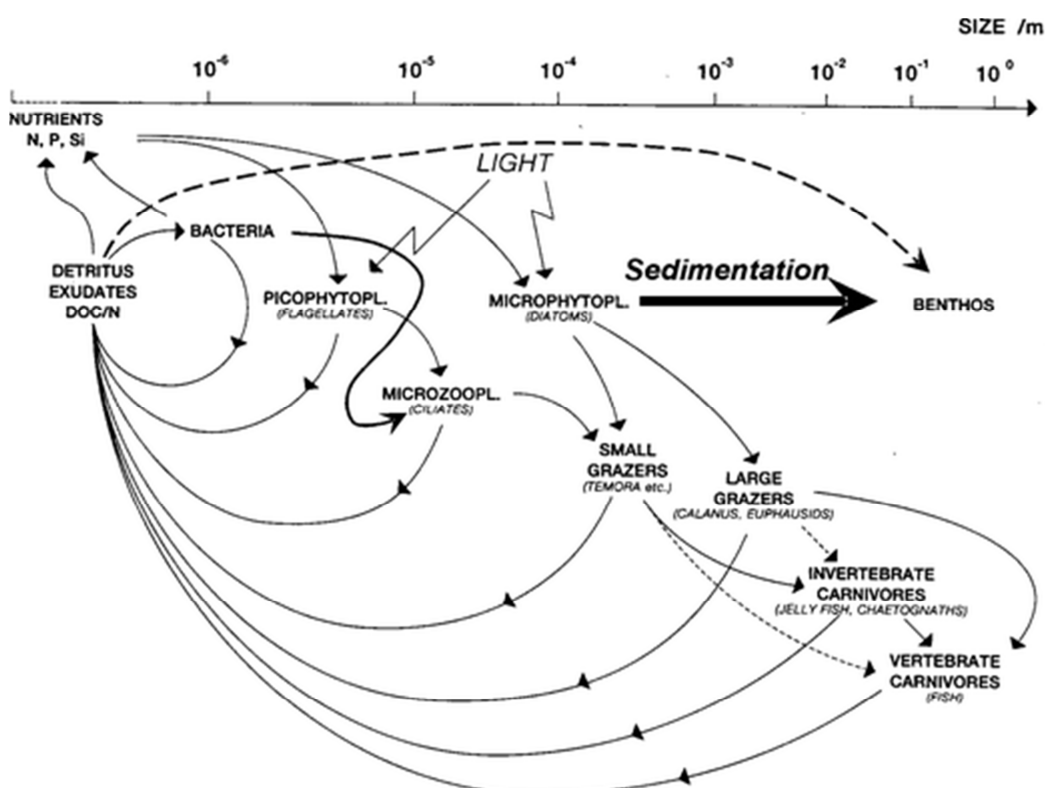


Figure 76. Représentation schématique des principales voies de transfert d'énergie et de nutriments au sein du réseau trophique (source : Van Beusekom et Diel-Christiansen, 2009).

Nous avons également confirmé que les périodes de dominance de *Phaeocystis globosa* sont généralement associées à des concentrations importantes de *Pseudo-nitzschia sp.*. Considérant les conclusions de Lefebvre *et al.* (2001) (**Art-6.**), de Hernández-Farinas *et al.* (2013) (**Art-7.**) quant à une augmentation de l'abondance de *Pseudo-nitzschia sp.* depuis le début des années 2000, et celles de Delegrange (2015) (**Th-7., JTh-6.**), de Delegrange *et al.* (Révision en cours, **ArtS-1.**) quant à la coïncidence entre des mortalités de bars d'élevage (*Dicentrarchus labrax*) et l'efflorescence phytoplanctonique printanière, la question de l'impact de ces efflorescences sur le compartiment pélagique et sur les poissons en particulier mérite d'être approfondie. Les efflorescences majeures de *Phaeocystis globosa* vont entraîner des changements de viscosité (Seuront *et al.*, 2006) pouvant provoquer des modifications comportementales des poissons (exemple de l'inhibition de l'activité nataoire des larves) (Fuiman et Batty, 1997 ; von Herbing et Keating, 2003) ou métaboliques (exemple de l'inhibition des fonctions branchiales) (Jenkinson, 1993). Les modifications de viscosité vont également inévitablement jouer sur les relations proies/prédateurs au sein du plancton (Seuront et Vincent, 2008).

La présence simultanée de *Phaeocystis globosa* et de *Pseudo-nitzschia sp.* va provoquer la création de structures ressemblant à de mini-oursins (aiguilles de *Pseudo-nitzschia sp.* plantées dans les colonies de *Phaeocystis*) qui seront avalés passivement par les poissons. Ces structures pourront provoquer des agressions mécaniques des tissus branchiaux et/ou digestifs ouvrant la voie à des infections virales, bactériennes. Cette agression mécanique sera d'autant plus importante que d'autres taxons en forme d'aiguille ou présentant des spicules pointus ont été recensés dans nos études et contribueront ainsi à former ces assemblages irritants. Il s'agit de *Chaetoceros sp.*, de certaines *Thalassiosira*, de *Rhizosolenia imbricata*, *R. styliformis*.

Par conséquent, c'est l'ensemble des compartiments pélagique et benthique qui sera impacté par les proliférations de *Phaeocystis globosa*, de *Pseudo-nitzschia sp.* et des cortèges d'espèces associées.

Les changements au sein de la communauté phytoplanctonique ne sont donc pas déconnectés des changements que l'on pourra observer au sein de l'écosystème et les interactions entre les composantes de l'écosystème vont amplifier ou atténuer ces changements. Ces relations complexes au sein de ces compartiments ont motivé dès 2004 (dans le cadre du projet Liteau II - **CNat-2.**) mon intention d'intégrer aux campagnes halieutiques en Manche - mer du Nord des suivis hydrologiques et du compartiment planctonique. En plus de cette volonté d'obtenir une vision plus intégratrice de différentes composantes pélagiques, cette stratégie était l'occasion pour mon laboratoire d'étendre sa zone atelier vers le large. Pour certains paramètres, cette extension implique de pouvoir disposer de données de référence hors impacts anthropiques directs afin de pouvoir prétendre déconvoluer les changements d'origine naturelle des changements d'origine anthropique. Par le biais d'une stratégie conventionnelle d'échantillonnage et d'analyses (prélèvement à la bouteille Niskin, profils de sonde, prélèvements au filet à plancton, analyses des paramètres de la qualité de l'eau en laboratoire, lecture des flores en microscopie inversée), nous avons pu ainsi définir les caractéristiques physico-chimiques et biologiques (phytoplancton) des masses d'eaux (Lefebvre et Sauvage, 2004 - **R-21.**) concernées par le programme d'échantillonnage IBTS (International Bottom Trawl Survey). Ce programme est lié à l'obligation française d'effectuer la collecte et la gestion des données nécessaires à la conduite de la politique commune de la pêche pour évaluer l'abondance et la

distribution des stocks (Règlements Communautaires N° 1543/2000 et N° 1639/2001). Cette stratégie « Liteau » d'échantillonnage a été reprise et améliorée (Carpentier *et al.*, 2009 - **R-52.**) au fil des années par mon équipe et celle du laboratoire Ressources Halieutiques afin d'aboutir vers les années 2009-2010 à une véritable stratégie pour l'approche écosystémique des pêches en Manche - mer du Nord, comme recommandée par certains gouvernements et organisations internationales depuis les années 90 mais trop peu mis en œuvre (Pitcher *et al.*, 2009).

Dans la logique de ce type d'approche intégratrice et dans le cadre du chantier 2 (juillet 2012 - mai 2013) de la DCSMM destiné à proposer une liste de paramètres et de dispositifs de suivi pour chacune des 11 thématiques du Bon État Ecologique, les pilotes scientifiques (Lefebvre, 2013 - **R-86.** pour la thématique Eutrophisation) ont tous fait référence aux campagnes halieutiques en tant que support de suivis complémentaires à la surveillance actuelle, essentiellement ciblée vers les expertises halieutiques. Ainsi, à ce jour, en plus de la mise en œuvre des méthodes conventionnelles d'échantillonnage et d'analyses, les outils développés pour les besoins de l'observation côtière (section 2.3) sont couramment utilisés lors des campagnes halieutiques en Manche et en mer du Nord (IBTS, CAMANOC 2014). Il s'agit notamment du Pocket Ferry Box couplé au fluorimètre spectral de type OAO, de la cytométrie en flux et du système FlowCam/ZooPhytoImage en ce qui concerne l'étude des paramètres de la qualité générale des masses d'eaux et du phytoplancton. Un groupe de travail, dont je fais partie, envisage l'installation d'un système de type Ferry Box à bord du navire de recherche halieutique Thalassa, afin de pérenniser ce mode d'acquisition de données à haute résolution spatiale et temporelle et de le généraliser à toutes les campagnes en mer en Manche et en Atlantique (exemples des campagnes EVHOE, PELGAS). Un système de type Pocket Ferry Box sera également déployé sur le navire Europe affrété en Méditerranée (Exemples des campagnes MEDITS, PELMED).

2.4.4. Contrôles climatiques

Prenons les six journées de la Genèse comme image pour présenter ce qui, en fait, s'est passé en quatre milliards d'années. Une journée égale donc environ six cent soixante millions d'années.

Notre planète est née le lundi à zéro heure.

Lundi, mardi et mercredi jusqu'à midi, la Terre se forme.

La vie commence mercredi midi et se développe pendant les trois jours suivants.

Samedi à quatre heures de l'après-midi seulement, les grands reptiles apparaissent.

Cinq heures plus tard, à neuf heures du soir, lorsque les séquoias sortent de terre, les grands reptiles disparaissent.

L'Homme n'apparaît qu'à minuit moins trois minutes samedi soir.

A un quarantième de seconde avant minuit, commence la révolution industrielle.

Il est maintenant minuit samedi soir, et nous sommes entourés de gens qui croient que ce qu'ils font depuis un quarantième de seconde peut durer indéfiniment ...

David Brower.

Cette image proposée par D. Brower nous permet de prendre un certain recul sur nos études et recherches. Il est clair que nos écosystèmes vont continuer à évoluer et le regard que nous portons sur leur évolution n'est représentatif que d'un court instant à l'échelle des temps géologiques, de l'évolution de l'hydrosphère et la biosphère. Avec une montée en puissance de l'observation et de la surveillance de l'environnement

marin dans les années 70 et 80, notre étude se situe à des échelles de temps bien inférieures encore à celle de ce quarantième de seconde qui marque la phase la plus importante des interventions humaines à effets négatifs sur l'environnement et son fonctionnement. Afin de mieux comprendre la variabilité des écosystèmes, il est important de tenir compte des paramètres locaux, régionaux, y compris les phénomènes météorologiques. Mais depuis quelques décennies, l'ampleur des modifications du climat par les activités anthropiques apparaît sans précédent. Il est donc tout aussi essentiel de considérer l'évolution du climat et de ses indices qui constituent les éléments structurants de base de la biodiversité depuis des millénaires. Les variations naturelles du climat sont régies par une variabilité interne et sont sous influences astronomique, de l'énergie émise par le soleil et du volcanisme. Après plus de dix mille ans d'une période considérée comme stable lors du développement de la civilisation, ces dernières décennies sont marquées par des changements rapides initiés depuis l'ère industrielle puis exacerbés depuis la fin de la seconde guerre mondiale.

Les séries de données acquises à BF grâce aux réseaux REPHY / SRN, IGA Gravelines constituent par leur durée et l'ensemble des paramètres mesurés des séries exceptionnelles permettant d'appréhender la variabilité de l'environnement des échelles de temps compatibles avec ces variations récentes du climat jusqu'aux échelles de temps relatives à des influences plus locales.

Woerhling *et al.* (2005) (**Art-3.**), à partir de la série de données de température de la station côtière IGA Gravelines 1975-2002 (proche de la radiale REPHY / SRN Dunkerque), mettent en évidence une tendance croissante de ce paramètre qui se surimpose à une forte variabilité interannuelle (Figure 77). Ces résultats traduisent l'existence d'un schéma complexe de fluctuations et d'évolution de la température de l'eau en zone côtière qui peut s'expliquer par la modification des schémas plus locaux via la superposition de patrons généraux et de tendances à grande échelle.

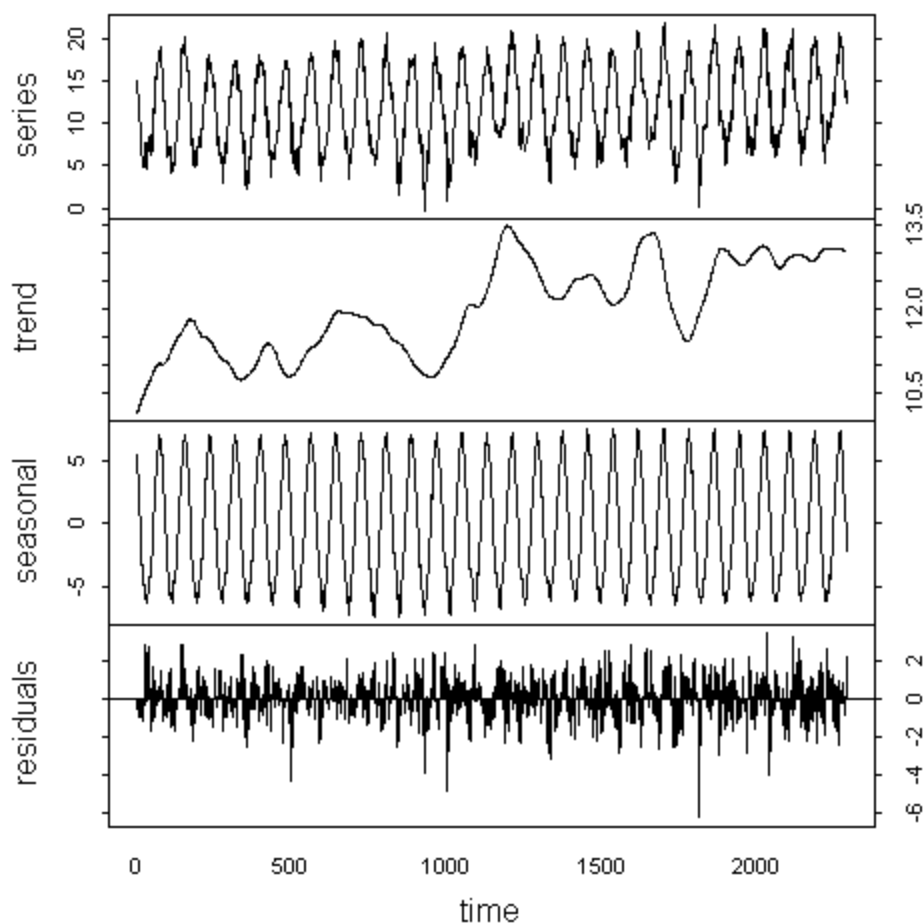


Figure 77. Décomposition du signal brut (series) de la série temporelle de température de l'eau (°C) mesurée à la station côtière IGA Gravelines au cours de la période 1975-2002 en ses composantes de tendance (trend), saisonnière (seasonal), et de résidus (residuals).

L'étude des anomalies de degrés-jours permet de conclure quant à l'existence de deux périodes distinctes, avant et après 1988 (Figure 78). Edwards *et al.* (2001), Reid *et al.* (2001) mettent en évidence des ruptures importantes des conditions hydroclimatiques dans les années 70 et 80 à l'échelle de l'Atlantique nord-est. Les modifications du régime de température à différentes échelles vont avoir comme effet direct d'agir sur la croissance et la production du phytoplancton et, comme effets indirects, de modifier la stabilité de la colonne d'eau et la croissance des prédateurs. L'augmentation de la température va contribuer, en dehors de son impact sur le métabolisme des organismes, à augmenter le taux de minéralisation, à faire diminuer la concentration en oxygène dans l'eau, à favoriser l'établissement de stratification dans certaines zones. Ces stratifications seront favorables au développement de certains flagellés, alors que la diminution de la concentration en oxygène ne fera qu'accentuer les effets négatifs de la prolifération de certains taxons comme *Phaeocystis*.

L'étude des relations entre l'environnement et le phytoplancton dans notre zone atelier via l'analyse des séries IGA, SRN / REPHY et via les projets de recherche plus récents se fait donc dans une période marquée par une augmentation significative de la température de l'eau, mais après une rupture importante des conditions hydroclimatiques, qui n'a pas été sans conséquence sur les organismes et

l'environnement. Les modifications que nous relevons via l'analyse de nos séries sont à la fois le fruit de ces ruptures et celui des dégradations ou améliorations plus récentes. Par ailleurs, Woerhling *et al.* (2005) (**Art-3.**) établissent une relation linéaire significative entre l'indice NAO hivernal (North Atlantic Oscillation, décembre à mars ; Hurrell, 1995) et les anomalies annuelles, ou de décembre à mars, de la température de l'eau exprimée en degrés-jours. Les données de température de l'eau présentent également un cycle de 7-8 ans qu'il faudra également considérer lors des approches multi-paramètres.

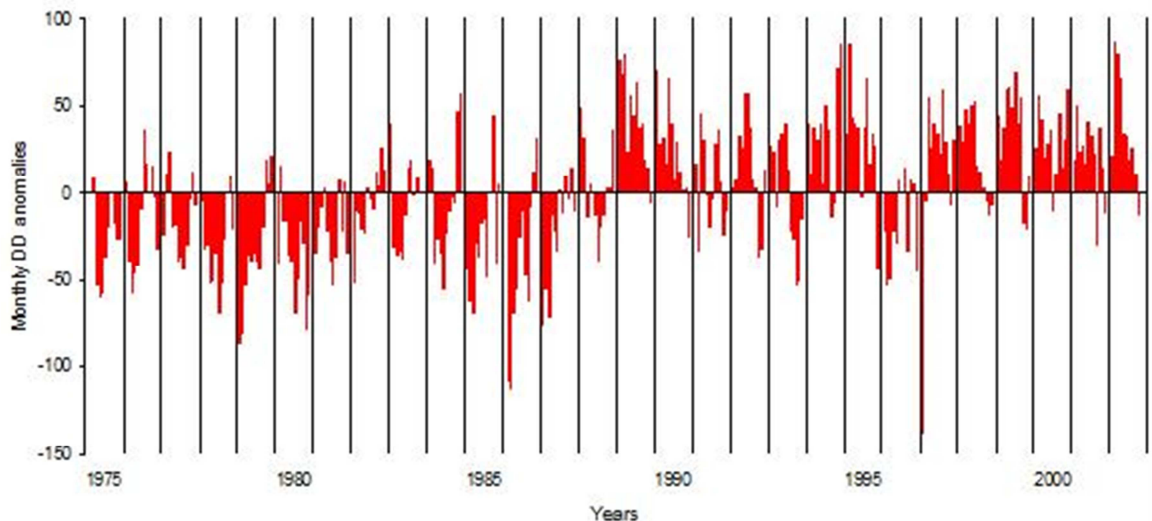


Figure 78. Anomalies en degrés-jours (déviations par rapport à la moyenne mensuelle 1975-2002) de la température de l'eau (°C) mesurée à la station côtière IGA Gravelines.

Seuront et Souissi (2002) mettent en évidence le rôle de la NAO sur le bloom de *Phaeocystis globosa* et des diatomées. Alors que ces auteurs s'intéressent à la radiale REPHY / SRN de Boulogne-sur-Mer, site caractéristique de la partie méridionale de la Manche orientale, il serait intéressant d'utiliser les séries biologiques (phytoplancton comme zooplancton) de la surveillance IGA Gravelines afin de vérifier que leurs hypothèses de contrôle climatique du bloom de *Phaeocystis globosa* et du phytoplancton en général est valide dans la baie sud de la mer du Nord, ce qui permettrait également de faire la jonction avec les travaux de Irigoien *et al.* (2000) en Manche orientale, Breton *et al.* (2006) en zone côtière belge dont les hypothèses de fonctionnement sont différentes. La question que l'on peut se poser est : existe-t-il un gradient d'influence du climat entre la Manche orientale et la mer du Nord avec une transition ou une rupture écologique qui coïnciderait avec une rupture géographique ? Ceci pourrait contribuer à mieux appréhender les enjeux transfrontaliers en termes de gestion de l'environnement. En effet, les zones transfrontalières sont des zones à enjeux majeurs ; les uns ayant toujours tendance à considérer que les problèmes sont liés aux activités des autres ...

Plus récemment et à partir des séries REPHY / SRN 1992-2011, Hernández-Farinas *et al.* (2013) (**Art-7., CI-20., CI-23., CN-26., CN-27.**) insistent sur l'importance de l'indice AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation ; Kerr, 2000) comme l'un des facteurs principaux définissant la structure de la communauté phytoplanctonique, confirmant ainsi le lien évoqué par Lefebvre *et al.* (2011) (**Art-6.**) pour notre site atelier entre la variabilité climatique à grande échelle et le phytoplancton, et comme mis en évidence

pour des zones adjacentes (Irigoién *et al.*, 2000 ; Leterme *et al.*, 2005 ; Breton *et al.*, 2006).

NAO et AMO vont par conséquent avoir un rôle déterminant sur l'évolution du phytoplancton en modifiant les conditions environnementales et notamment la salinité, la turbidité, les concentrations en nutriments via leurs rôles sur les précipitations et les débits des fleuves et rivières. Ils agiront également sur la vitesse et la direction du vent, ce qui se répercutera sur la circulation des masses d'eaux et l'orientation des panaches des fleuves et rivières, impactant ainsi plus ou moins les zones sous l'emprise, ou pas, de ces panaches.

Les stratégies de lutte contre l'eutrophisation visent à réduire les apports de nutriments avec, à ce jour, une efficacité plus importante sur les rejets ponctuels que sur les rejets diffus. Or les changements climatiques devraient intensifier les événements extrêmes (notamment les tempêtes et les inondations), ce qui devrait contribuer, entre autres, à une augmentation des apports diffus de nutriments (Jeppersen *et al.*, 2011), ce qui va ainsi accentuer l'eutrophisation. L'étude de ces événements extrêmes, de leurs origines et de leurs conséquences, revêt ainsi une importance toute particulière dans mon projet.

Les liens entre l'eutrophisation, le changement climatique et l'acidification des eaux marines sont rappelés de manière synthétique par Jutterstöm *et al.* (2014) (Figure 79). Ce schéma rappelle l'importance de considérer les effets cumulatifs et synergétiques lors de l'évaluation de l'état de santé des écosystèmes. En ce qui concerne les effets des changements climatiques et de l'acidification, on peut désormais noter que les programmes d'observation n'intègrent pas systématiquement les paramètres clefs du système du carbone inorganique, à savoir le pH, le pCO₂, l'alcalinité totale, le carbone inorganique dissous, et que par conséquent il n'existe pas d'indicateur intégrant ces paramètres. La non prise en compte de ces effets est telle qu'en termes de management de l'environnement, il n'est pas improbable que ces effets contrebalancent les efforts consentis en termes de réduction des pressions de nutriments.

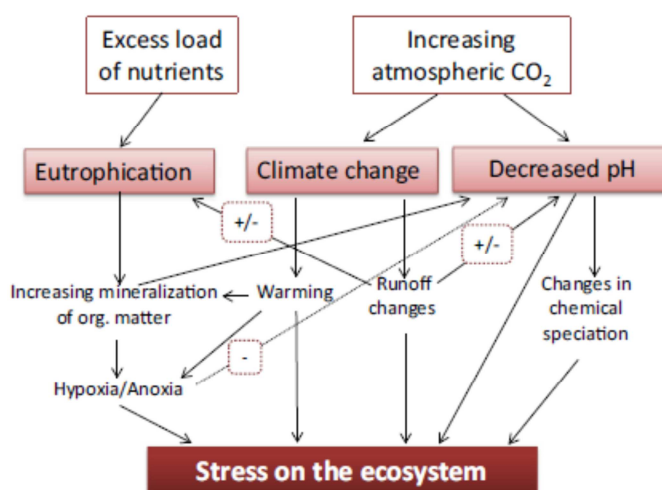


Figure 79. Impacts et inter-connectivité des effets de l'augmentation des apports de nutriments et de CO₂ atmosphérique (source : Jutterstöm *et al.*, 2014).

2.4.5. Dynamique à haute résolution temporelle et/ou spatiale

Les évolutions technologiques et informatiques de ces dernières décennies ont grandement favorisé le développement et la mise à l'eau de nombreux systèmes instrumentés autonomes de mesures à Haute Fréquence (HF) comme la station MAREL Carnot en 2004 à Boulogne-sur-Mer (**CReg-3.**, **CReg-4.**). Cependant, force est de constater qu'il existe un réel décalage entre la possibilité de mise en œuvre des systèmes HF et la capacité à traiter les données pour en extraire le maximum d'informations. Le système MAREL Carnot a bénéficié de deux types de valorisations : une sous forme d'édition de rapports relatifs à la phase d'implantation et à des bilans annuels (**R-9.**, **R-16.**, **R-31.**, **R-37.**, **R-42.**, **R-47.**, **R-60.**, **R-67.**, **R-79.**, **R-80.**, **R-87.**, **R-94.**, **R-101.**, **R-105.**, **R-113.**) et une selon les codes de la valorisation scientifique. J'ai ainsi pu contribuer directement ou indirectement à des développements méthodologiques et à la valorisation des données par l'encadrement de stagiaires, dans le cadre de la thèse de S. Zongo (2007-2010) (**Th-4.**, **O-3.**, **O-7.**), de K. Rousseeuw (2010-2014) (**Th-2.**, **O-4.**, **O-6.**, **O-8.**, **Art-9.**, **AC-1.**, **CI-23.**, **CI-27.**, **CI-34.**, **R-103.**), de J. Derot (**Th-6.**) et dans le cadre d'une collaboration renforcée (via le projet DYMAPHY (2010-2014) (**CEur-1.**) puis sous forme d'une convention d'accueil de chercheur dans mon laboratoire (2014-2016)) avec E. Poisson-Caillault (MCF, ULCO/LISIC) (**Th-2.**, **O-8.**, **Art-9.**, **AC-1.**, **R-103.**, **CI-9.**, **CI-10.**, **CI-23.**, **CI-27.**, **CI-34.**, **CN-18.**, **CN-28.**, **CN-30.**, **CN-32.**, **CN-34.**, **CN-36.**, **CN-39.**, **CN-45.**, **CN-50.**, **CN-55.**). Cette montée en puissance de la valorisation des données HF de MAREL Carnot s'est concrétisée en 2014 par la possibilité d'organisation d'un colloque dédié aux systèmes instrumentés HF et dirigé par Schmitt et Lefebvre (**O-4.**, **O-5.**, **O-6.**).

2.4.5.1. Variabilité et caractéristiques d'échelles

La première publication scientifique à partir des données de MAREL Carnot est proposée par Zongo et Schmitt (2011). Ces auteurs montrent par analyse spectrale que les fluctuations de pH dans les eaux marines côtières sont fortement influencées par le transport hydrodynamique turbulent et qu'il peut ainsi être considéré comme un scalaire actif turbulent.

Sur la base de ce travail, Zongo *et al.* (2011) (**O-3.**) proposent de caractériser la variabilité et la structuration temporelle de la température, du pH, de la concentration en oxygène dissous et de la fluorescence (période étudiée : 2004-2009) par des analyses de fonction de densité de probabilité (PDF, Probability Density Fonction) et par analyses spectrales de Fourier. Ces auteurs mettent ainsi en évidence la forte variabilité de ces paramètres quelles que soient les échelles temporelles considérées (variabilité journalière à saisonnière). Les spectres d'énergie de la température, du pH, de l'oxygène dissous et de la fluorescence montrent tous une invariance d'échelle avec un exposant spectral proche de celui de la turbulence. La température se comporte comme un scalaire passif. La variabilité journalière de l'oxygène est contrôlée par des processus physiques (échanges avec l'atmosphère, marée et turbulence), alors que la variabilité saisonnière est fortement structurée par les processus biologiques (dynamique du phytoplancton et apports/dégradations de matière organique associés). La variabilité journalière et saisonnière de la fluorescence est très importante et est corrélée à celle de l'oxygène dissous, avec un léger décalage pour les petites échelles qui pourrait s'expliquer par une sensibilité différente aux processus physiques. Pour conclure, ces

auteurs indiquent que le forçage physique est fortement structurant pour des échelles supérieures à 33 jours. Le pH, la fluorescence, l'oxygène dissous sont des scalaires actifs dont les statistiques sont différentes de celle de la température pour les petites échelles (< 33 jours).

Les nutriments sont essentiels au développement du phytoplancton et constituent la pression majeure responsable du processus d'eutrophisation. Il est courant de considérer le rapport des nutriments (azote, phosphore et silice) (Redfield *et al.* (1963), Brzezinski (1985)) afin de considérer les limitations potentielles de la croissance du phytoplancton. Face à la variabilité saisonnière de ces rapports (Voir section 2.4.1.2.2.), nous nous sommes posé la question de leur variabilité et de la pertinence de leur utilisation lorsqu'ils sont calculés à partir de données hautes fréquences. Schmitt *et al.* (2016) (**O-7.**) montrent que le transport turbulent génère de très fortes fluctuations des concentrations et des rapports des nutriments. La variabilité des rapports peut être de l'ordre d'un facteur 6 à l'échelle de quelques jours. Il est courant que les données HF soient dégradées, en calculant des moyennes, afin de proposer des synthèses de résultats aux gestionnaires de l'environnement. Schmitt *et al.* (2016) (**O-7.**) estiment que cette simplification peut être risquée pour les rapports de nutriments acquis à HF puisque l'estimation de ce rapport est différente si l'on considère le rapport des moyennes ou la moyenne des rapports. Par ailleurs, les fluctuations HF de ce ratio sont telles que la notion d'écart-type n'est plus adaptée à la caractérisation de la variabilité. L'écart-type pourra être supérieur à la moyenne. Il est par conséquent recommandé dans ce cas d'avoir recours aux quantiles. L'équivalent de l'intervalle $[m-2s, m+2s]$ qui contient 95 % des valeurs est alors l'intervalle $[q_1, q_2]$, avec $q_1=0,023$ et $q_2=0,977$.

Ces travaux basés sur les PDF et les analyses spectrales de Fourier se sont poursuivis dans le cadre de la thèse de J. Derot (**Th-6., JTh-5.**). Toujours dans le domaine de l'étude des processus stochastiques et de la dynamique multi-échelle, Schmitt et Huang (2014) proposent de caractériser la dépendance temporelle entre la température et la concentration en oxygène via la méthode de décomposition modale empirique (EMD, Empirical Mode Decomposition) associée à l'analyse spectrale de Hilbert et complétée par une analyse des corrélations croisées par la méthode de corrélation intrinsèque dépendante du temps (TDIC, Time Dependent Intrinsic Correlation).

La fréquence d'acquisition des données permet de couvrir une vaste gamme d'échelles et l'une des études mise en place en soutien aux volets avis et expertises, soutien à la politique publique de mes activités à consister à utiliser le jeu de données HF MAREL Carnot comme base de test afin d'étudier les conséquences des modifications de stratégies d'échantillonnage sur un indicateur de la DCE : la biomasse du phytoplancton, exprimée via une mesure de la fluorescence (**R-47., O-4., O-6.**).

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE, directive 2000/60/CE) demande aux États de l'Union Européenne d'établir l'état des milieux aquatiques de manière à qualifier les masses d'eau, les classer et éventuellement prévoir des actions de restauration. Ces évaluations sont faites à partir de paramètres hydrologiques. Parmi ceux-ci, la concentration en chlorophylle-*a* dans l'eau de mer permet d'apprécier la biomasse phytoplanctonique. La métrique retenue est le percentile quatre-vingt-dix (P90) des mesures entre les mois de mars et d'octobre inclus, à raison d'une mesure par mois, soit 8 mesures par an, 48 durant un plan de gestion de six ans.

Ce plan d'échantillonnage très spécifique n'est pas sans avoir une influence sur la métrique calculée. Elle a été comparée aux résultats obtenus avec des plans identiques mais comportant des fréquences bimensuelles et hebdomadaires, pour lesquelles les données sont disponibles grâce aux programmes d'observation et de surveillance

habituels. Une des conclusions majeures de cette étude est qu'une fréquence mensuelle d'échantillonnage peut engendrer des modifications dans l'appréciation de la biomasse phytoplanctonique au regard de la dynamique des efflorescences (Daniel, 2004). Toutefois, d'une part cette observation ne constitue pas une conclusion statistique, et d'autre part la fréquence minimale disponible ne permet pas la mise en place de simulation et offre peu de souplesse pour le test de plans alternatifs.

Les séries haute fréquence, avec une mesure toutes les 20 minutes, permettent d'envisager ces approches. De telles séries sont disponibles pour la fluorescence, elle aussi indicatrice de la biomasse phytoplanctonique (à la variabilité de la relation fluorescence/chlorophylle-*a* près), grâce au système de mesures de type MAREL. Les données utilisées pour cette étude concernent les années 2005 à 2007, ce qui représente une base de 68 437 données.

Les données brutes ont été filtrées afin de répondre à différents critères et/ou exigences :

- diurne (7 h-19 h pour limiter l'effet de photoquenching lors des analyses et dans la mesure où les prélèvements DCE se feront de jour) ;
- diurne et mars-octobre (période de prélèvements conforme à la stratégie DCE) ;
- diurne et opérationnel (9 h-16 h entre le lundi et le vendredi et à Pleine Mer \pm 2h pour représenter les conditions réelles de prélèvements dans les laboratoires) ;
- diurne, opérationnel et mars-octobre.

Le ré-échantillonnage des données permet de simuler des valeurs qui auraient pu être mesurées à différentes fréquences d'échantillonnage au cours d'un plan de gestion. Les scénarios de fréquence d'échantillonnage considérés sont les suivants :

- Scénario M (simulation d'une stratégie à fréquence mensuelle) ;
- Scénario F1 (simulation d'une stratégie à fréquence mensuelle de mai à août, puis bimensuelle le reste du temps) ;
- Scénario F2 (simulation d'une fréquence mensuelle en juin et juillet, puis bimensuelle le reste du temps) ;
- Scénario B (simulation d'une stratégie à fréquence bimensuelle) ;
- Scénario H (simulation d'une stratégie à fréquence hebdomadaire).

La méthode de ré-échantillonnage utilisée est le bootstrap (Davidson et Hinkley, 1997) avec $n \times 1\,000$ (n étant la taille de l'échantillon) tirages aléatoires sans remise. De manière à apprécier la variabilité des estimations, les intervalles de confiance sont calculés selon la méthode du percentile. La moyenne, la médiane et le mode de la distribution des percentiles 90 de la fluorescence simulée pour chaque année à partir des données diurnes ou diurnes et opérationnelles pour les fréquences mensuelle, bimensuelle et hebdomadaire sont systématiquement calculés. Pour référence, les « vrais » P90 ont été calculés sur l'ensemble des données d'une part pour chaque année disponible à fréquence mensuelle, bimensuelle et hebdomadaire et d'autre part pour chaque couple (filtre, scénario). Toutes les analyses statistiques ont été réalisées grâce au logiciel R.

Si l'on considère les valeurs simulées de percentile 90 à partir des données de fluorescence pour les fréquences d'échantillonnage par mois, quinzaine et semaine, il apparaît que les indices de position des valeurs simulés sont toujours inférieurs aux vrais P90 (Figure 80). L'écart se réduit lorsque la fréquence d'échantillonnage augmente.

Avec des données diurnes pour les scénarii M, B et H, le vrai P90 est inférieur à la moyenne, la médiane et au mode des distributions des P90. La différence est encore plus marquée avec les scénarii F1 et F2.

Avec des données diurnes et opérationnelles et pour les différents scénarii, l'écart est faible.

Avec des données diurnes, opérationnelles ou non et limitées à la période octobre-mars, il y a une surestimation du P90 liée à la non prise en compte des faibles valeurs de fluorescence lors de la période hivernale (Figure 81).

Comme attendu, plus la fréquence d'échantillonnage est élevée, plus la variabilité du P90 est limitée. L'estimation la plus éloignée de la « vraie » valeur du P90 est obtenue pour les données diurnes, opérationnelles, limitées à la période mars-octobre avec une fréquence d'échantillonnage mensuelle. L'utilisation des données diurnes, opérationnelles pour toute l'année avec fréquence mensuelle conduit à une estimation très proche du « vrai » P90. Des travaux complémentaires pourraient être mis en œuvre afin de mieux prendre en compte la variabilité de la relation fluorescence/chlorophylle-*a* et pour améliorer la méthodologie du bootstrap employée (exemple de l'approfondissement nécessaire pour résoudre le problème des données non-indépendantes et non-identiquement distribuées, pour proposer une meilleure définition des scénarii).

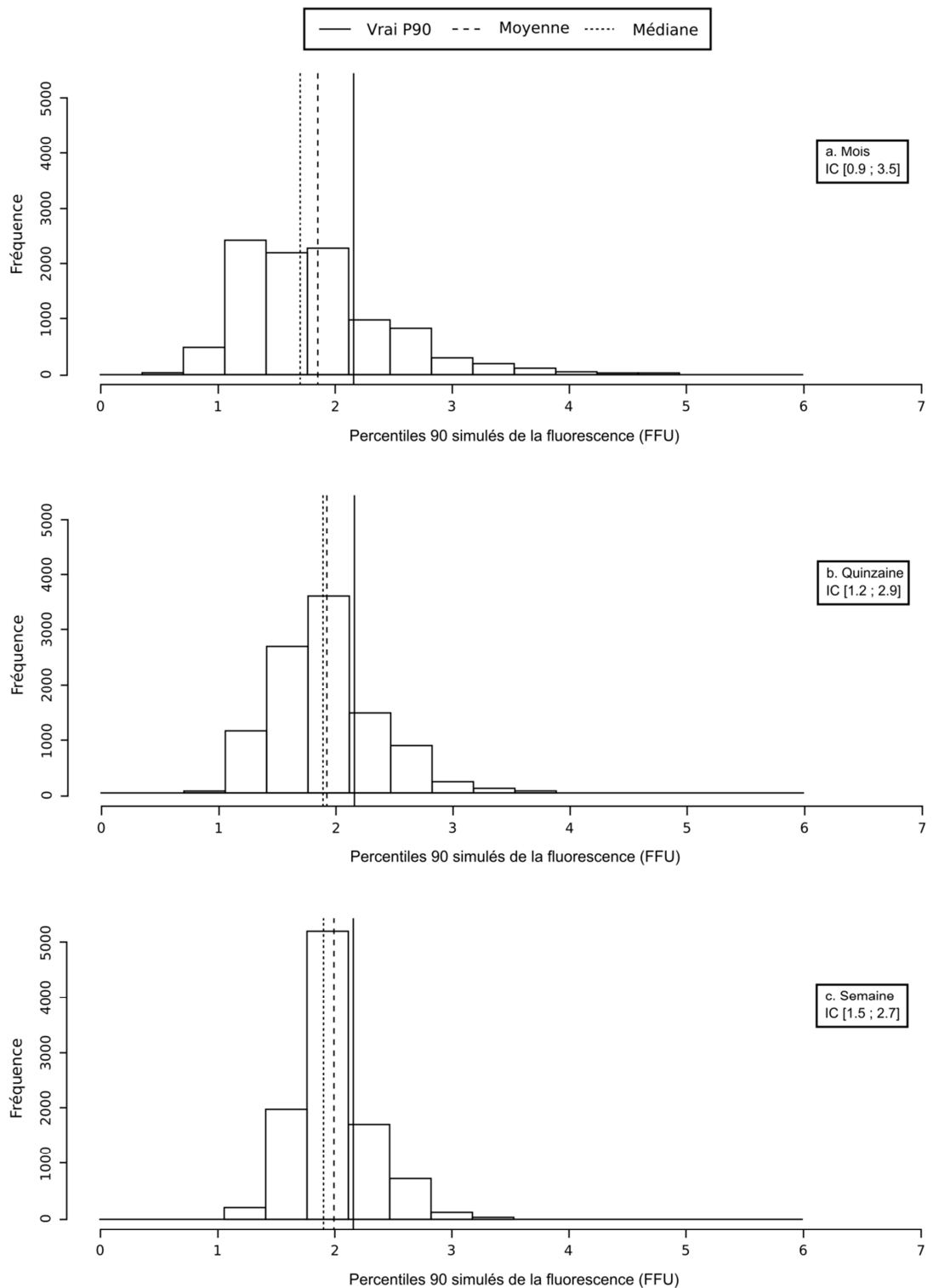


Figure 80. Histogrammes des valeurs simulées de percentile 90 à partir des données de fluorescence de l'année 2007 pour les fréquences d'échantillonnage a) mensuelle, b) bimensuel et c) hebdomadaire.

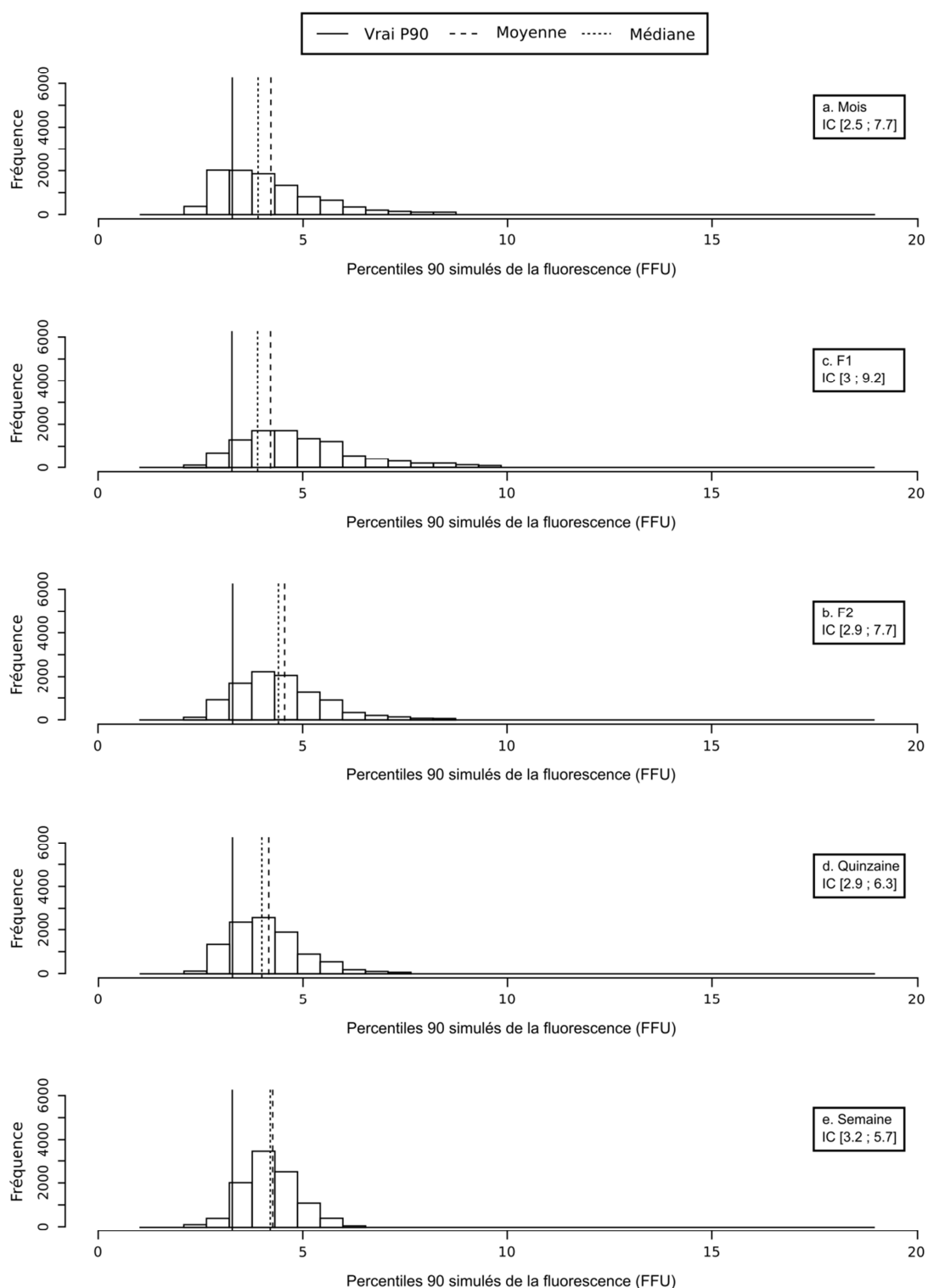


Figure 81. Histogrammes des valeurs simulées de percentile 90 à partir des données de fluorescence diurnes, acquises au cours de la période mars-octobre (Stratégie Directive cadre sur l'Eau) des années 2005, 2006 et 2007 pour les fréquences d'échantillonnage a) mensuelle, b) bimensuelle mais mensuelle de mai à août inclus (F1), c) bimensuelle mais mensuelle en juin et juillet (F2), d) bimensuelle et e) hebdomadaire.

2.4.5.2. Variabilité temporelle

En complément de ces travaux, j'ai initié avec E. Caillault dès 2010 (CN-18., CI-9., CI-10.) le travail qui allait aboutir à la thèse de K. Rousseeuw (Th-2., JTh-4.) dédiée à la modélisation de signaux temporels HF à valeurs manquantes pour la prédiction d'états environnementaux caractéristiques de la dynamique phytoplanctonique dans un système marin côtier fortement anthropisé. La méthodologie est celle présentée dans la section 1.4.3.3.

Rousseeuw *et al.* (2015, 2016) (AC-1., Art-9., O-8.) ont validé leur modèle de Markov caché non supervisé (uHMM) en testant sa capacité à détecter, au minimum et dans un premier temps, les deux périodes caractéristiques de la dynamique du phytoplancton, à savoir la période productive (mars à octobre) et la période non productive. Ce découpage est celui qui est considéré par la Directive Cadre sur l'Eau pour définir les modalités d'échantillonnage des masses d'eaux en fonction des paramètres considérés (voir section 1.3.2.2). Lors de cette phase, ces auteurs confirment que la génération automatique des symboles du modèle donne les meilleurs résultats avec l'algorithme du Self Tuning Fast K-means (STFKM), alors que la génération des états par classification spectrale est mieux adaptée aux données HF MAREL Carnot afin de lever l'hypothèse sur la forme de ces données qui suivent des processus stochastiques, non linéaires et non stationnaires comme démontré en partie dans la section précédente. La figure 82 illustre cette capacité supérieure de la méthode de classification spectrale à différencier 2 états à partir d'un jeu de données théoriques.

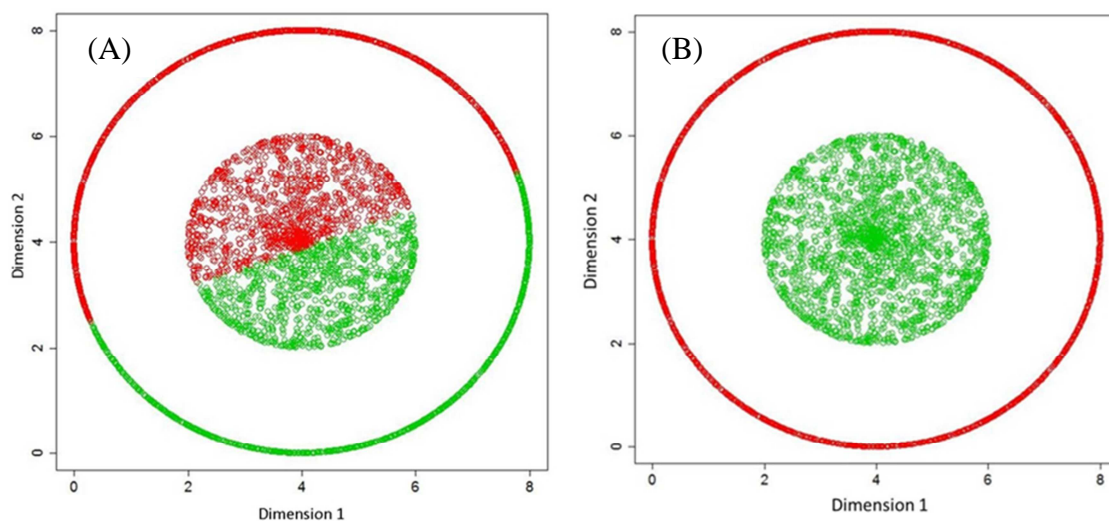


Figure 82. Classification en 2 états (rouge et vert) d'un jeu de données théoriques de structure non convexe et non linéairement séparables, (A) par l'algorithme du K-means et (B) par classification spectrale.

Selon ces modalités, Rousseeuw *et al.* (2015, 2016) (AC-1., Art-9., O-8.) parviennent donc à séparer les deux périodes caractéristiques de la dynamique phytoplanctonique annuelle simplifiée sans prise en compte de la temporalité, en mode non supervisé et en se basant uniquement sur la géométrie des données (Figure 83). La comparaison des signaux originaux et des signaux reconstruits par le modèle afin d'apprécier la puissance du modèle donne d'excellents résultats. Les similarités et la moyenne de celle-ci sont de l'ordre de 0,8. Un score de 1 signifie que les signaux reconstruits sont exactement les mêmes que les originaux, sachant que cet indice de similarité maximum ne peut pas être

atteint en raison du découpage strict en deux périodes et donc de l'absence de prise en compte de la variabilité du début et de la fin de ces périodes.

Figure 83. Distribution des états par mois pour un cycle annuel classique : les états s_2 (en vert) et s_1 (en rouge), représentent, respectivement, la période non-productive et la période productive. L'état NA (en noir) concerne les données pour lesquelles l'état n'est pas estimé car il existe au moins 1 donnée manquante pour un paramètre et pour un instant. (A) Données 2005-2008 à partir desquelles est construit le modèle. (B) Données tests 2009.

Une fois validé, le modèle a été généralisé à N-états afin d'extraire le maximum d'informations des données HF. L'hypothèse de Rousseeuw *et al.* (2015, 2016) (**AC-1., Art-9., O-8.**) était que le uHMM devait être capable de distinguer au minimum $N=4$ états caractéristiques d'un cycle annuel de développement du phytoplancton : pré-efflorescence, efflorescence, post-efflorescence et événements rares ou extrêmes. A partir de la base de données 2005-2008 considérant 10 paramètres non corrélés (niveau de la mer, vitesse du vent, température, salinité, turbidité, PAR, concentrations en oxygène dissous, nitrate, phosphate et silicate - la fluorescence n'est pas prise en compte et est utilisée pour la validation) et 84 614 instants, le modèle construit automatiquement propose 7 états (λ ($N=7$, $M = 2884$, π , A, B)). Le résultat de la classification spectrale permet de définir la distribution mensuelle ainsi que le séquençement pluriannuel de ces 7 états (+ l'état NA sans estimation d'état en raison de données manquantes) (Figure 84). Au moins 4 états sont caractéristiques d'une période de l'année et par conséquent sont caractérisés par une géométrie et une dynamique spécifiques des données de cet état : s_1 de janvier à mai, s_2 d'avril à octobre, s_3 de novembre à mars et s_4 de juin à novembre. Les 3 autres états n'apparaissent pas à la même période d'une année sur l'autre.

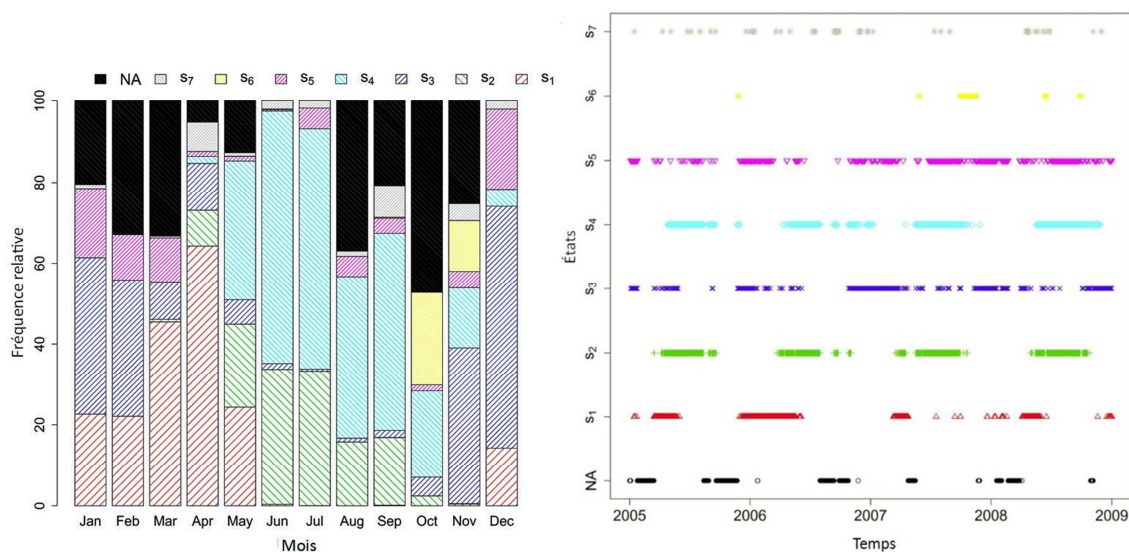


Figure 84. (A) Distribution mensuelle des états pour une année type reconstituée à partir de la série 2005-2008 et (B) séquençage des états après classification spectrale de la base de données 2005-2008 sur 10 paramètres non corrélés.

Le tableau 15 permet d'identifier quels sont les paramètres structurants pour un état donné.

Tableau 15. Coefficients de corrélation de Pearson entre les paramètres et les états déterminés à partir de la classification spectrale non supervisée des données MAREL Carnot 2005-2008 (en gras : coefficients les plus élevées en valeur absolue).

État	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
Couleur	rouge	vert	bleu	cyan	rose	jaune	gris
Nitrate	-0,14	-0,24	0,54	-0,24	0,12	0,02	-0,03
Oxygène	0,64	-0,16	-0,03	-0,38	0,05	-0,17	0,01
Phosphate	-0,08	-0,03	-0,04	-0,07	-0,02	-0,03	0,57
Silicate	-0,11	-0,16	0,20	-0,25	0,15	0,04	0,47
Salinité	0,12	0,13	-0,36	0,10	-0,25	0,42	0,00
PAR	-0,08	0,73	-0,21	-0,24	-0,06	-0,06	0,00
Turbidité	-0,11	-0,14	-0,01	-0,22	0,76	-0,03	-0,05
Vitesse Vent	-0,25	-0,03	0,16	-0,05	0,31	-0,06	-0,03
Température Eau	-0,50	0,32	-0,37	0,56	-0,14	0,07	0,05
Hauteur Eau	0,00	0,03	0,02	-0,03	0,01	0,01	0,00

Au regard de ces résultats et des paramètres de tendance centrale et de dispersion pour chaque paramètre dans chaque état (données non illustrées), il est alors possible de faire correspondre chaque état spectrale à un état écologique.

L'état s_1 correspond à la phase d'initiation du bloom et au bloom printanier, c'est à dire la production nouvelle. Il est très structuré par la température de l'eau et la concentration en oxygène est élevée. Les états s_2 et s_4 correspondent à des phases de production régénérée, plus tardives. L'état s_3 est caractérisé par des concentrations élevées en nitrate, phosphate et silicate et par de faibles valeurs de fluorescence ; il s'agit de la période non productive marquée par des apports hivernaux de nutriments via le bassin versant d'où des températures et des salinités globalement plus faibles. Les états s_5 et s_7 sont des épisodes extrêmes et/ou rares, de courtes durées. L'état s_6 ne

correspond pas à un état écologique, et met en avant la possibilité du modèle d'identifier automatiquement une phase de défaillance du système de mesures et plus particulièrement du capteur de salinité.

Le système uHMM ainsi construit et validé sur l'année 2009 (données non illustrées) permet donc d'identifier clairement 6 états écologiques et 1 état technique. Il est désormais possible par modélisation d'estimer les états des nouvelles données entrantes et d'anticiper les évolutions environnementales récurrentes comme extrêmes ou rares.

Pour conclure et au regard des résultats des analyses des données BF et HF, il apparaît que l'état s3 représente l'état à surveiller du point de vue des pressions (apports de nutriments hivernaux), alors que les états s1 et s2, s4 vont être caractéristiques des effets directs des pressions, à savoir la phase de développement massif de la prymnésiofycée *Phaeocystis globosa* (s1) ou de diatomées nuisibles comme *Pseudo-nitzschia* (s2 et/ou s4). Ces hypothèses méritent d'être confirmées, ce qui implique de pouvoir disposer de données HF en termes de composition du phytoplancton. Une meilleure définition de ces états permettrait ainsi d'améliorer les connaissances sur les relations pressions/impacts. L'amélioration du modèle permettrait de disposer d'un système de prédiction rendant possible la mise en œuvre d'une stratégie adaptative pour la surveillance comme pour la recherche et ouvre la voie vers un système d'alerte préventive. En effet, ayant défini des états donc des périodes (ou des zones lorsque le suivi HF est spatial) à risques, l'affectation de toute nouvelle série de données entrantes dans un tel état permettrait de déclencher la mise en œuvre en temps quasi-réel de procédures de pré-alerte ou d'alerte.

2.4.5.3. Variabilité spatiale

La deuxième étape de mon projet de développement des mesures HF a consisté à proposer la mise en œuvre d'un système HF mobile, autonome, le Pocket Ferry Box (PFB) couplé à un fluorimètre spectrale (Algae Online Analyzer, AOA) lors de différentes campagnes. L'utilisation de l'AOA permet aussi d'envisager une approche ataxonomique rapide, en temps réel. Cette approche, en partie compatible avec le besoin de disposer d'information HF quant à la composition du phytoplancton, permet de proposer une classification d'états environnementaux caractéristiques et permet également d'améliorer les performances du modèle uHMM. Les principaux résultats de l'article en préparation de Lefebvre et Caillault-Poisson (**ArtS-2.**) sont présentés ci-dessous.

Dans le cadre du projet InterReg IVA DYMAPHY, 3 campagnes ont eu lieu en 2012, respectivement, du 20 au 21 avril (Leg 1), du 27 au 29 avril (Leg 2) et du 31 mai au 4 juin (Leg 3). Pendant ces trois campagnes, les différentes masses d'eaux ont été échantillonnées avec une résolution de l'ordre de 200 m le long de trajets, respectivement, de 100, 200 et 300 milles nautiques.

Le contexte environnemental global était tel que premier trimestre 2012 était plutôt sec en Manche. Dès le mois d'avril 2012, les perturbations pluvieuses océaniques étaient de retour et se succédaient à un rythme soutenu avec des valeurs de précipitations supérieures à la normale. Le passage des perturbations s'accompagnait de vent soutenu, plus particulièrement durant la deuxième quinzaine du mois d'avril. Le mois de mai était normal en termes de précipitation et de vent. Le mois de juin se caractérisait par des précipitations abondantes et par des vents assez forts de secteur sud-ouest. En Manche, d'avril à juin, les champs de salinité de surface étaient globalement supérieurs aux moyennes mensuelles, à l'exception de la baie de Seine. La turbidité qui devrait

chuter à cette saison se maintenait à des niveaux relativement élevés. Les conditions particulièrement ventées (impact sur les vagues) et pluvieuses (impact sur les débits des fleuves) étaient à l'origine de cette turbidité relativement importante. La biomasse phytoplanctonique apparaissait relativement faible, particulièrement dans le panache des grands fleuves français. En mai et en juin, les niveaux n'étaient pas très élevés car il n'y avait pas eu de périodes ensoleillées suffisamment longues pour qu'une efflorescence majeure puisse se développer.

Les campagnes se sont déroulées lors de périodes de faible ou de forte amplitude de marée, respectivement, pour le Leg 2, et pour les Legs 1 et 3.

Le déploiement du PFB couplé à l'AOA a permis de collecter 7074 séries de mesures valides, avec, respectivement, 1573 instants pour le Leg 1, 2192 instants pour le Leg 2 et 3309 instants pour le Leg3. Les données manquantes sont liées à des épisodes d'entrée d'air dans le système de prise d'eau de mer en raison de conditions de mer agitées.

Les paramètres de tendance centrale et de dispersion pour chaque paramètre et pour chaque Leg sont présentés dans le tableau 16. La salinité moyenne était comprise entre 34,0 et 34,6 toutes campagnes confondues (min. : 31,6 ; max. 35,0). La température moyenne de l'eau était de l'ordre de 9 °C lors des deux premiers Legs. Elle était en moyenne de l'ordre de 13 °C lors du Leg 3. Le pourcentage de saturation en oxygène était toujours supérieur à 94 % et pouvait atteindre 122,5 % lors du Leg 3. La concentration en oxygène dissous était comprise entre 7,33 et 10,40 mg l⁻¹, les valeurs les plus fortes étaient relevées lors du Leg3.

La biomasse phytoplanctonique totale (Chl-*a*) estimée par l'AOA était comprise entre 1,15 et 42,50 eq. µg Chl-*a* l⁻¹ entre la fin du mois d'avril et le début du mois de juin (entre le Leg 1 et le Leg 3). Les concentrations les plus élevées ont été relevées lors du Leg 2 (Tableau 16). Les analyses en microscopie inversée réalisées sur des échantillons discrets prélevés régulièrement au cours des différents Legs (données non présentées) permettent de conclure quant à la dominance de *Phaeocystis globosa* (entre 5.10⁵ et 10.10⁶ cells l⁻¹) et/ou des Bacillariophycées (Diatomées ou Brown pour l'AOA). Les cryptophytes et les dinoflagellés sont en concentration nettement inférieure. *Phaeocystis globosa* peut représenter près de 97 % de la biomasse globale dans certaines zones, alors qu'elle peut être complètement absente dans d'autres (partie centrale de la Manche et côtes anglaises généralement). Bien que des dinoflagellés aient été identifiés (*Gymnodinium sp.*, *Gyrodinium spirale*, *Katodinium sp.*, *Protoperidinium sp.*, *Torodinium sp.*), ils ne contribuent qu'à hauteur de 3 % au nombre total de cellules par litre (contribution maximale de 3 % pour *Gymnodinium sp.*, 1.3 % pour *Katodinium sp.*, et inférieure à 1 % pour les autres).

Tableau 16. Paramètres de tendances centrales et de dispersion pour la salinité (Sal.), la température de l'eau (Temp., °C), la concentration en oxygène dissous (Oxy., mg.l⁻¹), la saturation en oxygène (%), les concentrations des quatre groupes spectraux et la concentration totale en chlorophylle-*a* issues de l'AOA (eq. µg Chl-*a*.l⁻¹) pour les Legs 1, 2 et 3 des campagnes DYMAPHY 2012.

(Min. : Minimum ; Q1. : premier quartile ; Méd. : Médiane ; Moy. Moyenne ; Q3. : troisième quartile ; Max : Maximum ; NA : nombre de données manquantes).

Leg 1	Sal.	Temp.	Oxy.	Sat. O ₂	Vert	Bleu-vert	Diat.	Crypto.	Chl. Tot.
Min.	33,3	8,51	7,68	84,8	0,00	0,00	0,85	0,00	2,37
Q1.	34,5	8,82	8,35	92,2	1,01	0,00	1,80	0,00	3,60
Méd.	34,8	8,94	8,48	93,3	1,49	0,01	2,19	0,49	4,35
Moy.	34,6	8,94	8,57	94,2	2,72	0,11	3,60	0,36	6,78
Q3.	34,8	9,09	8,67	95,1	4,06	0,19	4,50	0,57	8,54
Max	35,0	9,48	9,66	106,5	15,60	1,52	18,69	3,91	34,30
NA	21	21	23	21	448	448	448	448	448

Leg 2	Sal.	Temp.	Oxy.	Sat. O ₂	Vert	Bleu-vert	Diat.	Crypto.	Chl. Tot.
Min.	33,3	9,04	8,03	89,4	0,00	0,00	0,17	0,00	1,15
Q1.	33,7	9,55	8,35	93,0	1,11	0,00	1,46	0,00	2,91
Méd.	33,9	9,73	8,51	94,4	3,14	0,00	4,09	0,00	7,02
Moy.	34,0	9,71	8,53	94,8	4,07	0,03	6,86	0,14	11,10
Q3.	34,4	9,90	8,77	96,9	6,87	0,00	12,62	0,29	20,70
Max	34,5	10,25	9,15	101,4	17,54	8,81	25,01	1,10	42,50
NA	238	238	242	238	905	905	905	905	905

Leg 3	Sal.	Temp.	Oxy.	Sat. O ₂	Vert	Bleu-vert	Diat.	Crypto.	Chl. Tot.
Min.	31,6	11,6	7,33	88,5	0,00	0,00	0,19	0,00	1,32
Q1.	33,8	12,9	8,13	97,4	0,88	0,00	0,89	0,14	2,08
Méd.	34,4	13,5	8,67	103,5	1,17	0,00	2,14	0,29	3,73
Moy.	34,2	13,5	8,60	103,3	1,48	0,01	2,91	0,28	4,69
Q3.	34,8	14,1	8,99	108,0	1,65	0,00	4,48	0,41	6,87
Max	35,0	15,8	10,40	122,5	7,35	0,80	9,89	1,10	15,80
NA	1423	1423	1434	1423	2276	2276	2276	2276	2276

Les Legs 1 et 2 se sont déroulés lors de la phase de prolifération de *Phaeocystis globosa*, alors que le bloom était sur le déclin lors du Leg 3. Pendant les Legs 1 et 2, les eaux françaises présentaient des concentrations élevées en Chl-*a* (maximum de 34,30 et de 42,50 eq. µg Chl-*a*.l⁻¹, respectivement) avec une forte contribution du signal marron / vert de l'AOA (Figures 85, 86 et 87). Nos mesures sur des cultures en laboratoire, ainsi que les travaux de Houliez *et al.* (2012) permettent de conclure que ce genre de répartition dans des proportions proches de 50 % marron / 50 % vert est caractéristique de la présence de *Phaeocystis globosa*. Les masses d'eaux échantillonnées présentaient une forte variabilité de la concentration en Chl-*a* au sein d'une zone dominée par *P. globosa*. Lors du Leg 3, ces concentrations étaient plus faibles et le rapport de signaux

marron / vert caractéristique de *P. globosa* plus rare. Les plus fortes concentrations en Chl-*a* ont été relevées dans les zones sous influence d'apports d'eau douce (Canche, Authie et Somme (respectivement, lors du Leg 1 entre les points de référence DPM 49 et 51, puis lors du Leg 2 entre les points DPM 70 à 80) (Figures 85, 86 et 87). Pour une même masse d'eau côtière française, la concentration en Chl-*a* était extrêmement variable d'un jour à l'autre : 34,29 eq. $\mu\text{g Chl-a.l}^{-1}$ le 20 avril et 17,49 eq. $\mu\text{g Chl-a.l}^{-1}$ le 21 avril 2012. Les eaux anglaises présentaient les plus faibles concentrations en Chl-*a* (< 5 eq. $\mu\text{g Chl-a.l}^{-1}$) avec une contribution faible des groupes spectraux cryptophytes et bleu-verts lors des Legs 1 et 2.

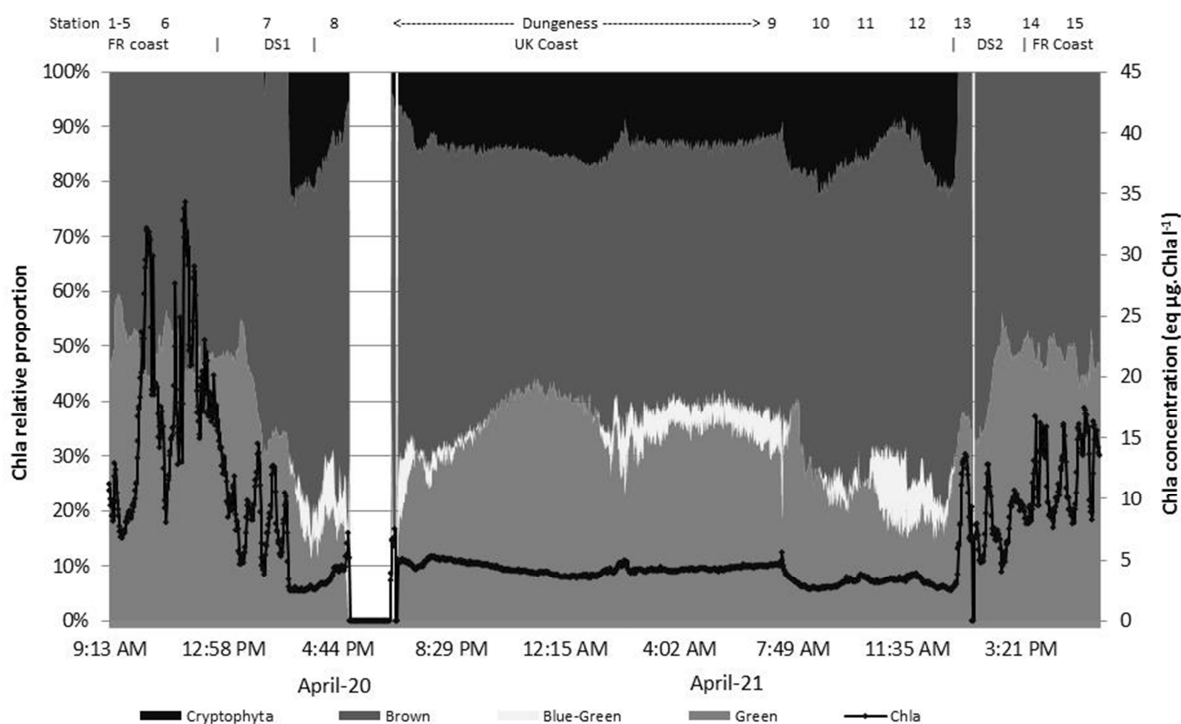


Figure 85. Évolution de la proportion relative (%) des quatre groupes spectraux phytoplanctoniques (Cryptophytes, Marron, Beu-Vert et Vert) et de la concentration totale en chlorophylle-*a* (eq. $\mu\text{g Chl-a.l}^{-1}$) estimées par l'Algae Online Analyser lors de la campagne DYMAPHY du 20 et 21 avril 2012 (Leg 1).

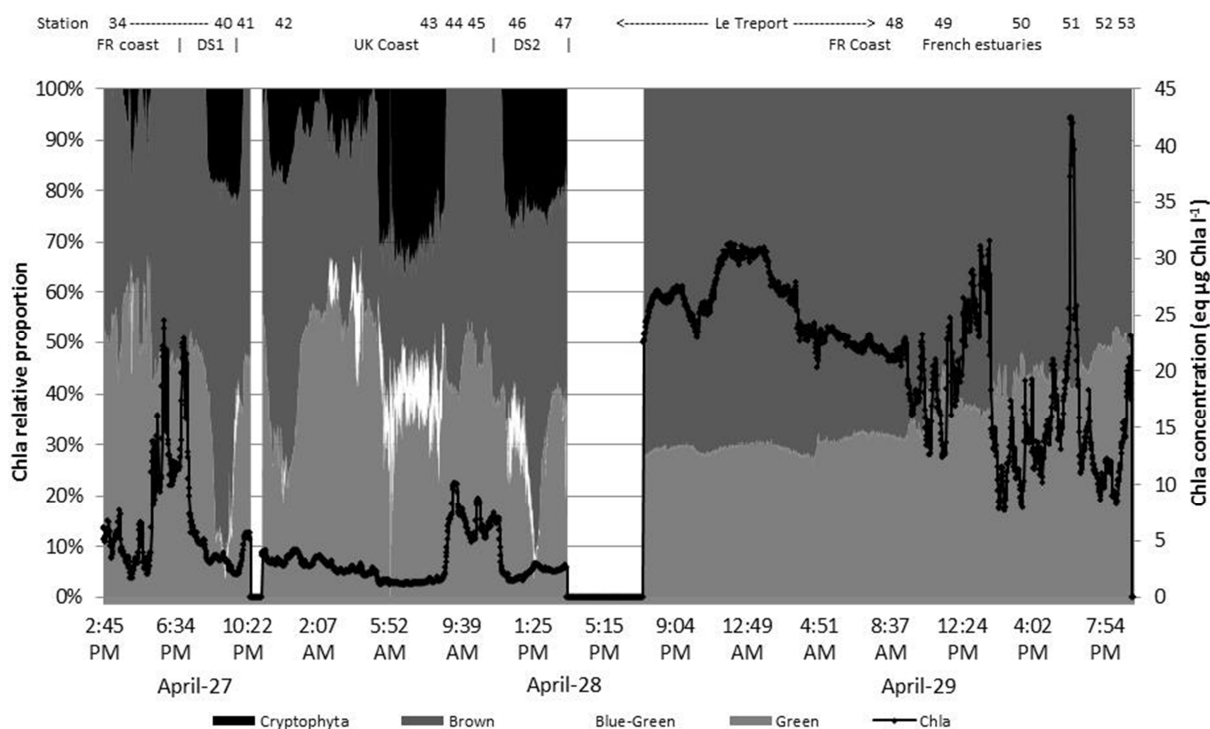


Figure 86. Évolution de la proportion relative (%) des quatre groupes spectraux phytoplanctoniques (Cryptophytes, Marron, Beu-Vert et Vert) et de la concentration totale en chlorophylle-*a* (eq. $\mu\text{g Chl-}a.l^{-1}$) estimées par l'Algae Online Analyser lors de la campagne DYMAPHY du 27 au 29 avril 2012 (Leg 2).

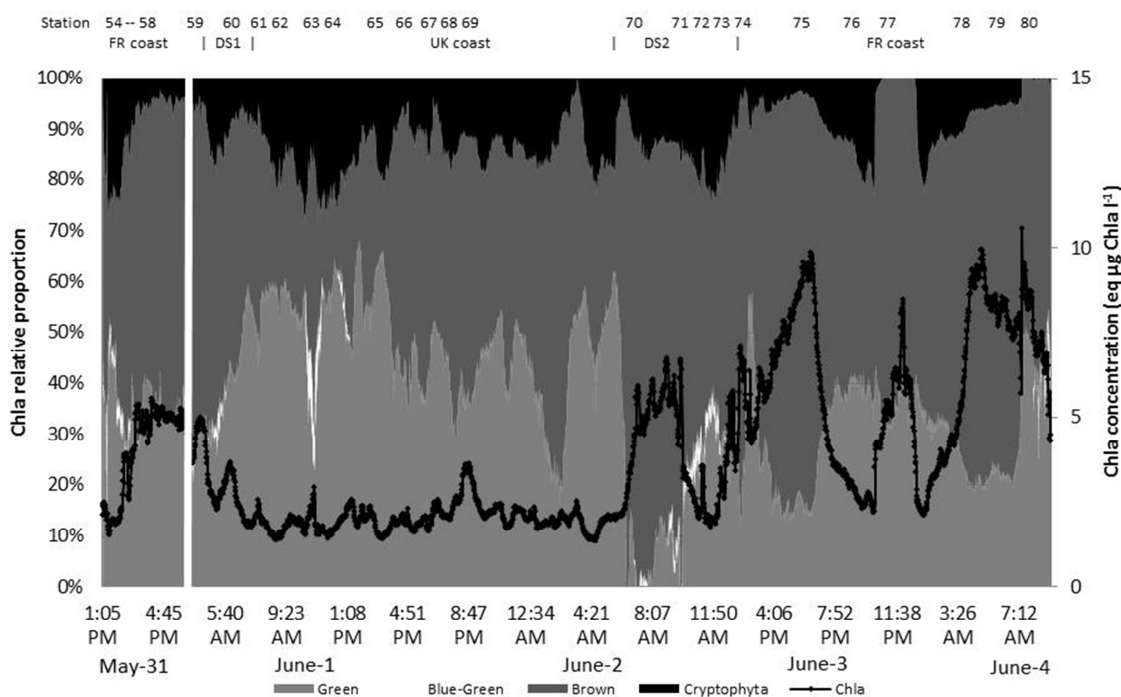


Figure 87. Évolution de la proportion relative (%) des quatre groupes spectraux phytoplanctoniques (Cryptophytes, Marron, Beu-Vert et Vert) et de la concentration totale en chlorophylle-*a* (eq. $\mu\text{g Chl-}a.l^{-1}$) estimées par l'Algae Online Analyser lors de la campagne DYMAPHY du 31 mai au 4 juin 2012 (Leg 3).

Conformément à la méthodologie présentée dans la section 1.4.3.3. et en mode automatisé, non supervisé, nous sommes capables de partitionner les jeux de données issus du système couplé PFB / AOA par classification spectrale. Dans un premier temps, nous avons focalisé nos analyses sur le Leg 2.

La méthode du Gap permet de définir automatiquement un nombre de groupes $K=85$ pour une valeur propre de 0,78. Par réduction de ce critère avec une condition sur la valeur propre (λ) d'être supérieure à 0,98 ou 0,99, on obtient, respectivement $K=18$ ou $K=6$ (Figure 88). La proposition $K=85$ correspond à un partitionnement optimisé et par conséquent équivaut à une optimisation de l'extraction de l'information contenue dans les données HF du système couplé PFB / AOA. Cependant, à ce stade, notre expertise environnementale ne permet pas de proposer une interprétation écologique de ces 85 groupes, chaque groupe représentant un état environnemental spécifique caractérisé par une géométrie spécifique de l'organisation des données dans l'espace spectral.

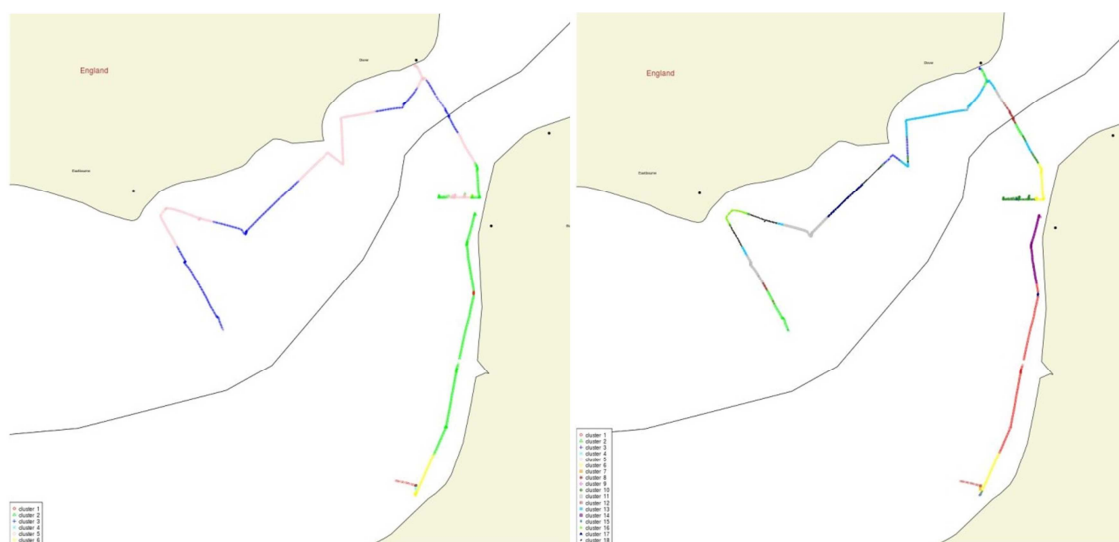


Figure 88. Projection spatialisée des 6 (à gauche) et 18 (à droite) états environnementaux définis par classification spectrale non supervisée sur la base du jeu de données haute fréquence issu du système couplé PFB /AOA lors du Leg 2 (27-29 avril 2012) des campagnes DYMAPHY (les jeux de couleurs des deux figures sont indépendants).

Le calcul de la matrice de corrélation permet de hiérarchiser la contribution des paramètres physico-chimiques et biologiques à la structuration de chaque groupe, donc de chaque état environnemental (Tableau 17).

Les partitionnements mettent clairement en évidence une différence environnementale du point de vue de la signature spectrale du phytoplancton entre les côtes françaises et les côtes anglaises caractérisées, respectivement, par les groupes 1, 2, 4, 6 et 3, 5 (Figure 89). Ces derniers sont les seuls présentant une proportion non nulle du groupe spectral des cryptophytes. La présence du groupe spectral Bleu-Vert caractérise le groupe 3. Côté français, c'est la proportion entre le signal marron et le signal vert qui fait la différence. Le groupe 2 représente les masses d'eaux dans lesquelles *Phaeocystis globosa* domine la communauté phytoplanctonique. Dans ces masses d'eaux, globalement la concentration et la saturation en oxygène sont les plus faibles, alors que la température est la plus élevée. Les groupes 3 et 5 se caractérisent également par des salinités plus élevées. Les groupes 1 et 4 sont représentatifs des modifications liées au

cycle tidal lors du point fixe effectué entre le 28 et le 29 avril devant Le Tréport (> DPM 47 et < DPM 48, figure 86).

Tableau 17. Coefficients de corrélation de Pearson entre les paramètres et les 6 états déterminés à partir de la classification spectrale non supervisée des données du système HF PFB / AOA pour le Leg 2 des campagnes DYMAPHY.

	1	2	3	4	5	6
Green	0.31	0.44	-0.64	0.23	-0.39	0.32
BlueGreen	-0.1	-0.24	0.44	-0.09	-0.31	-0.15
Diatoms	0.44	0.15	-0.52	0.4	-0.44	0.42
Cryptophyta	-0.17	-0.4	0.91	-0.15	-0.1	-0.26
Temperature_Optode	-0.07	0.46	-0.73	0.09	0.09	0.23
Salinity	-0.12	-0.54	0.65	-0.1	0.42	-0.45
Oxygen_ST_corr	0.38	-0.56	0.09	0.31	0.01	0.1
Saturation	0.42	-0.53	-0.12	0.34	0.15	0.14

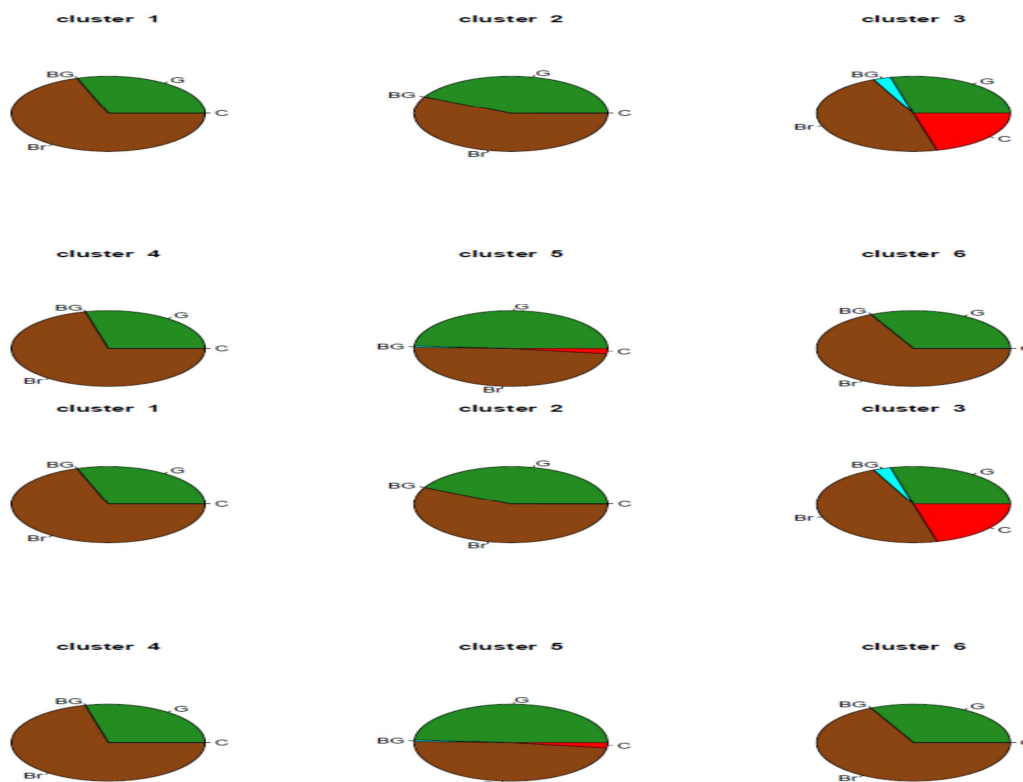


Figure 89. Proportion relative des quatre groupes spectraux identifiés par l'AOA pour chaque état environnemental (Cluster 1 à 6) caractéristique du Leg 2 des campagnes DYMAPHY (BG : Blue-Green ; G : Green ; C : Cryptophytes ; Br : Brown).

Bonato *et al.* (2014) (**Art-10.**) ont analysé lors de la même campagne (Leg 2) et toutes les dix minutes, un échantillon d'eau provenant du circuit d'alimentation du PFB/AOA grâce à un cytomètre en flux (Cytosense, Cytobuoy). L'analyse de la matrice de Bray-Curtis (distance de Ward) construite à partir de la composition phytoplanctonique leur permet de différencier 4 communautés de 8 groupes phytoplanctoniques. Ces auteurs confirment la présence majoritaire *Phaeocystis globosa* dans les eaux françaises (notre groupe 2 principalement), et sont également capables d'en mettre en évidence au large d'Eastbourne (UK). Les picoeucaryotes et *Synechococcus spp.* dominent les eaux anglaises et le centre de la Manche et correspondent à nos groupes 3 et 5. Selon les critères de Cebrian et Valiela (1999), Bonato *et al.* (2014) (**Art-10.**) concluent que les eaux côtières françaises et anglaises correspondraient ainsi, respectivement, aux types Écosystème Côtier Fermé (Enclosed Coastal Ecosystem) et Écosystème Côtier Ouvert (Open Coastal Ecosystem). La différence entre les deux concerne la période de l'efflorescence (printemps, été vs hiver, automne) et la pression en terme de concentration en nutriments (forte vs faible).

Afin de disposer d'une vision synoptique de l'état environnemental en Manche orientale lors des campagnes DYMAPHY, nous avons compilé les jeux de données PFB/AOA des Legs 1 à 3. Selon la même méthodologie, nous obtenons $K=291$ en mode non supervisé. Avec les critères $\lambda > 0,996$ et $\lambda > 0,990$, nous obtenons, respectivement, $K=9$ et $K=33$ (Figure 90).

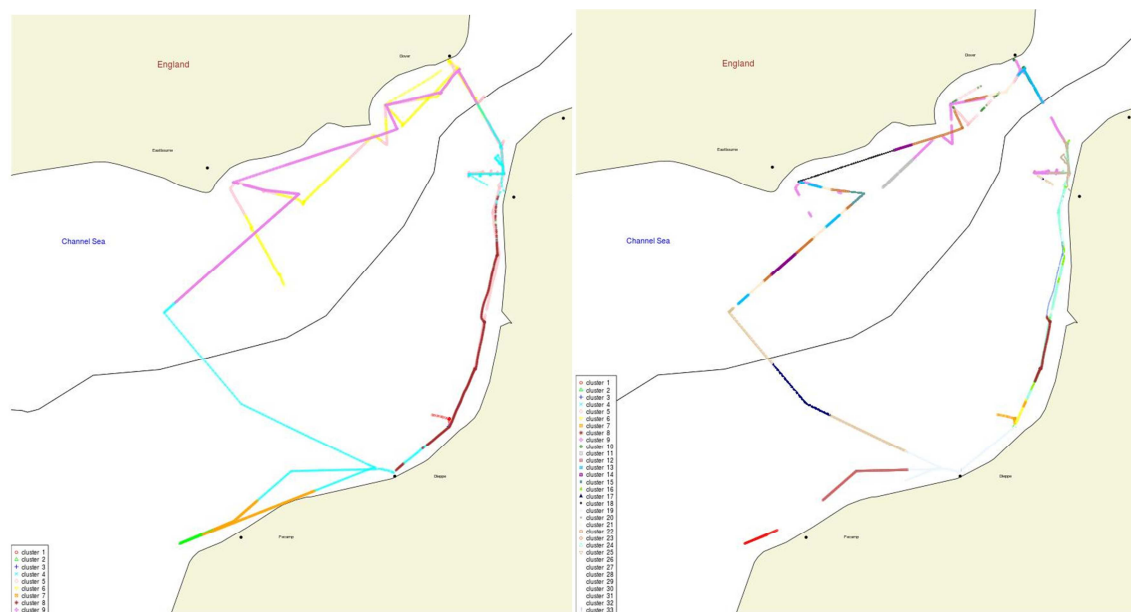


Figure 90. Projection spatialisée des 9 (à gauche) et 33 (à droite) états environnementaux définis par classification spectrale non supervisée sur la base du jeu de données haute fréquence issu du système couplé PFB/AOA pour l'ensemble des campagnes DYMAPHY (Legs 1 à 3) (les jeux de couleurs des deux figures sont indépendants).

Sans rentrer, cette fois, dans l'interprétation des résultats obtenus, nous montrons ici que notre système de classification spectrale non supervisée permet l'analyse de bases de données volumineuses avec un temps calcul acceptable et que les résultats obtenus permettent de discriminer à différents niveaux de précision (en fonction du nombre de groupe K) dans le temps comme dans l'espace des états environnementaux caractérisés par une combinaison spécifique des paramètres entre eux.

2.5. Conclusions

De multiples pressions, comme les pollutions chimiques, l'eutrophisation, l'introduction d'espèces indigènes, la surexploitation des ressources, le changement climatique s'exercent sur l'environnement marin et provoquent des altérations dans la productivité et la distribution des espèces, des communautés, des populations. Ces altérations se sont produites à des fréquences et avec des amplitudes sans précédents depuis la fin de la seconde guerre mondiale. Les conséquences de cette pression mise sur le milieu marin, censé pouvoir tout absorber, tout tamponner, sont parfois invisibles pour la société (ou ignorées), donc les pressions continuent de s'exercer. Parfois ces pressions sont visibles et vont toucher de près la société qui se pose alors en victime des effets de l'environnement : fermeture des zones conchylicoles, proliférations d'organismes néfastes au bon fonctionnement de certains procédés industriels, interdiction de baignade, ... Quoiqu'il en soit il est clair que la prise de conscience quant à l'importance de faire machine arrière a été tardive. L'urgence est maintenant d'améliorer les connaissances scientifiques afin de faire des expertises, proposer des avis, mettre en place des suivis et contribuer à des recommandations pour l'application de mesures préventives et/ou correctives.

L'eutrophisation est considérée comme l'une des menaces les plus préoccupantes sur la santé des écosystèmes marins depuis ces dernières décennies, alors qu'elle est

considérée avec attention dans le domaine de la limnologie depuis le début du XX^{ème} siècle. La pression que représente les apports de nutriments ainsi que leurs effets directs et indirects constitue une menace grandissante dans le monde entier avec 415 systèmes marins identifiés comme eutrophes ou hypoxiques (Nixon, 1995 ; Duarte *et al.*, 2009) (Figure 91).

World Hypoxic and Eutrophic Coastal Areas

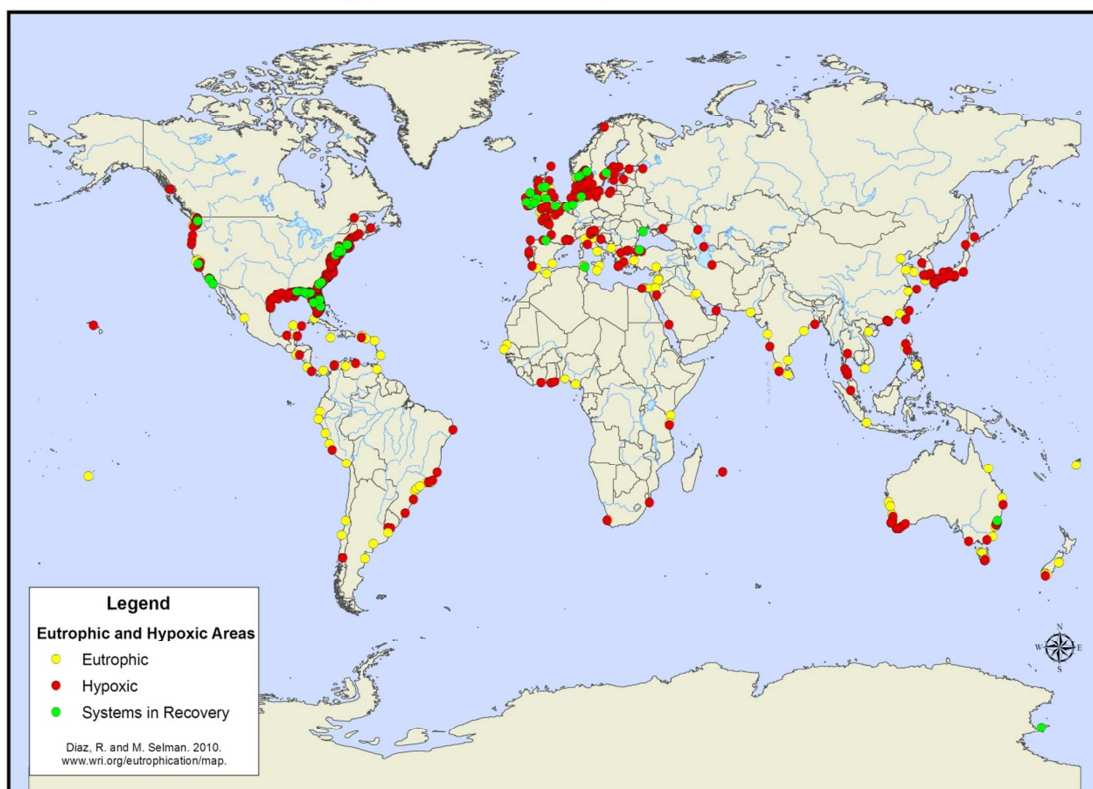


Figure 91. Identification des zones côtières eutrophes, hypoxiques et en restauration dans le Monde (Source : <http://www.wri.org/resource/world-hypoxic-and-eutrophic-coastal-areas>).

L'Europe avec 168 systèmes marins eutrophes ou hypoxiques et la France en particulier ne sont pas épargnés par ce processus (Figure 92). La façade Manche orientale ne fait pas exception à la règle. L'eutrophisation est favorisée par (i) son positionnement géographique (entre l'Atlantique et la mer du Nord) qui implique un cumul important d'apports de nutriments, (ii) ses caractéristiques hydrodynamiques (dérive résiduelle vers le nord-est, présence d'une structure frontale) qui facilitent le transport et/ou la rétention des masses d'eaux dans certaines zones, et (iii) par l'existence de fortes pressions exercées en zone côtière par les activités humaines. La qualité de cet environnement est considérée comme moyenne à mauvaise selon les critères de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE). La zone est classée comme à problèmes au regard de l'eutrophisation selon les critères de la convention d'Oslo et de Paris (OSPAR) et comme une zone à enjeux pour la nouvelle Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM).

Eutrophic and Hypoxic Coastal Areas of Europe

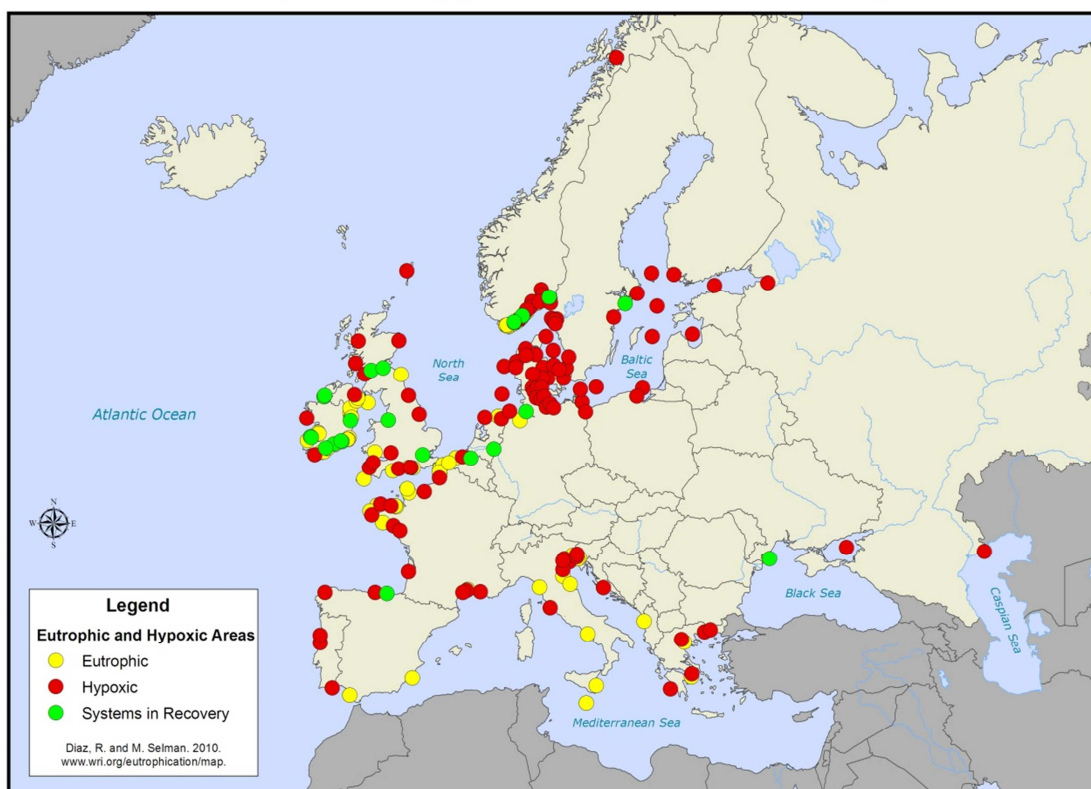


Figure 92. Identification des zones côtières eutrophes, hypoxiques et en restauration en Europe (Source : <http://www.wri.org/resources/maps/coastal-eutrophic-and-hypoxic-areas-europe>).

La plupart des définitions de l'eutrophisation s'accorde pour définir ce processus comme une prolifération excessive des espèces végétales (micro- et macroalgues) en réponse à des apports conséquents de nutriments, notamment à l'azote et au phosphore. Cette réponse se traduit par des effets directs et indirects qui vont aboutir à des dysfonctionnements des écosystèmes benthique et pélagique. Le besoin de (sur) simplification des messages transmis de la communauté scientifique vers les gestionnaires de l'environnement et la société pour expliquer l'eutrophisation a été, et est toujours, tel qu'il est courant d'entendre dans certaines réunions ou groupes de travail ouverts à des non-spécialistes que l'eutrophisation peut se résumer à des proliférations de phytoplancton (développement d'eaux colorées, prolifération de mousses nauséabondes) ou de végétaux supérieurs (marées vertes) (Figure 93) qu'une simple réduction des apports de nutriments pourrait bannir du jour au lendemain de manière complètement linéaire.



Figure 93. Aspects visuels de l'eutrophisation. A gauche, prolifération de mousse nauséabonde sur le littoral des Hauts-de-France lié au développement massif de *Phaeocystis globosa*, et à droite, marée verte à Ulves en Bretagne.

Or l'eutrophisation est un phénomène beaucoup plus complexe, multi-paramètres faisant intervenir des processus à différentes échelles de temps et d'espace et avec des réactions des écosystèmes qui vont s'inscrire dans la durée, aussi bien en matière de dégradation que de restauration. La réponse de l'environnement ne sera pas linéaire, ni monotone croissante ou décroissante, il existera des points de non-retours, des ruptures (Figure 94). Par conséquent, l'évaluation de l'état d'eutrophisation et la mesure de l'efficacité des mesures envisagées nécessitent encore l'amélioration des connaissances dans de nombreux domaines.

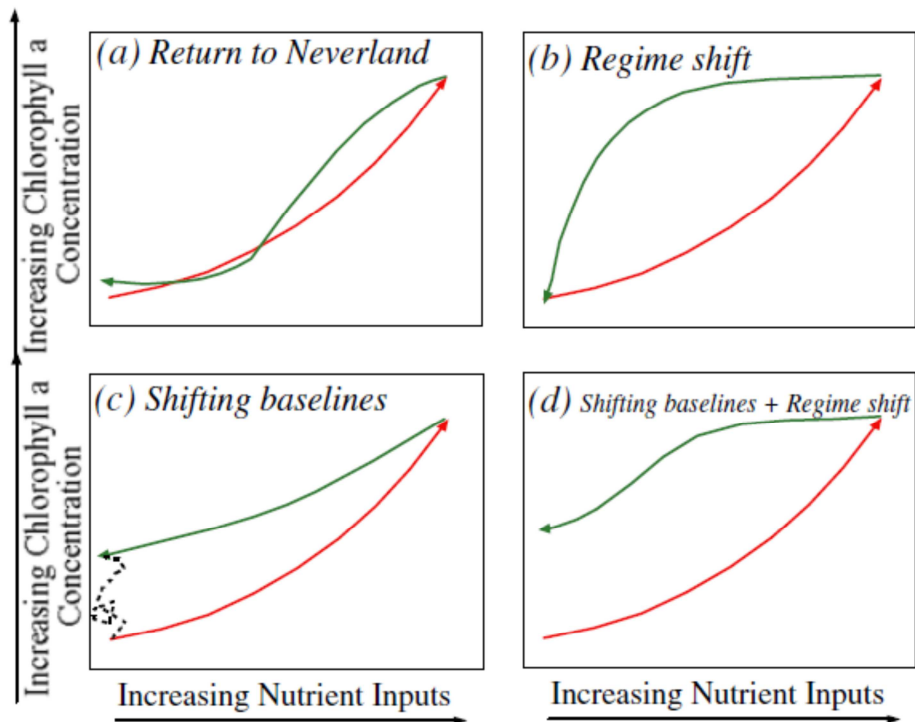


Figure 94. Trajectoires idéalisées de la concentration en chlorophylle-*a* (chl-*a*) et des apports de nutriments dans une situation d'augmentation (ligne rouge) et de diminution (ligne verte) des apports en réponse à différents scénarios : (a) « Return to Neverland », scénario impliquant une relation réversible directe entre chl-*a* et nutriments. (b) trajectoire résultant d'un changement de régime, avec hystérésie. (c) Modification de la ligne de base. (d) Trajectoires avec combinaison des effets (b) et (c) (Duarte *et al.*, 2009).

Ma contribution à la recherche vise à améliorer les connaissances sur la structure et la dynamique du phytoplancton en réponse aux modifications des conditions environnementales sous l'effet de pressions d'origines naturelle ou anthropique. Elle est ainsi très orientée vers l'étude de l'eutrophisation et des habitats pélagiques. Elle se décline dans une zone atelier, la Manche orientale et la baie sud de la mer du Nord, très marquées par les proliférations régulières de la prymnésiophycée, *Phaeocystis globosa*, taxon recensé dans la liste des espèces nuisibles indicatrices d'eutrophisation. L'objectif est également de contribuer au développement d'un système intégré, numérique pour l'Observation et la Surveillance de l'environnement marin. En effet, la déconvolution des effets locaux des effets globaux, des évolutions naturelles des évolutions d'origine anthropique, la détection des ruptures et des tendances ne peuvent être efficaces que via une stratégie d'observation à haute résolution spatiale et temporelle inscrite dans la durée.

Les schémas de variations saisonnières des paramètres physico-chimiques et biologiques de notre zone d'étude ont été appréhendés historiquement par Bentley *et al.* (1993), Laane *et al.* (1993), Brunet *et al.* (1996), Gentilhomme et Lizon, 1998. La limite de ces approches est d'être basée sur des séries de données courtes avec prise en compte d'année(s) parfois très particulière(s). La valeur ajoutée de notre travail vient du fait que les schémas de variations proposés dans nos publications et nos communications puis, mis à jour régulièrement dans les rapports de bilan annuel se basent aujourd'hui sur près de trente ans de mesures au niveau des sites de Dunkerque, de Boulogne-sur-Mer et de la baie de Somme, ce qui en fait des séries temporelles parmi les plus longues au niveau français. Par ailleurs, mon projet de recherche est basé sur une approche intégratrice, multi-paramètres combinant les avantages (tout en essayant de gérer les inconvénients) des approches conventionnelles à Basse Fréquence et des approches plus récentes, basées sur les systèmes complémentaires à l'étude du phytoplancton par microscopie optique, comme sur des systèmes de mesures à Haute Fréquence des paramètres physico-chimiques et biologiques, le tout associé à des outils numériques d'analyses de données.

Le système intégré d'Observation et de Surveillance de la Manche orientale et de la baie sud de la mer du Nord ainsi amélioré et/ou développé au cours de ces quinze dernières années (Figure 95) présente plusieurs avantages :

- Échantillonnage dans des écosystèmes contrastés, interconnectés,
- Positionnement des points d'échantillonnage dans des zones sous influence des pressions anthropiques, tout en proposant des références au large,
- Combinaison d'approches à haute et basse fréquences, c'est-à-dire innovantes comme conventionnelles (référence),
- Existence de plateformes analytiques adaptées à une stratégie BF-HF,
- Complémentarité avec les systèmes mis en œuvre en Manche occidentale (approche entrée/sortie à l'échelle de la Manche),
- Création de séries multi-paramètres et à long-terme bancarisées, accessibles,
- Développement de méthodes et d'outils pour le traitement de bases de données volumineuses, la prédiction d'états environnementaux,
- Extension et/ou combinaison possible avec d'autres stratégies (notions de plateforme de test ou site d'essai).

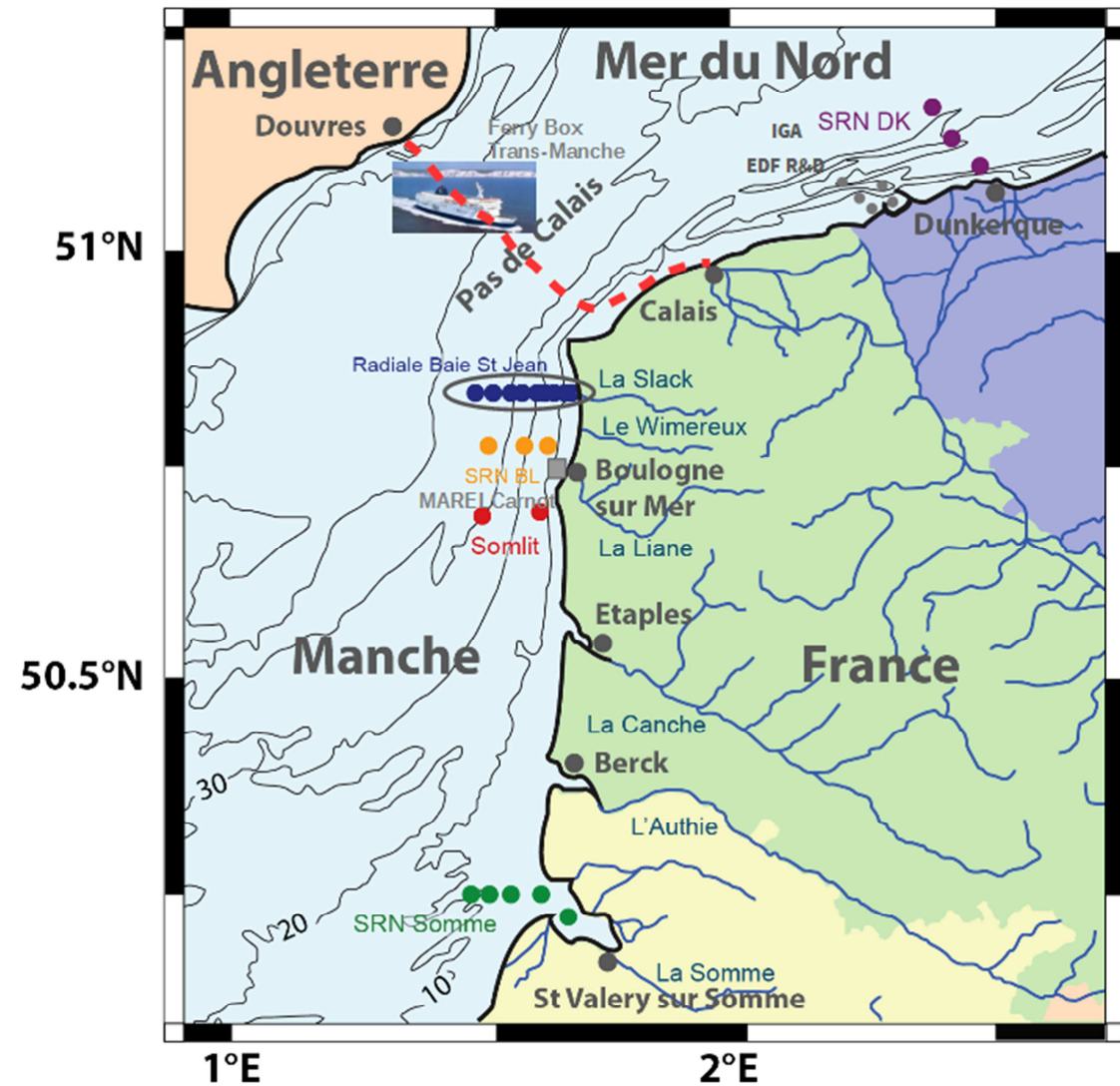


Figure 95. Illustration du système intégré d'Observation et de Surveillance de la Manche orientale et de la baie sud de la mer du Nord, développé et amélioré dans le cadre de mon projet de recherche (Réseaux REPHY/SRN, IGA, MAREL Carnot et projet de ligne instrumentée Haute Fréquence Calais-Douvres) et complémentarité avec celui de l'UMR LOG (Radiale Baie St Jean, Somlit) (Source : Artigas F. et Lefebvre A.).

Grâce aux améliorations de ce système d'observation, grâce aux développements des méthodes de collecte et d'analyse des données à différentes échelles de temps et d'espace, grâce à l'utilisation conjointe des données *in situ*, des produits dérivés des images satellites et de la modélisation, nous pouvons proposer une image fiable de la réponse du compartiment phytoplanctonique de la Manche orientale et de la baie sud de la mer du Nord aux apports de nutriments. Cette notion de fiabilité s'explique par le fait que nos résultats et les conclusions qui en découlent tiennent compte de différentes échelles de temps et d'espace. Nos schémas sont en effet basés sur des stratégies d'échantillonnage dont la fréquence temporelle est comprise entre la minute et le mois. Au niveau spatial, nos observations sont faites au niveau de points fixes, de radiales de plusieurs milles nautiques avec des gradients plus ou moins important d'influences anthropiques et également à mésoéchelle.

La pression exercée par les nutriments en Manche orientale et dans la baie sud de la mer du Nord est expliquée, par ordre d'importance décroissante, par les apports de la Seine, de la Somme, de la Canche, de l'Authie, puis à un niveau comparable, mais dans une moindre mesure, par la Slack, le Wimereux et la Liane. Les apports d'azote dans la zone côtière sont expliqués à 70 % par les apports issus de ces rivières, alors que les 30 % restant proviennent des eaux océaniques. Les apports atmosphériques sont secondaires, bien qu'ils puissent contribuer significativement, mais ponctuellement, à la croissance du phytoplancton en période estivale. Cette période peut être propice au développement de taxons potentiellement nuisibles via la production de phycotoxines (exemple de *Pseudo-nitzschia*). Le détroit du Pas-de-Calais en raison de sa situation géographique et de la très forte fréquentation maritime (apport d'oxyde d'azote via les fumées de combustion) est une zone à enjeux au regard de ce type d'apport.

Les concentrations en ammonium, nitrite, nitrate, phosphate et silicate mesurées dans les eaux de notre zone atelier suivent un cycle saisonnier marqué, caractéristique des systèmes tempérés. Ces concentrations présentent une forte variabilité interannuelle. Comme dans de nombreux systèmes confrontés à une pression d'origine anthropique croissante depuis la fin de la seconde guerre mondiale, puis soumis aux effets plus récents des tentatives de régulation des pressions, nous pouvons constater une diminution significative de la concentration en phosphate. L'évolution des concentrations en silice et en nitrate est plus complexe. Pour la silice, il pourrait s'agir soit d'une réponse de l'environnement marin à des améliorations des conditions d'eutrophisation dans les eaux continentales favorisant l'augmentation des apports de silice en mer du fait de leur non intégration par les diatomées d'eaux douces, soit d'une modification du cycle de la silice biogène en réponse à des modifications de la structure de la communauté phytoplanctonique (développement des flagellés aux dépens des diatomées). Pour le nitrate, l'absence de tendance à l'amélioration est liée aux difficultés de régulation des apports via les sources diffuses, mais peut-être le résultat de mesures correctives insuffisantes ou d'un décalage entre la mise en œuvre de ces mesures et la réponse du système. Selon les critères de Redfield et Brzezinski, la croissance du phytoplancton ne serait pratiquement jamais limitée par l'azote dans la mesure où il est systématiquement en excès par rapport au phosphate et au silicate. En baie de Somme, les éléments qui limitent majoritairement la croissance du phytoplancton sont, par ordre de priorité, le phosphore, la silice et l'azote de septembre à février-mars, et la silice, le phosphore et l'azote, le reste de l'année. Pour les zones côtières de Dunkerque et de Boulogne-sur-Mer, la limitation est du type P : Si : N entre octobre et avril-mai, et du type N : Si : P le reste de l'année.

La communauté phytoplanctonique qui se développe en réponse à ces apports de nutriments est principalement représentée par les bacillariophycées (diatomées) et par la prymnésiofycée, *Phaeocystis globosa*. Cette dernière va se développer entre mars et juin, après une première efflorescence de diatomées. *P. globosa* représentera alors entre 70 et 90 % de l'abondance phytoplanctonique totale. Au cours de son cycle de vie polymorphe complexe, elle passera d'une forme isolée à une forme coloniale. C'est la rupture de ces colonies qui sera à l'origine de la libération de matière organique, à l'origine de la formation d'une mousse abondante et nauséabonde qui se déposera sur le littoral. Alors que sa présence est naturelle et cosmopolite, ce sont les modifications de timing et d'amplitude des efflorescences de *P. globosa*, leurs origines et leurs conséquences qui méritent une attention particulière.

Dans notre zone atelier, l'azote incorporé par *P. globosa* provient à 80 % des rivières françaises. Dans les eaux côtières belges adjacentes, cette contribution est faible (< 30 %). Elle s'explique par un rejet vers le large, par effet de cap, des masses d'eaux du fleuve côtier qui intègrent alors la circulation centrale de la Manche pour alimenter les eaux du large de la baie sud de la mer du Nord.

Les concentrations cellulaires maximales estimées lors des efflorescences de *P. globosa* sont supérieures à 28.10^6 cellules par litre, 29.10^6 cellules par litre et 48.10^6 cellules par litre, respectivement, dans les eaux côtières de Dunkerque, de Boulogne-sur-Mer et de la baie de Somme. Ces valeurs sont nettement supérieures aux seuils proposés par OSPAR (10^6 cell.l⁻¹) et Lancelot *et al.* (2009) (4.10^6 cell.l⁻¹) comme limites au-delà desquelles les effets néfastes sur l'environnement sont avérés. Depuis le début des années 90, les abondances de *P. globosa* augmentent à Dunkerque et à Boulogne-sur-Mer, alors qu'elles sont plutôt stables en baie de Somme.

Les efflorescences de *P. globosa* sont régulièrement accompagnées et/ou suivies d'efflorescence de diatomées du genre *Pseudo-nitzschia*. Ces périodes sont donc caractérisées par un risque environnemental accru. La présence simultanée de ces 2 taxons peut démultiplier les effets négatifs : apports excessifs de matière organique pouvant être à l'origine d'hypoxie, production de phycotoxines, altérations mécaniques, modification de la viscosité de l'eau, modification des transferts énergétiques au sein du réseau trophique.

Ces évolutions de la dynamique et de la structure de la communauté phytoplanctonique se font également dans le contexte particulier de modifications majeures des conditions climatiques à des échelles de temps sans précédent. Nous avons pu mettre en évidence une augmentation significative de la température de l'eau depuis les années 80 et, plus globalement, une influence de l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) et de l'Oscillation Multidécennale Atlantique (AMO) sur les conditions hydrodynamiques, hydrologiques, météorologiques et biologiques. Les changements à long-terme de la communauté phytoplanctonique et de la qualité de l'environnement au sens large en Manche orientale et en mer du Nord sont ainsi le reflet d'une combinaison d'influence de facteurs globaux et locaux. Nos résultats vont dans le sens de constatations déjà alarmantes, à savoir que les facteurs à grande échelle vont impacter le fonctionnement de l'écosystème à l'échelle locale avec, par exemple, des changements de la phénologie du bloom (nos résultats ; Breton *et al.*, 2006 ; Wiltshire *et al.*, 2008 ; Racault *et al.*, 2013), des migrations de groupes planctoniques (Gomez et Souissi, 2007 ; Widdicombe *et al.*, 2010), des changements hydrologiques conditionnant des modifications de la distribution et de la composition du phytoplancton (Gailhard *et al.*, 2002 ; nos résultats).

Ces changements vont provoquer un renforcement du rôle des événements extrêmes que notre système d'observation HF peut mettre en évidence. Les outils numériques associés à ces systèmes de mesures à haute fréquence permettent le traitement en temps (quasi) réel et de manière optimisée des quantités énormes de données qui en sont issues. La classification spectrale non supervisée permet de définir des états environnementaux et la dynamique associée en fonction de la géométrie des données, sans connaissance a priori, sans tenir compte de la temporalité, de manière automatisée et sans introduire la notion de seuil. Le recours à un système hybride couplant classification non supervisée et modèle de Markov caché permet d'envisager la prédiction de ces états. En dehors des possibilités que cela offre en matière d'amélioration des connaissances quant aux fonctionnements des écosystèmes, ce système hybride permet d'envisager le recours à

des stratégies adaptatives (notion d'early warning system des anglo-saxons) dans les programmes d'observation et de surveillance. Bien qu'un plan d'échantillonnage doive systématiquement être défini avant les campagnes d'échantillonnage, ce système hybride permet d'identifier des changements environnementaux en temps réel afin de permettre un renforcement ou un allègement des prélèvements.

Au regard de l'identification de zones à enjeux pour l'eutrophisation à l'échelle des différentes sous-régions marines de la DCSMM, Lefebvre (2013) (**R-86.**) a proposé, pour le Programme de Surveillance de cette directive, la généralisation de la mise en œuvre de ce type de système d'observation intégré pour l'extension ou la création de dispositifs de collectes de données et/ou de modélisation dans des zones ateliers à l'échelle nationale française (la longueur des radiales est donnée à titre indicatif afin de mieux se représenter l'emprise spatiale vers le large des zones à enjeux) :

Sous-région marine Manche Mer du Nord

Entre la frontière belge et le sud de la baie de Somme (Figure 96), la zone à forte biomasse phytoplanctonique s'étend jusqu'à l'isobathe des 20 m. Afin de compléter les dispositifs existants (principalement IGA Gravelines, REPHY/SRN et Résomar/Somlit), la radiale du réseau SRN de la baie de Somme devrait être étendue vers le large (passage d'une radiale de 4 à environ 15 milles nautiques de long à partir du point SRN Mimer). En baie de Seine (Figure 96), la zone à plus forte biomasse phytoplanctonique est également généralement délimitée par l'isobathe des 20 m. En baie de Seine orientale, le dispositif existant couvre la zone de plus forte biomasse au droit de l'estuaire, mais une radiale orientée de Ouistreham (Orne) vers Antifer serait à créer (longueur d'environ 30 milles nautiques). La baie de Seine occidentale et notamment la zone au large de la baie des Veys est insuffisamment couverte. Une radiale côte-large d'environ 12 milles nautiques serait à créer entre la baie des Veys et l'isobathe des 20 m (Figure 12).

Le site des Archipels Chausey (Figure 96) constituerait un site de référence permettant de déconvoluer les effets des changements d'origine anthropique des changements « naturels ».

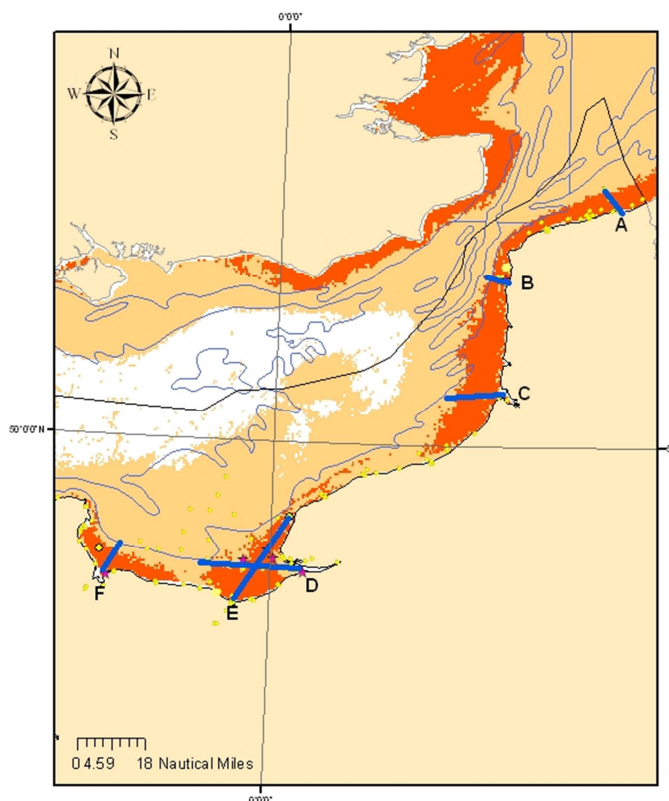


Figure 96. Proposition de compléments aux dispositifs de collecte existants sous forme de radiales côte-large dans les zones de plus forte biomasse phytoplanctonique en Manche orientale et baie sud de la mer du Nord (en orange : estimation de la concentration en chlorophylle-*a* via MODIS - climatologie 2003-2010 pour les mois de mai à juillet - source : F. Gohin ; points jaunes : dispositifs existants, supports pour le groupe de paramètre Nutriments). (A) radiale SRN Dunkerque existante, (B) radiale SRN Boulogne-sur-Mer existante, (C) radiale SRN Baie de Somme à étendre vers le large, (D) radiale baie de Seine orientale à modifier, (E) radiale Ouistreham (Orne) - Antifer à créer (F) radiale Baie des Veys à créer.

Au niveau de la pointe Bretagne (Figure 97), l'écosystème est structuré par le front d'Ouessant caractérisé par une dynamique complexe. Cette zone correspond à une interface entre les eaux de l'Atlantique, du Golfe de Gascogne et de la Manche. Dans cette zone, les dispositifs d'observation et de surveillance existants sont très côtiers. Le dispositif DCSMM devrait intégrer de nouvelles radiales orientées de la côte vers le large : une radiale orientée vers le large dans la baie du Mont Saint Michel (environ 26 milles nautiques), une radiale orientée vers le large depuis la baie de Saint Briec (environ 15 milles nautiques), une radiale orientée vers le large depuis Roscoff (environ 50 milles nautiques), une radiale orientée vers le large depuis la rade de Brest (environ 18 milles nautiques), une radiale orientée vers le large depuis la baie de Douarnenez (environ 18 milles nautiques), une radiale large Lorient-Groix (environ 18 milles nautiques), une radiale vers le large depuis la baie de Vilaine (environ 38 milles nautiques) et une radiale large Loire (environ 42 milles nautiques). Les sites d'Ouessant et de la baie de Concarneau constitueraient des sites de référence permettant de déconvoluer les effets des changements d'origine anthropique des changements naturels.

Sous-région marine Mers Celtiques

Cette aire ne présente pas de zone à enjeux au regard de l'eutrophisation et par conséquent n'est pas concernée par la mise en place d'un dispositif spécifique de collecte de données DCSMM pour le D5. Il faut noter que le site d'Ouessant s'avère néanmoins intéressant comme site de référence.

Sous-région marine Golfe de Gascogne

Les systèmes sous influence de la Loire et de la Vilaine et sous influence de la Gironde et du bassin d'Arcachon (Figure 98) constituent deux entités devant faire l'objet d'une surveillance particulière au regard de l'eutrophisation. Les dispositifs en place couvrent relativement bien les zones de plus forte biomasse phytoplanctonique jusqu'à l'isobathe des 20 m. Au-delà de cette limite, les dispositifs sont quasi-inexistants. Ainsi, il pourrait être recommandé de créer 4 radiales côte-large dans cette zone : une radiale des Pertuis-Charentais vers le large (environ 27 milles nautiques), une radiale au large de la Gironde (environ 37 milles nautiques), une radiale au large du bassin d'Arcachon (environ 5 milles nautiques) et une radiale au large de l'Adour (environ 12 milles nautiques).

Le site de l'île d'Yeu constituerait un site de référence.

Sous-région marine Méditerranée occidentale

Dans cette SRM oligotrophe, les problèmes d'eutrophisation touchent quasi-exclusivement les lagunes. La zone sous influence des apports de nutriments et de matières organiques du Rhône apparaît comme une zone à enjeux au regard du processus d'eutrophisation. Les dispositifs d'observation et de surveillance sont insuffisamment étendus vers le large dans cette zone. La mise en place d'une radiale côte-large depuis l'embouchure du Rhône (transect d'environ 16 milles nautiques) permettrait d'échantillonner cette zone à plus forte biomasse phytoplanctonique (Figure 99).

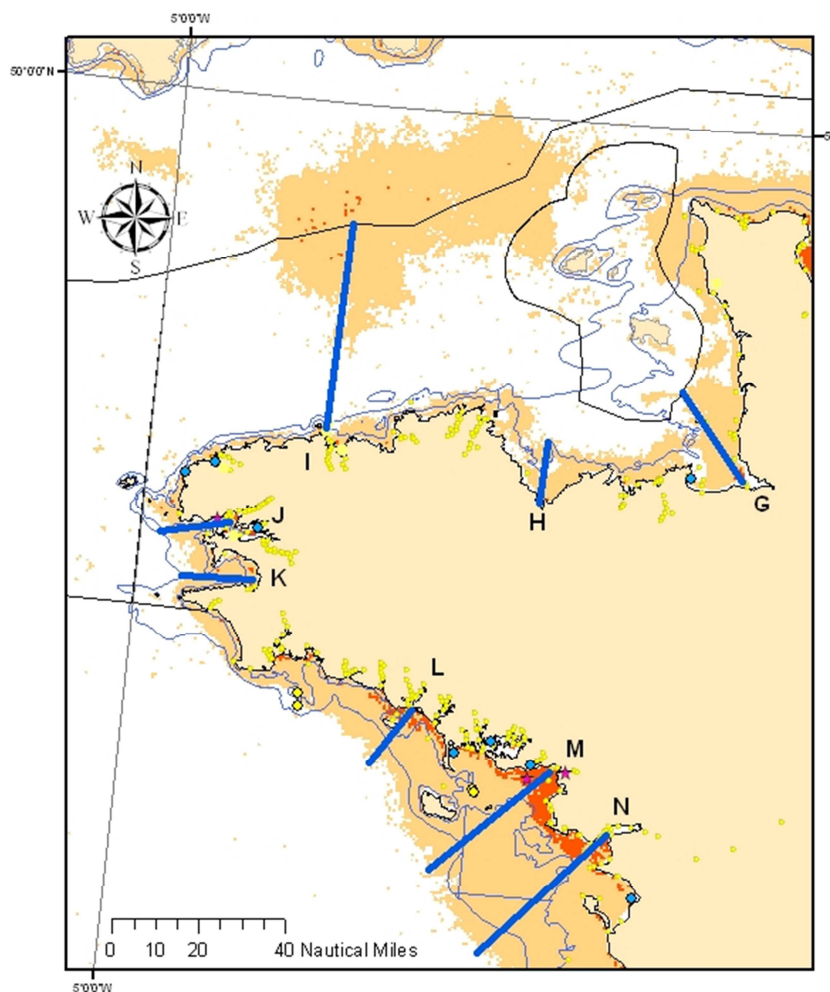


Figure 97. Proposition de compléments aux dispositifs de collecte existants sous forme de radiales côte-large dans les zones de plus forte biomasse phytoplanctonique dans la partie nord du Golfe de Gascogne et mer d'Iroise (en orange : estimation de la concentration en chlorophylle-*a* via MODIS - climatologie 2003-2010 pour les mois de mai à juillet ; points jaunes : dispositifs existants, supports pour le groupe de paramètre Nutriments). (G) radiale de la baie du Mont Saint Michel large à créer, (H) radiale de la baie de Saint Briec large à créer, (I) radiale large Roscoff à créer, (J) radiale large rade de Brest à créer, (K) radiale large baie de Douarnenez à créer, (L) radiale large Lorient-Groix à créer, (M) radiale large Vilaine à créer et (N) radiale large Loire à créer.

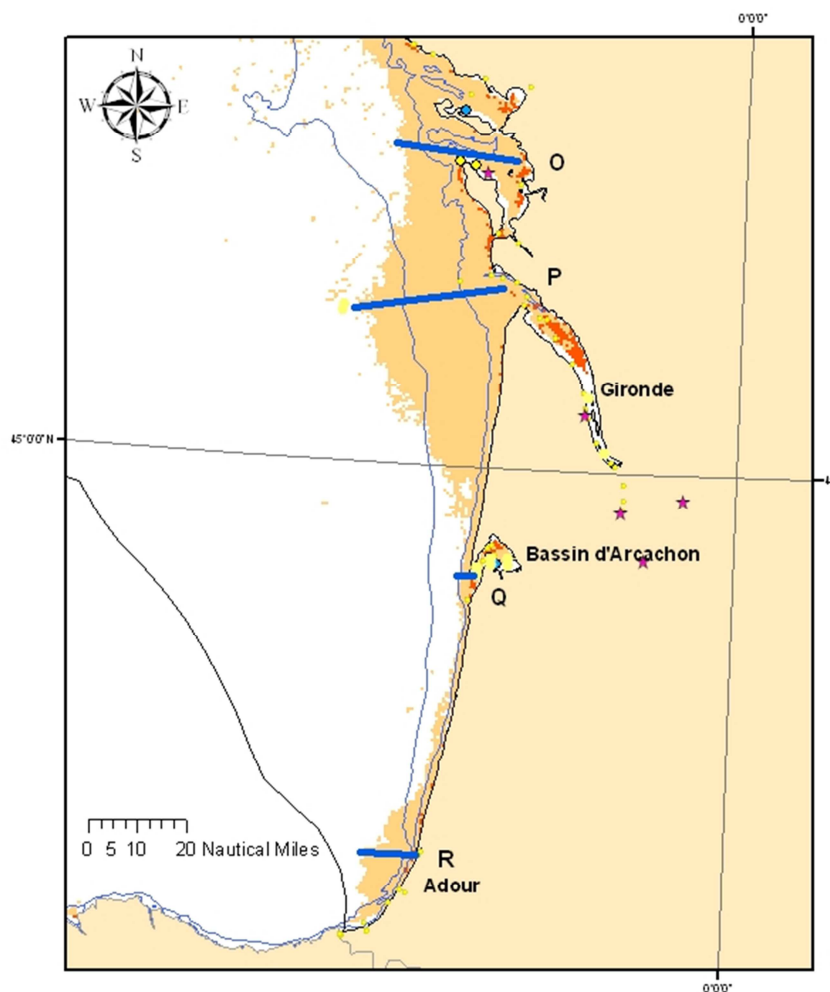


Figure 98. Proposition de compléments aux dispositifs de collecte existants sous forme de radiales côte-large dans les zones de plus forte biomasse phytoplanctonique dans la partie sud du Golfe de Gascogne (en orange : estimation de la concentration en chlorophylle-*a* via MODIS - climatologie 2003-2010 pour les mois de mai à juillet ; points jaunes : dispositifs existants, supports pour le groupe de paramètre Nutriments). (O) radiale Pertuis-Charentais à créer, (P) radiale large Gironde à créer, (Q) radiale large bassin d'Arcachon à créer et (R) radiale large Adour à créer.

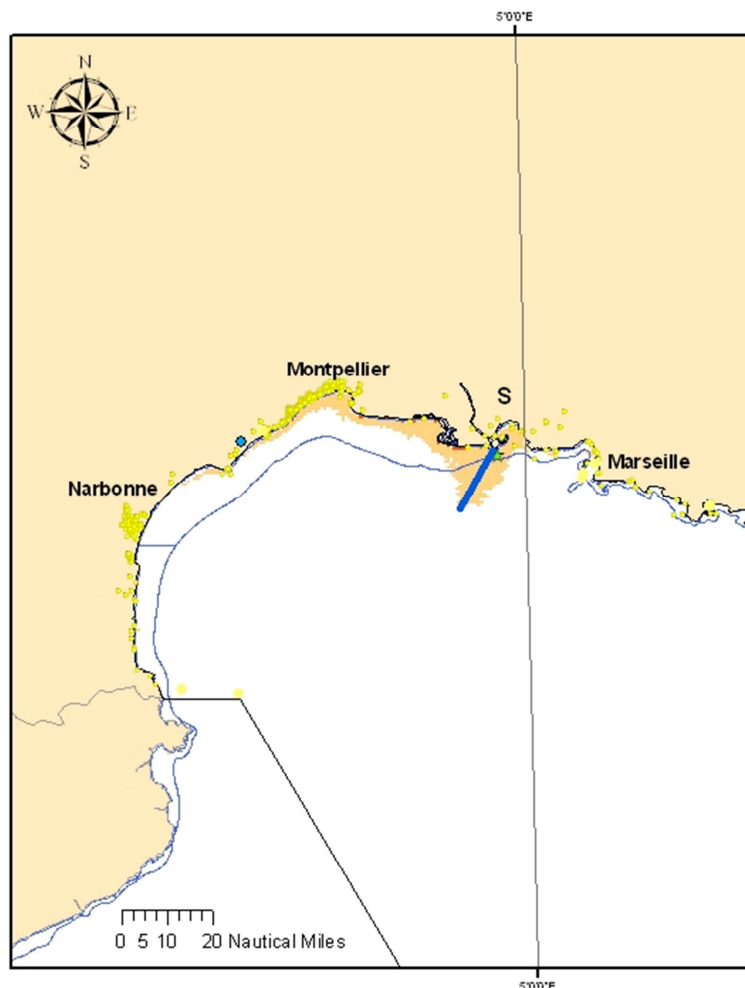


Figure 99. Proposition de compléments aux dispositifs de collecte existants sous forme de radiales côte-large dans les zones de plus forte biomasse phytoplanctonique en Méditerranée occidentale (en orange : estimation de la concentration en chlorophylle-*a* via MODIS - climatologie 2003-2010 pour les mois de mai à juillet ; points jaunes : dispositifs existants, supports pour le groupe de paramètre Nutriments). (S) radiale large embouchure du Rhône à créer.

La révision en cours de la décision 477/2010 relative aux critères et normes concernant le Bon État Écologique de la DCSMM va probablement aboutir à une suppression du critère dédié à l'évaluation des modifications de la structure de la communauté phytoplanctonique pour le descripteur dédié à l'eutrophisation. Le recensement des HAB serait également un critère secondaire, donc optionnel (et on sait ce que deviennent les options lorsqu'il s'agit de mettre en place un programme de surveillance dans l'environnement marin). Alors que les démonstrations quant à l'existence d'une relation entre les HAB et l'eutrophisation se multiplient (Heisler *et al.*, 2008), mais que le sujet demeure équivoque (Gowen *et al.*, 2012), la relation entre apports de nutriments et composition du phytoplancton ne devrait pas se poser. La définition du descripteur qualitatif n°5 dédié à l'eutrophisation et servant à la définition du bon état écologique de la DCSMM (Annexe I de la Directive 2008/56/CE) est la suivante : « L'eutrophisation d'origine humaine, en particulier pour ce qui est des effets néfastes, tels que l'appauvrissement de la biodiversité, la dégradation des écosystèmes, la prolifération d'algues toxiques et la désoxygénation des eaux de fond, est réduite au minimum ». Il

est rassurant de constater que cette modification de la structure de la communauté phytoplanctonique en réponse à des modifications des apports en nutriments demeure néanmoins un critère primaire de la DCSMM en support à l'évaluation de la modification de la biodiversité (Descripteur n°1). On peut toutefois noter une mise en avant (à mon avis, disproportionnée) des niveaux trophiques pélagiques supérieurs comme du compartiment benthique au détriment des niveaux inférieurs du compartiment pélagique. Une des questions est : est-ce que la stratégie de surveillance mise en place pour répondre à la problématique de la biodiversité sera systématiquement compatible avec celle nécessaire pour la problématique de l'eutrophisation (couverture spatiale et temporelle, fréquence d'échantillonnage, ...) ? L'effet des apports excessifs de nutriments serait ainsi prioritairement mesuré via des modifications de la biomasse du phytoplancton, donc de son proxy, la concentration en chlorophylle. Une revue de la littérature dédiée à l'eutrophisation et nos résultats mettent en avant la complexité des réponses du phytoplancton à une politique de réduction des apports de nutriments qui ne peut se résumer à la seule étude des changements de biomasse. Alvarez-Hernandez *et al.* (2014) indiquent que dans un environnement évoluant vers une limitation de la croissance du phytoplancton par les nutriments, et soumis à une augmentation de la température et des modifications des conditions de lumière, l'utilisation des mesures de concentration en chlorophylle comme indicateur de biomasse phytoplanctonique est à considérer avec précaution. Une telle simplification de l'évaluation pourrait aboutir à deux situations aussi contre-productives l'une que l'autre :

- L'évaluation conduit à ne pas observer de modification de la biomasse et par conséquent aucune mesure environnementale n'est engagée (pas de préconisation quand à des besoins supplémentaires de réduction des apports). Sauf que, pour une même biomasse, la structure de la communauté peut être significativement différente. Nous avons montré que les changements peuvent être favorables à la prolifération d'espèces potentiellement nuisibles (*Phaeocystis*, *Pseudo-nitzschia*, *Gymnodinium*, *Gyrodinium*,...). L'inaction pourrait aboutir à une dégradation de la situation.
- L'évaluation conduit à mettre en place des mesures supplémentaires de réduction des apports de nutriments car une augmentation de la biomasse phytoplanctonique est observée. Si cette augmentation de la biomasse n'est liée qu'au développement de phytoplancton « fourrage », alors ces mesures vont aboutir à limiter des transferts énergétiques au sein du réseau trophique qui peuvent être bénéfique pour les niveaux trophiques supérieurs par compensation d'autres pressions (effets d'autres pressions que l'eutrophisation, comme la contamination chimique, la pêche,...). L'action risque d'inhiber une amélioration de la situation.

2.6. Perspectives

Dans leur méta-analyse de l'état de l'art en matière d'identification des pressions, des impacts et des manques de connaissances associés, Crise *et al.* (2015) indiquent, que pour la pression relative aux apports de nutriments et de matière organique et donc pour le descripteur dédié à l'eutrophisation, les priorités de la recherche doivent porter sur (i) la compréhension des relations entre les apports de nutriments, la réponse du phytoplancton par modification de la structure de sa communauté, les efflorescences des algues nuisibles et la production de mucilage et, (ii) les mécanismes d'impacts des changements de concentration en nutriments, des rapports entre ces nutriments sur la structure du réseau trophique et des flux de carbone. Ils insistent également sur le besoin de définir des méthodes harmonisées de la côte vers le large avec des seuils d'évaluation adaptés et en tenant compte des différences d'échelles des processus impliqués dans les eaux côtières vs les eaux du large. Plus généralement, il apparaît un manque de connaissance important au sujet des mécanismes et des processus de contrôle de la biodiversité, comme au sujet de la structure du réseau trophique.

A court terme et dans le sens de ces recommandations en parfait accord avec nos résultats, il s'agira de débiter les travaux liés au CPER 2014-2020 Territoires du bouloonnais / GIS Campus de la Mer et de l'Environnement littoral intitulé MARCO « Recherches marines et littorales en Côte d'Opale : des milieux aux ressources, aux usages et à la qualité des produits aquatiques » qui se veut être un projet structurant multi-laboratoires, multi-organismes associant la mise en place d'instruments et d'outils (enquêtes, indicateurs) pour une approche globale. Pour répondre à ses enjeux académiques et sociétaux, le projet s'articule autour de six axes :

- Observation et évaluation de l'environnement marin (coord. A. Lefebvre pour l'Ifremer et F. Artigas pour l'UMR-LOG),
- Structure, fonctionnement et dynamique des écosystèmes,
- Productivité et durabilité des ressources halieutiques et aquacoles,
- Qualité et sécurité des ressources aquatiques,
- Vulnérabilité et usages des éco-socio-systèmes marins et littoraux,
- Ingénierie marine et littorale.

Mon projet au sein du CPER MARCO vise à renforcer la valorisation scientifique des séries à long terme afin de mieux caractériser la communauté phytoplanctonique et sa dynamique spatio-temporelle. Dans le but d'appréhender la grande variabilité d'échelles inhérente à l'étude des processus en milieu côtier et marin, il s'agira pour moi de renforcer la stratégie d'observation mise en œuvre via les programmes conventionnels basse fréquence et via le programme haute fréquence MAREL Carnot grâce à la création d'une ligne transmanche (Calais-Douvres) de mesures automatisées par Ferry Box. Une partie du travail sera également consacrée au développement d'outils numériques de traitements des données HF dans la logique de ce qui a été initié lors du projet InterReg IVA - 2 Mers DYMAPHY et de la thèse 2010-2014 de Rousseeuw K. et de l'accueil d'un chercheur ULCO/LISIC spécialisé en traitement du signal.

Comme nous l'avons signalé à plusieurs reprises (Rousseeuw, 2014 ; Rousseeuw *et al.*, 2015 ; Caillault-Poisson *et al.*, 2014 (CN-30.)), les données manquantes constituent une problématique à part entière lorsqu'il s'agit de traiter les données HF pour développer des outils de prédiction que ce soit par réseau de neurones, par modèles de Markov Caché, par Random Forest, ... De plus, nos données HF sont rarement décorréliées et il est important de considérer l'ensemble des dynamiques de chacun des signaux pour

compléter une séquence manquante sur un ou plusieurs signaux. C'est pourquoi le laboratoire LISIC de l'ULCO (A. Bigand, E. Poisson-Caillault) a déposé dès 2015 un sujet de thèse (**Th-8.**) en collaboration avec le Département de Science Informatique de l'Université du Vietnam et mon laboratoire afin de proposer le développement à l'horizon 2018 d'une méthode de complétion d'une série HF basée sur une approche d'appariement élastique dans un contexte multidimensionnel et temporel prenant en compte l'ensemble de la dynamique des signaux des séries considérées (la série MAREL Carnot sera l'une d'entre elles). La méthode sera également étendue en proposant une modélisation basée sur l'incertitude de la complétion par des outils de la logique floue par intervalle à plusieurs dimensions. Pour 2017, j'envisage de déposer avec cette équipe une proposition de sujet de thèse portant sur le développement d'un système numérique de classification / modélisation ayant pour vocation d'intégrer des données multi-échelles (de la BF vers la HF), multi-sites (écosystèmes contrastés) et multi-paramètres/systèmes (stations instrumentées, Ferry Box, FlowCam, ZooCam,...) afin de pouvoir poursuivre le travail de caractérisations des états environnementaux et de leurs dynamiques spatiales comme temporelles. Du point de vue méthodologique, cette thèse s'inspirerait des méthodes du Deep Learning, de sélection automatique des attributs et des systèmes de classification multidimensionnelle. Une partie serait également consacrée à l'optimisation du traitement des données de type Big Data. En 2016, nous avons initié ce travail dans le cadre d'un stage de M2 recherche dédié à la classification semi-supervisée par paire.

Au regard des dernières avancées de l'action « numérisation du phytoplancton et traitement des images par ZooPhytoImage » dont j'assure le pilotage scientifique, les collaborations avec les laboratoires Ifremer ODE/UL/LER-MPL de Nantes, LER-AR d'Arcachon, DYNECO-Pelagos et REM/RDT/LDCM de Brest seront maintenues, voire renforcées, et il sera alors question de consacrer davantage de temps à la valorisation et la validation comparative des résultats obtenus avec les autres méthodes utilisées (méthodes alternatives vs microscopie). Il sera ensuite envisagé une phase de passage en mode pré-opérationnel du système dans le cadre des besoins du réseau REPHY (Phytoplancton et Phycotoxines) pour certaines implantations Ifremer. Suivant en cela les recommandations de l'AERES, l'amélioration de la stratégie d'observation par l'imagerie est devenue une thématique phare au sein du LER-BL dont l'expertise dans ce domaine est de plus en plus sollicitée. En matière de recherche, les attributs affectés à chaque cellule phytoplanctonique lors des numérisations avec le FlowCam, vont nous permettre, par exemple, via l'étude de la distribution précise des tailles et de la forme des cellules au cours d'une succession saisonnière (tout en tenant compte de la variabilité interannuelle grâce à nos suivis à long-terme), d'améliorer les connaissances sur ce trait morphologique. Nous pourrons alors mieux comprendre comment les fluctuations de régimes d'apports de nutriments, de la lumière, de la température à différentes échelles de temps vont pouvoir influencer la dynamique et la succession des espèces du phytoplancton en nous focalisant sur les modifications de la structure de taille. Parmi ces cellules de différentes tailles, une attention toute particulière sera portée aux taxons potentiellement nuisibles *Pseudo-nitzschia* et *Phaeocystis*.

A l'échelle européenne, dans la continuité de la démarche scientifique engagée dans le cadre du projet InterReg IVa - 2 Mers DYMAPHY (2010-2014), il s'agira de mener à bien les actions programmées dans le projet H2020 JERICO-Next (New European eXpertise for coastal observatories). Il est ainsi question de renforcer le consortium

existant (France, Belgique, Royaume-Uni, Pays-Bas) et de l'étendre à d'autres partenaires (Allemagne, Suède, Norvège, Espagne, Italie, Grèce) afin de poursuivre le développement de technologies et de méthodologies afin d'améliorer l'opérabilité et les capacités de discrimination des technologies dites innovantes, supports aux recherches sur la diversité du phytoplancton, les micro-algues toxiques, la distribution des groupes fonctionnels et les paramètres photosynthétiques. A terme, la comparaison et l'analyse critique des caractéristiques et des capacités des différents systèmes permettront de mieux définir les règles de mises en œuvre en fonction des contraintes logistiques et environnementales. Notre groupe focalisera son attention sur les systèmes suivants : cytomètre en flux, analyseur spectral de fluorescence, FlowCam. Les actions de développement et/ou d'optimisation des méthodes de prétraitement, de traitement et de modélisation des signaux HF issus de ces systèmes se feront en complémentarité avec celles du CPER MARCO. L'illustration des capacités de ces systèmes à soutenir les besoins de la recherche, comme de l'observation et de la surveillance, tout particulièrement, en soutien aux descripteurs 1 (Biodiversité) et 5 (Eutrophisation) de la DCSMM se fera lors d'actions conjointes entre les partenaires dès 2017. Des campagnes de mesures seront organisées dans quatre zones côtières européennes contrastées (Mer Baltique, Skagerrak-Kattegat, Manche orientale - baie sud de la mer du Nord, mer Ligure).

En parallèle, dans le contexte de la dynamique engagée au niveau national par les groupes spécialisés dans le développement et la mise en œuvre de systèmes instrumentés de mesures à haute fréquence (Somlit-HF pour les stations marines et HOSEA (High Frequency Observation network for the environment in coastal SEAs) pour l'Ifremer), j'aimerais voir aboutir au moins une partie d'un projet non retenu par l'ANR en 2016 (OSMOSE : Observation Synergy for Monitoring the Ocean System Evolution : note globale entre 10,5 et 14,5 sur 15 pour les 4 évaluateurs). L'idée générale est d'utiliser trois systèmes HF implantés dans des écosystèmes contrastés (oligotrophe à eutrophe, sans marée à mégatidal, homogène à stratifié) pour identifier des schémas de variabilité naturelle et d'évaluer les impacts (directs et indirects) des changements globaux et des forçages anthropiques sur la structure et le fonctionnement de ces systèmes en se focalisant sur l'étude du phytoplancton (Figure 100). L'autre enjeu serait de pouvoir combiner les informations HF et BF pour apprécier la variabilité et les schémas de réponses aux forçages à différentes échelles de temps. Cette approche d'intégration serait en partie portée par le projet de thèse que nous souhaitons proposer avec l'ULCO/LISIC dès 2017.

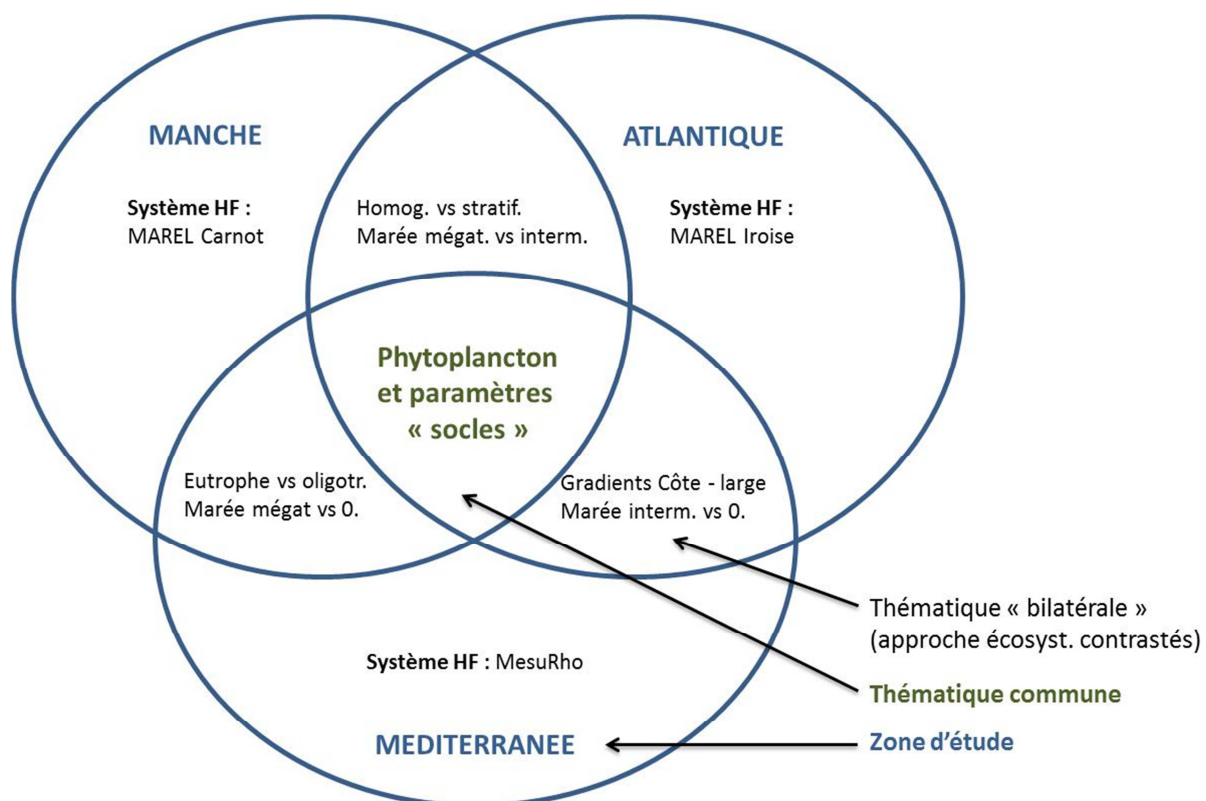


Figure 100. Proposition de zones d'études, de thématiques commune et bilatérale, identification de systèmes de mesures à Haute Fréquence pertinents pour le développement et la mise en œuvre de méthodes de traitements et de modélisation de données HF et pour l'étude à différentes échelles de temps des réponses du phytoplancton aux pressions anthropiques dans des écosystèmes contrastés.

Grâce aux travaux engagés pour une approche écosystémique à l'échelle de la Manche et de la baie sud de la mer du Nord avec notamment, les campagnes pluridisciplinaires de type IBTS et CGFS, il est envisageable à plus long terme, de développer une recherche dédiée à la prise en compte des conséquences des cascades trophiques multi-échelles telles que présentées par Casini *et al.* (2008). Les études des cascades trophiques de plus de trois niveaux sont en effet plutôt rares, alors que la prise en compte des forçages hydrologiques, des régulations bottom-up et top-down peuvent contribuer à mieux comprendre la résilience des réseaux trophiques aux effets combinés des modulations de la ressource nutritive et de la prédation. Par ailleurs, l'intégration en routine de l'échantillonnage du phytoplancton lors des campagnes IBTS mises en œuvre par le Royaume-Uni depuis 2010 (Ford *et al.*, 2016) a permis de mettre en avant les forces et les faiblesses du modèle hydrodynamique / biogéochimique ERSEM en vue de son utilisation optimale comme support aux besoins de la DCSMM et, plus généralement, comme support aux prises de décisions pour une utilisation durable et une protection de l'environnement marin. Cette approche mériterait d'être appliquée au modèle EcoMARS-3D, pressenti comme un pilier pour répondre aux besoins français d'information dans les eaux du large pour plusieurs descripteurs de la DCSMM.

Il est évident que nos projets s'inscrivent dans le cadre plus large des besoins d'amélioration des connaissances nécessaires pour la mise en œuvre de la DCSMM. Je suis en effet impliqué depuis 2010 dans les travaux liés à cette directive (définition du Bon État Écologique, propositions scientifiques et techniques pour le Programme de

Surveillance, révision de la Décision 2010/477/EU) via le rôle de chef de file et/ou d'expert pour le descripteur 5 - Eutrophisation. Le passage à la phase opérationnelle du programme de surveillance des Plans d'Actions du Milieu Marin de la DCSMM requiert la mise en place d'une organisation et l'attribution de rôles clairement identifiés et nouveaux aux différents acteurs de la surveillance du milieu marin. Dans ce contexte, je poursuivrai les actions entreprises en tant que pilote scientifique national pour le volet Eutrophisation et co-pilote pour le volet Habitat Pélagique (avec le CNRS). Je suis ainsi chargé i) de veiller au pilotage général des travaux scientifiques liés au thème : appui aux maîtres d'ouvrage des dispositifs contribuant au programme de surveillance, en lien avec les coordonnateurs de programme ; vérification de l'adéquation de la partie de programme de surveillance concernée aux besoins de l'évaluation du Bon État Écologique, développement de protocoles si nécessaire, propositions d'amendements aux protocoles, de modifications des réseaux (stratégies d'échantillonnage), etc., ii) d'assurer une veille scientifique sur les outils de surveillance en construction et sur les avancées dans les domaines de la recherche, participation aux réflexions qualités, et iii) d'animer la communauté scientifique pour toute question relative au thème concerné.

A ce jour, ma contribution future à la recherche afin de mieux observer, pour mieux comprendre et par conséquent, pour mieux prévoir et gérer l'eutrophisation et les modifications des habitats pélagiques concernera les points ci-dessous. Cette contribution se fera soit par la promotion, la coordination d'actions, pour lesquelles je n'ai pas toutes les compétences, soit par la mise en œuvre d'actions que je pourrai mener à bien personnellement en lien avec mon réseau de collaborateurs.

- Améliorer l'estimation des flux de nutriments d'origine terrestre et atmosphérique, en tenant compte des processus biogéochimiques et biologiques mis en jeux le long du continuum bassin versant - zone de transition - zone côtière ;
- Déterminer l'enrichissement naturel d'origine en nutriments par comparaison des sources d'origine anthropique pour définir un état non impacté et pouvoir faire la distinction entre un état naturellement productif et un état d'eutrophisation culturelle pour l'identification de ce qui peut ou non être géré ;
- Déterminer la contribution des apports transfrontaliers et transnationaux et/ou des échanges de nutriments par rapport aux sources terrestre et atmosphérique et comment gérer ces apports ;
- Étude des relations entre concentrations en nutriments, en chlorophylle, abondance et composition du phytoplancton et de la robustesse de leur utilisation combinée dans le cadre de l'évaluation de l'eutrophisation ;
- Étude de la régulation par les nutriments et de la stœchiométrie de la production de biomasse du phytoplancton en tenant compte des phénomènes de sélection d'espèces et de groupes fonctionnels et de structuration de la communauté algale ;
- Identification et compréhension du lien entre les efflorescences d'algues nuisibles et de l'expression des toxicités, et les apports de nutriments et/ou de carbone et leurs conséquences sur le réseau trophique ;
- Identification du rôle des mécanismes ou biologiques dans la formation des HABs et de l'expression des toxicités et des possibilités de gestion de ces mécanismes ;
- Étude de la relation entre enrichissement en nutriments et changement dans la structure et le fonctionnement de la chaîne trophique planctonique ;
- Étude des effets du contrôle top-down (exemples : filtration par les coquillages, grazing par le zooplancton) et des autres interactions au sein du réseau trophique

(infections virales, parasitisme, rôle de la mixotrophie, etc.) dans la régulation de la biomasse algale et sur la transmission, l'amplification des effets ;

- Déterminer comment différencier les impacts liés au changement climatique de ceux liés aux activités humaines et comment les gérer au mieux ;
- Développement des outils de la surveillance et de l'observation permettant de tenir compte des échelles spatiales et temporelles mises en jeu lors du développement du phytoplancton ;
- Détermination des capacités d'hystérésis et de résilience des écosystèmes marins afin de définir le point de non-retour au-delà duquel le système évoluera inévitablement vers un autre état et pour lequel un retour à l'état initial sera difficile voire impossible.

L'ensemble de ces travaux ouvrira incontestablement de nouvelles voies en ce qui concerne l'étude des relations entre les conditions environnementales et le plancton, le développement et la mise en œuvre de systèmes de mesures *in situ* à haute résolution et contribuera également à développer une approche plus intégratrice du fonctionnement de l'écosystème.

2.7. Références

- Admiraal W., Venekamp L.A.H., 1986. Significance of tintinnid grazing during blooms of *Phaeocystis pouchetii* (Haptophyceae) in Dutch coastal waters. *Journal of Sea Research*, 20,1, 61-66.
- Alvain, S., Moulin C., Dandonneau Y., Bréon F. M., 2005. Remote sensing of phytoplankton groups in case 1 waters from global SeaWiFS imagery. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 52, 11, 1989-2004.
- Alvain, S., Moulin C., Dandonneau Y., Loisel H., 2008. Seasonal distribution and succession of dominant phytoplankton groups in the global ocean: A satellite view. *Global Biogeochemical Cycles* 22: GB3001.
- Alvarez-Fernandez S., Lindeboom H., Meesters E., 2012. Temporal changes in plankton of the North Sea: community shifts and environmental drivers. *Marine Ecology Progress Series*, 462, 21-38.
- Alvarez-Fernandez S., Riegman R., 2014. Chlorophyll in North Sea coastal and offshore waters does not reflect long term trends of phytoplankton biomass. *Journal of Sea Research*, 91, 35-44.
- Aminot A., Guillaud J.F., Andrieux-Loyer F., Kerouel R., Cann P., 1998. Apports de nutriments et développement phytoplanctonique en baie de Seine. *Oceanologica Acta*, 21, 6, 923-935.
- Amouroux I., 2008a. Document de prescription. Cahier de procédures et de programmation REMI. Rapport Interne Ifremer, révision J du 15 avril 2008, 58 p.
- Amouroux I., 2008b. Bilan national REMI 2007. Rapport interne Ifremer, RST-DOP/DCN/08.01/EMP, 72 p.
- Anonyme, 1988. Courants de marée dans la Manche et sur les côtes françaises de l'Atlantique. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, Paris, 287 p.
- Bätje M., Michaelis H., 1986. *Phaeocystis pouchetii* blooms in the East Frisian coastal waters (German Bight, North Sea). *Marine Biology*, 93,1, 21-27.
- Becquevort S., Rousseau V., Lancelot C., 1998. Major and comparable roles for free-living and attached bacteria in the degradation of *Phaeocystis*-derived organic matter in Belgian coastal waters of the North Sea. *Aquatic Microbial Ecology*, 14,1, 39-48.

- Belgrano A., Vincx M., Dewarumez J. M., Richard A., Craeymeersch J., Heip C., 1990. Recruitment of meroplanktonic larvae in the Southern Bight of the North Sea. *Oceanis*, 16, 3, 225-243.
- Benaglia T., Chauveau D., Hunter D. R., Young D., 2009. mixtools: An R Package for Analyzing Finite Mixture Models. *Journal of Statistical Software*, 32, 6, 1-29.
- Bentley D., Lafite R., Morley N.H., James R., Statham P.J., Guary J.C., 1993. Flux de nutriments entre la Manche et la Mer du Nord. Situation actuelle et évolution depuis 10 ans. *Oceanologica Acta*, 16, 599-606.
- Beutler M., Wilthshire K.H., Meyer B., Moldenke C., Lürig C., Meyerhöfer M., Hansen M., Dau H., 2002. A fluorimetric method for the differentiation of algal populations *in vivo* and *in situ*. *Photosynthesis Research*, 72, 39-53.
- Billen G., Garnier J., Hanset P., 1994. Modelling phytoplankton development in whole drainage networks: The RIVERSTRAHLER model applied to the Seine river system. *Hydrobiologia*, 289, 119-137.
- Billen G., Garnier J., Rousseau V., 2005. Nutrient fluxes and water quality in the drainage network of the Scheldt basin over the last 50 years. *Hydrobiologia*, 540, 47-67.
- Borcard D., Gillet F., Legendre P., 2011. Numerical ecology with R. Éditeur Springer, pages 306.
- Breton E., Brunet C., Sautour B., Brylinski J.M., 2000. Annual variations of phytoplankton biomass in the eastern English Channel: comparison by pigment signatures and microscopic counts. *Journal of Plankton Research*, 22, 8, 1423-1440.
- Brunet C., Brylinski J.M., Bodineau L., Thoumelin G., Bentley D., Hilde D., 1996. Phytoplankton dynamics during the spring bloom in the south-eastern English Channel. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 43, 469-483.
- Brylinski J.-M., Lagadeuc Y., 1990. L'interface eaux côtières/eaux du large dans le Pas-de-Calais (côte française) : une zone frontale. C.R. Académie des Sciences Paris, t. 311, Série II, p. 535-540.
- Brylinski J.M., Lagadeuc Y., Gentilhomme V., Dupont J.P., Lafite R., Dupeuple P.A., Huault M.F., Auger Y., Puskaric E., Wartel M. & L. Cabioch, 1991. Le fleuve côtier : un phénomène hydrologique important en Manche Orientale. Exemple du Pas-de-Calais. *Oceanologica Acta*, 11, 197-203.
- Brzezinski M.A., 1985. The Si:C:N ratio of marine diatoms: interspecific variability and the effect of some environmental variables. *Journal of Phycology*, 21, 347-357.
- Buchanan J.Y., 1910. Colour of the sea. *Nature*, 84, 87.
- Cadée G.C., 1986. Increased phytoplankton primary production in the Marsdiep area (western Dutch Wadden Sea, Netherland). *Journal of Sea Research*, 20, 2/3, 285-290.
- Cadée G.C. & Hegeman J., 1986. Seasonal and annual variation in *Phaeocystis pouchetii* (Haptophyceae) in the westernmost inlet of the Wadden Sea during the 1973 to 1985 period. *Journal of Sea Research*, 20, 1, 29-36.
- Cadée G.C., Hegeman J., 1991. Historical phytoplankton data in the Marsdiep. *Hydrobiological Bulletin*, 24, 2, 111-188.
- Caillault E., Viard-Gaudin C., Lallican P.M., 2005. Training of hybrid ANN/HMM systems for on-line handwriting word recognition. In Proceedings of 12th Conference of International Graphonomics Society (IGS 2005), pages 10.
- Carpentier P., 1999. Caractérisation de structures spatiales et temporelles en écologie. Application aux séries physico-chimiques de qualité des eaux du Réseau National de Bassin en Artois-Picardie et aux peuplements benthiques du site de Gravelines et de la Manche Orientale. Thèse de Doctorat, USTL, 213 pp.

- Casini M., Lövgren J., Hjelm J., Cardinale M., Molinero J.C., Kornilovs G., 2008. Multi-level trophic cascades in a heavily exploited open marine ecosystem. *Proceedings of the Royal Society B*, 275, 1793-1801.
- Cebrian J., Valiela I., 1999. Seasonal patterns in phytoplankton biomass in coastal ecosystems. *Journal of Plankton Research*, 21, 3, 429-444.
- Chaussepied M., Arnal O., Grosseil H., Deladre J.M., Wartel M., 1989. Le littoral de la Région Nord - Pas de Calais, apports à la mer. *Rapports scientifiques et techniques de l'Ifremer*, 15, 151 pp.
- Chavez F.P., Messié M., Pennington J.T., 2011. Marine primary production in relation to climate variability and change. *Annual Review of Marine Science*, 3, 227-260.
- Claussen U., Zevenboom W., Brockmann, Topcu D., Bot P., 2009. Assessment of the eutrophication status of transitional coastal and marine waters within OSPAR. *Hydrobiologia*, 629, 49-58.
- Cloern, J.E., 1996. Phytoplankton bloom dynamics in coastal ecosystems: A review with some general lessons from sustained investigation of San Francisco bay, California. *Geophysics*, 34, 2, 127-168.
- Cloern, J.E., Jassby A.D., 2008. Complex seasonal patterns of primary producers at the land-sea interface. *Ecology Letters*, 11: 1294-1303.
- Cottingham K.L., Carpenter S.R., 1998. Population, community and ecosystem variates as ecological indicators: phytoplankton responses to whole-lake enrichment. *Ecological Applications*, 8, 508-530.
- Crise A., Kaberi H., Ruiz J., Zatsopin A., Arashkevich E., Giani M., *et al.*, 2015. A MSFD complementary approach for the assessment of pressures, knowledge and gaps in southern European seas: the PERSEUS experience. *Marine Pollution Bulletin*, 95, 28-39.
- Daniel A., 2004. Réseau Hydrologique Littoral Normand : Cycles annuels 2001-2003 et proposition d'indicateurs d'eutrophisation. *Rapport Ifremer RST.DEL/04.09/PB*, 103 pages.
- Daro M-H., Breton E., Antajan E., Gasparini S., Rousseau V., 2008. Do *Phaeocystis* colony blooms affect zooplankton in the Belgian Coastal Zone? III Current Status of Eutrophication in the Belgian Coastal Zone, pp. 61-72. Ed. by V. Rousseau, C. Lancelot, and D. Cox. University of Brussels Press, Belgium. 122 pp.
- Davidson A., Hinkley D.V., 1997. *Bootstrap Methods and Their Application*. Cambridge University Press, 594 pages.
- Davidson K., Gowen R.J., Tett P., Bresnan E., Harrison P.J., McKinney A., Milligan S., Mills D.K., Silke J., Crooks A.M., 2012. Harmful algal blooms: how strong is the evidence that nutrient ratios and forms influence their occurrence? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 115, 399-413.
- DCE - Directive Cadre sur l'Eau - Parlement Européen, Conseil de l'Union européenne (2000). Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. *Journal Officiel de l'Union Européenne*.
- DCSMM - Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin - Parlement Européen, Conseil de l'Union européenne (2008). Directive 2008/56/CE du Parlement européen et du Conseil du 17 juin 2008 établissant un cadre d'action communautaire dans le domaine de la politique pour le milieu marin (directive-cadre «stratégie pour le milieu marin»). *Journal Officiel de l'Union Européenne*.

- De Jonge V.N., Elliott M., 2001. Eutrophication. In: J Steele, S Thorpe and K Turekian (Eds.) Encyclopedia of Ocean Sciences. Volume 2, Academic Press, London. p852-870.
- De Leeuw G., Spokes L., Jickells T., Skjoth C.A., Hertel O., Vignati E., Tamm S., Schulz M., Sorensen L.-L., Pedersen B., Klein L., Schlünzen K. H., 2003. Atmospheric nitrogen inputs into the North Sea: effect on productivity. *Continental Shelf Research*, 23, 1743-1755.
- Del Amo Y., Le Pape O., Tréguer P., Quéguiner B., Ménesguen A. & A. Aminot, 1997. Impacts of high-nitrate inputs on macrotidal ecosystems. I. Seasonal evolution of nutrient limitation for the diatom-dominated phytoplankton of the Bay of Brest (France). *Marine Ecology Progress Series*, 161, 213-224.
- Debyeche M., Haton J., Houacine A., 2007. Improved Vector Quantization Approach for Discrete HMM Speech Recognition System. In *The International Arab Journal of Information Technology*, 4, 4, 338-344.
- Delesmont R., Delesmont E., 1993. Étude des apports en azote et phosphore au littoral français de la mer du Nord. Rapport de l'Institut Pasteur de Lille, Service Eaux - Environnement, 77 pp.
- Devlin M., Best M., Coates D., Bresnan E., O'Boyle S., Park R., Silke J., Cusack C., Skeats J., 2007. Establishing boundary classes for the classification of UK marine waters using phytoplankton community. *Marine Pollution Bulletin*, 55, 91-103.
- Dickey J.M., 2003. Emerging ocean observations for interdisciplinary data assimilation systems. *Journal of Marine Systems* 40-41, 5-48.
- Djambazov G., Pericleous K., 2015. Modelled atmospheric contribution to nitrogen eutrophication in the English Channel and the southern Nord Sea. *Atmospheric Environment*, 102, 191-199.
- Duarte C.M., Conley D.J., Carstensen J. & Sanchez-Camacho M., 2009. Return to Neverland: shifting baselines affect eutrophication restoration targets. *Estuaries and Coasts*, 32, 29-36.
- Dupont J.P., Lafite R., Huault M.F., Lamboy M., Brylinski J.M., Guéguéniat P., 1991. La dynamique des masses d'eau et matière en suspension en Manche orientale. *Oceanologica Acta*, 11, 177-186.
- Eberlein K., Leal M.T., Hammer K.D., Hickel W., 1985. Dissolved organic substances during a *Phaeocystis pouchetii* bloom in the German Bight (North Sea). *Marine Biology*, 89, 311-316.
- Edwards M., Reid P., Planque B., 2001. Long-term and regional variability of phytoplankton biomass in the Northeast Atlantic (1960-1995). *ICES Journal of Marine Science*, 58, 39-49.
- Edwards M., Richardson A. J., 2004. Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature*, 430, 881-884.
- Elliott M., De Jonge V.N., 2002. The management of nutrients and potential eutrophication in estuaries and other restricted water bodies. *Hydrobiologia*, 475/476, 513-524.
- Elser J.J., Bracken M.E.S., Cleland E.E., Daniel S., Gruner W., Harpole S., Hillebrand H., Ngai J.T., Seabloom E.W., Shurin E.W., Smith J.B., 2007. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecological Letters*, 10, 1135-1142.
- Escaravage V., Prins T.C., Nijdam C., Smaal A.C., Peeters J.C.H., 1999. Response of phytoplankton communities to nitrogen input reduction in mesocosm experiments. *Marine Ecology Progress Series*, 179, 187-199.

- Fehling J., Davidson K., Bolch C.J., Bates S.S., 2004. Growth and domoic acid production by *Pseudo-nitzschia seriata* (Bacillariophyceae) under phosphate and silicate limitation. *Journal of Phycology*, 40, 674-683.
- Ferreira J.G., Andersen J.H., Borja A., Bricker S.B., Camp J., Da Silva M.C., Garcés E., Heiskanen A.-S., Humborg C., Ignatiades L., Lancelot C., Menesguen A., Tett P., Hoepffner N., Claussen U., 2011. Overview of eutrophication indicators to assess environmental status within the European Marine Strategy Framework Directive. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93, 117-131.
- Ford D.A., van der Molen J., Hyder K., Bacon J., Barciela R., Creach V., McEwan R., Ruardij P., Forster R., 2016. Observing and modeling phytoplankton community structure in the North Sea: can ERSEM-type models stimulate biodiversity? *Biogeosciences discussions*, manuscript under review for journal *Biogeosciences*.
- Fuiman L., Batty R., 1997. What a drag it is getting cold : partitioning the physical and physiological effects of temperature on fish swimming. *Journal of Experimental Biology*, 200, 1745-1755.
- Gailhard I., Gros P., Durbec J. P., Beliaeff B., Belin C., Nézan E., Lassus P., 2002. Variability patterns of microphytoplankton communities along the French coasts. *Marine Ecology Progress Series*, 242, 39-50.
- Garmendia M., Borja A., Franco J., Revilla M., 2013. Phytoplankton composition indicators for the assessment of eutrophication in marine waters: Present state and challenges within the European directives. *Marine Pollution Bulletin*, 66,7-16.
- Gentilhomme V., Lizon F., 1998. Seasonal cycle of nitrogen and phytoplankton biomass in a well-mixed coastal system (Eastern English Channel). *Hydrobiologia*, 361, 191-199.
- Goberville E., Beaugrand G., Sautour B., Tréguer P., 2011a. Early evaluation of coastal nutrient over-enrichment: New procedures and indicators. *Marine Pollution Bulletin*, 62, 1751-1761.
- Goberville E., Beaugrand G., Sautour B., Tréguer P., 2011b. Evaluation of coastal perturbations: a new mathematical procedure to detect changes in the reference state of coastal systems. *Ecological Indicators*, 11, 1290-1300.
- Gohin F., Druon J. N., Lampert L., 2002. A five channel chlorophyll algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters. *International Journal of remote Sensing*, 23, 1639-1661.
- Gomez F., Souissi S., 2007. Unusual diatoms linked to climatic events in the northeastern English Channel. *Journal of Sea Research*, 58, 283-290.
- Gomez F., Souissi S., 2008. The impact of the 2003 summer heat wave and the 2005 late cold wave on the phytoplankton in the north-eastern English Channel. *C.R. Biologies*, 331, 678-685.
- Gorsky G., Ohman M.D., Picheral M., Gasparini S., Stemmann L., Romagnan J.-B., Cawood A., Pesant S., Garcia-Comas C., Prejger F., 2010. Digital zooplankton image analysis using the ZooScan integrated system. *Journal of Plankton Research*, 32, 3, 285-303.
- Gowen R.J., Tett P., Bresnan E. Davidson K., McKinney A., Milligan S., Mills D.K., Silke J., Harrison P., Crooks A.M., 2012. Anthropogenic nutrient enrichment and blooms of harmful micro-algae. *Oceanography and Marine Biology: An annual review*, 50, 65-126.
- Graneli E., Flynn K.J., 2006. Chemical and physical factors influencing toxin content. *In: Graneli E., Turner T.T. (Eds), Ecology of Harmful Algae*. Springer, Berlin, pp. 229-241.

- Grattepanche J.D., Breton E., Brylinski J.M., Lecuyer E., Christaki U., 2010. Succession of primary producers and micrograzers in a coastal ecosystem dominated by *Phaeocystis globosa* blooms. *Journal of Plankton Research*, 33, 1, 37-50
- Grosjean, Ph., M. Pickerel, C. Warembourg & G. Gorsky, 2004. Enumeration, measurement, and identification of net zooplankton samples using the ZOOSCAN digital imaging system. *ICES Journal of Marine Sciences*, 61, 4, 518-525.
- Grosjean, PH. & K. Denis, 2013. Supervised classification of images, applied to plankton samples using R and Zooimage. In: Zhao, Y. & Y. Cen (Eds). *Data mining applications with R*. Academic Press, Elsevier ISBN: 978-0-12-411511-8. pp 331-365.
- Grosjean P., Wacquet G., 2016. Optimisation de l'identification et du dénombrement du microphytoplancton avec le système couple de numérisation et d'analyse d'images FlowCam - ZooPhytoImage (système innovant). Rapport final du projet ONEMA 2013-2015 - Action 9, livrable 1, 118 pages.
- Guerzoni S., Chester R., Dulac F., Moulin C., Herut B., Loÿe-Pilot M.D., Measures C., Migon C., Molinaroli E., Rossini P., Saydam C., Soudine A., Ziveri P., 1999. The role of atmospheric deposition in the biogeochemistry of the Mediterranean Sea. *Progress in Oceanography*, 44, 147-190.
- Harding L., 1994. Long term trends in the distribution of phytoplankton in the Chesapeake Bay: roles of light, nutrients and streamflow. *Marine Ecology Progress Series*, 104, 167-291.
- Hartigan J. A., Wong M. A., 1979. Algorithm AS 136: A k-means clustering algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 28, 1, 100-108.
- Heisler J., Glibert P.M., Burholder J.M., Anderson D.M., Cochlan W., Dennison W.C., Dortch Q., Gobler C.J., Heil C.A., Humphries E., Lewitus A., Magnien R., Marshall H.G., Sellner K., Stockwell D.A., Stoecker D.K., Suddleson M., 2008. Eutrophication and harmful algal blooms: a scientific consensus. *Harmful Algae*, 8, 3-13.
- Hernández-Farinas .T., Bacher C., Soudant D., Belin C., Barillé L., 2015. Assessing phytoplankton realized niches using a french national phytoplankton monitoring network. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 159, 15-227.
- Hill M.O., Bunce R.G.H., Shaw M.W., 1975. Indicator species analysis, a divisive polythetic method of classification and its application to a survey of native pinewoods in Scotland. *Journal of Ecology*, 63, 597-613.
- Houliet E., Lizon F., Thyssen M., Artigas L.F., Schmitt F., 2012. Spectral fluorometric characterization of Haptophyte dynamics using the FluoroProbe: an application in the eastern English Channel for monitoring *Phaeocystis globosa*. *Journal of Plankton Research*, 34, 2, 136-151.
- Hughes L., 2000. Biological consequences of global warming: is the signal already? *Trends in Ecology and Evolution*, 15, 56-61.
- Hurrell J.W., 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, 269, 241-258.
- Hutchinson G.E., 1957. Concluding remarks. *Cold Spring Harb. Symp. Quantitative Biology*, 22, 415-427.
- Ibanez F., Fromentin J.M., Castel J., 1993. Application de la méthode des sommes cumulées à l'analyse des séries chronologiques en océanographie. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences Paris*, 316, 745-748.
- ICES, 2008. Report of the Working Group for Regional Ecosystem Description (WGRED). 25-29 February 2008, ICES Copenhagen, Denmark, ICES CM2008/ACOM: 47, 203 pp.

- Irigoiien X., R.P. Harris, R.N. Head, Harbour D., 2000. North Atlantic Oscillation and spring bloom phytoplankton composition in the English Channel. *Journal of Plankton Research*, 22, 12, 2367-2371.
- Jenkinson I.R., 1993. Viscosity and elasticity of *Gyrodinium* cf. *aureolum* and *Noctiluca scintillans* exudates in relation to mortality of fish and damping of turbulence. *In*: Smayda T.J. and Shimizu Y. (Eds). *Toxic phytoplankton blooms in the sea*. Elsevier, Amsterdam, pp. 757-762.
- Jeppersen E., Kronvang B., Olesen J.E., Audet J., Sondergaard M., Hoffman C.C., Andersen H.E., Lauridsen T., Bjerring R., Conde-Porcuna JM. *et al.*, 2011. Climate change effects on nitrogen loading from cultivated catchments in Europe: implications for nitrogen retention, ecological state of lakes and adaptation. *Hydrobiologia*, 663, 1-21.
- Joint I., Pomoroy A., 1993. Phytoplankton biomass and production in the southern North Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 99, 169-182.
- Jutterstöm S., Andersson H.C., Omstedt H.C., Malmaeus J.M., 2014. Multiple stressors threatening the future of the Baltic Sea - Kattegat marine ecosystem: Implications for policy and management actions. *Marine Pollution Bulletin*, 86, 468-480.
- Keog E., Lin J., 2005. Clustering of time series subsequences is meaningless: implications for previous and future research. *Knowledge and Information Systems*, 8, 2, 154-177.
- Kerr R.A., 2000. A North Atlantic climate pacemaker for the centuries. *Science*, 288, 1984-1985.
- Kitsiou D., Karydis M., 2011. Coastal marine Eutrophication assessment: a review on data analysis. *Environment International*, 37, 778-801.
- Ko A.H., Sabourin R., de Souza Britto Jr A., 2008. A New HMM training and testing scheme. *In* Pattern Recognition, ICPR 2008, page 4.
- Kromkamp J.C., Van Egeland T., 2010. Changes in phytoplankton biomass in the western Scheldt estuary during the period 1978-2006. *Estuaries and Coasts*, 33, 270-285.
- Laanne R.W.P.M., Groeneveld G., De Vries A., van Bennekom J., Sydow S., 1993. Nutrient (N, P, Si) in the Channel and the Dover Strait: seasonal and year-to-year variation and fluxes to the North Sea. *Oceanologica Acta*, 16, 607-616.
- Lacroix G., Ruddick K., Ozer J., Lancelot C., 2004. Modelling the impact of the Scheldt and Rhine/Meuse plumes on the salinity distribution in Belgian waters (southern North Sea). *Journal of Sea Research*, 52, 149-163.
- Lamy D., Obernosterer I., Laghdass M., Artigas L.F., Breton E., Grattepanche J.D., Lecuyer E. *et al.*, 2009. Temporal evolution of major bacterial groups and bacterial heterotrophic activity during a *Phaeocystis globosa* bloom in the eastern English Channel. *Aquatic Microbial Ecology*, 58, 95-107.
- Lancelot C., S. Mathot, 1987. Dynamics of a *Phaeocystis*-dominated spring bloom in Belgian coastal waters. 1. Phytoplankton activities and related parameters. *Marine Ecology Progress Serie*, 37, 2-3, 239-248.
- Lancelot C., Billen G., Sournia A., Weisse T., Colijn F., Veldhuis M., Davies A., Wassmann P., 1987. *Phaeocystis* blooms and nutrient enrichment in the continental coastal zone of the North Sea. *Ambio*, 16, 38-46.
- Lancelot C., Rousseau V., 1994. Ecology of *Phaeocystis* : the key role of colony forms The Haptophyte Algae. Green J.C., Leadbeater B.S.C. (Eds), Clarendon Press, Oxford. The Systematics Association, Special volume N°. 51, pp. 229-245.

- Lancelot C., Spitz Y., Gypens N., Ruddick K., Becquevort S., Rousseau V., Lacroix G., Billen G., 2005. Modelling diatom and *Phaeocystis* blooms and nutrient cycles in the Southern Bight of the North Sea: the MIRO model. *Marine Ecology Progress Series*, 289, 63-78.
- Lancelot C., Gypens N., Billen G., Garnier J., Roubeix V., 2006. Testing an integrated river-ocean mathematical tool for linking marine eutrophication to land use: The *Phaeocystis*-dominated Belgian coastal zone (Southern North Sea) over the past 50 years. *Journal of Marine System*, n° 64, p. 216-228.
- Lancelot C., Rousseau V., Gypens N., 2009. Ecologically based indicators for *Phaeocystis* disturbance in eutrophied Belgian coastal waters (Southern North Sea) based on field observations and ecological modelling. *Journal of Sea Research*, 61, 1-2, 44-49.
- Lenhart H., Desmit X., Große F., Mills D., Lacroix G., Los H., Ménesguen A., Pätsch J., Troost T., van der Molen J., van Leeuwen S., Wakelin S., 2012. Report on “distance to target” modelling assessment by ICG-EMO. Ospar Commission, 89 pages.
- Leterme S. C., Edwards M., Seuront L., Attrill M. J., Reid P. C., John A.W.G., 2005. Decadal basin-scale changes in diatoms, dinoflagellates, and phytoplankton color across the North Atlantic. *Limnology and Oceanography*, 50, 1244-1253.
- Litchman E., Klausmeier C.A., 2008. Trait-based community ecology of phytoplankton. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 39, 615-639.
- Litchman E., de Tezanos Pinto P., Klausmeier C.A., Thomas M.K., Yoshiyama K., 2010. Linking traits to species diversity and community structure in phytoplankton dynamics. *Hydrobiologia*, 653, 15-28.
- Loyez S., Lampert L., Ménesguen A., Cann P., Labasque T., 2006. Seasonal evolution of the nutrient pattern on Biscay Bay continental shelf over the years 1999-2000. *Scientia Marina*, 70, 1, 31-46.
- Maillard-Quisthoudt C., 1988. Environnement physique et chimique, productivité primaire phytoplantonique et bactérienne dans le détroit du Pas-de-Calais. Thèse de Doct. État, Univ. Lille I, 207 pp.
- Margalef R., 1978. Life forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. *Oceanologica Acta*, 493-509.
- Ménesguen A., Hoch T., 1997. Modelling the biogeochemical cycles of elements limiting primary production in the English Channel. I. Role of thermohaline stratification. *Marine Ecology Progress Series*, 146, 173-188.
- Ménesguen A., Cugier P., Leblond I., 2006. A new numerical technique for tracking chemical species in a multi-source, coastal ecosystem, applied to nitrogen causing *Ulva* blooms in the Bay of Brest (France). *Limnology and Oceanography*, 51, 1, 591-601.
- Mieruch S., Freund J.A., Feudel U., Boersma M., Janisch S., Wiltshire K.W., 2010. A new method of describing phytoplankton blooms: Examples from Helgoland Roads. *Journal of Marine Systems*, 79, 36-43.
- Ng A. Y., Jordan M. I., Weiss Y., 2002. On spectral clustering: Analysis and an algorithm. *Advances in neural information processing systems*, 2, 849-856.
- Nixon S.W., 1995. Coastal marine eutrophication: a definition, social causes and future concerns. *Ophelia*, 41, 199-219.
- OSPAR, 2002. Common assessment criteria, their (region specific) assessment levels and guidance on their use in the area classification within the comprehensive procedure of the common procedure. OSPAR 02/8/2-E.

- OSPAR, 2003. OSPAR integrated report 2003 on the Eutrophication status of the OSPAR maritime area based upon the first application of the Comprehensive Procedure. OSPAR Eutrophication Series, publication 189/2003. OSPAR Commission, London.
- OSPAR, 2005. Common Procedure for the identification of the Eutrophication status of the OSPAR maritime area. Agreement 2005-3. OSPAR Commission, London, p. 36.
- OSPAR, 2007. Atmospheric nitrogen in the OSPAR convention area in 1990-2004. ISBN 978-1-905859-83-2, 56 pages.
- OSPAR, 2008a. Nutrients in the convention area. Assessment of implementation of PARCOM recommendations 88/2 and 89/4. OSPAR Commission, London.
- OSPAR, 2008b. Towards the 50% reduction target for nutrients. Assessment of implementation of PARCOM recommendations 88/2 and 89/4. OSPAR Commission, London.
- OSPAR, 2009. Eutrophication status of the OSPAR maritime area. Second OSPAR Integrated Report. The OSPAR Commission. Eutrophication Series. London.
- OSPAR, 2010. Quality Status Report 2010. OSPAR Commission, London, pp. 27-36.
- Paerl H.W., Boynton W.R., Dennis R.L., Driscoll C.T., Greening H.S., Kremer J.N., Rabalais N.N., Seitzinger S.P., 2000. Atmospheric deposition of nitrogen in coastal waters: biogeochemical and ecological implications. In: Valigura R.A. (Ed.). Nitrogen loading in coastal water bodies: an atmospheric perspective. Coastal and Estuarine Studies, vol. 57 AGU Press, Washington D.C., pp. 11-52.
- Peperzak L., Colijn F., Gieskes W.W.C., Peeters J.C.H., 1998. Development of the diatom *Phaeocystis* spring bloom in the Dutch coastal zone of the North Sea: the silicon depletion versus the daily irradiance threshold hypothesis. Journal of Plankton Research, 20, 3, 517-537.
- Pingree R. D., Pennicuik L., Battin G.A.W., 1975. A time varying temperature model of mixing in the English Channel. Journal of the Marine Biological Association U. K., 55, 4, 975-992.
- Pingree R.D., Maddock L., 1977. Tide residuals in the English Channel. Journal of the Marine Biological Association U. K., 57, 339-354.
- Pingree R. D., Griffith D.K., 1980. Current driven by a steady uniform wind stress on the shelf seas around the British Isles. Oceanologica Acta, 3, 227-236.
- Pourriot P., Meybeck M., 1995. Limnologie générale. Masson, Paris : 956 pp.
- Prandle D., 1978. Monthly-mean residual flows through the Dover Strait, 1949-1972. Journal of the Marine Biological Association U. K., 58, 965 - 973.
- Prins T.C., Desmit X., Baretta-Bekker J.G., 2012. Phytoplankton composition in Dutch coastal waters responds to changes in riverine nutrient loads. Journal of Sea Research, 73, 49-62.
- Prygiel J., Caby B., Carpentier P., Leprêtre A., 2000. Évaluation des flux en nutriments, matières en suspension et matières organiques, au littoral de la Manche et du bassin Artois-Picardie pour la période 1980-2000. Actes du Colloque "Qualité des eaux du littoral régional : Objectifs atteints ?", Wimille 7 décembre 2000, 47-56.
- Quéguiner B., 2016. Le cycle biogéochimique du silicium dans l'océan. Collection système terre - environnement, ISTE éditions, 145 pages.
- R Development Core Team, 2012. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://CRAN.R-project.org/>.
- Rabiner L., 1989. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. In Proceedings of the IEEE, pages 257-286.

- Racault M. F., Le Quéré C., Buitenhuis E., Sathyendranath S., Platt T., 2013. Phytoplankton phenology in the global ocean. *Ecological Indicators*, 14, 1, 152-163.
- Redfield A.C., Ketchum B.H., Richards F.A., 1963. The influence of organisms on the composition of sea-water. In : *The Sea. Ideas and observations on progress in the study of the seas. Volume 2. The composition of sea-water. Comparative and descriptive oceanography.* General editor : M.N. Hill. Interscience publishers, a division of Wiley J. & Sons (Eds), New-York, London, p. 26-77.
- Reid P.C., Borges M.D., Svendsen E., 2001. A regime shift in the North Sea circa 1988 linked to changes in the North Sea horse mackerel fishery. *Fisheries Resources*, 50, 163-171.
- Reynolds C.S., 1988. Functional morphology and the adaptative strategies of freshwater phytoplankton. In: Sandgren C.D. (Ed.), *Growth and survival strategies of freshwater phytoplankton.* Cambridge University Press : pp. 388-433.
- Reynolds C.S., Huszar V., Kruk C., Naselli-Flores L., Melo S. 2002. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 24, 417-428.
- Rousseau V., 2000. Dynamique des efflorescences de *Phaeocystis* et des diatomées dans les eaux côtières eutrophisées de la baie sud de la mer du Nord. Thèse de l'Université Libre de Bruxelles, 205 pages.
- Rousseau V., Vaultot D., Casotti R., Cariou V., Lenz J., Gunkel J. & M.E.M. Baumann, 1994. The life cycle of *Phaeocystis* (Prymnesiophyceae): Evidence and hypotheses. *Journal of Marine System*, 5,1, 23-39.
- Ruelland D., Billen G., Brunstein D., Garnier J., 2007. SENEQUE: A multi-scaling GIS interface to the Riverstrahler model of the biogeochemical functioning of river systems. *Science of the Total Environment*, 375, 1-3, 257-273.
- Ruser A., Popp P., Kolbowski J., Reckermann M., Feuerpfeil P., Egge B., Reineke C., Vanselow K.H., 1999. Comparison of chlorophyll-fluorescence based measuring systems for the detection of algal groups and the determination of chlorophyll-*a* concentrations. *Berichte Forsch.-u. technologiezent. Westküste d. Univ. Kiel*, 19, 27-38.
- Salomon J.C., Breton M., 1991. Courants résiduels de la marée de la Manche. *Oceanologica Acta*, 11, 47-53.
- Sazhin A. F., Artigas L. F., Nejstgaard J. C. and Frischer M. E., 2007. The Colonization of Two *Phaeocystis* Species (Prymnesiophyceae) by Pennate Diatoms and Other Protists: A Significant Contribution to Colony Biomass. *Biogeochemistry* Vol. 83, No. 1/3, *Phaeocystis*, Major Link in the Biogeochemical Cycling of Climate-Relevant Elements (Mar., 2007), pp. 137-145.
- Schapira M., Vincent D., Gentilhomme V., Seuront L., 2008. Temporal patterns of phytoplankton assemblages during the wane of a *Phaeocystis globosa* spring bloom in hydrologically contrasted waters. *Journal of the Marine Biological Association, UK*, 88, 4, 649-662.
- Shindler, M., Wong, A., Meyerson, A., 2011. Fast and accurate k-means for large datasets. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 17, 9.
- Schmitt F.G., Huang Y., 2014. Time dependent intrinsic correlation analysis of temperature and dissolved oxygen time series using empirical mode decomposition. *Journal of Marine Systems*, 130, 90-100.
- Schroeder F., Mizerkowski B., Petersen, W., 2008. The pocketFerryBox - A new portable device for water quality monitoring in oceans and rivers. *Journal of Operational Oceanography*, 1, 2, 51-57.

- Schwartz M.D. (ed.), 2003. Phenology: an integrative environmental science. Dordrecht, Kluwer, 592 p.
- Seuront L., Lagadeuc L., 1998. Spatio-temporal structure of tidally mixed coastal waters: variability and heterogeneity. *Journal of Plankton Research*, 20, 1387-1404.
- Seuront L., Schmitt F., Lagadeuc Y., Shertzer D., Lovejoy S., 1999. Multifractal analysis as a tool to characterize multiscale inhomogeneous patterns. Example of phytoplankton distribution in turbulent coastal waters. *Journal of Plankton Research*, 21, 877-922.
- Seuront L., Souissi S., 2002. Evidence for climatic control of *Phaeocystis sp.* Bloom in the eastern English Channel. *La Mer*, 40, 41-51.
- Seuront L., Gentilhomme V., Lagadeuc Y., 2002. Small-scale nutrient patches in tidally mixed coastal waters. *Marine Ecology Progress Series*, 232, 29-44.
- Seuront L., 2005. Hydrodynamical and tidal controls of smallscale phytoplankton patchiness. *Marine Ecology Progress Series*, 302, 93-101.
- Seuront L., Vincent D., Mitchell J.G., 2006. Biologically induced modification of seawater viscosity in the eastern English Channel during a *Phaeocystis globosa* spring bloom. *Journal of Marine Systems*, 31, 3-4, 118-133.
- Seuront L., Vincent D., 2008. Increased seawater viscosity, *Phaeocystis globosa* spring bloom and *Temora longicornis* feeding and swimming behaviours. *Marine Ecology Progress Series*, 363, 131-145.
- Smayda T.J., Reynolds C.S., 2001. Community assembly in marine phytoplankton: application of recent models to harmful dinoflagellates blooms. *Journal of Plankton Research*, 23, 447-461.
- Smetacek V., Cloern J.E., 2008. On phytoplankton trends. *Science*, 319: 1346-1348.
- Sournia A., Brylinski J.M., Dallot S., Le Corre P., Leveau M., Prieur L., Frojet C., 1990. Fronts hydrologiques au large des côtes françaises: les sites ateliers du programme Frontal. *Oceanologica Acta*, 11, 197-203.
- Spilmont N., Denis L., Artigas L.F., Calouin F., Courcot L., Créach A., Desroy N., Gevaert F., Hacquebart P., Hubas C., Janquin M.A., Lemoine Y., Luczak C., Migné A., Rauch M., Davoult D., 2009. Impact of the *Phaeocystis globosa* spring bloom on the intertidal benthic compartment in the eastern English Channel: a synthesis. *Marine Pollution Bulletin*, 58, 55-63.
- Tsirtsis G., Karydis M., 1998. Evaluation of phytoplankton community indices for detecting eutrophic trends in the marine environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 50, 3, 255-269.
- Van Beusekom, J.E.E, Diel-Christiansen, S., 2009. Global change and biogeochemistry of the North Sea: the possible role of phytoplankton and phytoplankton grazing. *International Journal of Earth Sciences*, 98, 269-280.
- Vaz S., Carpentier A., Coppin F., 2004. Eastern English Channel community from 1998 to 2003 and its relation to the environment. *ICES CM 2004/K*, 40, 18 pages.
- Verity P.G., Brussaard C.P.D., Nejtgaard J.C., Van Leeuwe M.A., Lancelot, C., Medlin L.K., 2007. Current understanding of *Phaeocystis* ecology and biogeochemistry, and perspectives for future research. *In: Van Leeuwe, M.A. et al. (Ed.) Phaeocystis, major link in the biogeochemical cycling of climate-relevant elements. Biogeochemistry*, 83, 1-3, 311-330
- Viterbi, A., 1967. Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm. *In IEEE Transactions on Information Theory*, 13, 2, 260-269.
- Von Herbing I.H., Keating K., 2003. Temperature-induced changes in viscosity and its effects on swimming speed in larval haddock. *In: The big fish bag. Presented at the*

- 26th annual larval fish conference, Browman H.I. and Skiftesvik A.B., Bergen, Norway.
- Wafar M.V.M., Le Corre P. & J.L. Birrien, 1983. Nutrients and primary production in permanently well-mixed temperate coastal waters. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 17, 431-446.
- Widdicombe C.E., Eloire D., Harbour D., Harris R.P., Somerfield P.J., 2010. Long-term phytoplankton community dynamics in the western English Channel. *Journal of Plankton Research*, 32, 643-655.
- Wiltshire K.H., Malzahn A.M., Wirtz K., Greve W., Mangelsdorf S.J., Mangelsdorf P., Manly B.F.J., Boersma M., 2008. Resilience of North Sea phytoplankton spring bloom dynamics: An analysis of long-term data at Helgoland Roads. *Limnology and Oceanography*, 53, 1294-1302.
- Zongo, S. B, Schmitt, F. G., 2011. Scaling analysis of pH fluctuations in coastal waters of the English Channel. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 18, 829-839.

ANNEXE 1 : Bilan de la qualité de l'environnement marin en Manche orientale et en baie sud de la mer du Nord et facteurs déclassants.

Réseaux nationaux et régionaux

L'Ifremer coordonne, sur l'ensemble du littoral métropolitain, la mise en œuvre de réseaux d'observation et de surveillance de la mer côtière. Ces outils de collecte de données sur l'état du milieu marin répondent à deux objectifs :

- servir des besoins institutionnels en fournissant aux pouvoirs publics des informations répondant aux exigences de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE , 2000/60/CE), des conventions régionales marines (OSPAR et Barcelone) et de la réglementation sanitaire relative à la salubrité des coquillages des zones de pêche et de production conchylicoles ;
- acquérir des séries de données nourrissant les programmes de recherche visant à mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes côtiers et à identifier les facteurs à l'origine des changements observés dans ces écosystèmes.

Le dispositif comprend : **le réseau d'observation et de surveillance du phytoplancton et des phycotoxines (REPHY)** qui porte aussi sur l'hydrologie et les nutriments, **le réseau d'observation de la contamination chimique (ROCCH)**, **le réseau de contrôle microbiologique (REMI)**. J'assure la coordination régionale pour la mise en œuvre de ces réseaux nationaux à l'échelle de la région des Hauts-de-France en lien avec les correspondants de ces réseaux et leurs suppléants dans mon laboratoire. Pour approfondir les connaissances sur certaines zones particulières et enrichir le diagnostic de la qualité du milieu, j'assure également la coordination et le rôle de responsable scientifique du réseau régional **SRN (Suivi Régional des Nutriments)**.

Pour gérer les données de la surveillance du littoral, l'Ifremer a développé le système d'information **Quadrige2** (http://envlit.ifremer.fr/resultats/base_de_donnees_quadrige), qui associe à une base de données une panoplie d'outils d'interprétation et d'élaboration de produits d'information. **Quadrige2** constitue un élément du Système d'Information sur l'Eau (SIE) (<http://www.eaufrance.fr>), et à ce titre, contribue aux travaux du Secrétariat d'Administration National des Données Relatives à l'Eau (SANDRE) (<http://www.sandre.eaufrance.fr>).

Ainsi, le Laboratoire Environnement Ressources de Boulogne-sur-Mer que je dirige opère, sur le littoral des départements du Nord, du Pas-de-Calais et de la Somme, les réseaux de surveillance nationaux de l'Ifremer dont une description succincte est présentée dans le tableau A1-T1.

Tableau A1-T1. Principales caractéristiques des réseaux REMI, REPHY / SRN et ROCCH.

	REMI	REPHY / SRN	ROCCH
Date de création	1989	1984	1974
Objectifs	Suivi microbiologique des zones de production conchylicole classées	Suivi spatio-temporel des flores phytoplanctoniques et des phénomènes phycotoxiniques associés Suivi physico-chimique	Evaluation des niveaux et tendances de la contamination chimique Surveillance chimique sanitaire des zones de production conchylicole classées
Paramètres	<i>Escherichia coli</i>	Flores totales et chlorophylle <i>a</i> Genre <i>Dinophysis</i> et toxicité lipophile (DSP) associée Genre <i>Pseudo-nitzschia</i> et toxicité ASP associée Genre <i>Alexandrium</i> et toxicité PSP associée température salinité turbidité, MES oxygène nutriments	Métaux réglementés : cadmium plomb mercure
Nombre de points 2015 A l'échelle de la métropole	389	417 Dont 169 eau et 255 coquillages	137
Nombre de points 2015 du laboratoire LER-BL	19	3 REPHY + 7 SRN	4

Selon la terminologie utilisée dans la base de données Quadrigé2, les lieux de surveillance sont regroupés dans des "zones marines". Un code est défini pour identifier chaque point : par exemple, " 001-P-002 " identifie le point " 002 " de la zone marine " 001 " (Tableau A1-T2 et Figures A1-F1 à A1-F7).

Tableau A1-T2. Intitulés des zones marines de la base de données Quadrigé2 et correspondance avec les masses d'eau côtières (FRAC) et les masses d'eau de transition (FRAT) de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE).

Zones marines Quadrigé²		Masses d'eau DCE	
Code	Libellé	Code	Libellé
001	Frontière belge – Cap Gris-Nez	<i>Masse d'eau côtière</i>	
002	Cap Gris-Nez – Le Boulonnais	FRAC01	Frontière belge – Malo
003	Zone de dragage autorisée pour les coquilles St-Jacques	FRAC02	Malo – Cap Gris-Nez
004	Baie de Canche	FRAC03	Cap Gris Nez – Slack
005	Baie d'Authie	FRAC04	Slack – La Wrenne
006	Baie de Somme – large	FRAC05	Equihen - Ault
007	Baie de Somme	<i>Masse d'eau de transition</i>	
008	Pays de Caux Nord	FRAT01	Baie de Somme
009	Pays de Caux Sud	FRAT02	Port de Boulogne S/M
092	Hors Zone – Manche Atlantique	FRAT03	Port de Calais
		FRAT04	Port de Dunkerque

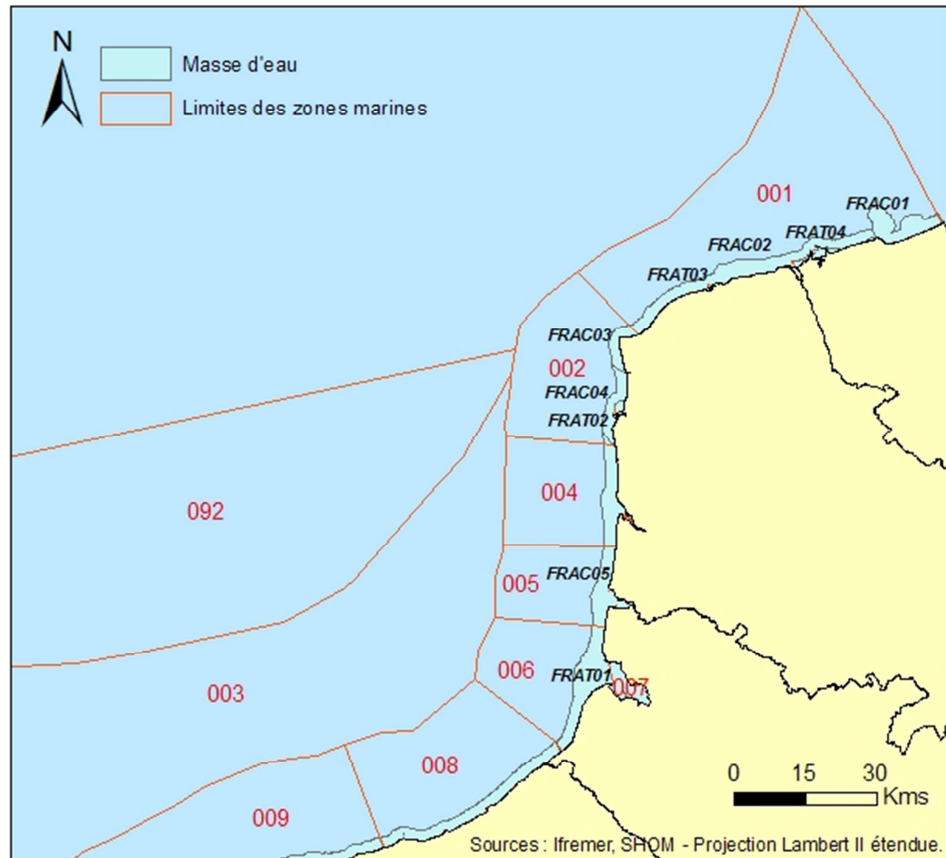


Figure A1-F1. Zones d'emprise de mon Laboratoire (LER-BL) pour la mise en œuvre des réseaux nationaux et régionaux d'observation et de surveillance. Zones marines de la base de données Quadrigé2 et correspondance avec les masses d'eau côtières (FRAC) et les masses d'eau de transition (FRAT) de la Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/CE).

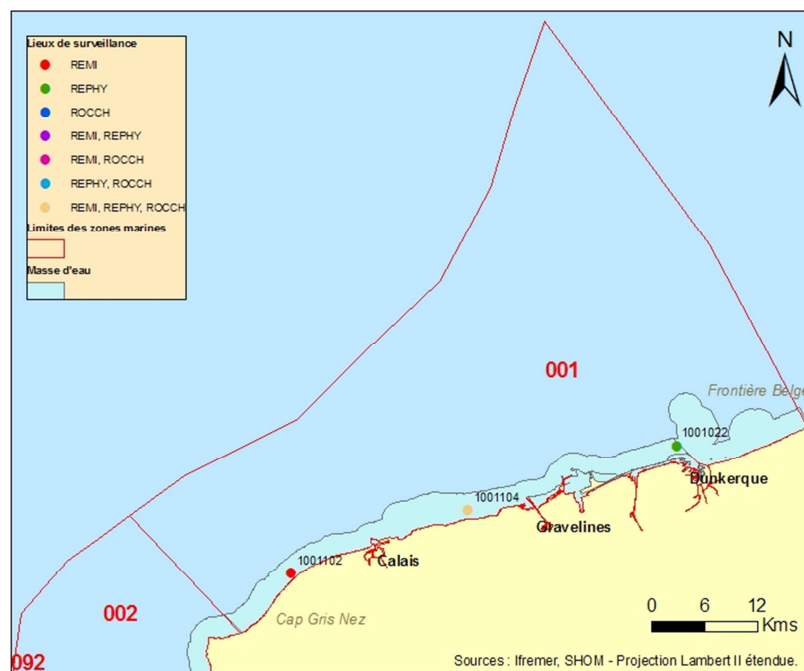


Figure A1-F2. Zone marine 001 - Façade Nord. Localisation des points d'observation et de surveillance REMI, REPHY et ROCCH.

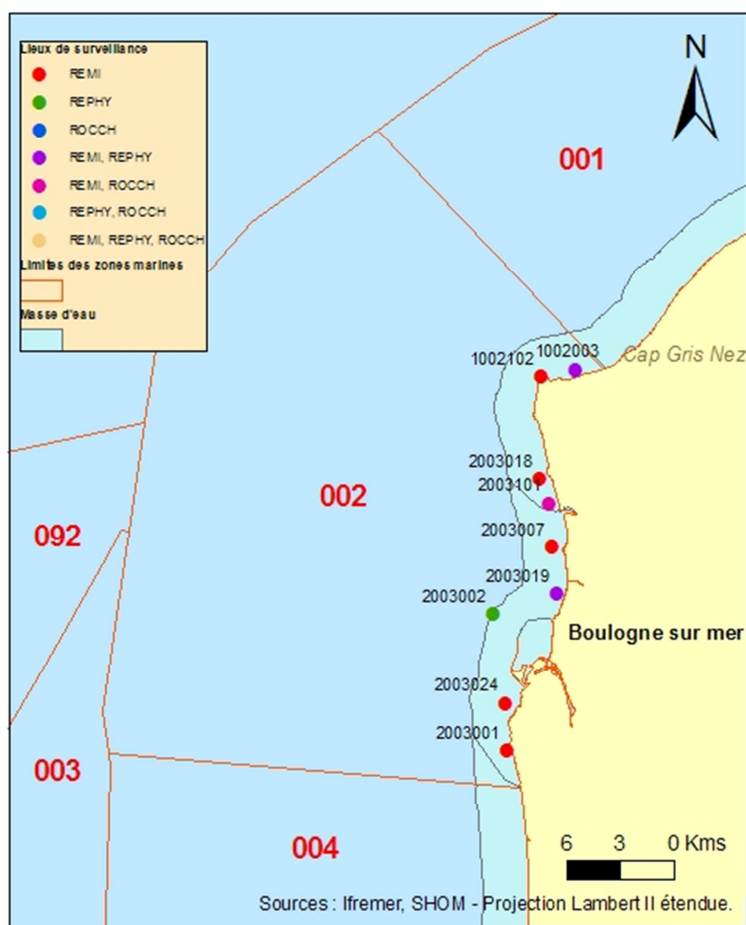


Figure A1-F3. Zone marine 002 - Façade Ouest, zone de Boulogne-sur-Mer. Localisation des points d'observation et de surveillance REMI, REPHY et ROCCH.

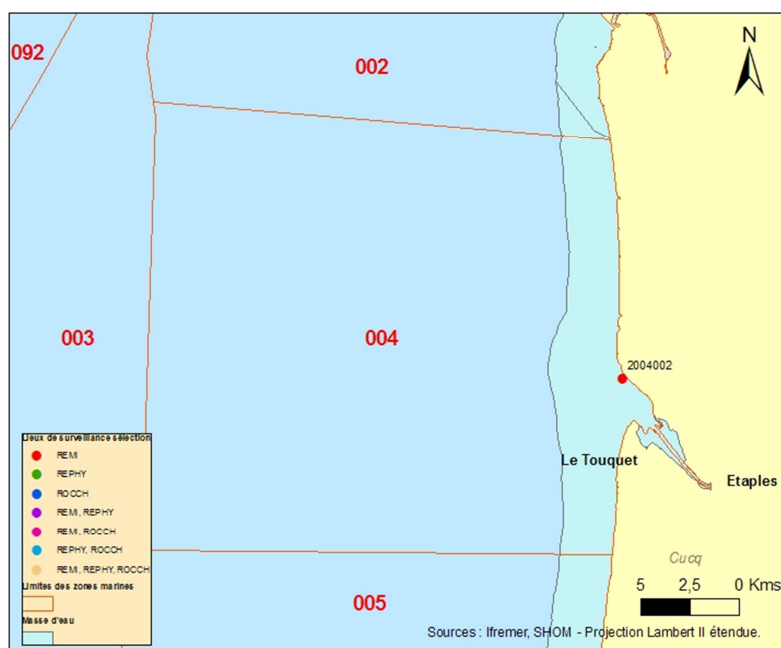


Figure A1-F4. Zone marine 004 - Façade Ouest, zone de la baie de Canche. Localisation des points d'observation et de surveillance REMI, REPHY et ROCCH.

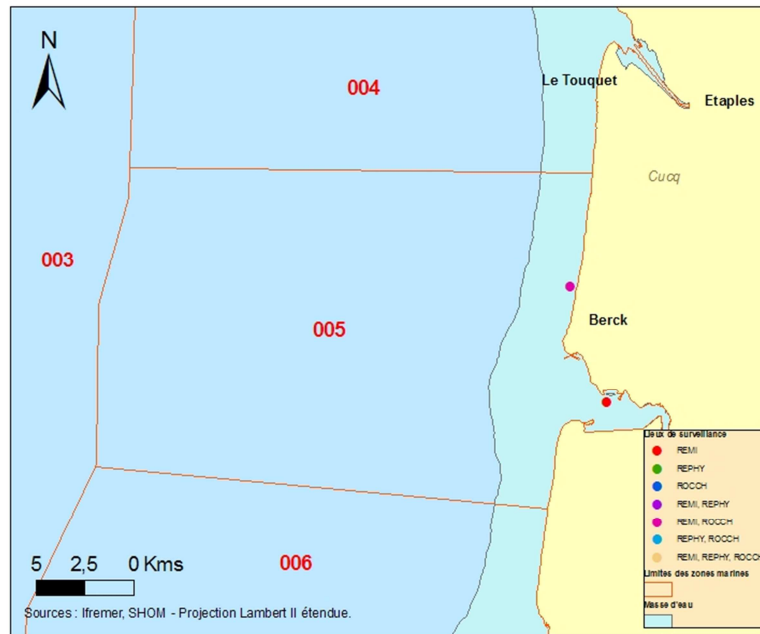


Figure A1-F5. Zone marine 005 - Façade Ouest, zone de la baie d'Authie. Localisation des points d'observation et de surveillance REMI, REPHY et ROCCH.

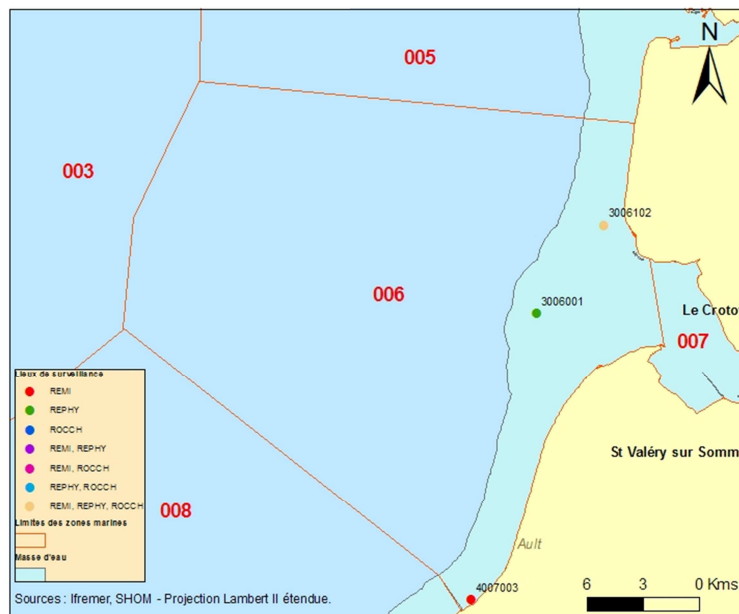


Figure A1-F6. Zone marine 006 - Façade Ouest, zone de la baie de Somme (partie externe). Localisation des points d'observation et de surveillance REMI, REPHY et ROCCH.

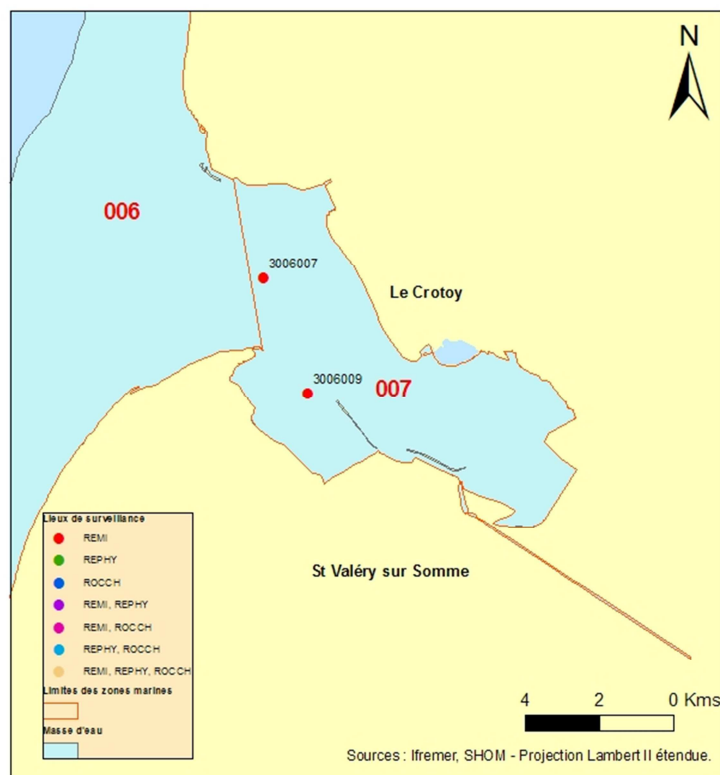


Figure A1-F7. Zone marine 007 - Façade Ouest, zone de la baie de Somme (partie interne). Localisation des points d'observation et de surveillance REMI, REPHY et ROCCH.




















Lefebvre *et al.* (2011 ; **O-2**) ont proposé une synthèse des résultats de ces différents réseaux pour caractériser la qualité de l'environnement au niveau des eaux côtières de la région des Hauts-de-France, ce qui permet de mieux cerner les enjeux environnementaux et par conséquent les enjeux pour la mise en place des actions de recherche et afin de répondre au mieux aux demandes d'études, d'avis et d'expertises (**AE-1. à AE-37., R-29., R-35., R-41., R-51., R-54., R-59.**). Une mise à jour régulière des analyses de résultats acquis par mon laboratoire permet d'évaluer régulièrement la qualité de l'environnement, ainsi que de confirmer ou d'infirmer certaines tendances quant à une amélioration ou une dégradation de sa qualité (**R-1. à R-3., R-5., R-7., R-8., R-11. à R-13., R-15., R-18., R-20., R-25. à R-27., R-30., R-32., R-36., R-38., R-39., R-36., R-43., R-44., R-48., R-49., R-53., R-55. à R-57., R-61. à R-64., R-70. à R-73., R-78., R-81., R-82., R-84., R-85., R-88. à R-90., R-93., R-95., R-96., R-100., R-102., R-104., R-111., R-114.**).

Évaluation de la qualité des zones de productions conchylicoles

Le milieu littoral est soumis à de multiples sources de contamination d'origine humaine ou animale : eaux usées urbaines, ruissellement des eaux de pluie sur des zones agricoles, faune sauvage. En filtrant l'eau, les coquillages concentrent les microorganismes présents dans l'eau. Aussi, la présence dans les eaux de bactéries ou virus potentiellement pathogènes pour l'homme (*Salmonella*, *Vibrio* spp, norovirus, virus de l'hépatite A) peut constituer un risque sanitaire lors de la consommation de coquillages (gastro-entérites, hépatites virales). Les *Escherichia coli*, bactéries communes du système digestif sont recherchées comme indicateurs de contamination fécale.

L'analyse de tendance concernant l'évolution du niveau de contamination de chaque zone conchylicole est basée sur un test non paramétrique de Mann-Kendall et sur les données acquises dans le cadre de la surveillance régulière sur les dix dernières années (2006-2015). Seules les séries présentant dix ans de données sans interruption en font l'objet (Tableau A1-T3). Il apparaît ainsi que pour les 16 sites conchylicoles répondant au critère précédent, 4 présentent une tendance significative à la dégradation de la qualité microbiologique, alors qu'1 seul présente une tendance à l'amélioration.

Tableau A1-T3. Analyse de tendances et qualité microbiologique par point de suivi REMI.

Point	Nom du point	Support	Tendance générale sur 10 ans ^a	Qualité microbiologique sur 3 ans ^b
001-P-020	Cap Blanc-Nez		→	moyenne
001-P-022	Oye plage		→	moyenne
001-P-172	Zuydcoote		Moins de 10 ans de données	moyenne
002-P-002	Bouchots Tardinghen		↗	moyenne
002-P-004	Cap Gris nez		→	moyenne
002-P-006	Equihen épuration		↗	moyenne
002-P-012	Pointe aux Oies		→	moyenne
002-P-023	Verdriette		→	moyenne
002-P-024	Parc 10 n		→	moyenne
002-P-026	Fort de l'Heurt		↗	moyenne
002-P-032	Ambleteuse		→	moyenne
004-P-023	Dannes		Moins de 10 ans de données	moyenne
004-P-006	Saint Gabriel		Moins de 10 ans de données	Nombre de données insuffisant
005-P-002	Authie nord		→	moyenne
005-P-006	Berck Bellevue		→	moyenne
006-P-009	Pointe de St Quentin		↗	moyenne
006-P-020	Bois de Cise		→	moyenne
007-P-001	R6 Somme nord		↘	moyenne
007-P-002	R11 Somme sud		→	Nombre de données insuffisant

↗ dégradation, ↘ amélioration, → pas de tendance significative (seuil 5 %).

^a Calculée sur les 10 dernières années (2006-2015)

^b Estimée sur les trois dernières années
(calcul sur au moins 12 ou 24 données selon la fréquence)

Évaluation de la contamination chimique

Les concentrations en métaux dans les coquillages des sites conchylicoles de la région des Hauts-de-France présente une variabilité pouvant dans certains cas aboutir à la mise en évidence d'une tendance marquée (Figure A1-F8). Quelle que soit cette variabilité, les concentrations en métaux sont systématiquement inférieures aux seuils réglementaires fixés par le règlement CE n° 1881/2006 modifié par le règlement CE n° 1259/2011.

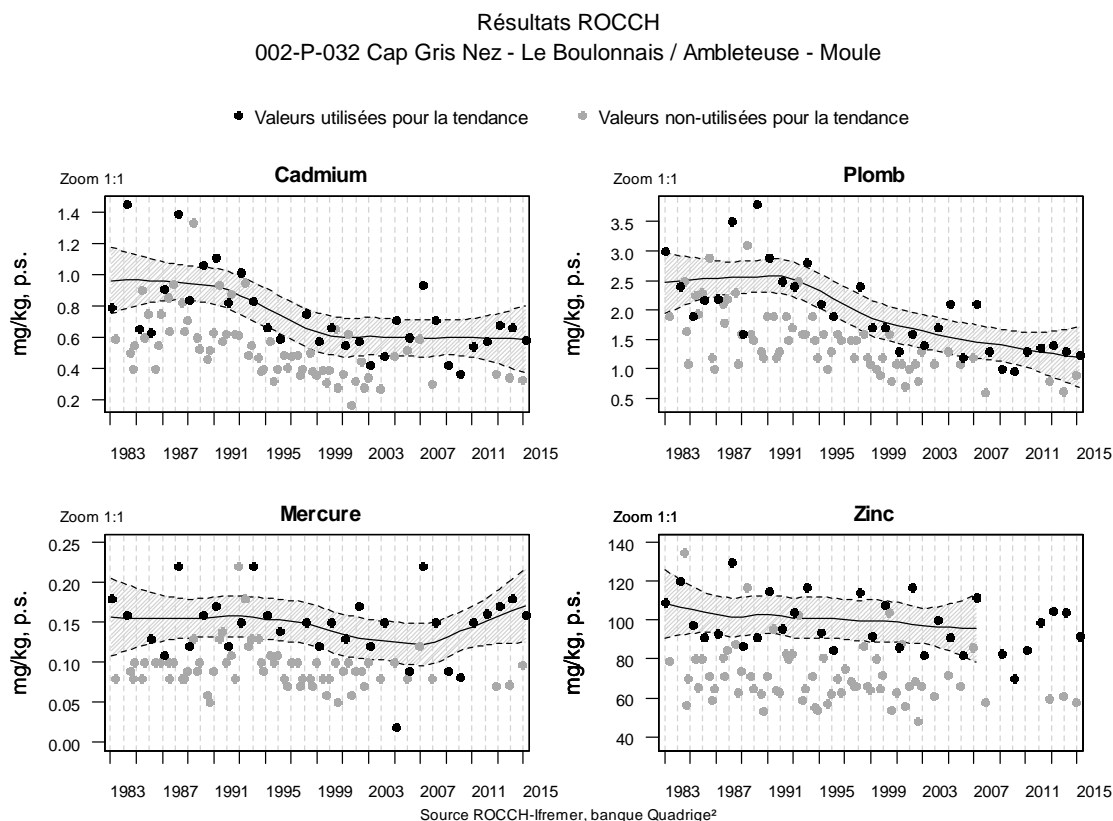


Figure A1-F8. Évolution de la concentration en cadmium, en plomb, en mercure et en zinc dans les moules du site 002-P-032 Cap Gris Nez surveillé dans le cadre du ROCCH (ligne noire et zone grisée : régression locale pondérée (lowess) et limites de l'enveloppe de confiance à 95 % du lissage effectué).

La figure A1-F9 permet de comparer les différents points surveillés par le laboratoire, relativement à une échelle nationale. Le point « Ambleteuse » (002-P-032) présente les plus fortes médianes régionales en cadmium, en plomb, en mercure (115 %) et en zinc sur les six dernières années.

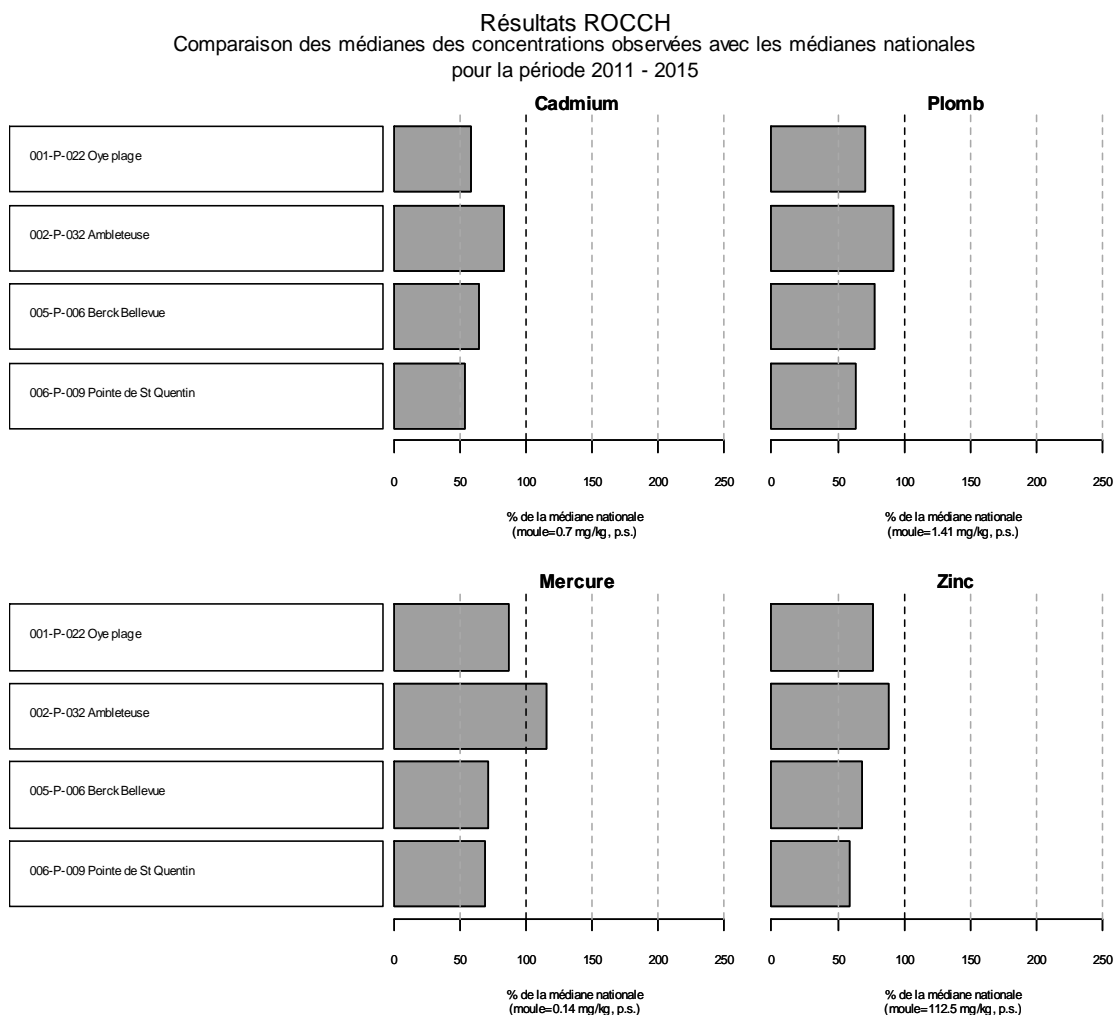


Figure A1-F9. Rapport (pourcentage) entre la médiane des observations du premier trimestre sur les cinq dernières années pour le point considéré et la médiane des observations sur l'ensemble du littoral français (sur la même période et pour le même coquillage) pour les 4 points ROCCH de la région des Hauts-de-France.

En conclusion, la contamination chimique des coquillages sur l'ensemble du littoral des départements du Nord, du Pas-de-Calais et de la Somme en cadmium, plomb et mercure reste inférieure au seuil réglementaire fixé et reste dans la moitié des points les moins contaminés de France. Seule la teneur en mercure est supérieure à la médiane nationale pour le point « Ambleteuse ».

Analyses des compartiments Hydrologie et Phytoplancton

Lefebvre *et al.* (2011) (**O-2.**, **Art-6.**) montrent, grâce à l'exploitation des données des réseaux REPHY et SRN, que le schéma d'évolution saisonnière classique des populations phytoplanctoniques correspond à des abondances maximales au moment du printemps puis une diminution en période hivernale. Cette tendance peut être variable en fonction des sites (hydrodynamisme différent) et des conditions environnementales rencontrées (luminosité, apports nutritifs, ...). Les masses d'eaux échantillonnées apparaissent peu structurées sur la verticale alors que des gradients côte-large importants sont mis en évidence. Ainsi, la dynamique générale de l'écosystème Manche orientale - baie sud de la mer du Nord présente un fonctionnement classique de système tempéré (Wafar *et al.*, 1983 ; Gentilhomme et Lizon, 1998). Les cycles saisonniers des

nutriments et de la biomasse phytoplanctonique sont très marqués. La variabilité interannuelle est forte. L'homogénéité des conditions d'échantillonnage permet de s'affranchir d'une normalisation des résultats de concentration en nutriments par la salinité aux fins d'une comparaison inter-sites. L'analyse approfondie des résultats (non développée dans cette annexe ; Lefebvre *et al.*, 2011 - **Art-6.**) met en évidence une tendance monotone décroissante de la concentration en phosphate pour l'ensemble des sites étudiés au cours de la période 1992-2007, alors que les concentrations en silicate sont relativement stables (hors variabilité interannuelle). La dynamique de l'azote comme celle de la biomasse phytoplanctonique sont beaucoup plus complexes à aborder et de telles tendances monotones ne sont pas identifiables. Ces résultats ne sont pas sans conséquence sur les valeurs des rapports stœchiométriques N : P, Si : N et Si : P (N : azote total ; P : Phosphate ; Si : silicate) (Redfield *et al.*, 1963 ; Brzezinski, 1985). La croissance du phytoplancton apparaît principalement limitée par le phosphate et le silicate (pour les diatomées uniquement). Cette notion de limitation de la croissance du phytoplancton et de ses conséquences sur les communautés phytoplanctoniques mérite une attention particulière dans un système bordé par des régions où les problèmes d'eutrophisation sont majeurs (la baie de Seine et la mer du Nord). En effet, des modifications majeures de productivité, d'abondance, de dominance et de succession des taxons phytoplanctoniques ont été rapportées en réponse à l'augmentation des pressions d'origine anthropique (apports de nutriments notamment) lors des dernières décennies (Billen *et al.*, 2005 ; Lancelot *et al.*, 2006).

Les dénombrements phytoplanctoniques mettent en évidence une forte variabilité interannuelle pour un site donné, ainsi qu'une forte variabilité spatiale. Les abondances maximales sont relevées entre mars et juin et sont principalement le fait de la présence de *Phaeocystis globosa* qui domine alors la communauté phytoplanctonique. En dehors de cette période, la communauté est principalement constituée de diatomées et de dinoflagellés.

La prymnésiofycée *Phaeocystis globosa* est échantillonnée régulièrement entre mars et juin sur l'ensemble des sites et sa concentration peut largement dépasser le million de cellules par litre (Figure A1-F10). Certaines cellules isolées ont pu être mises en évidence le reste de l'année. Les concentrations les plus élevées sont relevées sur la radiale de la baie de Somme (plus de 48.10^6 cellules par litre au maximum au cours de la période 1992-2007). Les concentrations maximales atteintes au cours de la même période sont élevées mais de moindre ampleur sur les radiales de Dunkerque (plus 29.10^6 cellules par litre) et de Boulogne-sur-Mer (plus de 28.10^6 cellules par litre).



Figure A1-F10. A gauche : Cellules isolées de *Phaeocystis globosa* vues en microscopie optique inversée et, à droite : accumulation de mousse de *Phaeocystis* sur le littoral (Source : Ifremer, LER-BL).

Les genres *Alexandrium*, *Dinophysis* et *Pseudo-nitzschia*, potentiellement responsables, respectivement, de la production de toxines du type PSP (Paralytic Shellfish Poison), DSP (Diarrhetic Shellfish Poison) et ASP (Amnesic Shellfish Poison) sont régulièrement observés sur les sites de surveillance. Cependant, il faut noter que même si les concentrations cellulaires sont parfois supérieures aux seuils d’alerte retenus pour ces genres toxiques, les analyses de recherche de toxines se révèlent négatives.

La Directive Cadre sur l’Eau

Le programme de surveillance de la DCE a été défini sur la base des réseaux REMI, REPHY / SRN, ROCCH et sur un programme dédié au benthos. J’assume le rôle de correspondant DCE pour le bassin Artois-Picardie et le district international Escaut depuis l’année 2007.

Les paramètres de suivis concernant la DCE dans le bassin Artois-Picardie varient en fonction des masses d’eau. Ainsi, les éléments de qualité écologique pour les eaux côtières et de transition sont de trois types :

- des paramètres biologiques,
- des paramètres chimiques et physico-chimiques,
- des paramètres hydro-morphologiques.

Chacun de ces paramètres permet de classifier les masses d’eaux, mais une combinaison des trois paramètres permettra d’apprécier la qualité écologique.

Les masses d’eau, qui font l’objet du contrôle de surveillance DCE, sont au nombre de neuf (Figure A1-F11) :

- cinq masses d’eaux côtières ;
- quatre masses d’eaux de transition.

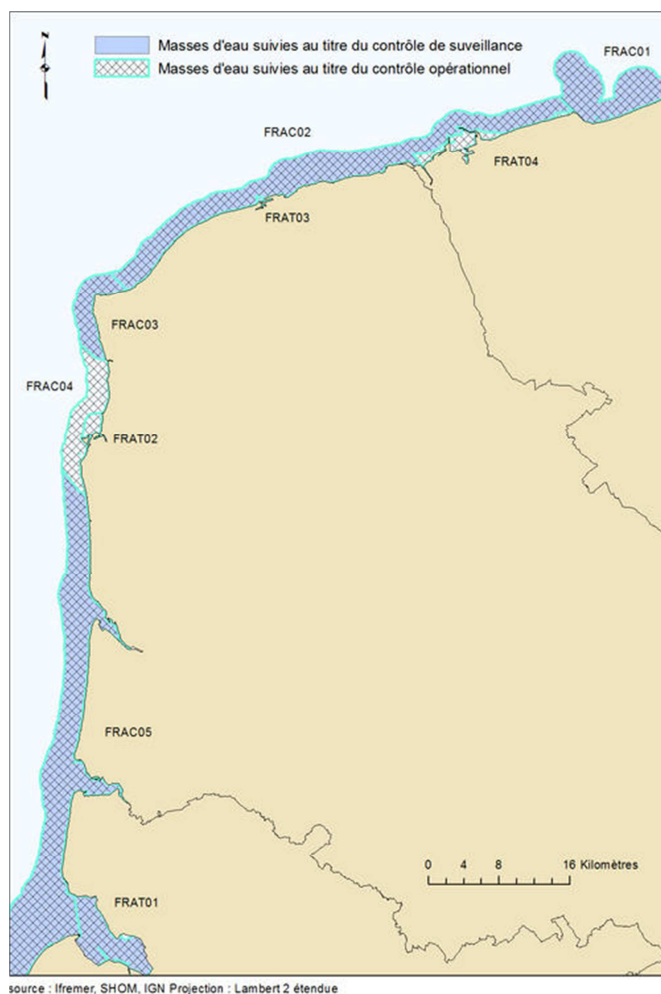


Figure A1-F11. Masses d'eau côtières et estuarienne du bassin Artois-Picardie (en bleu foncé, masses d'eau suivies au titre du contrôle de surveillance DCE).

Dans le cadre de la DCE, la définition de l'état global de l'écosystème prend en compte plusieurs éléments de qualité. Chaque élément est associé à une métrique. Chaque métrique (ou indice) est alors transformé en EQR (Ecological Quality Ratio), rapport impliquant la valeur de référence et la valeur de la métrique (valeur entre 0 et 1).

Élément de qualité Oxygène dissous : la métrique est le percentile 10 des concentrations en oxygène dissous. Elle se calcule sur des données mensuelles acquises entre juin et septembre et sur une période de 6 ans.

La grille et la valeur de référence pour les différents groupes de masses d'eau (ME) sont les suivantes :

Groupe de ME	Grille de l'indice (mg/L)	Valeur de référence (mg/L)	Grille de l'EQR
Toutes	1 – 2 – 3 – 5	8,33	0,12 – 0,24 – 0,36 – 0,6

Élément de qualité Température : L'indicateur température est défini comme le pourcentage des mesures hors d'une enveloppe (intervalle interquartile x 3) considérée comme assurant le bon fonctionnement écologique de l'écosystème. Il permet un classement en 2 classes : bon ou mauvais. L'enveloppe est définie autour d'une

référence, qui est une sinusoïde modélisant les données de température 1988-2007. Si plus de 5% des valeurs sont en dehors de l'intervalle, alors la masse d'eau est désignée en mauvais état au regard de l'élément de qualité température.

Élément de qualité Salinité : L'indicateur salinité a été déclaré comme non pertinent dans les masses d'eau de transitions et les masses d'eau côtières dans le cadre du contrôle de surveillance.

Élément de qualité Turbidité : La métrique a été définie comme le percentile 90 calculé sur les valeurs absolues de concentration exprimée en NTU. La grille de classement s'applique sur les 3 écotypes définis au regard de l'atlas de turbidité de surface élaboré à partir de données de réflectance du capteur MODIS.

Ecotype	Grille de l'indice (NTU)	Valeur de référence (NTU)	Grille de l'EQR
Ecotype 1 et 2	5 - 10	3,3	0,67 - 0,33
Ecotype 3	30 - 45	20,1	0,67 - 0,45

Élément de qualité Phytoplancton : L'indicateur phytoplancton est constitué des 3 indices biomasse, abondance et composition taxonomique. La biomasse est le percentile 90 des valeurs de concentration en chlorophylle a mesurée mensuellement entre mars et octobre (Manche Atlantique) ou entre janvier et décembre (Méditerranée) pendant 6 ans.

La grille et la valeur de référence pour les différents groupes de masses d'eau (ME) sont les suivantes :

Groupes de masses d'eau	Grilles de l'indice	Valeurs de référence	Grilles de l'EQR
EC mer du Nord 1/26b	10 - 15 - 22,5 - 45	6,66	0,15 - 0,30 - 0,44 - 0,67
EC manche atlantique 1/26a	5 - 10 - 20 - 40	3,33	0,08 - 0,17 - 0,33 - 0,67
ET mer du Nord	10 - 15 - 22,5 - 45	6,66	0,15 - 0,30 - 0,44 - 0,67
ET manche atlantique	5 - 10 - 20 - 40	3,33	0,08 - 0,17 - 0,33 - 0,67

L'indicateur d'abondance est défini comme le pourcentage d'échantillons pour lequel l'effectif d'un taxon visé dépasse une valeur seuil (petites cellules : 250 000 cellules par litre ; grandes cellules : 100 000 cellules par litre). La grille des indices (20 - 40 - 70 - 90), la grille des EQRs correspondants (0,19 - 0,24 - 0,42 - 0,83) et la valeur de référence 16,7 sont utilisées pour tous les groupes de masses d'eau. L'indicateur composition est en cours de développement.

Élément de qualité Angiospermes (herbiers) : Pour le littoral Manche-Atlantique, il s'agit des herbiers à zostères alors que ce sont les herbiers à Posidonies pour le littoral Méditerranéen. L'indicateur pour les posidonies est le PREI (Posidonia oceanica Rapid Easy Index). Il est en cours de développement sur la base de travaux anglo-saxons pour les zostères. Cet indicateur n'est pas utilisé pour le bassin Artois-Picardie.

Élément de qualité Macroalgues : Les indices relatifs aux macroalgues intertidales et subtidales de substrat dur sont développés sur la base du CFR (Quality of Rocky

Bottom Index) proposé par les espagnols (Juanes *et al.*, 2007. Macroalgae, a suitable indicator of the ecological status of coastal rocky communities in the NE Atlantic. Ecological Indicators, In press). Pour les blooms de macroalgues, type ulves, l'indice est en cours de définition.

Élément de qualité Invertébrés benthiques : L'indicateur retenu pour la qualification des masses d'eau côtières est le MAMBI pour les masses d'eau côtières Manche, Atlantique et Méditerranée et l'indicateur AMBI pour les masses d'eau de transition en Méditerranée (Desroy *et al.*, 2009 et Desroy *et al.*, 2010). L'indicateur M-AMBI repose sur :

- L'indicateur AMBI lui-même basé sur la reconnaissance dans le peuplement de cinq groupes écologiques de polluosensibilités différentes, comme proposé par Hily (1984) et sur la pondération de chaque groupe écologique par une constante qui représente le niveau de perturbation auquel les espèces sont associées ;
- la richesse spécifique, ou nombre d'espèces présentant au moins un individu pour la station ;
- l'indice de diversité de Shannon-Weaver.

La grille de lecture du M-AMBI (Desroy *et al.*, 2009) pour notre zone est la suivante.

Grille de qualité pour l'indicateur « invertébrés benthiques » adoptée pour les sous régions Manche - mer du Nord, Mers Celtiques et Golfe de Gascogne.

Classes	[0,0.2]]0.2,0.39]]0.39,0.53]]0.53,0.77]]0.77,1]
Etat écologique	Très mauvais	Mauvais	Moyen	Bon	Très bon

L'évaluation de l'atteinte ou pas du Bon État au sens de la DCE (Figure A1-F12) s'effectue en prenant le résultat le plus déclassant entre l'état chimique (Figure A1-F13) et l'état biologique (Figure A1-F14). Ces états sont eux-mêmes dépendants des états des éléments ou sous-éléments de qualité (Figures A1-F15 et A1-F16).

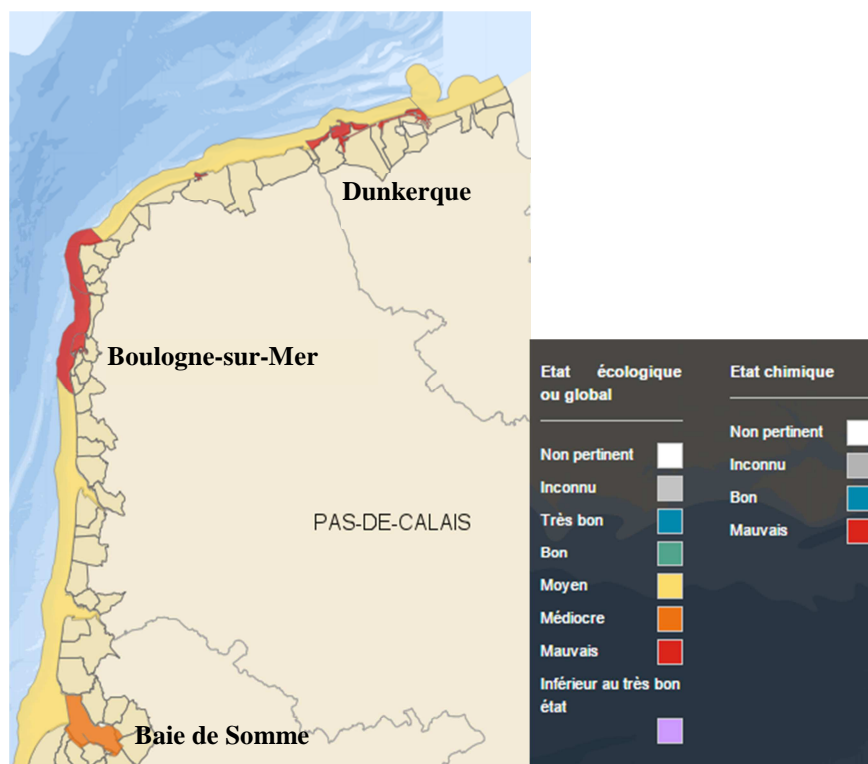


Figure A1-F12. Évaluation de l'état écologique global (état biologique + état chimique) des masses d'eau entre 2008 et 2015 dans le cadre du programme de surveillance de la DCE.

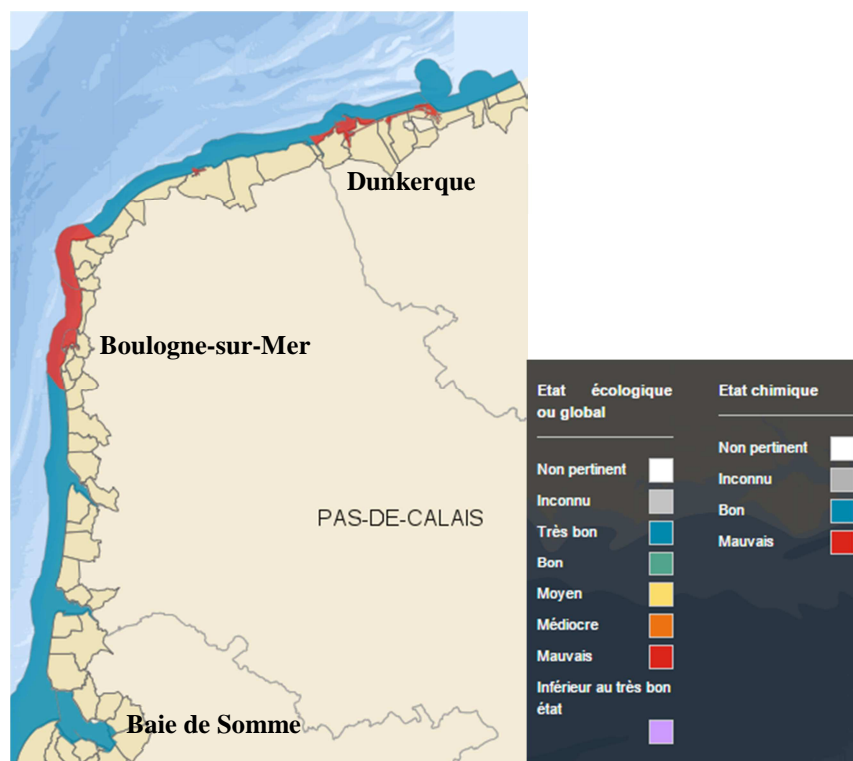


Figure A1-F13. Évaluation globale de l'état chimique des masses d'eau entre 2008 et 2015 dans le cadre du programme de surveillance de la DCE.

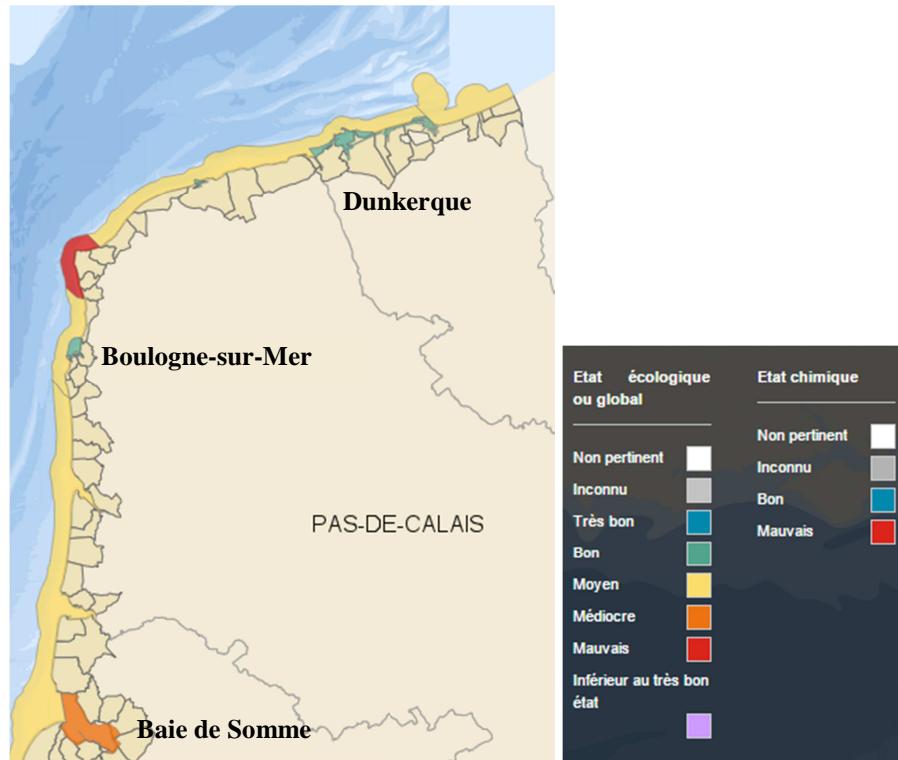


Figure A1-F14. Évaluation globale de l'état biologique des masses d'eau entre 2008 et 2015 dans le cadre du programme de surveillance de la DCE.

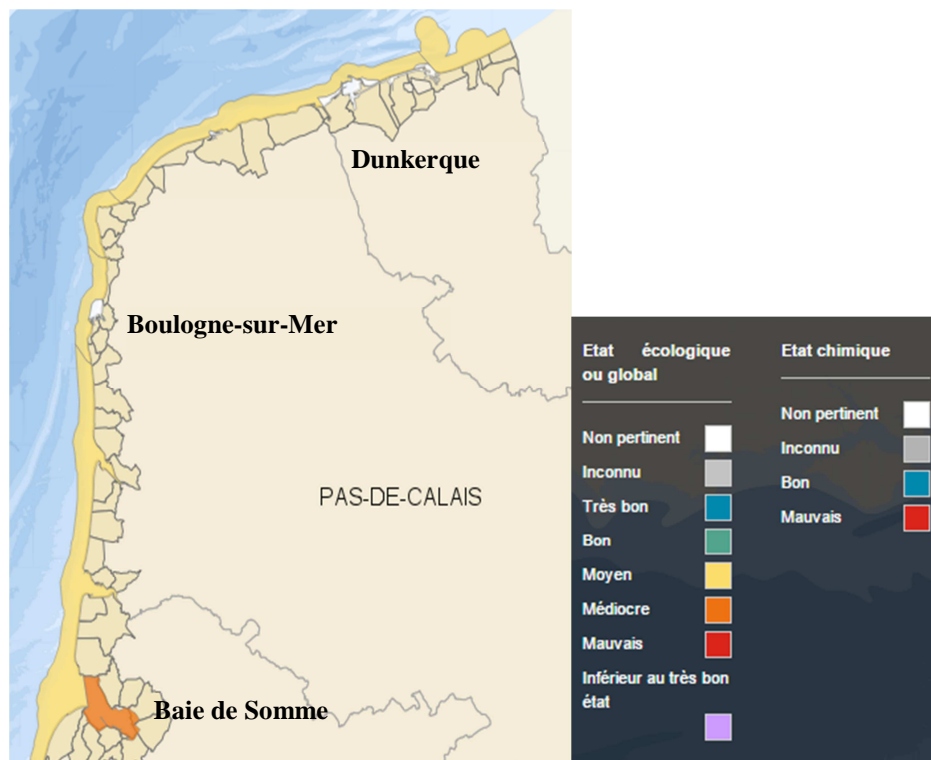


Figure A1-F15. Évaluation de l'état biologique des masses d'eau en date du 01/01/2014 pour l'élément de qualité Phytoplancton dans le cadre du programme de surveillance de la DCE.

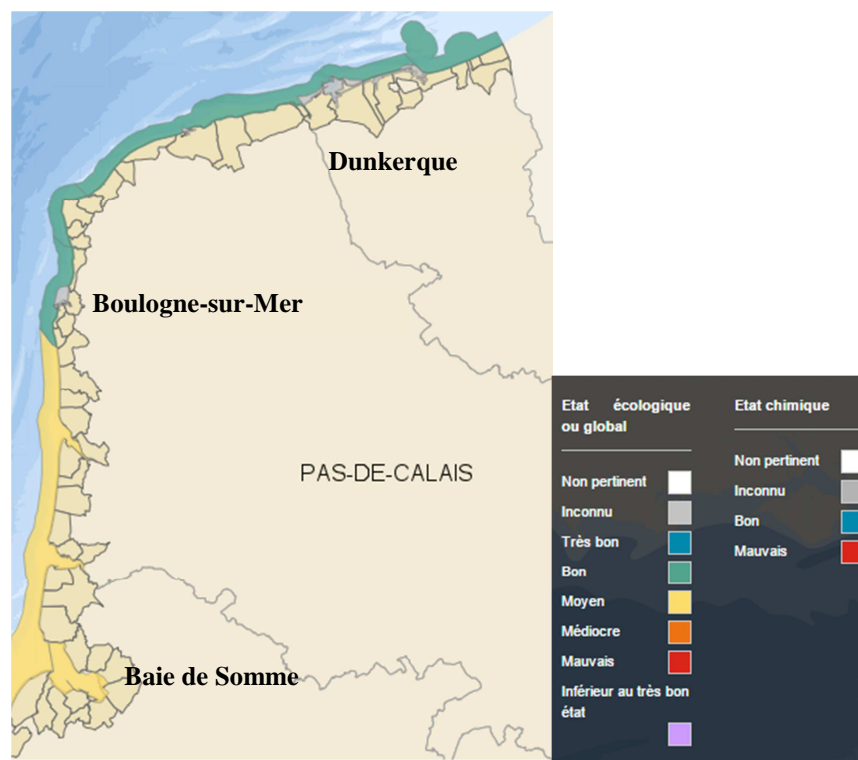


Figure A1-F16. Évaluation de l'état physico-chimique des masses d'eau en date du 01/01/2014 pour l'élément de qualité Nutriments dans le cadre du programme de surveillance de la DCE.

BILAN DE L'ÉVALUATION DCE

L'objectif d'atteinte du Bon État au sens de la DCE est reporté à 2027 pour l'ensemble des masses d'eau côtières de la région Hauts-de-France et pour la masse d'eau de transition FRAT01 – Baie de Somme. L'objectif est moins strict que le Bon État pour les masses d'eau de transition qui correspondent aux ports de Dunkerque, de Calais et de Boulogne-sur-Mer.

Les masses d'eau sont classées en état **Moyen** (FRAC01 à FRAC05) ou **Médiocre** (FRAT01) pour l'élément de qualité **Phytoplancton**.

L'état est **Moyen** pour les masses d'eau FRAC05 et FRAT01 pour l'élément de qualité **Nutriments**.

Les masses d'eau FRAC02 et FRAC03 sont, respectivement, en état **Moyen** et **Mauvais** pour le sous-élément **macro-algues subtidales**.

Pour l'**état chimique**, les masses d'eau FRAC03, FRAC04, FRAT02 et FRAT03 sont en classées en état **Mauvais** en raison des résultats pour le méthylmercure. La masse d'eau FRAT04 est classée en Mauvais état au regard des résultats pour le méthylmercure et pour le TBT (tributylétain)

La convention OSPAR

A l'échelle de l'Atlantique nord-est, la convention d'Oslo et de Paris (OSPAR) trouve ses origines avec l'entrée en force de la convention Oslo en 1974, puis de la convention de Paris en 1978, avant leur fusion en 1992 ; les stratégies d'action de la commission OSPAR sont adoptées en 1998 (<http://www.ospar.org/about/history>). L'emprise spatiale de la zone OSPAR correspond à la partie Nord-Est de l'Atlantique, à la mer du Nord et à une partie de l'océan Arctique (Figure A1-F17).

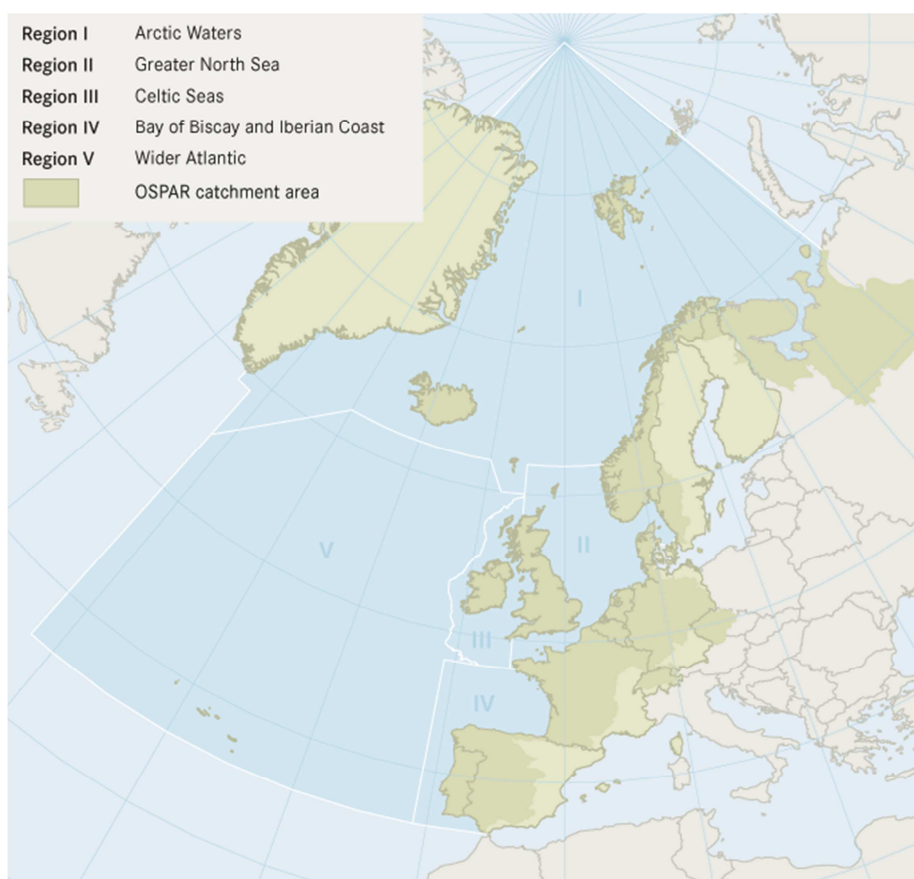


Figure A1-F17. Les différentes régions OSPAR et les bassins versants associés (Source : OSPAR).

La convention OSPAR propose ainsi une stratégie pour la protection de l'environnement marin à l'échelle de l'Atlantique nord-est basée sur cinq thématiques spécifiques : biodiversités et écosystèmes, eutrophisation, substances dangereuses, industrie pétrolière et gazière offshore, substances radioactives, et une thématique commune : Programme conjoint d'évaluation et de surveillance (JAMP - Joint Assessment and Monitoring Programme) (Figure A1-F18). Je suis impliqué comme expert français et/ou chef de délégation auprès du Ministère en charge de l'Environnement pour le volet « Eutrophisation » depuis l'année 2002. La mise en œuvre de la stratégie « Eutrophisation » s'effectue dans le cadre des obligations et des engagements des diverses Parties contractantes dans le cadre d'autres accords internationaux. Ceci inclut la législation européenne, par exemple la directive « nitrates » (91/676/CEE), la directive « eaux résiduaires urbaines » (91/271/CEE), la directive-cadre sur l'eau (2000/60/CEE) et la directive-cadre « stratégie pour le milieu marin » (2008/56/CE).

En dehors de la participation aux groupes de travail dédiés, à l'expertise de documents et à la préparation de notes de cadrage pour le Ministère, je contribue à l'évaluation de du statut des masses d'eau OSPAR au regard de l'eutrophisation via la mise en œuvre de la Procédure Commune (COMP - Comprehensive Procedure). Les résultats de cette évaluation sont intégrés dans le bilan de qualité (OSPAR Quality Status Report) établi pour l'ensemble des thématiques.

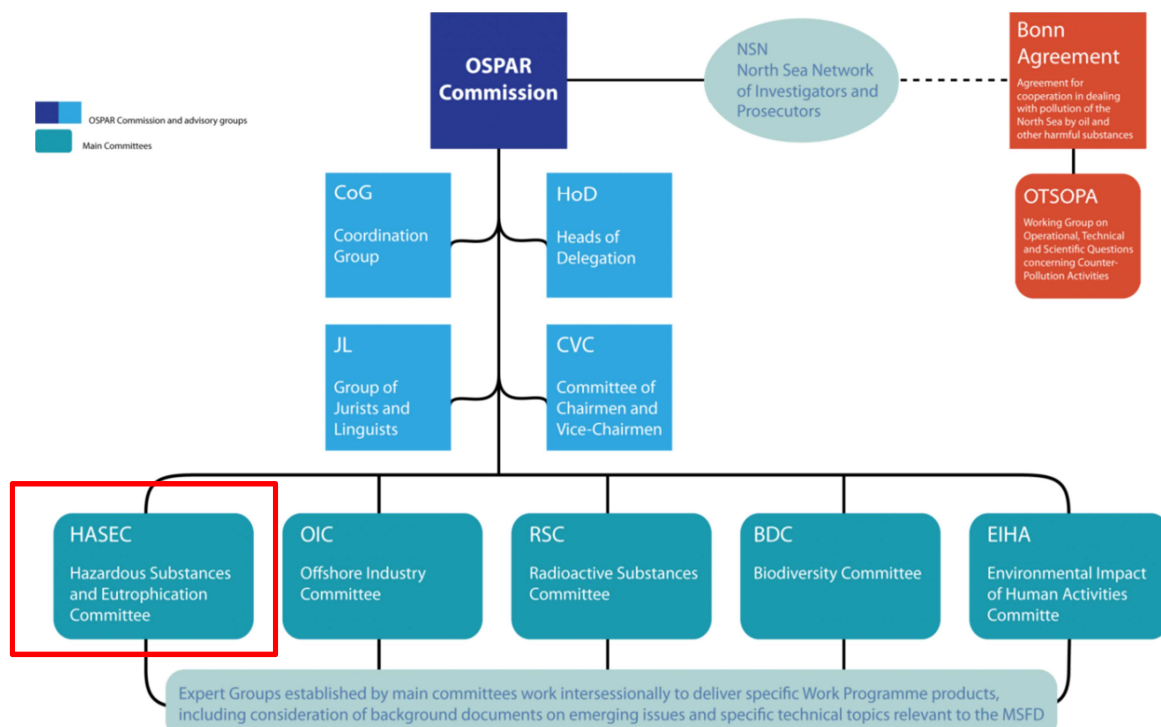


Figure A1-F18. Organisation de la Commission OSPAR. Cadre rouge : Groupe HASEC (Contaminants Chimiques et Eutrophisation) à l'origine du groupe inter-sessionnel ICG-EUT auquel je participe au titre de mon expertise sur l'eutrophisation.

La troisième application de la Procédure Commune (COMP3) porte sur les résultats acquis au cours de la période 2006-2014 pour l'ensemble des masses d'eau Manche et Atlantique (Figure A1-F19) (Lefebvre et Devreker, 2016 - **R-108**). Bien que notre évaluation ait porté sur les zones Manche et Atlantique, nous focaliserons l'analyse des résultats de notre évaluation sur la zone du bassin Artois-Picardie, zone d'emprise de mon laboratoire, afin de mieux comprendre les enjeux environnementaux et par conséquent ma stratégie de recherche régionale qui s'est ensuite déclinée à d'autres zones géographiques. Ainsi, les masses d'eau OSPAR concernées par l'évaluation sont au nombre de deux. Elles correspondent à la fusion de masses d'eau DCE (Tableau A1-T4).

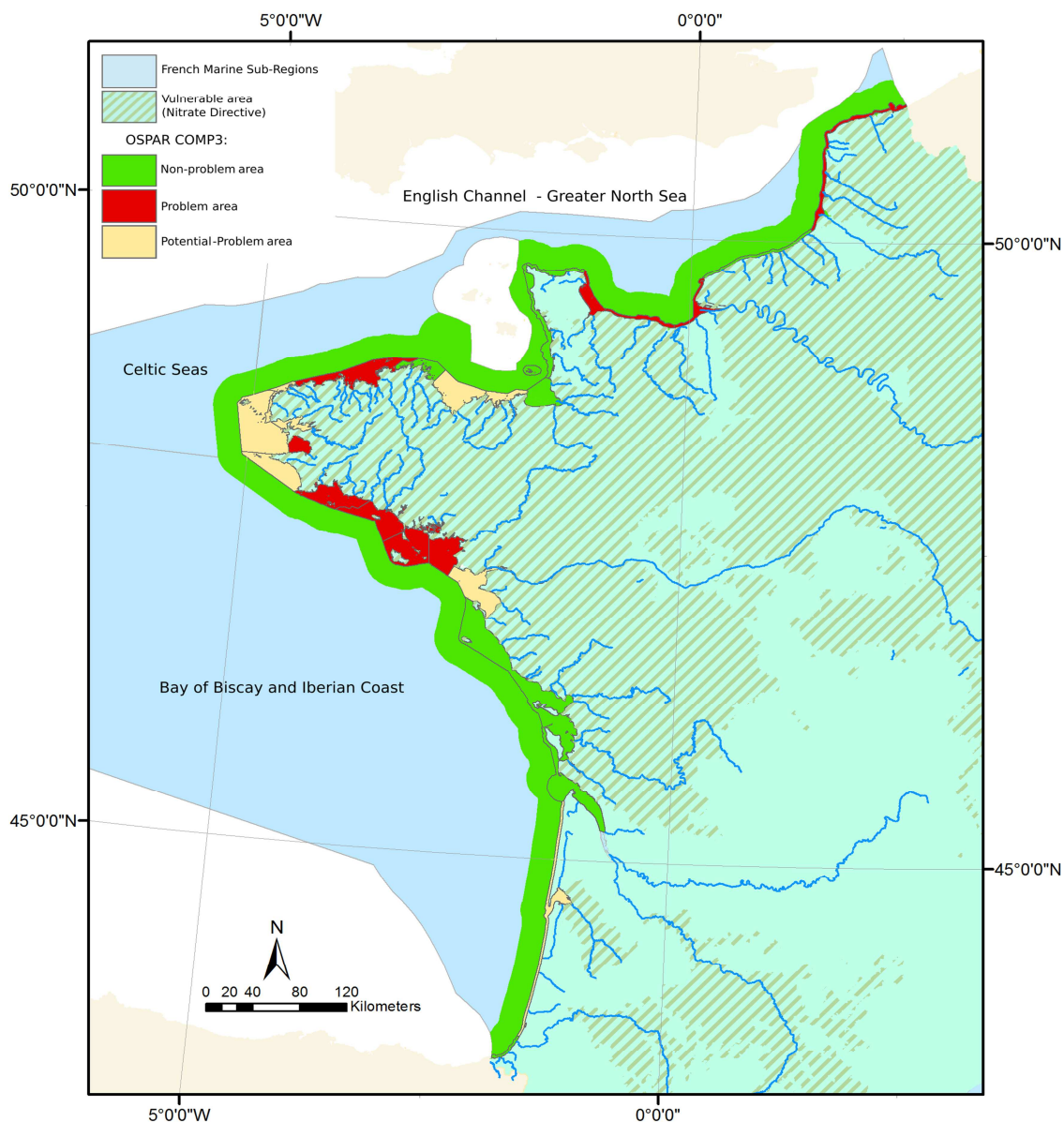


Figure A1-F19. Résultats de la troisième application de la Procédure Commune OSPAR d'évaluation de l'état d'eutrophisation à l'échelle des façades Manche et Atlantique. Classification en zone à problème (PA - Problem Area), zone à problème potentiel (PPA - Potential Problem Area) et zone sans problème (NPA - Non Problem Area).

Tableau A1-T4. Description des zones OSPAR et correspondance avec les masses d'eau DCE à l'échelle du bassin Artois-Picardie.

N°	Zones OSPAR	Masses d'eau DCE
1	Dunkerque et Calais	AC01, AC02
2	Boulogne, Canche, Authie and Somme	AC03, AC04, AC05, AT01

L'évaluation est basée sur des métriques regroupées en trois catégories (Tableau A1-T5).

Tableau A1-T5. Paramètres harmonisés d'évaluation de la Procédure Commune OSPAR.

<p>Category I Causative factors; Degree of nutrient enrichment</p> <p>1 Riverine Inputs of total N and P and Direct Discharges High input and/or increasing trends (compared with previous years)</p> <p>2 Winter concentrations of dissolved inorganic nitrogen and phosphorus Elevated levels (defined as concentrations >50% above the salinity-related or area-specific background concentrations) <i>DIN (normalized at salinity 33) elevated levels (>29 $\mu\text{mol.l}^{-1}$), DIP not used by France</i></p> <p>3 Winter N/P ratio (Redfield N/P = 16) Elevated levels (>25) <i>Criteria not used by France</i></p>
<p>Category II Direct effects of nutrient enrichment (during growing season)</p> <p>1 Maximum and mean chlorophyll a concentration Elevated levels (defined as concentrations >50% above the offshore or historic background concentrations) <i>90th percentile is calculated from data for March to October (inclusive)</i> <i>Values compared to a limit which depends on the type of water mass considered:</i> - Atlantic and Channel coastal and transition waters: 10 mg/m³ - North Sea coastal and transition waters: 15 mg/m³ <i>Elevated levels: P90 > limit</i></p> <p>2 Region or area-specific phytoplankton indicator species Elevated levels (and increase in duration) <i>Percentage of samples with at least one bloom defined by category and taxon size:</i> - small: 250 000 cells.l⁻¹ (unicellulars < 20μm without chain) - large: 100 000 cells.l⁻¹ (colonial species < 20μm + sp. > 20μm) <i>Elevated levels > 40% of samples above reference abundances</i></p> <p>3 Macrophytes, including macroalgae (region specific) Trend from long-lived species to short-lived species (e.g. <i>Ulva</i>) <i>Elevated levels: depends of the green tide types and the proportion of potentially colonisable substrate</i></p>
<p>Category III Indirect effects of nutrient enrichment (during growing season)</p> <p>1 Degree of oxygen deficiency Decreased levels (< 2 mg/l: acute toxicity; 2 – 6 mg/l: deficit) <i>10th percentile calculated from data for June to September (inclusive) for surface and sea bed samples</i> <i>Decreased levels: P10 < 3mg.l⁻¹</i></p> <p>2 Changes and kills in zoobenthos and fish kills Kills (related to oxygen deficit or toxic algae) Long-term changes in biomass and zoobenthos species composition <i>Criteria not used by France</i></p> <p>3 Organic carbon/organic matter Elevated levels (related to III.1) (concerning sedimentation areas) <i>Criteria not used by France</i></p>
<p>Category IV Other possible effects of nutrient enrichment (during growing season)</p> <p>1 Algal toxins (DSP/PSP events) Incidence (related to II.2) <i>The indicator is the number of months with toxicity (include the ASP in addition to DSP/PSP)</i> <i>Elevated levels: Indicator > 2</i></p>

Les données que nous avons utilisées proviennent de la base de données Quadrigé2 pour les paramètres physico-chimiques et biologiques de base, de la base du CEVA (Centre d'Evaluation et de Valorisation des Algues) pour les macro-algues, des Agences de l'Eau et des DREAL (Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) ainsi que du projet EMOSEM ([http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2\[CODE\]=ANR-12-SEAS-0005](http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2[CODE]=ANR-12-SEAS-0005)) pour les nutriments.

Le résultat final de la COMP3 permet donc de classer les zones OSPAR N°1 et N°2 comme zones à problèmes au regard de l'eutrophisation (Tableaux A1-T6, A1-T7 et A1-T8).

Tableau A1-T6. Résultat de la troisième application de la Procédure Commune OSPAR par catégorie pour la zone N°1 – Dunkerque et Calais.

Category	Assessment Parameters	Description of Results	Score (+ - ?)	Aggregated confidence rating
Degree of Nutrient Enrichment (I)	Riverine inputs and direct discharges of total N and total P	- in 2006-2010 (-3.4% of kgN/day per year)	-	p. value of 0.001
	Winter DIN and/or DIP concentrations	? in 2006-2014	?-	
	Winter N/P ratio (Redfield N/P = 16)			
Direct Effects (II)	90 th percentile, maximum and mean chlorophyll <i>a</i> concentration	+ in 2006-2014	---+---+	
	Area-specific phytoplankton indicator species	+ in 2006-2014	+++++++	
	Macrophytes including macroalgae			
Indirect Effects (III)	Oxygen deficiency	- in 2006-2014	-----	
	Changes/kills in zoobenthos and fish kills			
	Organic carbon/organic matter			
Other Possible Effects (IV)	Algal toxins (DSP/PSP/ASP mussel infection events)	- in 2006-2014	-----	

Tableau A1-T7. Résultat de la troisième application de la Procédure Commune OSPAR par catégorie pour la zone N°2 – Boulogne-sur-Mer, Canche, Authie et Somme.

Category	Assessment Parameters	Description of Results	Score (+ - ?)	Aggregated confidence rating
Degree of Nutrient Enrichment (I)	Riverine inputs and direct discharges of total N and total P	- in 2006-2010 (trend not significant)	-	p. value of 0.34
	Winter DIN and/or DIP concentrations	+ in 2006-2014	++?-	
	Winter N/P ratio (Redfield N/P = 16)			
Direct Effects (II)	90 th percentile, maximum and mean chlorophyll <i>a</i> concentration	+ in 2006-2014	+++++ +	
	Area-specific phytoplankton indicator species	+ in 2006-2014	+++++ +	
	Macrophytes including macroalgae			
Indirect Effects (III)	Oxygen deficiency	? in 2006-2014	?-----	
	Changes/kills in zoobenthos and fish kills			
	Organic carbon/organic matter			
Other Possible Effects (IV)	Algal toxins (DSP/PSP/ASP mussel infection events)	- in 2006-2014	-----	

Tableau A1-T8. Résultat final de la troisième application de la Procédure Commune OSPAR pour les zones N°1 et N°2.

OSPAR Zones	OSPAR COMP3 Classif. (2006-2014)	WFD Areas	WFD Quality status (2006-2011)
1	PA (Chla + Phyto.)	FRAC01	Moderate (Phyto.)
		FRAC02	Moderate (Phyto.)
2	PA (Nut.+ Chla + Phyto.)	FRAC03	Bad (Phyto + Macro. Sub.)
		FRAC04	Moderate (Phyto.)
		FRAC05	Moderate (Phyto.)
		FRAT01	Mediocre (Phyto.)

BILAN DE L'ÉVALUATION OSPAR

Les zones OSPAR N°1 et N°2 sont classées comme **des zones à problème au regard de l'eutrophisation** (PA – Problem Area) selon les critères de la Procédure Commune. Les facteurs déclassants sont le phytoplancton et les macro-algues subtidales.

ANNEXE 2 : Principales caractéristiques des systèmes de mesures automatisées à haute fréquence.

(A) Station MAREL Carnot

Paramètre	Gamme	Incertitude
Température	- 5 à + 30 °C	0,1 °C
Conductivité	0 à 70 mS/cm	0,3 mS/cm
Oxygène dissous	0 à 20 mg/L	0,2 mg/L
PH	6,5 à 8,5	0,2
Turbidité	0 à 4000 NTU	10 %
Fluorescence	0 à 150 FFU	10 %
Nitrate	0,1 à 100 µmol/L	5 %
Phosphate	0,1 à 100 µmol/L	5 %
Silicate	0,1 à 100 µmol/L	5 %

(B) Sonde multiparamètre NKE MP6

Paramètre	Précision	Résolution	Gamme
Pression	0,06 m	0,006 m	0 à 20 m
Température	0,0005 °C à 0°	0,05 °C	-5 à + 35 °C
Conductivité	0,05 mS/cm	0,0012 mS/cm	0 à 70 mS/cm
Oxygène dissous	5 %	0,01 %	0 à 16 mg/l
Fluorescence	1 % gamme	0,08 µg/l	0 à 500 µg/l
Turbidité	2 % gamme	0,0006 NTU	0 à 500 NTU

(C) Pocket Ferry Box (4H-Jena)

Nom de capteurs	Paramètres mesurés	Gamme	Incertitude/Précision
Meinsberg	pH	0 à 14	0,05
	Température	-5 à 80 °C	0,01 °C
Optode	Oxygène dissous	0 à 500 µmol.L ⁻¹	< 0,1 µmol.L ⁻¹
Conductivité	Salinité	0 à 75 mS.cm ⁻¹	0,05 mS.cm ⁻¹
	Température	-5 à 40 °C	0,01 °C
Cyclops	Matière organique dissoute colorée (CDOM)	0 à 2500 ppb	0,2 ppb

(D) Sonde multiparamètre YSI 6600 V2

Oxygène dissous % Saturation	Plage	0 à 500%
	Résolution	0,1%
	Précision	0 à 200%:±2% de la lecture
Oxygène dissous mg.L⁻¹	Plage	0 à 50mg/l
	Résolution	0,01mg/l
	Précision	0 à 20mg/l:±2% de la lecture ou 0,2mg/l
Conductivité	Plage	0 à 100 mS/cm
	Résolution	0,001 à 0,1mS/cm
	Précision	±0,5% de la lecture + 0,001mS/cm
Température	Plage	-5 à +50°C
	Résolution	0,01°C
	Précision	±0,15°C
Salinité	Plage	0 à 70 ppt (parties pour mille)
	Résolution	0,01 ppt
	Précision	±1% de la lecture ou 0,1 ppt, la valeur la plus grande
Turbidité	Plage	0 à 1 000NTU
	Résolution	0,1NTU
	Précision	±2% de la lecture ou 2NTU, la valeur la plus grande
	Immersion	61 m
Chlorophylle	Plage	0 à 400 µg/l
	Résolution	0,1 µg/l Chl; 0,1% pleine échelle (PE)
	Immersion	1 m

3. Curriculum vitae

3.1. État civil

Lefebvre Alain, José, Camille

46 ans, né le 5 mars 1970 à Calais (Pas-de-Calais).

Nationalité française.

Marié, 2 enfants.

Adresse personnelle : 56, rue Jules César - 62200 Boulogne-sur-Mer.

Adresse professionnelle : Ifremer - Laboratoire Environnement et Ressources, 150 quai Gambetta, BP 699, 62321 Boulogne-sur-Mer.

Téléphones professionnels : 03.21.99.56.22 / 06.73.58.97.52

Messageries électroniques : alain.lefebvre@ifremer.fr et littoral.lerbl@ifremer.fr

3.2. Formation et titres universitaires

Juillet 1992	DEUG B2, option biologie - biogéochimie, Université des Sciences et technologies de Lille.
Juillet 1993	Licence de Biologie, Université des Sciences et technologies de Lille.
Juillet 1994	Maîtrise de Biologie des Organismes et de Populations, mention écologie, Université des Sciences et technologies de Lille.
Février 1997	Diplôme d'Étude Approfondie en océanologie biologique et environnement marin, Université de Lille 1.
Décembre 1999	Doctorat de l'Université de Lille 1 en Environnement et Écosystèmes Marins et Continentaux. Station Marine de Wimereux, UPRES A 8013 CNRS. Mention très honorable avec les félicitations du jury. Soutenance le 14 décembre 1999.

Titre : Reproduction d'une espèce benthique à phase larvaire planctonique, l'ophiure *Ophiothrix fragilis* (Echinoderme), dans un système côtier à fort hydrodynamisme (Déroit du Pas-de-Calais) : interactions physique-biologie et implications dans le fonctionnement global de l'écosystème.

Composition du jury :

Pr. Jean-Claude Dauvin, Université de Lille 1 (Président du jury).

Pr. John Lawrence, Université de Floride du sud (Rapporteur).

Pr. Christian Retière, Museum d'Histoire Naturelle (Rapporteur).

Dr. Eric Thiébaud, MCF, Université de Paris VI (Examinateur).
Pr. Dominique Davoult, Université du Littoral Côte d'Opale (Directeur de thèse).

3.3. Expériences professionnelles avant recrutement à l'Ifremer

Recherche

- 1993/1994 Service National Environnement à la Station Marine de Wimereux, UPRES A 8013 CNRS. 10 mois. Responsable : Pr. D. Davoult.
Contribution à l'étude de la communauté des fonds caillouteux à épibiose sessile de la Manche orientale (métabolisme, reproduction, couplages benthopélagiques).
- 1994/1995 Mémoire du Diplôme d'Études Approfondies (DEA) à la Station Marine de Wimereux, UPRES A 8013 CNRS.
« Reproduction d'*Ophiothrix fragilis* (Échinoderme ; Ophiuroïde) en mer mégatidale (Manche) : évolution qualitative et quantitative de la maturation gonadique et distribution larvaire ».
- 1996/1999 Doctorat en Environnement et Écosystèmes Marins et Continentaux, Station Marine de Wimereux, UPRES A 8013 CNRS (Directeur : Pr. D. Davoult).

Enseignements

- 01/11/1998 au 31/08/2000 Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER) pour l'Université du Littoral Côte d'Opale.
- Année universitaire 2000/2001 Chargé d'enseignement vacataire pour l'Université du Littoral Côte d'Opale (18 h eq. TD).

3.4. Responsabilités administratives

Le laboratoire Environnement et Ressources (LER-BL) du centre Ifremer Manche Mer du Nord fait partie de l'Unité Littorale (UL), elle-même rattachée au département Océanographie et Dynamique des Écosystèmes (ODE) qui constitue l'un des quatre Départements de l'Ifremer (Figure I).

Adjoint au chef de laboratoire depuis mon recrutement à l'Ifremer en juin 2000, j'ai pris la responsabilité de chef de laboratoire en novembre 2005. Ce mandat est toujours d'actualité. Il consiste en :

- la représentation interne comme externe du laboratoire,
- le pilotage des partenariats scientifiques ainsi que des propositions d'évolutions de ceux-ci,
- l'organisation des réunions plénières de laboratoire,
- la réalisation des entretiens annuels,
- l'élaboration du budget prévisionnel,
- l'analyse des besoins et propositions de recrutements,
- l'encadrement et le suivi du personnel temporaire,

- l'appui aux chefs de projets pour les choix scientifiques, techniques et financiers,
- la gestion des plates-formes techniques et du parc instrumental,
- l'interfaçage avec les services fonctionnels des centres pour tous les besoins du laboratoire,
- la gestion des dépenses déléguées au laboratoire,
- le maintien de la disponibilité opérationnelle du laboratoire à hauteur des engagements pris,
- la mise en œuvre du système de management de la qualité Ifremer conformément au système de qualité ISO 9001.

Département Océanographie et Dynamique des Écosystèmes

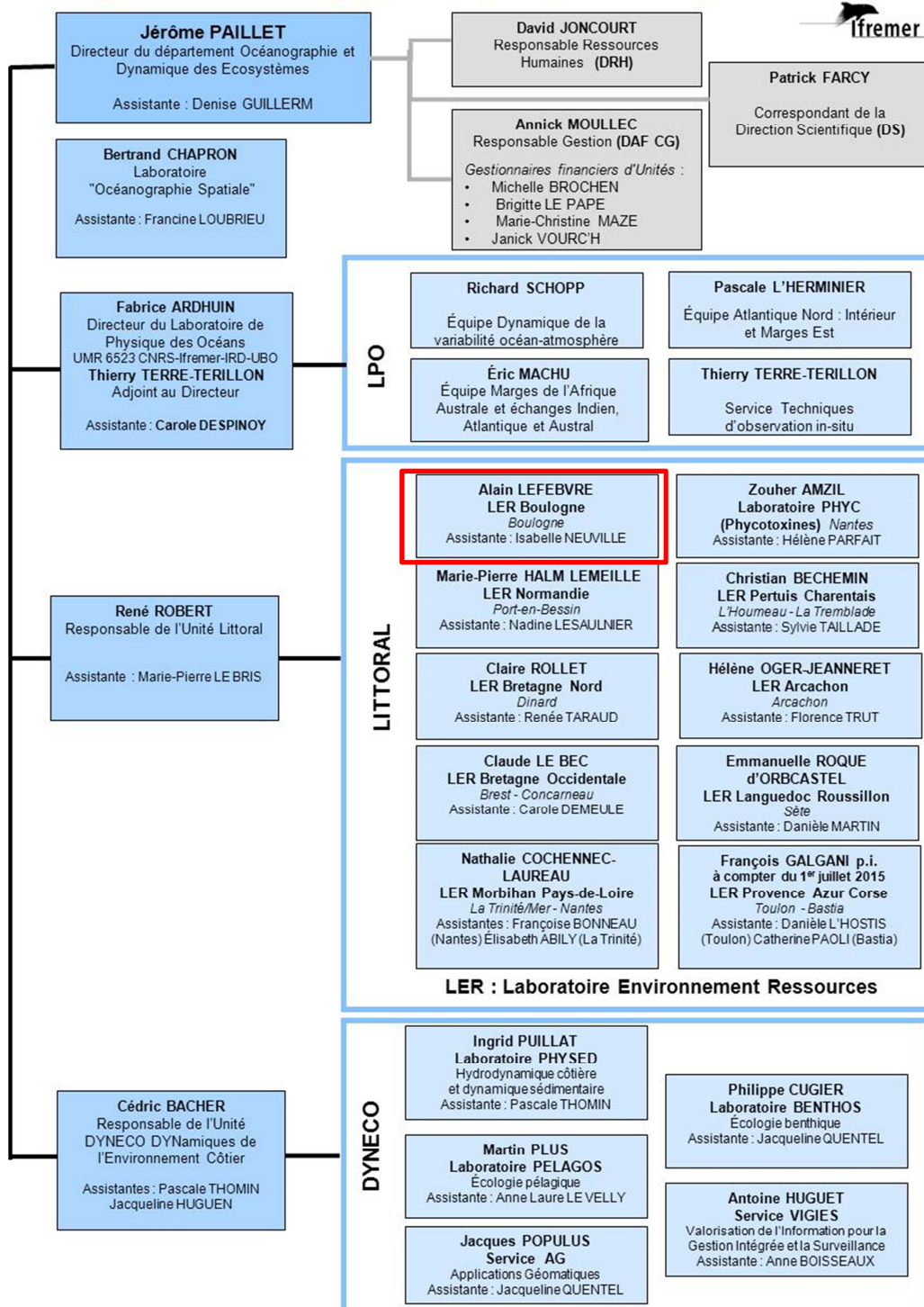


Figure I. Organigramme en date du 24/09/2015 du Département Océanographie et Dynamique des Écosystèmes (ODE) de l'Ifremer et position hiérarchique d'Alain Lefebvre, chef du laboratoire Environnement et Ressources du centre Ifremer Manche Mer du Nord (cadre rouge).

3.5. Expertises techniques et scientifiques

3.5.1. Responsabilités

Correspondant Statistiques du Laboratoire Environnement et Ressource de Boulogne-sur-Mer (LER-BL) depuis 2000.

Coordinateur de la surveillance écologique et halieutique du Centre National de Production d'Électricité de Gravelines pour le projet Impact des Grands Aménagements (IGA) de l'Ifremer entre 2002 et 2008.

Coordinateur de l'axe « Bilan des apports en sels nutritifs : leur rôle dans le déclenchement et l'extension du bloom de la prymnésiofycée *Phaeocystis sp.* en Manche orientale » du Contrat de Plan État Région CPER 2000-2006 « Étude et observation de l'écosystème côtier de la Manche orientale : le bloom de *Phaeocystis* et ses effets sur l'écosystème ».

Co-coordonateur (avec D. Purdie, Southampton University, UK) du thème 1 « extension sud-nord et suivi temporel » du chantier PNEC 2003-2007 « Manche orientale - sud mer du Nord », Programme « Déterminisme du bloom de *Phaeocystis* et ses conséquences sur l'écosystème Manche orientale- Sud mer du Nord ».

Coordinateur du réseau Ifremer / Agence de l'Eau Artois Picardie intitulé « Suivi Régional des Nutriments » (SRN) depuis 2002.

Responsable scientifique du système instrumenté de mesures à haute fréquence MAREL Carnot depuis 2002.

Secrétaire du Comité Scientifique et Technique de la Surveillance (CSTS), devenu le Comité d'Orientation de la Recherche et de la Surveillance, entre 2002 et 2010.

Membre du groupe de travail Eutrophication Task Group (ETG), devenu l'Intersessional Correspondance Group on Eutrophication (ICG-EUT), de la convention d'Oslo et de Paris (OSPAR) depuis 2002.

Coordinateur du projet LITEAU II 2002-2006 (Axe 2.1. Définitions des états écologiques) intitulé « Modélisation intégrée des transferts de nutriments depuis les bassins versants de la Seine, la Somme et l'Escaut jusqu'en Manche-Mer du Nord ». Partenariat : Ifremer - ESA-ULB : Écologie des Systèmes Aquatiques, Université Libre de Bruxelles (Be) - UMR 7619 Sisyphe, CNRS-Université Pierre & Marie Curie.

Correspondant régional Ifremer pour la mise en œuvre de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE - 2000/60/CE) pour les masses d'eau côtières et de transition du littoral Nord-Pas-de-Calais-Picardie et pour le district international de l'Escaut depuis 2007.

Coordinateur Ifremer du projet InterReg IVa 2 Mers DYMAPHY « Développement d'un système d'observation DYnamique pour la détermination de la qualité des eaux MARines, basé sur l'analyse du PHYtoplancton » (Porteur du projet : Université du Littoral Côte d'Opale) (2010-2013).

Membre du comité de suivi du projet InterReg IVa 2 Mers ISECA « Information System on the Eutrophication of our Coastal Areas » (2010-2013).

Membre du Groupe de travail « Eaux littorales » de l'Agence de l'Eau Artois Picardie.

Membre du Comité Scientifique du GIS « Campus de la Mer » depuis 2014.

Membre du GDR d'animation et d'action CNRS/Ifremer 2011-2017 PHYCOTOX : Des micro-algues aux risques pour l'homme et l'écosystème (Responsables : Hélène Hégaret (CR2 CNRS, INEE, Section 30) et Philipp Hess (CR3 IFREMER). Participation à l'axe 2. Écologie, diversité, physiologie et modélisation des HABs et implications dans la production de toxines.

Membre de la Commission Locale d'Évaluation des demandes de campagnes pour le NO CNRS-INSU « Sépia II » depuis 2014.

Responsable scientifique du projet Ifremer « Numérisation du phytoplancton et traitement par ZooPhytoimage » depuis 2014.

Co-coordonateur (avec le CNRS) de l'axe 1 « Observation et évaluation de l'environnement marin » du Contrat de Plan État Région MARCO 2014-2020 « Recherches marines et littorales en Côte d'Opale : des milieux aux ressources, aux usages et à la qualité des produits aquatiques ».

Chef de file pour le descripteur 5 Eutrophisation de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) entre 2010 et 2015 – Expert référent pour l'Ifremer et auprès du Ministère de l'Environnement pour cette thématique.

Pilote scientifique pour le volet Eutrophisation de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) depuis 2015 – Expert référent pour l'Ifremer et auprès du Ministère de l'Environnement pour cette thématique.

Co-pilote scientifique (avec le CNRS-Résomar) pour le volet Habitat Pélagique de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) depuis 2015 – Expert référent pour l'Ifremer et auprès du Ministère de l'Environnement pour cette thématique.

Pilote scientifique pour l'Ifremer de la tâche JRAP#1 (Pelagic Biodiversity – biodiversity of plankton, harmful algal blooms and eutrophication), du Work Package 4 (Valorisation through applied joint research) du projet H2020 JERICO-Next (2015-2019).

Membre du Groupe de Travail « mesures en continu » du groupe de réflexion pour la modernisation du navire de recherche halieutique Thalassa (Ifremer-Genavir) (depuis octobre 2015).

Mandat d'expert milieu marin & eutrophisation dans le cadre du travail d'expertise scientifique collective (ESCo) relative à l'Eutrophisation coordonnée par le CNRS (2015-2016) (Lettre de mission INEE-2015-D-169 du 17/12/2015).

3.5.2. Bilan des expertises

Les avis et expertises recensés ci-dessous ne concernent que les réponses formelles en réponse aux demandes émises par les ministères de tutelles de l'Ifremer et leurs services décentralisés. Cependant, d'autres avis et expertises, au sens plus large, peuvent être émis sous différentes formes (rapports, courriers, interventions dans des comités, des commissions, des groupes de travail) et en réponse à des demandes plus larges (pollutions, eutrophisation, mortalités, animation de groupe de discussions, commission de suivi sanitaire,...). Ce deuxième type d'avis et d'expertises ne fera pas l'objet d'un bilan exhaustif.

Participation à des groupes de travail

- Groupe de travail ETG (Eutrophication) OSPAR, 7-9/10/2003, Londres.
- Groupe de travail ETG (Eutrophication) et ETG / MON (Monitoring) OSPAR, 2-5/11/ 2004, Londres.
- Groupe de travail ETG (Eutrophication) OSPAR, 12-14/10/2005, Londres.
- Groupe de travail EUC (Eutrophication) OSPAR, 5-9/12/2005, Bruxelles.
- Groupe de travail EUC 1 & 2 (Eutrophication) OSPAR, 11-12/10, Londres et 12-14/12/2006, La Haye.
- Groupe de travail EUC (Eutrophication) OSPAR, 1-3/04/2008, Stockholm.
- Groupe de travail EMMA (Indicators Comparison), EEA, 17-18/11/2008, Copenhague.
- Groupe de travail EUC 1 & 2 (Eutrophication) OSPAR, 2-5/03/2009, Copenhague et 1-4/12/2009, Londres.
- Réunion des chefs de file pour les descripteurs de la DCSMM, 28/05/2010, Paris.
- Groupe de travail ICG-EUT (Eutrophication) OSPAR, 19-20/01/2011, Berlin.
- Réunion des chefs de file pour les descripteurs de la DCSMM, 5-6/07/2011, Paris.
- Comité de Bassin de l'Agence de l'Eau Artois Picardie, 01/07/2011, Douai.
- Groupe de travail « Eaux littorales » de l'Agence de l'Eau Artois Picardie. Élaboration du X^{ième} programme cadre de l'AEAP, 26/10/2011, Douai.
- Groupe de travail DCSMM - Bon État Ecologique (GT BEE), 5-6/01/2012, Paris.
- Groupe de travail DCSMM - Bon État Ecologique (GT BEE), 9-10/02/2012, Paris.
- Groupe de travail HASEC (Eutrophication & Contaminants) OSPAR, 23-24/10/2012, Ispra.
- Groupe de travail ICG-EUT (Eutrophication) OSPAR, 5-7/11/2012, Göthenburg, Suède.
- Sous-groupe thématique Biodiversité Habitats DCSMM, 15/11/2012, Nantes.
- Groupe de travail "MSFD workshop on Eutrophication & Contaminants", 23-24/10/ 2012, Ispra.

- Comité de Coordination Technique (CoCoTech) du Programme de Surveillance de la DCSMM. Pilotage DEB/Ifremer. 30/01/2013, Paris.
- Réunion DCSMM inter-thématique « Habitats Pélagiques », 01/02/2012, par vidéoconférence.
- Réunion DCSMM - Atelier Pelagos, 07/2/2013, Gif sur Yvette.
- Groupe de Travail DCSMM – Programme de Surveillance (GT PdS) : présentation du livrable 5 du chantier 2 : Propositions scientifiques et techniques de paramètres et de dispositifs de suivis associés pour le thème 5 - Eutrophisation, 2-3/4/2013, Paris.
- Groupe de Travail DCSMM - Programme de Surveillance (GT PdS) : Ateliers d'experts pour la finalisation du chantier 2 en lien avec le rendu du livrable 5 (propositions scientifiques et techniques de paramètres et de dispositifs de suivis associés), 12-13/06/2013, Paris.
- Groupe de Travail DCSMM - Programme de Surveillance (GT PdS), 10-11/10/2013, Paris.
- Groupe de travail WK SERIES ICES, 15-18/10/ 2013, Copenhague.
- Groupe de travail ICG-EUT (Eutrophisation) OSPAR. Convenor on Product 2A “Joint trend assessment – marine parameters” during the OSPAR ICG-EUT Workshop, 3-6/02/2014, Paris.
- Groupe de travail DCSMM - Bon État Ecologique (GT BEE), 19/02/2014, Paris.
- Groupe de travail FW2, OSPAR ICG-COBAM : Production of Phytoplankton. Par vidéoconférence, 20/02/2014.
- Comité de Coordination Technique (CoCoTech) DCSMM, 09/04/2014, Paris.
- Groupe de Travail DCSMM - Programme de Surveillance (GT PdS), 03/06/2014, Paris.
- Groupe « Eaux Littorales DCE » - Révision du programme de surveillance DCE, réseau de mesures des flux de nutriments pour le bassin Artois-Picardie, 01/12/2014, Boulogne-sur-Mer.
- Réunion des chefs de file BEE pour la mise en œuvre de la nouvelle organisation DCSMM (Pilotes scientifiques, responsables de programmes, bilan des actions communautaires et régionales en cours, Programme d’acquisition de connaissances, préparation du WG GES), 20/01/2015, Paris.
- Groupe de travail ICG-EUT (Eutrophication) OSPAR, 26-28/01/2015, Londres.
- Groupe de travail DCSMM - Bon État Ecologique (GT BEE) : Pressions (Descripteurs 4, 5, 8, 9), 10/02/2015, Paris.
- Groupes de travail du colloque de restitution final du projet DG Env « Joint Monitoring Programme for the North Sea and the Celtic Sea », 18-19/03/2015, Utrecht.
- Groupe de Travail DCSMM - Programme de Surveillance (GT PdS), 15/04/2015, Paris.
- Groupe de travail DCSMM - Bon État Ecologique (GT BEE), 16/04/2015, Paris.
- Comité Scientifique du GIS Campus de la Mer, 20/05/2015, Boulogne-sur-Mer.
- Atelier Indicateur pour le Parc Naturel Marin EPMO - Groupe Qualité de l’eau, phytoplancton et zooplancton, 27/05/2015, Boulogne-sur-Mer.
- Séminaire Ifremer « Nouvelle organisation du pilotage scientifique DCSMM », 30/09-01/10/2015, Nantes.
- Groupe de travail DCSMM - Bon État Ecologique (GT BEE), 09/10/2015, Paris.

- Lefebvre A., 2015. Atelier technique du RESOMAR. Mesure Haute Fréquence dans les réseaux SOMLIT et HOSEA. Qualité du procédé de mesure et qualification de la donnée. Animateur de l'atelier 1 – Les processus d'intérêt et les grandeurs associés.
- Lefebvre A., 2015. Colloque annuel du RESOMAR. Ateliers Environnement Littoral et Pélagos. 16-18/11/2015, Montpellier.
- Lefebvre A., 2015. Journée Coriolis côtier – GT : La mesure *in situ* côtière à l'échelle nationale. 19/11/2015, Montpellier.
- Lefebvre A., 2015. Groupe de Travail « Mesures en route » (contexte de la jouvence du navire de recherche Thalassa). 21 octobre 2015 (Participants : Ifremer, IRD, Station Biologique de Roscoff).
- Daniel A., Lefebvre A., Devreker D., 2015. Réunion DEB/Ifremer/Irstea/Onema de préparation du Working Group EcoStat de la Directive Cadre sur l'Eau, 18-19 novembre 2015, Berlin.
- Lefebvre A., 2016. Expert Eutrophisation auprès de la DEB pour le groupe ICG-EUT OSPAR. Réunion du groupe de travail du 25 au 27 janvier 2016, Malaga, Espagne.
- Lefebvre A., 2016. Expertise Collective sur l'Eutrophisation (ESCo). Réunion du groupe 2 : Cadre réglementaire. Coord. Doussan I., 20 janvier 2016.
- Lefebvre A., 2016. Coordination de la réunion du groupe d'experts régionaux pour expertises des résultats de la troisième application de la Procédure Commune OSPAR (Experts : Menet-Nedellec F., Devreker D., Trut G., Cochenec N., Le Bec C.). 9 février 2016.
- Lefebvre A., Baudrier J., Devreker D., 2016. Priorisation des tâches liées au Programme de Surveillance de la DCSMM lors des campagnes halieutiques. 9 février 2016.
- Lefebvre A., 2016. Réunion du GT BEE / Expertise DCSMM Convocation DEB, coordination nationale DCSMM - Participation au titre du rôle de pilote scientifique Eutrophisation et co-pilote, avec le CNRS, pour les Habitats Pélagiques. 22 février 2016, La Défense.
- Lefebvre A., 2016. Expertise Collective sur l'Eutrophisation (ESCo). Réunion du groupe 3 : Analyse et évaluation de l'eutrophisation en France et dans le monde. Coord. Mostajir B. (Univ. Montpellier) et Chauvin C. (Irstea), 08 et 09 mars 2016.
- Lefebvre A., Devreker D., 2016. Demande d'étude de documents de la commission OSPAR : feedback sur les assessment sheets pour l'Intermediate Assessment 2017. Demande de Marion Besançon, Chargée de mission fonds marins – pollution, Bureau des milieux marins, Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, DGALN/DEB/LM1, 28 juin 2016.

Rédaction d'Avis & Expertises

AE-1. Piriou J.-Y., Lefebvre A., 2006. Observations et avis, pour la DDAF du Pas-de-Calais, du dossier de demande d'autorisation du projet de nouveau système d'assainissement et de station d'épuration de Montreuil-sur-Mer. Ifremer LER-BL/06.042, janvier 2006, 2 p.

AE-2. Alzieu C., Lefebvre A., 2006. Observations et avis, pour le Service Maritime du Nord, du dossier de rengraisement du « Banc aux phoques » par les produits de dragage de la passe de Zuydcoote. Ifremer LER-BL/06.044, février 2006, 2 p.

- AE-3.** Dreves L., Lefebvre A., 2006. Expertise et avis, pour la Préfecture du Pas-de-Calais, du dossier de demande d'autorisation de dragages d'entretien du port de Boulogne-sur-Mer. Ifremer D/CMMN/06-165, mai 2006, 3 p.
- AE-4.** Dreves L., Lefebvre A., 2006. Expertise et avis, pour la Préfecture du Pas-de-Calais, du dossier de demande d'autorisation de dragages d'entretien du port de Calais. Ifremer LER-BL/06-168, mai 2006, 4 p.
- AE-5.** Lefebvre A., 2006. Observations et avis, pour la Direction Interdépartementale des Affaires Maritimes du Nord-Pas-de-Calais-Picardie, concernant l'étude prospective des zones potentielles de développement des cultures marines dans le département de la Somme. Ifremer LER-BL/06.213, juillet 2006, 3 p.
- AE-6.** Lefebvre A., 2006. Remarques, pour la Direction Départementale des Affaires Maritimes du Nord, sur le projet d'arrêté et de cahier des charges aux demandes d'autorisation d'exploitation de cultures marines dans le cadre de la création de filières de moules au large de Zuydcoote. Ifremer LER-BL/06.214, juillet 2006, 2 p.
- AE-7.** Lefebvre A., 2006. Observations, pour la Direction Départementale des Affaires Maritimes, sur la pêche de la telline au sud du Pas-de-Calais. Ifremer LER-BL/06.216, juillet 2006, 1 p.
- AE-8.** Dreves L., Lefebvre A., 2006. Commentaires et observations, pour la CCI de Boulogne sur Mer, du dossier d'aménagement d'un terminal roulier au port de Boulogne-sur-Mer. Ifremer LER-BL/06-224, juillet 2006, 3 p.
- AE-9.** Dreves L., Lefebvre A., 2006. Expertise et avis, pour la Mission Inter-Services de l'Eau du Pas-de-Calais, du dossier d'aménagement d'un terminal roulier au port de Boulogne-sur-Mer. Ifremer LER-BL/06-237, août 2006, 3 p.
- AE-10.** Lefebvre A., 2007. Remarques, pour la Mairie de Sangatte, sur le rôle consultatif de l'Ifremer pour tout dossier relatif à la conchyliculture. Ifremer LER-BL/07.005, janvier 2007, 1 p.
- AE-11.** Lefebvre A., 2007. Recommandations, pour la Direction Départementale de l'Équipement du Pas-de-Calais, pour l'élaboration du porter à connaissance du SCOT de la Terre des 2 Caps. Ifremer LER-BL/07.014, janvier 2007, 2 p.
- AE-12.** Lefebvre A., 2007. Recommandations, pour la Direction Départementale de l'Équipement du Pas-de-Calais, pour l'élaboration du porter à connaissance du SCOT du Calaisis. Ifremer LER-BL/07.015, janvier 2007, 2 p.
- AE-13.** Lefebvre A., 2007. Observations, pour la Direction Départementale de l'Équipement du Pas-de-Calais, sur la révision du PLU de la commune d'Escalles. Ifremer LER-BL/07.016, janvier 2007, 2 p.
- AE-14.** Lefebvre A., 2007. Observations, pour la Direction Départementale de l'Équipement du Pas-de-Calais, sur la révision du PLU de la commune d'Étaples. Ifremer LER-BL/07.017, janvier 2007, 2 p.
- AE-15.** Piriou J.-Y., Lefebvre A., 2007. Expertise et avis, pour la mission Inter-Services de l'Eau du Pas-de-Calais, du dossier de mise aux normes de la station d'épuration du Touquet. Ifremer LER-BL/07.051, février 2007, 4 p.
- AE-16.** Lefebvre A., 2007. Avis, pour la Communauté de Communes Mer & Terres d'Opale, au sujet d'un projet d'implantation de moutons prés-salés en Baie de Canche. Ifremer LER-BL/07.120, 1 p.
- AE-17.** Lefebvre A., 2007. Avis, pour la Direction Départementale des Affaires Maritimes du Nord, sur la création d'un lotissement de cultures marines au large de Leffrinckoucke/Zuydcoote. Ifremer LER-BL/07.133, mai 2007, 2 p.
- AE-18.** Lefebvre A., 2007. Avis, pour la Direction Régionale des Affaires Maritimes de Boulogne-sur-Mer, concernant le dossier d'agrément d'un établissement de purification et d'expédition de coquillages vivants au nom de M. Pascal Binet à Berck. Ifremer LER-BL/07.265, septembre 2007, 2 p.

- AE-19.** Lefebvre A., 2007. Observations, pour la Direction Départementale de l'Équipement du Pas-de-Calais, sur la révision du PLU de la commune d'Audinghen. Ifremer LER-BL/07.275, octobre 2007, 2 p.
- AE-20.** Lefebvre A., 2007. Commentaires et observations, pour la Direction Départementale des Affaires Maritimes du Nord, concernant le projet d'exploitation de filières de moules au large de Zuydcoote. Ifremer LER-BL/07.286, octobre 2007, 2 p.
- AE-21.** Delpech J.-P., Veron G., Lefebvre A., 2007. Avis, pour la Direction Départementale de l'Équipement de Seine-Maritime, au sujet de l'immersion de récifs artificiels à Etretat. Ifremer DC/MMN/2007.154, 5 p.
- AE-22.** Lefebvre A., 2008. Recommandations, pour la Direction Départementale de l'Équipement du Pas-de-Calais, pour l'élaboration du porter à connaissance du SCOT Boulonnais. Ifremer LER-BL/08.144, mai 2008, 2 p.
- AE-23.** Lefebvre A., Rauflet F., 2008. Avis, pour la Direction Régionale des Affaires Maritimes de Boulogne-sur-Mer, concernant le dossier d'autorisation d'exploitation de cultures marines situées sur le domaine public maritime devant les communes de Quend ou Saint-Quentin-en-Tourmont. Ifremer LER-BL/08.310, novembre 2008, 2 p.
- AE-24.** Lefebvre A., Rauflet F., 2008. Avis, pour la Direction Régionale des Affaires Maritimes de Boulogne-sur-Mer, concernant le dossier d'autorisation d'exploitation de cultures marines situées sur le domaine public maritime de la commune d'Ambleteuse. Ifremer LER-BL/08.339, décembre 2008, 2 p.
- AE-25.** Lefebvre A., 2009. Avis technique, pour la Direction Régionale des Affaires Maritimes de Boulogne-sur-Mer, concernant le dossier d'agrément des établissements de purification et d'expédition de coquillages vivants de Le Crotoy. Ifremer LER-BL/09.048, février 2009, 2 p.
- AE-26.** Lefebvre A., 2009. Mission d'expertise, pour la DDAF de la Somme et la Direction Régionale des Affaires Maritimes de Boulogne-sur-Mer, concernant une demande de reconnaissance liée à des mortalités dans des concessions mytilicoles à QUEND. Le 10 juillet 2009, Quend-Plage.
- AE-27.** Lefebvre A., 2009. Avis, pour la Direction Régionale des Affaires Maritimes de Boulogne-sur-Mer, concernant le dossier de demande d'autorisation de prise d'eau à la mer pour le centre conchylicole du Crotoy. Ifremer LER-BL/09.280, octobre 2009, 2 p.
- AE-28.** Lefebvre A., Le Mao P., 2010. Avis pour, la Direction Départementale de l'Équipement de la Somme, Service Prévention des Risques et Sécurité, Pôle de Gestion du Littoral de Saint Valery-sur-Somme, concernant la demande d'autorisation d'occupation temporaire du DPM au profit de la municipalité du Crotoy pour mener une action de contrôle de la spartine. Ifremer LER-BL/10.024, janvier 2010, 4 p.
- AE-29.** Lefebvre A., 2010. Avis pour, la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt du Pas-de-Calais, suite à des mortalités de coquillages sur les communes de Dannes et de Berck et dans le contexte de l'instruction d'un dossier pour Calamité Agricole. Ifremer LER-BL/10.053, février 2010, 3 p.
- AE-30.** Lefebvre A., 2011. Avis de l'Ifremer concernant le contingent de licences coques, moules et végétaux marins délivrés par le CRPMEM, pour le Président du Comité Régional des Pêches Maritimes et des Elevages Marins Nord – Pas de Calais / Picardie. Ifremer LER-BL/11.08, janvier 2011, 1 p.
- AE-31.** Lefebvre A., Vérin F., 2012. Avis de l'Ifremer concernant le stockage de naissains de moules en provenance de Vendée sur une plage du port est de Dunkerque, pour le Directeur de la DDEA 59, Dunkerque. Ifremer LER-BL/12.022, 25 janvier 2012, 5 p.
- AE-32.** Lefebvre A., 2012. Élaboration du porter à connaissance pour le SAGE Somme aval et cours d'eau côtiers, pour le Directeur de la DDTM 80, Amiens. Ifremer LER-BL/12.068, 5 mars 2012, 2 p.
- AE-33.** Lefebvre A., 2012. Avis de l'Ifremer sur le contingent de licences coques, moules et végétaux marins délivrés par le CRPMEM, pour le Président du CRPMEM Nord, Pas-de-Calais et Picardie. Ifremer LER-BL/12.127, 25 avril 2012, 1 p.

- AE-34.** Lefebvre A., Cordier R., 2013. Avis de l'Ifremer concernant le projet de schéma des structures pour le département du Nord, pour l'Administrateur en Chef des Affaires Maritimes, Dunkerque. Ifremer LER-BL/13.023, 21 janvier 2013, 2 p.
- AE-35.** Lefebvre A., Cordier R., 2013. Avis de l'Ifremer concernant le projet de schéma des structures pour le département du Pas-de-Calais, pour le Directeur Départemental des Territoires et de la Mer du Pas-de-Calais. Ifremer LER-BL/13.022, 21 janvier 2013, 2 p.
- AE-36.** Lefebvre A., Cordier R., 2013. Avis de l'Ifremer concernant le projet de schéma des structures pour le département de la Somme, pour le Directeur Départemental des Territoires et de la Mer du Pas-de-Calais. Ifremer LER-BL/13.021, 21 janvier 2013, 3 p.
- AE-37.** Lefebvre A., 2014. Avis de l'Ifremer concernant le contingent de licences coques, moules et végétaux marins délivrés par le CRPMEM, pour le Président du Comité Régional des Pêches Maritimes et des Elevages Marins Nord – Pas de Calais / Picardie. Ifremer LER-BL/14.084, Avril 2014, 1 p.

Contribution à la rédaction d'arrêtés ministériels et de décision EU

- AE-38.** Lefebvre A., 2012. Contribution à la rédaction de l'arrêté du 17 décembre 2012 relatif à la définition du bon état écologique des eaux marines. NOR : DEVL1240628A.
- AE-39.** Lefebvre A., 2015. Contribution à la rédaction de l'arrêté du 28 avril 2015 relatif aux critères et méthodes pour l'élaboration et la mise en œuvre du programme de surveillance du plan d'action pour le milieu marin. NOR : DEVL1425248A, version consolidé au 21 mai 2015, 11 pages.
- AE-40.** Nicolas Hoepffner, Andreas Palialexis, Wouter van de Bund, Sandra Poikane, Jean Noel Druon, Fuensanta Salas Herrero, Vivi Fleming-Lehtinen, Elżbieta Łysiak-Pastuszek, Marcel van den Berg, Philip Axe, Martin Hansson, Wera Leujak, Marta Martínez-Gil Pardo de Vera, Jesús Mercado, Irene del Barrio, Stephen Malcolm, Luminita Lazar, Ioannis Karakassis, Alain Lefebvre, Marta Nogueira, 2015. Review of the Commission Decision 2010/477/EU concerning MSFD criteria for assessing good environmental status - Descriptor 5: Human-induced eutrophication is minimised, especially adverse effects thereof, such as losses in biodiversity, ecosystem degradation, harmful algal blooms and oxygen deficiency in bottom waters. Scientific and technical review of Commission Decision 2010/477/EU in relation to Descriptor 5 MSFD. European Commission, Joint Research Centre, Institut for Environment Sustainability, Water Resources Unit, 33 pages.

3.6. Activités d'enseignements

Impliqué dans les activités d'enseignement de l'Université du Littoral Côte d'Opale ou de l'Université de Lille depuis la préparation de mon doctorat, j'ai participé à des enseignements de niveau Bac+1 à Bac+5 (DEUST Aménagement et Environnement Littoral et Technicien Valorisation des Produits de la Mer, Master 1 ou 2 FOGEM (Fonctionnement et Gestion des Écosystèmes Marins)) comme ATER ou chargé d'enseignement vacataire. Depuis 2004, je suis chargé d'enseignement vacataire pour le Département Génie Biologique de l'IUT Calais-Boulogne de l'Université du Littoral Côte d'Opale. Afin de pouvoir proposer une activité d'enseignement cohérente, complète, j'ai préféré centrer cette activité sur l'IUT Calais-Boulogne, plutôt que de répondre à d'autres demandes d'interventions plus ponctuelles dans d'autres formations (exemple du Master Biodiversité, Écologie et Évolution / parcours Fonctionnement et Gestion des Écosystèmes Marins de l'Université de Lille). Le tableau 1 est le reflet de mon activité annuelle d'enseignement pour le Département Génie Biologique de l'Université du Littoral Côte d'Opale. Cette activité d'enseignement sera reconduite pour l'année universitaire 2016-2017.

Tableau 1. Contenu type de mon activité d'enseignement depuis 2004 au sein de l'Université du Littoral Côte d'Opale.

Nom	Organisme	Niveau	Sujet	Durée (h éq. TD)
LEFEBVRE Alain	ULCO	IUT GB 1 ^{ère} année	Écologie Numérique (biostatistiques)	40
LEFEBVRE Alain	ULCO	IUT GB 2 ^{ème} année	Écologie et Surveillance du milieu marin (Étude de cas)	08

Le module d'écologie numérique vise à permettre aux étudiants de disposer des connaissances minimales indispensables aux traitements et à l'analyse des données. Les cours théoriques sont dédiés à la présentation d'un bilan non exhaustif des principaux paramètres de tendance centrale et de dispersion, ainsi que des méthodes d'analyses uni-, bi- et multi-variées. Les enseignements pratiques, en salle informatique, sont destinés à leur permettre de mettre en application les connaissances ainsi acquises avec une prise en main du logiciel Statistique et Graphique R via la le pré-traitement, l'analyse et l'interprétation de données issues du réseau REPHY / SRN de l'Ifremer.

Le module d'écologie et de surveillance du milieu marin est destiné à sensibiliser les étudiants aux différentes pressions qui s'exercent sur le milieu marin, et à leur présenter les caractéristiques des principaux programmes d'observation et de surveillance mise en œuvre. Il s'agit plus particulièrement de leur présenter les métriques, les indicateurs en insistant sur les compétences et la rigueur nécessaires à la mise en application des matériels et méthodes. Le lien est fait également avec les projets d'études et de recherche destinés à améliorer les connaissances sur le fonctionnement des écosystèmes, à optimiser les stratégies, à contribuer à aider les gestionnaires de l'environnement par l'émission d'avis et d'expertises élaborés sur une base scientifique solide. Des démonstrations de l'utilisation de systèmes d'échantillonnage (bouteille Niskin, filet à plancton) et de système de mesures *in situ* (sonde multiparamètre) sont également proposées en salle.

3.7. Activités d'encadrement

3.7.1. Stages post-bac à bac +4

Gagnard-Holod M., 2001. Stage DEUST Aménagement et Environnement Littoral, Université du Littoral Côte d'Opale. Période : 15/3 au 01/06/2001. Sujet : Étude de la qualité des eaux littorales via le réseau régional SRN.

Chéramy J., 2002. Stage DEUST Aménagement et Environnement Littoral, Université du Littoral Côte d'Opale. Période : 01/10/2001 au 02/02/2002. Sujet : Autécologie et éthologie de l'annélide Polychète *Polydora ciliata* - synthèse bibliographique.

Gagneux V., 2002. Stage DEUST Valorisation des Produits de la Mer, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : Recrutement des larves de l'annélide polychète *Polydora sp.* en Baie de Somme (18/03/2001 au 26/05/2002).

Fournier A., 2002. Stage IUT Génie Biologique, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : Valorisation des résultats de la surveillance de la qualité des masses d'eau sur le littoral Nord-Pas-de-Calais-Picardie : bilan SRN 2001 (08/04 au 14/06/02).

- Barbet F., 2003. Stage IUT Génie Biologique, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : Évolution de la qualité du milieu marin sur le littoral Nord-Pas-de-Calais-Picardie (14/04 au 20/06/2003).
- Sauvage A., 2004. Stage IUT Génie Biologique, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : Caractéristiques physico-chimiques, hydrologiques et biologiques de la Mer du Nord en situation hivernale. Résultats de la campagne IBTS / Liteau II de 2004 (13/04 au 18/06/2004).
- Libert A., 2004. Stage IUT Génie Biologique, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : Valorisation des résultats de la surveillance de la qualité des masses d'eau sur le littoral Nord-Pas-de-Calais-Picardie : bilan SRN 2002 (13/04 au 18/06/2004).
- Barbet F., 2005. Stage M1 Écologie, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : Évolution des concentrations en nutriments et lien avec l'eutrophisation sur le littoral Nord-Pas-de-Calais-Picardie (02/05 au 29/07/2005).
- Carton C., 2005. Stage IUT Génie Biologique, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : le suivi régional des nutriments (SRN) sur le littoral Nord-Pas-de-Calais-Picardie. Bilan de l'année 2004 (11/04 au 17/06/2005).
- Bonte Y., 2006. Stage IUT Génie Biologique, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : le suivi régional des nutriments (SRN) sur le littoral Nord-Pas-de-Calais-Picardie. Bilan de l'année 2005 (10/04 au 16/06/2005).
- Barbet F., 2006. Stage M2 Écologie, Université de Lille. Sujet : Implantation du modèle hydrodynamique/biogéochimique Eco-MARS 3D au laboratoire Environnement et Ressource de Boulogne-sur-Mer et mise en œuvre dans le cadre du projet Liteau II (01/03 au 31/08/2006).
- Dewaele K., 2007. Stage IUT Génie Biologique, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : le suivi régional des nutriments (SRN) sur le littoral Nord-Pas-de-Calais-Picardie. Bilan de l'année 2006 (14/04 au 16/06/2008).
- Lebon S., 2008. Stage IUT Génie Biologique, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : Mise en œuvre de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) sur le littoral Nord-Pas-de-Calais-Picardie (14/04 au 16/06/2008).
- Soudant A., 2008. Stage DUT Statistiques et Traitements Informatiques des Données (STID), Université de Paris. Sujet : Influence de la distribution d'échantillonnage sur la distribution de la fluorescence et son percentile 90. Accueil : Ifremer DYNECO/Vigies, Nantes. Co-encadrement Lefebvre A. & Soudant D. (30/06 au 29/08/2008).
- Duval P., 2009. Stage Licence Institut Supérieur d'Agriculture de Lille. Sujet : Étude à haute fréquence de la dynamique de l'écosystème côtier, sous influence anthropique, au large de Boulogne sur Mer : contexte des efflorescences de la prymnésiofycée *Phaeocystis globosa* (25/05 au 26/07/2009).
- Baheux M., 2010. Stage IUT Génie Biologique, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : Origine, dynamique et conséquences de la prolifération des annélides polydors sur la zone mytilicole de la baie de Somme : mesures de la concentration en oxygène à micro-échelle dans les bouchots (06/04 au 11/06/2010).
- Schiffrine N., 2010. Stage M1 Écologie, Université de Lille. Sujet : Origine, dynamique et conséquences de la prolifération des annélides polydors sur la zone mytilicole de la baie de Somme : mesures à haute fréquence des paramètres biologiques et physico-chimiques (29/03 au 28/05/2010).
- Verbeke G., 2011. Stage M1 Écologie, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : Mesures à haute fréquence en zone marine côtière : Projet InterReg IVa 2 Mers DYMAPHY (28/03 au 20/05/2011).
- Verny J., 2012. Stage IUT Génie Biologique, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : Projet InterReg IVa 2 Mers DYMAPHY: Analyse à haute fréquence du phytoplancton par fluorimétrie spectrale en Manche orientale (10/04 au 15/06/2012).

- Brebion A., 2012. Stage IUT Génie Biologique, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : Projet InterReg IVa 2 Mers DYMAPHY: Analyse à haute fréquence des conditions environnementales en lien avec le développement du phytoplancton en Manche orientale (10/04 au 15/06/2012).
- Benichou F., 2013. Stage M1 Écologie, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : Combinaison de dispositifs à haute fréquence pour l'étude de la dynamique phytoplanctonique et des paramètres physico-chimiques associés en Manche orientale (02/04 au 25/5/2013).
- Breton S., 2014. Stage M1 Écologie, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : Analyses multivariées des données à haute résolution de MAREL Carnot et comparaison avec les résultats acquis par le système hybride Classification non-supervisée/MMC (31/3 au 28/05/2014).
- Mégret C., 2014. Stage IUT Génie Biologique, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : le suivi régional des nutriments (SRN) sur le littoral Nord-Pas-de-Calais-Picardie. Bilan de l'année 2013 + réalisation d'une vidéo pour la valorisation du réseau SRN et du système instrumenté MAREL Carnot en lien avec la problématique du changement climatique, en collaboration avec le centre national de la mer Nausicaa et l'Université du Littoral Côte d'Opale (05/05 au 07/07/2014).
- Flesh M., 2015. Stage IUT Génie Biologique, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : le suivi régional des nutriments (SRN) sur le littoral Nord-Pas-de-Calais-Picardie. Bilan de l'année 2014 (13/04 au 19/06/2015).
- Robillard V., Collot C., Brunier J., Bueno C., Pointier H., 2015. Stage 3^{ième} année de la formation Ingénieurs pour la terre, École de l'agriculture, l'agroalimentaire, l'environnement et du paysage (ISA), Lille. Sujet : Étude statistiques des données HF de la station MAREL Carnot (26/01 au 26/05/2015).
- Perrouchet W., 2016. Stage de DUT Génie Biologique, ULCO. Bilan de la mise en oeuvre des réseaux REPHY et SRN en Manche orientale et baie sud de la mer du Nord. Bilan de l'année 2015 (11/04/2016 au 17/06/2016).
- Batkoum M., 2016. Stage de Master 1 ULCO TSI, Calais. Sujet : Étude de la complétion par EMD de séries temporelles multidimensionnelles à données manquantes sur des périodes de tailles variables. Applications aux données MAREL Carnot. Projet d'étude du 1er semestre de l'année universitaire 2015-2016. Encadrement Poisson-Caillault E., Lefebvre A..
- Dalhouni M., 2016. Stage de Master 1 ULCO TSI, Calais. Sujet : Validation des données et complétion par analyse de tendance. Etudes des données HF MAREL Carnot et mesures à Courcelles. Projet d'étude du 1^{er} semestre de l'année universitaire 2015-2016. Encadrement Poisson-Caillault E., Lefebvre A..
- Benkirane H., Delabasserue, 2016. Étudiants ING3 EILCO, ULCO, Calais. Étude bibliographique : Appariement élastique (DTW, Elastic matching) et programmation optimisée avec une perspective multi-CPU et GPU pour la complétion de données manquantes ou aberrantes. Encadrement Poisson-Caillault E., Lefebvre A..
- Curtill C., 2016. Stage de M1 FOGEM, ULCO. Analyse taxonomique préliminaire (via l'étude de la fluorescence spectrale) à haute résolution du phytoplancton en Manche et en mer du Nord (04/04/2016 au 29/05/2016). Encadrement : Lefebvre A. et E. Poisson-Caillault.

3.7.2. Stages Bac +5

- Lamy D., 2000. Stage Master 2 MBPE, Université de Paris VI. Sujet : Première approche de caractérisation de la qualité du milieu marin littoral (1992-2000) : importance des apports en sels azotés dans le processus d'eutrophisation et de prolifération phytoplanctonique.
- Ansel A., 2000. Stage Master Sciences et Technique « Expertise en pollution du milieu naturel », Université de Lille. Sujet : Système d'Information Géographique (SIG) sur l'environnement littoral et marin : exploitation des données sous Arcview 3 et synthèse de fiche de métadonnées sous REPORTS.

- Desombre J., 2004. Stage Master Sciences et Technique « Expertise en pollution du milieu naturel », Université de Lille. Sujet : Analyse de la contamination des sédiments du littoral Nord / Pas de Calais/ Picardie.
- Guiselin N., 2005. Stage Master 2 ENV-NAT, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : Étude des successions d'espèces phytoplanctoniques dans les eaux côtières de la Manche orientale (Déroit du Pas-de-Calais).
- Barbet F., 2006. Stage Master 2 Pro Gestion Intégrée des Écosystèmes Côtiers et Marins, Université de Lille. Sujet : Implantation du modèle d'écosystème ECOMARS3D au laboratoire Environnement & Ressources du centre Ifremer Manche mer du Nord en lien avec le projet LITEAU II.
- Claudiel H., 2006. Stage Master 2 Pro Gestion Intégrée des Écosystèmes Côtiers et Marins, Université de Lille. Sujet : Les systèmes de mesures hautes-fréquences : bouées et ferry-box.
- Roosens J., 2006. Stage Master 2 Pro Gestion Intégrée des Écosystèmes Côtiers et Marins, Université de Lille. Sujet : Les systèmes de mesures hautes-fréquences : bouées et ferry-box.
- Aït Hamoudi T., 2011. Stage Master 2 Écologie, FOGEM, Université de Lille. Sujets : 1) Évaluation de la qualité des masses d'eau côtières en Manche orientale et en baie sud de la Mer du Nord : de la basse vers la haute fréquence ; 2) Répartition trimestrielle des espèces phytoplanctoniques dominantes, basée sur l'indice de Sanders, dans le cadre du Suivi Régional des nutriments sur le littoral Nord-Pas-de-Calais/ Picardie.
- Herbez C., 2012. Stage Master 2 INS3I, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : Traitement de données manquantes ou aberrantes par imputation multiple. Encadrement : E. Caillault (ULCO/LISIC) & A. Lefebvre.
- Zannakis R., 2012. Stage Master 2 INS3I, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : Métrologie - analyses de données multicapteurs. Encadrement : E. Caillault (ULCO/LISIC) & A. Lefebvre.
- Lemir F., 2013. Stage Master 2 INS3I, Université du Littoral Côte d'Opale. Sujet : Création d'une interface graphique de classification non supervisée (K-means, Spectral) et de modélisation dynamique (Modèle de Markov Cachée). Encadrement : E. Caillault (ULCO/LISIC) & A. Lefebvre.
- Cuvelliez R., 2015. Stage de M2 Écologie, FOGEM, Université de Lille. Sujet : Contribution à l'optimisation d'un réseau d'observation et de surveillance du phytoplancton par analyses d'images (05/01 au 26/06/2015).
- Cuvelliez R., 2016. Stage M2 de l'Université de Rennes. Sujet : Analyse des tendances au sein de la communauté phytoplanctonique de la Manche orientale et de la baie sud de la Mer du Nord par Modélisation Linéaire Dynamique. (01/02/2016 au 13/07/2016) (Encadrement : Lefebvre A. et D. Soudant).

3.7.3. Thèses

Encadrements de thèses

Th-1. Thèse de l'université de Paris VI de Alice Vanhoutte-Brunier (2002-2005). Financement Région Nord, Pas-de-Calais / Ifremer. Modélisation tridimensionnelle de la production phytoplanctonique et du devenir des nutriments en Manche orientale et au sud de la mer du Nord. Quantification de l'importance de l'origine des apports continentaux dans le bloom printanier de *Phaeocystis* (Prymnesiophyceae). Directeur de thèse : P. Nival (Université Paris IV).

=> *Co-encadrement A. Lefebvre (50 %) et A. Ménesguen (50 %) (Ifremer, Dyneco).*

Th-2. Thèse de doctorat de l'ULCO – Accueil Ifremer de Kévin Rousseuw (2010-2014). Financement Ifremer / AEAP. Modélisation des signaux temporels hautes fréquences, multicateurs à valeurs manquantes. Application à la prédiction des efflorescences phytoplanctoniques dans les rivières et les écosystèmes marins côtiers. Soutenance le 11/12/14 (Rapporteurs : A. Mansour (ENSTA), P. Grosjean (Univ. Mons) – Examineurs : C. Bacher (Ifremer), E. Poisson-Caillault (ULCO/LISIC), A. Lefebvre (Ifremer) – Directeur de thèse : D. Hamad (ULCO/LISIC) - Membres invités : J. Prygiel (AEAP), F. Schmitt (CNRS, UMR LOG)).

=> *Co-encadrement A. Lefebvre (50 %) et E. Caillault (50 %) (ULCO/LISIC).*

Autres

Th-3. Thèse de doctorat de l'ULCO / CNRS UMR LOG 8187 de Natacha Guiselin (2007-2010). Financement Région Nord, Pas-de-Calais / AEAP. Étude de la dynamique des communautés phytoplanctoniques par microscopie et cytométrie en flux, en eaux côtières de la Manche orientale. Soutenance le 29/01/2010 (Membres du Jury : M. Denis (Univ. Medit.), K. Sabbe (Univ. Gent), A. Lefebvre (Ifremer), J. Prygiel (AEAP), J.-M. Brylinski (ULCO)(Dir. thèse), F. Artigas (ULCO)(co-Dir. Thèse)).

=> *Contribution à l'écriture du sujet de thèse - Sujet initialement proposé pour un co-financement Ifremer / AEAP et co-encadrement A. Lefebvre mais non retenu par la Direction Scientifique de l'Ifremer puis repris par l'ULCO. Contribution A. Lefebvre notamment pour l'étude des séries temporelles hydrologie et phytoplancton (données REPHY/SRN) ainsi que pour la valorisation scientifique. Membre du jury de thèse.*

Th-4. Thèse de doctorat de l'Université de Lille 1 / CNRS UMR LOG 8187 de Sylvie Zongo (2007-2010). Fluctuations multi-échelles dans les séries temporelles biogéochimiques à moyen et long terme en milieu marin côtier. Soutenance le 12/10/2010 (Membres du Jury : G. Durrieu (Univ. Bordeaux 1), S. Blain (Paris VI), P. Morin (Roscoff), S. Souissi (Univ. Lille 1), F. Schmitt (CNRS, LOG), B. Sautour (Univ. Bordeaux 1), J. Prygiel (AEAP), A. Lefebvre (Ifremer)).

=> *Contribution à la phase de prétraitement des données et à l'interprétation des résultats, leurs valorisations. Membre du jury de thèse.*

Th-5. Thèse de doctorat de l'ULCO / CNRS UMR LOG 8187 de Nicolas Jouanneau (2010-2013). Caractérisation de la dispersion de traceurs passifs dans un écoulement soumis à un régime macrotidal. Étude d'impact de la dynamique sur la qualité de l'eau le long du littoral du Nord – Pas-de-Calais et de la Picardie. Soutenance le 12/04/2013 (Membres du Jury : A. Ouashine (UTC), B. Zakardjan (USTV), F. Schmitt (CNRS, LOG), A. Lefebvre (Ifremer), A. Mangin (ACRI), A. Sentchev (ULCO)).

=> *Co-rédaction avec A. Sentchev du sujet pour une demande de financement Ifremer / AEAP. Demande rejetée par la Direction Scientifique de l'Ifremer. Le sujet a alors été repris par l'ULCO. Contribution d'A. Lefebvre à la définition des objectifs opérationnels, des sites d'étude et à l'interprétation des résultats. Membre du jury de thèse.*

Th-6. Thèse de doctorat de l'ULCO de Jonathan Derot. «Utilisation des données de MAREL Carnot pour la compréhension des mécanismes des extrêmes dans la qualité des eaux à Boulogne-sur-Mer ». Soutenance le 12/12/2014 à Boulogne-sur-Mer

(Rapporteurs : S. Schmitt (EPOC), G. Durrieu (Univ. Bretagne Sud) - Examineurs : F. Artigas (ULCO), V. Gentilhomme (encadrante) (USTL), I. Puillat (Ifremer) - Directeur de thèse : F. Schmitt (CNRS, UMR LOG) - Membres invités : J. Prygiel (AEAP), A. Lefebvre (Ifremer)).

=> *Contribution à la phase de prétraitement des données et à l'interprétation des résultats, leurs valorisations. Membre invité du jury de thèse.*

Th-7. Thèse de doctorat de l'ULCO / CNRS UMR LOG 8187 de Alice Delegrange (2012-2015). Impact du phytoplancton sur les juvéniles de bar (*Dicentrarchus labrax*) en milieu aquacole. Approches *in situ* et expérimentales. Soutenance le 30/01/15 à la Maison de la Recherche en Environnement Littoral, UMR LOG, Wimereux (Rapporteurs : P. Soudant (IUEM), J.L. Zambobino (Ifremer) - Examineurs : H. Hegaret (IUEM), E. Roque d'Orbcastel (Ifremer), U. Christaki (ULCO), A. Lefebvre (Ifremer) - Responsable scientifique : D. Vincent (ULCO) - Directeur de thèse : R. Amara (ULCO)).

=> *Contribution à la phase de traitements des séries temporelles Phytoplancton (données du programme de surveillance IGA Gravelines) et à la valorisation des résultats. Membre du Comité de Suivi et du jury de thèse.*

Th-8. Collaboration à la thèse de Phan Thi Thu Hong - Titre : Appariement élastique (par émtrique classique et floue), critères et méthodes pour la classification et la modélisation des séries temporelles incomplètes. Laboratoire LISIC/ULCO. Directeur de thèse : Bigand A.. Encadrante : Poisson-Caillault E.

=> *Contribution à l'écriture du sujet de thèse, à la phase de traitements des séries temporelles (données Ifremer de la station instrumentée MAREL Carnot et du Pocket Ferry Box) et à l'expertise, la valorisation des résultats. Membre du Comité de suivi de la thèse.*

Th-9. Comité de suivi de la thèse de Stéphane Karasiewicz - Titre : Phytoplankton community response(s) to global changes and their effect(s) on ecosystem functioning. Directeur de thèse : Sébastien Lefebvre, UMR LOG. Membre du comité : Sylvain Doledec, Univ. Lyon – P. Claquin, UMR BOREA, Caen – C. Bacher, Ifremer – A. Lefebvre, Ifremer.

=> *Contribution à l'expertise et à la valorisation des résultats issus du traitement des séries temporelles Phytoplancton (données des programmes de surveillance REPHY et SRN).*

Participation à des jurys de thèse

J.Th-1. Lefebvre A., 2010. Membre du jury de thèse de Guiselin N.. Étude de la dynamique des communautés phytoplanctoniques par microscopie et cytométrie en flux, en eaux côtières de la Manche orientale. Thèse de doctorat de l'ULCO, CNRS UMR LOG 8187. Soutenance le 29/01/2010 (Membres du Jury : M. Denis (Univ Medit), K. Sabbe (Univ Gent), A. Lefebvre (Ifremer), J. Prygiel (AEAP), J.-M. Brylinski (ULCO)(Dir. thèse), F. Artigas (ULCO)(co-Dir. Thèse)).

J.Th-2. Lefebvre A., 2010. Membre du jury de thèse de Zongo S.. Fluctuations multi-échelles dans les séries temporelles biogéochimiques à moyen et long terme en milieu marin côtier. Thèse de doctorat de l'Université de Lille, 308 pages. Soutenance le 12/10/2010 (Membres du Jury : G. Durrieu (Univ. Bordeaux 1), S. Blain (Paris VI), P. Morin (Roscoff), S. Souissi (Univ. Lille 1), F. Schmitt (CNRS, LOG), B. Sautour (Univ. Bordeaux 1), J. Prygiel (AEAP), A. Lefebvre (Ifremer)).

- J.Th-3.** Lefebvre A., 2013. Membre du jury de thèse de Jouanneau N. Caractérisation de la dispersion de traceurs passifs dans un écoulement soumis à un régime macrotidal. Étude d'impact de la dynamique sur la qualité de l'eau le long du littoral du Nord – Pas-de-Calais et de la Picardie. Thèse de doctorat de l'ULCO, CNRS UMR LOG 8187. Soutenance le 12/04/2013 (Membres du Jury : A. Ouashine (UTC), B. Zakardjan (USTV), F. Schmitt (CNRS, UMR LOG), A. Lefebvre (Ifremer), A. Mangin (ACRI), A. Sentchev (ULCO)).
- J.Th-4.** Lefebvre A., 2014. Membre du jury de thèse de Rousseeuw K.. «Modélisation des signaux temporels hautes fréquences, multicapteurs à valeurs manquantes ». Soutenance le 11/12/14 à Boulogne-sur-Mer (Rapporteurs : A. Mansour (ENSTA) , P. Grosjean (Univ. Mons) - Examineurs : C. Bacher (Ifremer), E. Poisson (encadrante)(ULCO/LISIC), A. Lefebvre (encadrant)(Ifremer) - Directeur de thèse : D. Hamad (ULCO/LISIC) - Membres invités : J. Prygiel (AEAP) , F. Schmitt (CNRS, UMR LOG).
- J.Th-5.** Lefebvre A., 2014. Membre du jury de thèse de Derot J.. «Utilisation des données de MAREL Carnot pour la compréhension des mécanismes des extrêmes dans la qualité des eaux à Boulogne-sur-mer ». Soutenance le 12/12/2014 à Boulogne-sur-Mer (Rapporteurs : S. Schmitt (EPOC), G. Durrieu (Univ. Bretagne Sud) - Examineurs : F. Artigas (ULCO), V. Gentilhomme (encadrante) (USTL), I. Puillat (Ifremer) - Directeur de thèse : F.Schmitt (CNRS, UMR LOG) - Membres invités : J. Prygiel (AEAP), A. Lefebvre (Ifremer)).
- J.Th-6.** Lefebvre A., 2015. Membre du jury de thèse de Delegrange A.. «Modélisation des signaux temporels hautes fréquences, multicapteurs à valeurs manquantes ». Soutenance le 30/01/15 à la Maison de la Recherche en Environnement Littoral, UMR LOG, Wimereux (Rapporteurs : P. Soudant (IUEM), J.L. Zambobino (Ifremer) - Examineurs : H. Hegaret (IUEM), E. Roque d'Orbecastel (Ifremer), U. Christaki (ULCO), A.Lefebvre (Ifremer) - Responsable scientifique : D.Vincent (ULCO) - Directeur de thèse : R. Amara (ULCO)).
- J. Th-7.** Lefebvre A., 2015. Membre du jury de thèse de Simon Bonato. Thèse de doctorat pour l'obtention du titre de docteur de l'Université du Littoral Côte d'Opale - Discipline : Géosciences, Ecologie, Paléontologie, Océanographie. Titre : Variabilité spatiale et temporelle des communautés phytoplanctoniques en Manche Orientale-Utilisation de la cytométrie en flux à scanning. Soutenance le 30/06/2015 à la Maison de la Recherche en Environnement Littoral, UMR LOG, Wimereux. Jury composé de : Dr. Michel Denis (DR, CNRS, Institut Méditerranéen d'Océanologie) Rapporteur - Pr. Philippe Grosjean (PR, Université de Mons, Belgique) Rapporteur - Dr. Alain Lefebvre (CR, IFREMER LER-BL) Examineur - Dr. Nathalie Simon (MCF, Station Biologique de Roscoff) Examinatrice - Dr. Véronique Creach (CR, Cefas – Royaume-Uni) Invitée - Dr. Fabrice Lizon (MCF, Université de Lille 1) Invité - Pr. Urania Christaki (PR, ULCO) Directrice de thèse - Dr. Felipe Artigas (MCF, ULCO) Responsable scientifique.

3.7.4. Post-doc ou assimilés (niveau > thèse)

- Devreker D., 2011-2012. CDD de soutien à la mise en œuvre de la Convention OSPAR et de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) : Mise au point d'un outil d'analyse exploratoire et de détection des tendances à long terme dans les séries de données à long-terme, contribution à la définition du Bon État Ecologique (4 mois).
- Wacquet G., 2012-2014. CDD de soutien au projet « Numérisation phytoplancton et traitement par ZooPhytoimage » de l'Ifremer en partenariat avec l'Université de Mons (Be) et l'UMR 8187 LOG (18 mois).
- Nzigou A.-R., 2013. CDD de soutien au projet InterReg IVa 2 Mers DYMAPHY. Valorisation des données des campagnes océanographiques DYPHYMA (8 mois).
- Devreker D., 2015-2016. CDD de soutien à la mise en œuvre de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin DCSMM auprès du pilote scientifique pour le volet Eutrophisation et co-pilote pour le volet Habitats Pélagiques (Lefebvre A.) (12 mois).

3.7.5. Encadrements CDD, intérimaires (niveau < thèse)

- Vilbas J.-V., 2006. Technicien analyste-préleveur en soutien aux activités liées à la mise en œuvre du réseau Suivi Régional des Nutriments (SRN) (6 mois).
- Caboche J., 2006. Technicien analyste-préleveur en soutien aux activités liées à la mise en œuvre du réseau Suivi Régional des Nutriments (SRN) (6 mois).
- Caboche J., 2007-2008. Technicien analyste-préleveur en soutien aux activités liées à la mise en œuvre du réseau Suivi Régional des Nutriments (SRN) (9 mois).
- Lagache C., 2008-2009. Technicienne analyste-préleveur en soutien aux activités liées à la mise en œuvre du réseau Suivi Régional des Nutriments (SRN) (6 mois).
- Bellamy E., 2008-2009. Contrat de professionnalisation DEUST Technicien en Milieu Littoral, Université du Littoral Côte d'Opale (17/03/2008 au 30/06/2009).
- Lagache C., 2010. Technicienne analyste-préleveur en soutien à la mise en œuvre des réseaux d'observation et de surveillance (6 mois).
- Cordier R., 2010. Technicien analyste-préleveur en soutien aux activités liées à la mise en œuvre du réseau Suivi Régional des Nutriments (SRN) (3 mois).

3.7.6. Autres

- Tuteur scientifique de Hauden S. pour le module « Projet professionnel » du DEUG SV de l'Université C. Bernard de Villeurbanne, Lyon (février 2001).
- Tuteur scientifique de Bénard I. (2^{ième} année DEUST AEL, Université du Littoral Côte d'Opale, Calais). Sujet : Sanctuaire Corso-Liguro-Provençal pour la protection des Cétacés. Problématique liées aux mythes des Cétacés (19/03-08/06/2001).
- Participation aux simulations d'entretien d'embauche de l'IUT Informatique, Université du Littoral Côte d'Opale, Calais (12/12/01).
- Membre du jury de DSR de l'Université de Lille pour Boulart C. Sujet : Apports atmosphériques de sels nutritifs en Manche orientale – Bilan 2003-2004 (Septembre 2004).
- Encadrement de stages « découverte de l'entreprise » :
- Dauvin G., 2008. Stage de découverte niveau 3^{ième}. Collège privé S^t Justin, Levallois-Perret (avril 2008).
- Bucamp A., 2011. Stage de découverte niveau 3^{ième}. Collège Pilâtre de Rosier, Wimille (janvier 2011).
- Verbecq T., 2011. Stage de découverte niveau 3^{ième}. Collège Pierre Daunou, Boulogne-sur-Mer (janvier 2011).
- Bresson J., 2013. Stage de découverte niveau 3^{ième}. Collège Le Bon Sauveur, Le Vesinet (décembre 2013).
- Lefebvre A., 2015. Stage de découverte niveau 3^{ième}. Collège Pierre Daunou, Boulogne-sur-Mer (janvier 2015).
- Leroy B., 2016. Stage de découverte niveau 3^{ième}. Collège Notre Dame de Beauvais (Janvier 2016).
- Verna L., 2016. Stage de découverte niveau 3^{ième}. Collège Pilâtre de Rozier, Wimille (Janvier 2016).
- Butor R., 2016. Stage de découverte niveau 3^{ième}. Collège Angelier, Boulogne-sur-Mer (Janvier 2016).
- Delie M., 2016. Stage de découverte niveau 3^{ième}. Collège Pierre Daunou, Boulogne-sur-Mer (Février 2016).

3.8. Collaborations et partenariats

Le partenariat que j'ai mis en place pour les aspects Observation/Surveillance et Avis/Expertises concerne par définition les trois départements (Nord, Pas-de-Calais et Somme) sur lesquels le LER-BL exerce ses compétences. Le partenariat développé pour les activités de Recherche déborde largement ce contexte régional (Figure II). La reconnaissance des compétences du LER-BL m'a conduit à contribuer à l'écriture des axes stratégiques du **Groupe d'Intérêt Scientifique (GIS)** « Campus International de la Mer et de l'Environnement Littoral » regroupant l'ensemble des acteurs de l'enseignement supérieur et de la recherche, des collectivités territoriales et du monde socio-économique dont les recherches sont relatives à la mer et à l'environnement littoral sur le territoire Manche-Mer du Nord. Par ailleurs, dès 2013, j'ai également participé à la démarche visant à permettre à mon laboratoire de rejoindre le consortium français sur la prolifération des algues nocives, motivé par la création du Groupe de Recherche (GDR) PHYCOTOX dont les recherches portent sur l'impact des microalgues sur l'homme et l'environnement. Le partenariat mis en place est d'autant plus important que l'effectif du laboratoire a toujours été considéré comme sub-critique lors des différentes évaluations auxquelles j'ai participé. La réalisation de mon projet ne peut aboutir que par la mise en place d'un réseau scientifique et technique, mais aussi financier, fiable, optimisé et à la fois le plus stable possible (compétences et moyens afin d'assurer l'existant) mais aussi évolutif afin de tenir compte des nouveaux besoins.

Mes partenaires scientifiques réguliers sont :

- Le Laboratoire d'Océanologie et de Géoscience (UMR 8187LOG) (Université de Lille, Université du Littoral Côte d'Opale et CNRS), lui-même partenaire de la Communauté d'Universités et d'Établissements Lille Nord de France (COMUE),
- Le Laboratoire d'Informatique Signal et Image de la Côte d'Opale (LISIC) de l'Université du Littoral Côte d'Opale,
- Le Centre for Environment, Fisheries & Aquaculture Science (CEFAS, UK),
- L'Université de Mons-Hainaut (Be),
- Le RWS Centre for Water Management (NL).

Mes autres partenaires (dont les partenaires financiers*) sont :

- Les ministères de tutelles*, les Services déconcentrés de l'État,
- L'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA)*,
- L'Agence de l'Eau Artois-Picardie (AEAP)*,
- L'Agence des Aires Marines Protégées (AAMP)*,
- Le Groupe d'Études des Milieux Estuariens et Littoraux (GEMEL),
- Les acteurs socio-économiques (représentants des filières pêche et conchyliculture*, collectivités territoriales*, communes littorales et Départements*, Régions*, ...),
- Le Centre National de la Mer Nausicaà,
- Le Pôle de Compétitivité Aquimer,
- Électricité de France (EDF)*,
- 4H-JENA engineering GmbH (De),
- BBE Moldaenke (De).

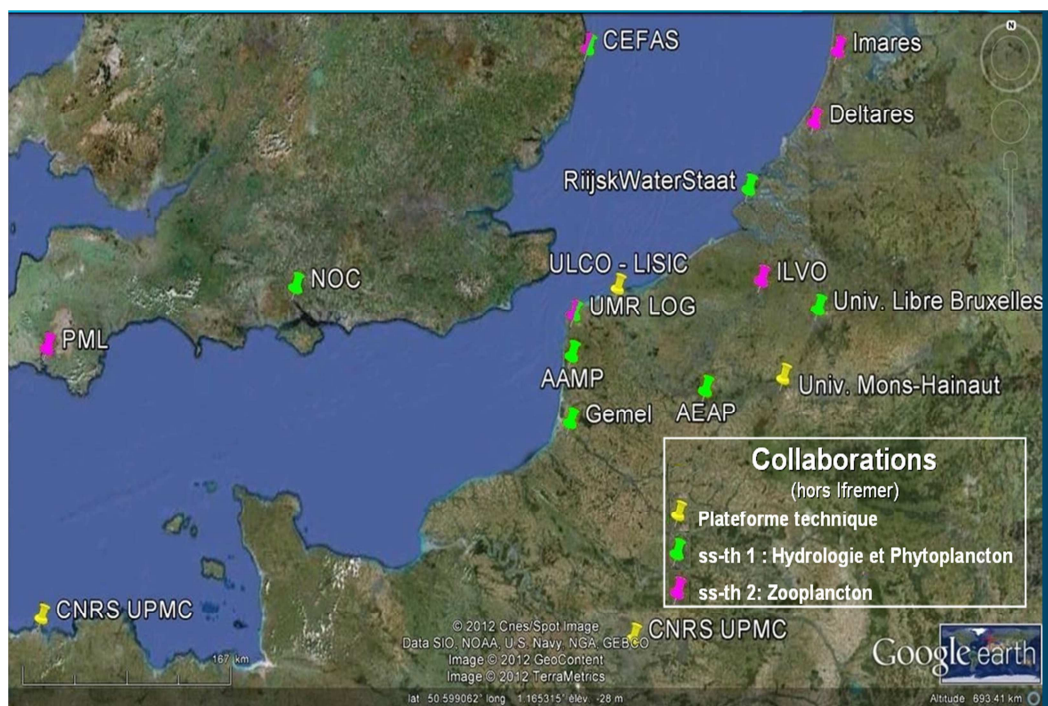


Figure II. Mes principaux partenaires à l'échelle de la Manche orientale et de la baie sud de la Mer du Nord pour le sous-thème 1 Hydrologie et Phytoplancton (*en vert*) et pour la plateforme technique (*en jaune*) (en dehors des relations internes à l'Ifremer et en dehors des collaborations à l'échelle des Directives (DCE, Commission Internationale Escaut, DCSSM) ou de la Convention de Mer Régionale OSPAR).

3.9. Projets, contrats régionaux, nationaux et internationaux

- CReg-1.** Surveillance écologique et halieutique du centre national de production d'électricité de Gravelines. Responsabilités scientifique et administrative (Coordination de 2002 à 2008). Contrat EDF.
- CReg-2.** Réseau régional S.R.N. (Suivi Régional des Nutriments) sur le Littoral Nord, Pas-de-Calais et Picardie + Mise en œuvre de la Directive Cadre sur l'Eau (volet hydrologie, phytoplancton, benthos et chimie) Responsabilités scientifique et administrative (Coordination depuis 2002). Partenariat Ifremer / Agence de l'Eau Artois Picardie.
- CReg-3.** Mesures Automatisées en Réseau pour l'Environnement Littoral – Station de mesures MAREL Carnot. Responsabilité scientifique (Coordination depuis 2004). Partenariat Ifremer / Agence de l'Eau Artois Picardie.
- CReg-4.** Contrat de Plan État Région (CPER 2000-2007). Étude et Observation de l'écosystème côtier de la Manche orientale : le bloom de *Phaeocystis* et ses effets sur l'écosystème.

Phase 1 : Responsabilité scientifique Ifremer pour les parties « en amont du bloom : bilan des apports en sels nutritifs, leur rôle dans le déclenchement et l'extension du bloom » et « mise en œuvre de la station instrumentée MAREL Carnot ».

Phase 2 : Responsabilité scientifique à l'Ifremer pour les opérations A et B, respectivement, « Étude des forçages physico-chimiques » et « Dynamique de l'abondance et des espèces phytoplanctoniques ».

- CReg-5.** Contrat de Plan État Région (CPER 2005-2020) MARCO : Recherches marines et littorales en Côte d'Opale : des milieux aux ressources, aux usages et à la qualité des produits aquatiques.
- CNat-1.** Programme National Environnement Côtier (PNEC 2002-2005). Chantier Manche orientale – sud Mer du Nord : déterminisme du bloom de *Phaeocystis* et ses conséquences sur l'écosystème. Responsabilités scientifiques (co-animation avec D. Purdie, Université de Southampton, UK) pour le thème I « Extension sud-nord du bloom de *Phaeocystis* et suivi temporel ». Contribution au thème II « le bloom de *Phaeocystis* : nuisances d'un point de vue socio-économique et/ou écologiques ? ».
- CNat-2.** Programme LITEAU II. Modélisation intégrée des transferts de nutriments depuis les bassins versants de la Seine, de la Somme et l'Escaut jusqu'en Manche – Mer du Nord. Responsabilité scientifique. Convention de recherche N°19-G/2003.
- CNat-3.** Convention Ifremer / Ministère en Charge de l'Environnement. Contribution aux volets Expertises & Appui à la Politique Publique pour la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin et pour la convention OSPAR. Responsabilité scientifique.
- CNat-4.** Convention Ifremer / ONEMA 2010-2015. Projet «Optimisation de l'identification et du dénombrement du micro-phytoplancton avec le système couplé de numérisation et d'analyse d'images FlowCAM / ZooPhytoImage (système innovant)». Responsabilité scientifique depuis 2013.
- CEur-1.** Projet InterReg IV A 2 Mers DYMAPHY « Développement d'un système d'observation DYnamique pour la détermination de la qualité des eaux MARines, basé sur l'analyse du PHYtoplancton » (2010-2014). Responsabilités scientifiques et administratives du projet pour l'Ifremer.
- CEur- 2.** Projet H2020 JERICO-Next (2015-2020). Responsabilité scientifique à l'Ifremer pour le Joint Research Activity Projects 1 (JRAP#1 (pelagic biodiversity) - Biodiversity of plankton, harmful algal blooms and eutrophication) du WP4 (Valorisation through applied joint research).

3.10. Liste des travaux et publications

Revue internationale à comité de lecture

- Art-1.** Lefebvre A., Ellien C., Davoult D., Thiébaud E., Salomon J.C., 2003. Pelagic dispersal of the brittle-star *Ophiothrix fragilis* larvae in a megatidal area (English Channel, France)

- examined using an advection-diffusion model. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 57 (3): 421-433 (IF : 2,057).
- Art-2.** Spilmont N., Migné A., Lefebvre A., Artigas L.F., Rauch M., Davoult D., 2005. Temporal variability of intertidal benthic metabolism under emersed conditions in an exposed sandy beach (Wimereux, eastern English Channel, France). *Journal of Sea Research*, 53: 161-167 (IF : 1,990).
- Art-3.** Woehrling D., Lefebvre A., Le Fèvre-Lehoërff G., Delesmont R., 2005. Seasonal and longer term trends in sea temperature along the french North Sea coast, 1975 to 2002. *Journal of the Marine Biological Association U.K.*, 85 (1): 39-48 (IF : 1,064).
- Art-4.** Boulart C., Flament P., Gentilhomme V., Debout K., Mignon C., Lizon F., Scapira M., Lefebvre A., 2006. Atmospherically-promoted photosynthetic activity in a well-mixed ecosystem: Significance of wet deposition events of nitrogen compounds. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 69: 449-458 (IF : 2,057).
- Art-5.** Gohin F., Saulquin B., Oger-Jeanneret H., Lozac'h L., Lampert L., Lefebvre A., Riou P., Bruchon F., 2008. Using satellite-derived chlorophyll concentrations for monitoring the eutrophication risk of coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 112 : 3329-3340 (IF : 4,77).
- Art-6.** Lefebvre A., Guiselin N., Barbet F., Artigas L. F., 2011. Long-term hydrological and phytoplankton monitoring (1992-2007) of three potentially eutrophicated systems in the eastern English Channel and the southern bight of the North Sea. *ICES Journal of Marine Science*, 68(10): 2029-2043 (IF : 2,377).
- Art-7.** Hernández Fariñas T., Soudant D., Barillé L., Belin C., Lefebvre A., Bacher C., 2013. Temporal changes in the phytoplankton community along the French coast of the eastern English Channel and the southern Bight of the North Sea. *ICES Journal of Marine Science*, doi:10.1093/icesjms/fst192.
- Art-8.** Thyssen M., Alvain S., Lefebvre A., Dessailly D., Rijkeboer M., Guiselin N., Creach V., Artigas L.-F., 2015. High-resolution analysis of a North Sea phytoplankton community structure based on in situ flow cytometry observations and potential implication for remote sensing. *Biogeosciences*, 12, 4051-4066 (IF : 3,753).
- Art-8.** Rousseeuw K., Poisson-Caillault E., Lefebvre A., Hamad D., 2015. Hybrid Hidden Markov Model for Marine Environment Monitoring. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8 (1), 204-213 (IF : 3,026).
- Art-10.** Bonato S., Christaki U., Lefebvre A., Lizon F., Thyssen M., Artigas F., 2015. High spatial variability of phytoplankton assessed by flow cytometry, in a dynamic productive coastal area, in spring: the eastern English Channel. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 154: 214-223 (IF : 2,057).

Revue nationale

- Art-11.** Lefebvre A., 2004. Seasonal trends of the *Phaeocystis* sp. and nutrients dynamics in the eastern English Channel. *Journal de Recherche Océanographique*, 28, fasc. 1 et 2, 57-61.
- Art-12.** Devreker D., Lefebvre A., 2014. TTAinterfaceTrendAnalysis: An R GUI for routine Temporal Trend Analysis and diagnostics. *Journal of Oceanography, Research and Data*, Vol. 6: 1 - 18.

Ouvrages et articles dans ouvrage avec ISBN

- O-1.** Lefebvre A. & D. Davoult, 2001. Horizontal distribution of *Ophiothrix fragilis* planktonic larvae associated with a tidal front in an open coastal sea. In: *Echinoderms 2000*, Barker M. (ed). Balkema, Rotterdam: 293-297.
- O-2.** Lefebvre A., Belin C., Amouroux I., Claisse D., 2011. Surveillance de la qualité des eaux côtières sur le littoral Nord, Pas-de-Calais et Picardie (Manche orientale) : Etat des lieux. In : *Observation des écosystèmes marin et terrestre de la côte d'Opale : du naturalisme à*

l'écologie. F.G. Schmitt (Coord.). Édition Union des Océanographes de France, Paris, pp. 225-252.

- O-3.** Zongo S. B., Schmitt F. G., Lefebvre A., Repecaud M., 2011. Observations biogéochimiques des eaux côtières à Boulogne-sur-mer à haute fréquence: les mesures automatiques de la bouée MAREL. *In*: Observation des écosystèmes marin et terrestre de la côte d'Opale: du naturalisme à l'écologie. F.G. Schmitt (Coord.). Édition Union des Océanographes de France, Paris, pp. 253-266.
- O-4.** Francois G Schmitt, Alain Lefebvre (Eds.), Mesures à haute résolution dans l'environnement marin côtier, CNRS Editions, 2016. ISBN 978-2-271-08592-4 (<http://www.cnrseditions.fr/home/7300-mesures-a-haute-resolution-dans-l-environnement-marin-cotier.html>)
- O-5.** Lefebvre A., Schmitt F. G., 2016. Introduction. In Mesures à haute résolution dans l'environnement marin côtier, Schmitt, F.G. et Lefebvre A. (Eds.) CNRS Editions, 2016, pp. 11-13.
- O-6.** Lefebvre A., Poisson-Caillault E., Rousseeuw K., Hamad D., Soudant D., Soudant A., Gohin F., Répécaud M., 2016. La station instrumentée MAREL Carnot : retours d'expérience de 10 ans d'observation à haute fréquence d'une zone côtière sous influence anthropique. In Mesures à haute résolution dans l'environnement marin côtier, Schmitt, F.G. et Lefebvre A. (Eds.) CNRS Editions, 2016, pp. 17-30.
- O-7.** Schmitt F. G., Zongo S. B., Lefebvre A., 2016. Dynamique multi-échelle et extrêmes dans les ratios stochiométriques mesurés en Manche orientale : MAREL Carnot et SOMLIT. In Mesures à haute résolution dans l'environnement marin côtier, Schmitt, F.G. et Lefebvre A. (Eds.) CNRS Editions, 2016, pp. 91-98.
- O-8.** Rousseeuw K., Caillault E., Lefebvre A., Hamad D., 2016. Modèle de Markov caché hybridé pour la surveillance de l'environnement marin. In Mesures à haute résolution dans l'environnement marin côtier, Schmitt, F.G. et Lefebvre A. (Eds.) CNRS Editions, 2016, pp. 111-120.

Actes de conférences avec comité de lecture

- AC-1.** Rousseeuw, K., Caillault, E.P., Lefebvre A., Hamad D., 2013. Monitoring system of phytoplankton blooms by using unsupervised classifier and time modelling. *In* IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2013), Melbourne, 21-26 July 2013, pp. 3962-3965.

En préparation ou en soumission

- ArtS-1.** Delegrange A., Lefebvre A., Amara R., Courcot L., Vincent D.. *Pseudo-nitzschia sp.* diversity in the southern North Sea, domoic acid production and associated phytoplankton communities. Soumis à Harmful Algae.
- ArtS-2.** Lefebvre A., Caillault-Poisson E.. High resolution overview and modelling of phytoplankton spectral groups distribution in the eastern English Channel. En préparation.
- ArtS-3.** Lefebvre A., Caillault-Poisson E.. Changes in the phytoplankton biomass and phenology in the southern bight of the North Sea during the period 1989-2014. En préparation.
- ArtS-4.** Lefebvre A., Devreker D. Implementation of the European Marine Strategy Framework Directive in the French waters. En préparation.

Rapporteurs de travaux scientifiques

Arbitre pour des revues internationales :

- Aquatic Ecology (1 article)
- Marine Ecology Progress Series (1 article)

Rapports finaux des réseaux d'observation et de surveillance, d'études et de contrats, d'appui à la politique publique dont ceux de la Communauté Européenne

- 2000 -

R-1. Morel M., Delesmont R., Hitier B., Lefebvre A., Loquet N., Meirland A., Olivesi R., 2000. Suivi Régional des Nutriments sur le littoral du Nord Pas de Calais. Bilan de l'année 2000. Rapport Ifremer, octobre 2000, 93 p.

- 2001 -

R-2. Lefebvre A., 2001. Résultats de la Surveillance de la Qualité du Milieu Marin Littoral, édition 2001. Rapport Ifremer, laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, édition juin 2001, 30 p.

R-3. Lefebvre A., Hitier B., Gagnard-Holod M., 2001. Suivi Régional des Nutriments sur le littoral du Nord Pas de Calais. Bilan de l'année 2000. Rapport Ifremer, octobre 2001, 91 p.

R-4. Le Fèvre-Lehoërff G., Delesmont R., Dewarumez J.-M., Hitier B., Lefebvre A., Luczak C., Woerhling D., 2001. Surveillance écologique du site de production électronucléaire de Gravelines Novembre 1999 - Octobre 2000. Rapport Ifremer R.INT.DEL/EC/01.05, 156 p.

- 2002 -

R-5. Fournier A., Lefebvre A., 2002. Évolution spatiale et temporelle de la qualité des masses d'eau au large de Boulogne-sur-Mer. Rapport Ifremer DEL/BL/RST/02/06, 29 p.

R-6. Gagneux V., Lefebvre A., 2002. Recrutement des larves de l'annélide polychète *Polydora sp.* en Baie de Somme . Rapport Ifremer DEL/BL/TMR/02/04, 40 p.

R-7. Lefebvre A., 2002. Résultats de la Surveillance de la Qualité du Milieu Marin Littoral, édition 2002. Rapport Ifremer, laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, édition juin 2002, 43 p.

R-8. Lefebvre A., Fournier A., 2002. Suivi Régional des Nutriments sur le littoral du Nord Pas de Calais Picardie. Bilan de l'année 2000. Rapport Ifremer DEL/BL/TMR/02/05, 92 p.

R-9. Lefebvre A., Repecaud M., Facq J.-V., Lefebvre G., B. Hitier, 2002. Projet d'implantation de la station de mesures automatisées MAREL dans le port de Boulogne sur mer - Mesures *in situ* et résultats du modèle d'advection-diffusion Mars 2D. Rapport Ifremer DEL/BL/RST/02/07, 51 p.

R-10. Lefebvre A., Delesmont R., Dewarumez J.-M., Hitier B., Le Fèvre-Lehoërff G., Luczak C., Woerhling D., 2002. Surveillance écologique du site de production électronucléaire de Gravelines Novembre 2000 - Octobre 2001. Rapport Ifremer DEL/BL/RST/02/01, 169 p.

- 2003 -

R-11. Barbet F., Lefebvre A., 2003. Évolution spatiale et temporelle de la qualité des masses d'eau au large de Boulogne-sur-Mer. Rapport Ifremer DEL/BL/TMR/03/02, 30 p.

R-12. Lefebvre A., Barbet F., 2003. Suivi Régional des Nutriments sur le littoral du Nord Pas de Calais Picardie. Bilan de l'année 2002. Rapport Ifremer DEL/BL/RST/03/03, 98 p.

R-13. Lefebvre A., Bucas K., 2003 Résultats de la Surveillance de la Qualité du Milieu Marin Littoral, édition 2003. Rapport Ifremer, laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 58 p.

R-14. Lefebvre A., Delesmont R., Dewarumez J.-M., Hitier B., Le Fèvre-Lehoërff G., Luczak C., Woerhling D., 2003. Rapport de Surveillance Ecologique et Halieutique Site de Gravelines Novembre 2001 à Octobre 2002. Rapport DEL/BL/RST/03/01, 167 p.

- 2004 -

- R-15.** Desombre J., Lefebvre A., Bucas K., 2004. Campagne RNOsed 1998. Analyse de la contamination des sédiments du littoral Nord / Pas de Calais/ Picardie. Rapport Ifremer DEL/BL/RST/04/09, 118 p.
- R-16.** Hebert C., Lefebvre A., 2004. Circulation des masses d'eau dans la rade de Boulogne sur Mer - Étude préalable à l'implantation de la station de mesures automatisées MAREL Carnot - Rapport Ifremer DEL/BL/RST/04/08, 18 p.
- R-17.** Hébert C., Lefebvre A., K. Bucas, 2004. Estimation des apports continentaux en éléments nutritifs vers la zone côtière du détroit du Pas-de-Calais, Manche orientale. Rapport Ifremer DEL/BL/RST/04/03, 51 p. + Annexes.
- R-18.** Lefebvre A., Bucas K., 2004 Résultats de la Surveillance de la Qualité du Milieu Marin Littoral, édition 2004. Rapport Ifremer/RST.DEL.BL/04.02/Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 54 p.
- R-19.** Lefebvre A., Delpech J.-P., 2004. Le bloom de *Phaeocystis* en Manche orientale : nuisances socio-économiques et / ou écologiques ? Rapport Ifremer DEL/BL/RST/04/11, 36 p.
- R-20.** Lefebvre A., Libert A., 2004. Suivi Régional des Nutriments sur le littoral du Nord Pas de Calais Picardie. Bilan de l'année 2003. Rapport Ifremer/DEL/BL/RST/04/04, 92 p.
- R-21.** Lefebvre A., Sauvage A., 2004. Caractéristiques physico-chimiques, hydrologiques et biologiques de la Mer du Nord en situation hivernale. Résultats de la campagne IBTS / LITEAU II (janvier 2004). Rapport Ifremer DEL/BL/RST/04/07, 54 p.
- R-22.** Lefebvre A., Delesmont R., Dewarumez J.-M., Hitier B., Le Fèvre-Lehoërff G., Luczak C., Woerhling D., 2004. Rapport de Surveillance Ecologique et Halieutique Site de Gravelines Novembre 2002 à Octobre 2003. Rapport Ifremer DEL/BL/RST/04/01, 164 p.

- 2005 -

- R-23.** Barbet F., Lefebvre A., Cugier P., Vanhoutte-Brunier A., Ménesguen A., Dumas F., 2006. Le modèle ECOMARS 3D Notice d'utilisation. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/06.08, 113 p. + Annexes.
- R-24.** Carpentier A., Vaz S., Martin C.S., Coppin F., Dauvin J.-C., Desroy N., Dewarumez J.-M., Eastwood P.D., Ernande B., Harrop S., Kemp Z., Koubbi P., Leader-Williams N., Lefebvre A., Lemoine M., Loots S., Meaden G.J., Ryan N., Walkey M., 2005. Eastern Channel Habitat Atlas for Marine Resource Management (CHARM), Atlas des Habitats des Ressources Marines de la Manche Orientale, INTERREG IIIA, 225 p. + Rapport technique, 54 p.
- R-25.** Duquesne V., Lefebvre A., Vérin F., 2006. Évaluation de la qualité et de la stabilité des zones de production conchylicole. Départements : Nord, Pas de Calais et Somme. Édition 2005. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/06.06, 46 p.
- R-26.** Lefebvre A., Carton C., 2005. Suivi Régional des Nutriments sur le littoral du Nord Pas de Calais Picardie. Bilan de l'année 2004. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/05.05/Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 130 p.
- R-27.** Lefebvre A., Blondel C., Duquesne V., Hébert P., Vérin F., 2005. Résultats de la Surveillance de la Qualité du Milieu Marin Littoral, édition 2005. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/05.03/Laboratoire Environnement Ressources de Boulogne-sur-Mer, 56 p.
- R-28.** Lefebvre A., Delesmont R., Dewarumez J.-M., Hitier B., Le Fèvre-Lehoërff G., Luczak C., Woerhling D., 2005. Rapport de Surveillance Ecologique et Halieutique Site de Gravelines Novembre 2003 à Octobre 2004. Rapport DEL/BL/RST/05.01, 170 p.

- 2006 -

- R-29.** Lefebvre A., 2006. Projet de création d'un Centre de Purification de Coquillages au Crotoy (Baie de Somme) – Qualité des eaux (Phase 1). Rapport Ifremer/RST.LER.BL/06.05/Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 17 p.
- R-30.** Lefebvre A., Bonte Y., 2006. Suivi Régional des Nutriments sur le littoral du Nord Pas de Calais Picardie. Bilan de l'année 2005. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/06.03, laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 149 p.
- R-31.** Lefebvre A., M. Repecaud, 2006. MAREL Carnot - Partie 1 : Bilan de la mise en place d'un système de mesures automatisées à haute fréquence en zone côtière de Boulogne-sur-Mer. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/06.09, 18 p. + CD ROM
- R-32.** Lefebvre A., Blondel C., Duquesne V., Hébert P., Vérin F., Cuvelier N., 2006. Résultats de la Surveillance de la Qualité du Milieu Marin Littoral, édition 2006. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/06.02/Laboratoire Environnement Ressources de Boulogne-sur-Mer, 50 p.
- R-33.** Lefebvre A., Brylinski J.-M., Delesmont R., Dewarumez J.-M., Luczak C., Vincent D., Woerhling D., 2006. Rapport de Surveillance Ecologique et Halieutique Site de Gravelines Novembre 2004 à Octobre 2005. Rapport DEL/BL/RST/06.01, 174 p.
- R-34.** Lefebvre A., Ménesguen A., Cugier P., Lancelot C., Lacroix G., Gypens N., Billen G., Garnier J., 2006. Rapport final du projet LITEAU II « Modélisation intégrée des transferts de nutriments depuis les bassins versants de la Seine, la Somme et l'Escaut jusqu'en Manche et Baie Sud de la Mer du Nord ». Convention de recherche 19-G/2003, 108 p. + Annexes.

- 2007 -

- R-35.** Antajan E., Lefebvre A., 2007. Projet de création d'un Centre de Purification de Coquillages au Crotoy (Baie de Somme) – Qualité des eaux (Phase 2). Rapport Ifremer/RST.LER.BL/07.03, laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 16 p.
- R-36.** Duquesne V, Vérin F., Lefebvre A., 2007. Évaluation de la qualité et de la stabilité des zones de production conchylicole. Départements : Nord, Pas-de-Calais et Somme. Édition 2007. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/07.07, 49 p.
- R-37.** Lefebvre A., 2007. MAREL Carnot : Partie 2 : Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Données de l'année 2006. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/07.08, 44 p.
- R-38.** Lefebvre A., Dewaele K., 2007. Suivi Régional des Nutriments sur le littoral du Nord Pas de Calais Picardie. Bilan de l'année 2006. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/07.05, laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 149 p.
- R-39.** Lefebvre A., Blondel C., Duquesne V., Hébert P., Vérin F., 2007. Résultats de la Surveillance de la Qualité du Milieu Marin Littoral, édition 2007. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/07.02/Laboratoire Environnement Ressources de Boulogne-sur-Mer, 59 p.
- R-40.** Lefebvre A., Brylinski J.-M., Delesmont R., Dewarumez J.-M., Luczak C., Vincent D., Woerhling D., 2007. Rapport de Surveillance Ecologique et Halieutique Site de Gravelines Novembre 2005 à Octobre 2006. Rapport LER-BL/RST/07.01, 182 p.

- 2008 -

- R-41.** Bellamy E., Lefebvre A., Mahé K., 2008. Mortalité de coques (*Cerastoderma edule*) observée en baie de Somme en mai 2008. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/08.07/Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 47 p.
- R-42.** Lefebvre A., 2008. MAREL Carnot : Rapport n° 3 : Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2007. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/08.04, 23 p.

- R-43.** Lefebvre A., Caboche J., 2008. Suivi Régional des Nutriments sur le littoral du Nord Pas de Calais Picardie. Bilan de l'année 2007. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/08.03/Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 187 p.
- R-44.** Lefebvre A., Blondel C., Hébert P., Vérin F., 2008. Résultats de la Surveillance de la Qualité du Milieu Marin Littoral, édition 2008. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/08.02/Laboratoire Environnement Ressources de Boulogne-sur-Mer, 54 p.
- R-45.** Lefebvre A., Antajan E., Delesmont R., Dewarumez J.-M., Luczak C., 2008. Rapport de Surveillance Ecologique et Halieutique Site de Gravelines Novembre 2006 à Octobre 2007. Rapport LER-BL/RST/08.01, 158 p.
- R-46.** Lefebvre A., Ménesguen A., Cugier P., Lancelot C., Lacroix G., Gypens N., Billen G., Garnier J., 2008. Rapport final du projet LITEAU II « Modélisation intégrée des transferts de nutriments depuis les bassins versants de la Seine, la Somme et l'Escaut jusqu'en Manche et Baie Sud de la Mer du Nord ». Convention de recherche 19-G/2003, 109 p. + Annexes.
- R-47.** Soudant A., Soudant D., Lefebvre A., 2008. Influence de la période et de la fréquence d'échantillonnage sur le percentile 90 de la fluorescence. Rapport Ifremer/R.INT. DOP/DYNECO/VIGIES2008.17, 36 p.
- R-48.** Vérin F., Lefebvre A., 2008. Évaluation de la qualité et de la stabilité des zones de production conchylicole. Départements : Nord, Pas-de-Calais et Somme. Édition 2008. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/08.05, 51 p.
- R-49.** Vérin F., Duquesne V., Lefebvre A., 2008. Etude de la qualité microbiologique et chimique de la zone "au large de la commune de Zuydcoote". Rapport Ifremer/RST.LER.BL/08.08/Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 35 p.

- 2009 -

- R-50.** Antajan E., Delesmont R., Dewarumez J.-M., Lefebvre A., Luczak C., Warembourg C., 2009. Rapport de Surveillance Ecologique et Halieutique Site de Gravelines Novembre 2007 à Octobre 2008. Rapport LER-BL/RST/09.01, 131 p.
- R-51.** Bellamy E., Lefebvre A., Mahé K., De Rafélis M., 2009. Croissance de la coque (*Cerastoderma edule*) en baie de Somme : Morphométrie et marquage. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/09.04/Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 60 p.
- R-52.** Carpentier A, Martin CS, Vaz S (Eds.), 2009. Channel Habitat Atlas for marine Resource Management, final report / Atlas des habitats des ressources marines de la Manche orientale, rapport final (CHARM phase II). INTERREG 3a Programme, IFREMER, Boulogne-sur-mer, France. 626 pp. & CD-rom (Contribution au chapitre 3).
- R-53.** Lefebvre A., Lagache C., 2009. Suivi Régional des Nutriments sur le littoral du Nord Pas de Calais Picardie. Bilan de l'année 2008. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/09.03/Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 171 p.
- R-54.** Lefebvre A., Lagache C., 2009. Mortalité de moules de bouchots observée à Quend Plage - Printemps 2009. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/09.07, 15 p.
- R-55.** Lefebvre A., Blondel C., Hébert P., Rauflet F., Vérin F., 2009. Résultats de la Surveillance de la Qualité du Milieu Marin Littoral, édition 2009. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/09.02/Laboratoire Environnement Ressources de Boulogne-sur-Mer, 65 p.
- R-56.** Vérin F., Lefebvre A., 2009. Évaluation de la qualité et de la stabilité des zones de production conchylicole. Départements : Nord, Pas-de-Calais et Somme. Édition 2009. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/09.05, 48 p.
- R-57.** Vérin F., Caboche J., Lagache C., Lefebvre A., 2009. Etude de la qualité microbiologique et chimique de la zone 62.10 « Dannes ». Rapport Ifremer/RST.LER.BL/09.08, 29 p.

- 2010 -

- R-58.** Antajan E., Delesmont R., Dewarumez J.-M., Lefebvre A., Luczak C., Warembourg C., 2010. Rapport de Surveillance Ecologique et Halieutique Site de Gravelines Novembre 2008 à Octobre 2009. Rapport LER-BL/RST/10.01, 151 p.
- R-59.** Baheux M., Lefebvre A., 2010. Caractérisation de l'influence de l'hypoxie liée à *Polydora sp.* sur la mortalité des moules de bouchot. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/10.05/Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 60 p.
- R-60.** Lefebvre A., 2010. MAREL Carnot : Rapport n°4 : Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2009. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/10.08, 20 p.
- R-61.** Lefebvre A., Cordier Rémy, 2010. Suivi Régional des Nutriments sur le littoral du Nord Pas de Calais Picardie. Bilan de l'année 2009. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/10.03/Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 201 p.
- R-62.** Lefebvre A., Cordier R., 2010. Bilan 2010 de la mise en œuvre de la DCE pour le bassin Artois-Picardie. Masses d'eau côtières et de transitions du Nord, du Pas-de-Calais et de la Picardie. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/10.06/Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 42 p.
- R-63.** Lefebvre A., Blondel C., Hébert P., Rauflet F., Vérin F., 2010. Résultats de la Surveillance de la Qualité du Milieu Marin Littoral, édition 2010. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/10.02/Laboratoire Environnement Ressources de Boulogne-sur-Mer, 58 p.
- R-64.** Vérin F., Lefebvre A., 2010. Évaluation de la qualité et de la stabilité des zones de production conchylicole. Départements : Nord, Pas-de-Calais et Somme. Édition 2010. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/10.07, 54 p.

- 2011 -

- R-65.** Antajan E., Delesmont R., Dewarumez J.-M., Lefebvre A., Loots C., Luczak C., 2011. Rapport de Surveillance Ecologique et Halieutique Site de Gravelines Novembre 2009 à Octobre 2010. Rapport LER-BL/RST/11.01, 144 p.
- R-66.** Lefebvre A., 2011. Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (2008/56/CE). Descripteur 5 - Eutrophisation : État de l'art : les indicateurs de qualité de masses d'eau et/ou de l'état d'eutrophisation, proposition d'organisation et plan de travail. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/11.02, 51 p.
- R-67.** Lefebvre A., 2011. MAREL Carnot : Rapport n° 5 : Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2010. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/11.04, 19 p.
- R-68.** Lefebvre A., 2011. Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM). Définition du Bon Etat Ecologique (BEE). Rapport intermédiaire : Descripteur 5 : L'Eutrophisation d'origine humaine, en particulier pour ce qui est de ses effets néfastes, tels que l'appauvrissement de la biodiversité, la dégradation des écosystèmes, la prolifération d'algues toxiques et la désoxygénation des eaux de fond, est réduite au minimum. Rapport pour le MEDTL - Direction de l'eau et de la biodiversité - Sous-direction du littoral et des milieux marins, juin 2011. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/11.08/Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 14 p.
- R-69.** Lefebvre A., 2011. Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM). Définition du Bon Etat Ecologique (BEE) pour le Descripteur 5. Rapport pour le MEDTL - Direction de l'eau et de la biodiversité - Sous-direction du littoral et des milieux marins, juin 2011, Rapport Ifremer/RST.LER.BL/11.10/Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 45 p.
- R-70.** Lefebvre A., Ait-Hamoudi T., 2011. Suivi Régional des Nutriments sur le littoral du Nord Pas de Calais Picardie. Bilan de l'année 2010. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/11.05/Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 204 p.
- R-71.** Lefebvre A., Ait-Hamoudi T., 2011. Répartition trimestrielle des espèces phytoplanctoniques dominantes, basée sur l'indice de Sanders, dans le cadre du Suivi

Régional des nutriments sur le littoral Nord-pas-de-Calais/ Picardie. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/11.07/Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 30 p.

- R-72.** Lefebvre A., Blondel C., Cordier R., Duquesne V., Hébert P., Raufflet F., Vérin F., 2011. Résultats de la Surveillance de la Qualité du Milieu Marin Littoral, édition 2011. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/11.03/Laboratoire Environnement Ressources de Boulogne-sur-Mer, 73 p.
- R-73.** Vérin F, Lefebvre A., Cordier R., 2011. Évaluation de la qualité et de la stabilité des zones de production conchylicole. Départements : Nord, Pas-de-Calais et Somme. Édition 2011. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/11.09, 51 p.

- 2012 -

- R-74.** Antajan E., Delesmont R., Dewarumez J.-M., Lefebvre A., Loots C., Luczak C., 2012. Rapport de Surveillance Ecologique et Halieutique Site de Gravelines Novembre 2010 à Octobre 2011. Rapport LER-BL/RST/12.01, 146 p.
- R-75.** Lefebvre A., 2012. Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM). Définition du Bon Etat Écologique (BEE) pour le Descripteur 5 lié à l'eutrophisation. Rapport final. Rapport pour le MEDTL - Direction de l'eau et de la biodiversité - Sous-direction du littoral et des milieux marins, janvier 2012. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/12.01.2, Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 51 p.
- R-76.** Lefebvre A., 2012. La Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM). Identification des besoins de recherches pour le descripteur 5 lié à l'eutrophisation. Rapport Ifremer LER-BL/RST/12.02, Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 23 p.
- R-77.** Lefebvre A., 2012. Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (2008/56/CE) - Descripteur 5 Eutrophisation - Chantier 2 : Livrable 3 - Analyse du recensement. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/12.09, 7 p.
- R-78.** Lefebvre A., Baladou M., 2011. Suivi Régional des Nutriments sur le littoral du Nord Pas de Calais Picardie. Bilan de l'année 2011. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/12.04, Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 177 p.
- R-79.** Lefebvre A., Rousseeuw K., 2012. MAREL Carnot : Variabilités mensuelle et interannuelle de la fluorescence, de la salinité, de la turbidité et de l'oxygène. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/12.10, 24 p.
- R-80.** Lefebvre A., Rousseeuw K., Caillault E., 2012. MAREL Carnot : Rapport n°6 : Valorisation des données d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2011. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/12.05, Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 36 p.
- R-81.** Lefebvre A., Blondel C., Cordier R., Duquesne V., Hébert P., Vérin F., 2012. Résultats de la Surveillance de la Qualité du Milieu Marin Littoral, Édition 2012. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/12.03, Laboratoire côtier de Boulogne-sur-Mer, 70 p.
- R-82.** Vérin F., Lefebvre A., 2012. Évaluation de la qualité et de la stabilité des zones de production conchylicole. Départements : Nord, Pas-de-Calais et Somme. Édition 2012. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/12.08, 58 p.

- 2013 -

- R-83.** Antajan E., Hervio-Heath D., Lefebvre A., Loots C., Luczak C., 2013. Rapport de Surveillance Ecologique et Halieutique Site de Gravelines Novembre 2011 à Octobre 2012. Rapport LER-BL/RST/13.01, 149 p.
- R-84.** Duquesne V. & Lefebvre A., 2013. Suivi des paramètres Physico-chimiques sur le site conchylicole de Oye-Plage. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/13.11, 12 p.

- R-85.** Fiant L., Lefebvre A., Blondel C., Cordier R., Duquesne V., Hébert P., Vérin F., 2013. Résultats de la Surveillance de la Qualité du Milieu Marin Littoral, Édition 2013. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/13.05, 75 p.
- R-86.** Lefebvre A., 2013. Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (2008/56/CE) - Programme de surveillance - Livrable 5 : Proposition scientifique et technique de paramètres et de dispositifs de suivis associés. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/13.02, 60 p.
- R-87.** Lefebvre A., Rousseuw K., 2013. MAREL Carnot : Rapport n° 7 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2012. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/13.09, 25 p.
- R-88.** Lefebvre A., Blondel C., Cordier R., Duquesne V., Fiant L., Hébert P., Rauflet F., Vérin F., 2013. Résultats de la Surveillance de la Qualité du Milieu Marin Littoral, édition 2013. Rapport Ifremer/RST.LER.BL/13.05/Laboratoire Environnement Ressources de Boulogne-sur-Mer, 75 p.
- R-89.** Nzigou A-R. & Lefebvre A., 2013. Suivi Régional des Nutriments sur le littoral du Nord Pas de Calais Picardie. Bilan de l'année 2013. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/13.12, 169 p.
- R-90.** Vérin F., Nzigou A-R. Lefebvre A., 2013. Évaluation de la qualité des zones de production conchylicole. Période 2010-2012. Départements : Nord, Pas-de-Calais et Somme. Édition 2013. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/13.07, 64 p.
- R-91.** Wacquet G., Lefebvre A., 2013. Projet FlowCam/Phytolmage : cahier des charges pour l'interface graphique utilisateur et fonctionnalités requises pour l'utilisation en (pré)routine de ZooPhytolmage. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/13.10, 21 p.

- 2014 -

- R-92.** Antajan E., Delesmont R., Foveau A., Hervio-Heath D., Lefebvre A., Loots C., Luczak C., 2014. Surveillance écologique et halieutique du site de Gravelines, Novembre 2012 - Octobre 2013. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/14.01, 160 p.
- R-93.** Lefebvre A., Mégret C., 2014. Suivi Régional des Nutriments sur le littoral du Nord Pas de Calais Picardie. Bilan de l'année 2013. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/14.05, 195 p.
- R-94.** Lefebvre A., Rousseuw K., 2014. MAREL Carnot - Rapport n° 8 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2013. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/14.02, 28 p.
- R-95.** Lefebvre A., Blondel C., Cordier R., Duquesne V., Hébert P., Vérin F., 2014. Résultats de la Surveillance de la Qualité du Milieu Marin Littoral, Édition 2014. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/14.03, 72 p.
- R-96.** Vérin F., Lefebvre A., 2014. Évaluation de la qualité des zones de production conchylicole. Période 2011-2013. Départements : Nord, Pas-de-Calais et Somme. Édition 2014. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/14.04, 64 p.
- R-97.** Wacquet G., Lefebvre A., 2014. Protocole sur les outils de reconnaissance optimisés Manche Atlantique. Rapport convention Ifremer/ONEMA 2013-2015, Février 2014, 239 p.
- R-98.** Wacquet G., Lefebvre A., Colas F., Grosjean P., 2014. Finalisation d'un outil pré-opérationnel FlowCam / Phytolmage. Rapport convention Ifremer/ONEMA 2013-2015, Février 2014, 150 p.

- 2015 -

- R-99.** Antajan E., Lefebvre A., Loots C., Luyczak C., Ruellet T., 2015. Rapport de Surveillance Ecologique et Halieutique Site de Gravelines Novembre 2013 à Octobre 2014. Rapport ODE/LITTORAL/LER.BL/15.01, 153 pages.

- R-100.** Vérin F., Lefebvre A., 2015. Évaluation de la qualité des zones de production conchylicole. Période 2012-2014. Départements : Nord, Pas-de-Calais et Somme. Édition 2015. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/15.02, 62 p.
- R-101.** Lefebvre A., Devreker D., 2015. MAREL Carnot : Rapport n° 9 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2014. Ifremer/RST.LER.BL/15.06, 37 pages.
- R-102.** Lefebvre A., Blondel C., Cordier R., Duquesne V., Hébert P., Vérin F., 2015. Résultats de la Surveillance de la Qualité du Milieu Marin Littoral, Édition 2015. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/15.03, 80 p.
- R-103.** Rousseeuw K., Lefebvre A., Caillault-Poisson E., 2015. Synthèse des résultats de la thèse de Rousseeuw K. (2011-2014). Modélisation de signaux temporels hautes fréquences, multicapteurs à valeurs manquantes. Application à la prédiction des efflorescences phytoplanctoniques dans les rivières et les écosystèmes marins côtiers. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/15.04, 29 p.
- R-104.** Lefebvre A, Flesch M., 2015. Suivi Régional des Nutriments sur le littoral du Nord Pas de Calais Picardie. Bilan de l'année 2014. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/15.05, 205 p.
- R-105.** Lefebvre A., Devreker D., 2015. MAREL Carnot : Rapport n° 9 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2014. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/15.06, 37 pages.
- R-106.** Neaud-Masson N., Blondel C., Lefebvre A., Hebert P., Maurer D., Meteigner C., Rumebe M., Wacquet G., 2015. Catalogue illustré des images d'un set d'apprentissage réalisé à l'aide de l'outil FlowCAM – ZooPhytoImage utilisé dans le cadre du REPHY. Images issues de numérisations de phytoplancton au grossissement 4X, d'échantillons d'eau, pour le set d'apprentissage global Manche-Atlantique. Rapport Ifremer R.INT.ODE/DYNECO/VIGIES/15-14, 69 pages.
- 2016 -**
- R-107.** Antajan E., Lefebvre A., Loots C., Luyczak C., Ruellet T., 2016. Rapport de Surveillance Ecologique et Halieutique Site de Gravelines Novembre 2014 à Octobre 2015. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/16.01, 169 pages.
- R-108.** Devreker D., Lefebvre A., 2016. Third application of the Common Procedure (COMP3) to determine eutrophication status of OSPAR marine waters. French national report. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/16.02, 80 pages.
- R-109.** Neaud-Masson N., Lefebvre A., Gauthier E., Huguet A., Szidon A., Lefebvre A., Cuveliez R., 2016. Optimisation de l'identification et du dénombrement du micro-phytoplancton avec le système couplé de numérisation et d'analyse d'images FlowCAM / ZooPhytoImage (système innovant). Action 9 – Livrable 2. Mise en œuvre opérationnelle de l'outil FlowCAM-Zoo/PhytoImage dans le cadre de la surveillance REPHY. Résultats sur 12-18 mois. Rapport Ifremer, Umanis, Université de Mons, ULCO pour l'ONEMA, février 2016, 266 p.
- R-110.** Lefebvre A., Devreker D., 2016. Plan de travail et plan de charge pour la révision de l'évaluation initial et de la définition du bon état écologique de la DCSSM – Descripteur 5 Eutrophisation (Echéance 2018). Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/16.03, 16 pages.
- R-111.** Vérin F., Lefebvre A., 2016. Évaluation de la qualité des zones de production conchylicole. Période 2013-2015. Départements : Nord, Pas-de-Calais et Somme. Édition 2016. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/16.04, 69 p.
- R-112.** Poisson-Caillault E., Lefebvre A., Ternynck P., 2016. Interface uHMM : Une interface utilisateur graphique sous R, pour construire un modèle de Markov caché non supervisé. Convention ULCO/LISIC-AEAP. Rapport ULCO/LISIC, 16 pages.
- R-113.** Lefebvre A., Poisson-Caillault E., 2016. MAREL Carnot : Rapport n° 10 : Bilan d'une surveillance à haute fréquence en zone côtière sous influence anthropique (Boulogne-sur-Mer). Bilan de l'année 2015. Ifremer/RST.LER.BL/16.06, 26 pages.

R-114. Lefebvre A., Perrouchet W., 2016. Lefebvre A, Perrouchet W., 2016. Bilan de la mise en œuvre des réseaux REPHY et SRN en Manche orientale et baie sud de la Mer du Nord. Bilan de l'année 2015. Rapport Ifremer ODE/LITTORAL/LER.BL/16.07, 200 p.

Communications internationales dans des colloques et congrès

- CI-1.** Boulart C., Gentilhomme V., Debout K., Flament P., Mignon C., Lefebvre A., 2005. Atmospheric versus fluvial nutrient inputs to a coastal ecosystem. IORC 2005 (Communication orale)..
- CI-2.** Artigas L.F., Guiselin N., Courcot L., Sazhin A., Jauzein C., Lizon F., Lefebvre A., Hebert P., Gentilhomme V., Chétionnot-Dinet M.-J., Purdie D., 2005. Seasonal and inter-annual variability of *Phaeocystis globosa* outbursts in the eastern English Channel and associated phytoplankton dynamics. SCOR-UNESCO working group « *Phaeocystis* » Final meeting, Groningen, NL, 30/08 au 03/09/2009 (Communication orale).
- CI-3.** Artigas L.F., Guiselin N., Courcot L., Sazhin, Jauzein C., Lizon F., Lefebvre A., Hébert P., Chrétiennot-Dinet M.J., Purdie D., Labry C., 2005. Phytoplankton spring blooms in coastal waters of the eastern English Channel: interannual and seasonal monitoring of species composition, biomasses and activities in coastal systems characterised by important *Phaeocystis globosa* outbursts. III International Plankton Symposium, Figueira da Foz, PT, 17-20/03/05 (Communication orale).
- CI-4.** Vanhoutte-Brunier A., Ménesguen A., Gohin F., Cugier P., Lefebvre A., 2005. 3D modelling of phytoplankton bloom in an eutrophicated area. Validation by satellite imagery and tracking nitrogen's origin. AMEMR 2005, Advances in Marine Ecosystem Modelling Research, Plymouth Marine Laboratory, 27-29/06/2005 (poster).
- CI-5.** Carpentier A., Vaz S., Martin C.S., Coppin F., Dauvin J.C., Desroy N., Dewarumez J.-M., Eastwood P.D., Ernande B., Harrop S., Kemp Z., Koubbi P., Leader-William N., Lefebvre A., Loots S., Lemoine M., Meaden G.J., Ryan N., Walkey M., 2005. Eastern Channel Habitat Atlas for Marine Resources Management: CHARM InterReg IIIA project. Colloque CIEM, Aberdeen, NL 20-24/09/2005 (poster).
- CI-6.** Guiselin N., Lefebvre A., Artigas L.F., Barbet F., Breton E., Brylinski J.-M., 2008. Long-term (1992-2007) changes in diatom and *Phaeocystis globosa* spring bloom dynamics in coastal waters of the eastern English Channel. American Geophysical Union Edition, Ocean Science Meeting : From the watershed to the global ocean, Orlando, FL (USA), 2-7 March 2008.
- CI-7.** Guiselin N., Lefebvre A., Barbet F., Arigas F., Breton E. & J.-M. Brylinski, 2008. Long-term changes in diatoms and *Phaeocystis globosa* dynamics in coastal waters of the eastern English Channel. Colloque ASLO Ocean Sciences Meeting, Orlando, USA, 3-7/03/2008 (Communication orale).
- CI-8.** Malcolm S., Johnson D., Lefebvre A., Zevenboom W., Bonne W., Saraiva S., Molvaer J., Mills D., 2009. Achieving a robust eutrophication status assessment of the waters of the north east Atlantic. Applying the OSPAR Comprehensive Procedure. Conférence ASLO 2009, 25-30/01/2009, Nice (communication orale).
- CI-9.** Caillault E., Lefebvre A., 2011. Phytoplankton monitoring system and countermeasures to prevent toxics algae blooms. Colloque NTMS INNOVATIVE PROJECTS 2011 (Fourth International Conference on New Technologies, Mobility and Security) in conjunction with IFIP NTMS 2011, 10/02/2011, Paris (communication orale).
- CI-10.** Lefebvre A., Caillault E., 2011. Study of the dynamic of the Phytoplankton bloom in the eastern English Channel using a high frequency instrumented station (MAREL) and a naive clustering classification method. Colloque EGU (European Geosciences Union) General Assembly 2011, Vienna, Austria, 3-8/04/2011(communication orale).
- CI-11.** Lefebvre A., 2011. Changes in the phytoplankton biomass and phenology in the southern bight of the North Sea during the period 1989-2009. International Symposium on phytoplankton blooms in temperate coastal ecosystems. 19-21/09/ 2011, Wimereux, France (communication orale).

- CI-12.** Breton E., Vincent D., Lecuyer E., Degros N., Grattepanche J.-D., Gentilhomme V., Lefebvre A., 2011. Spring nutrient imbalance controls *Phaeocystis globosa* blooms in coastal waters of the eastern English Channel. International Symposium on phytoplankton blooms in temperate coastal ecosystems. September 19-21, 2011, Wimereux, France (communication orale).
- CI-13.** Lefebvre A., 2011. Implementation of a pocketFerryBox interfaced with a CTD probe and an Algae Online Analyser in an ecosystem affected by undesirable blooms of the colonial haptophyte *Phaeocystis globosa* (eastern English Channel) . Working Group FerryBox, 01-02/09/2011, Helmholtz-Zentrum Geestacht, Hamburg (communication orale et poster).
- CI-14.** Thyssen M., Lefebvre A., Alvain S., Artigas L. F., 2011. Phytoplankton monitoring: automated scanning flow cytometry for a high resolution observing approach. 5th International Conference on Analysis of Microbial Cells at the Single cell level, 5-8/11/2011, Carry-Le-Rouet, France (communication orale).
- CI-15.** Artigas L.F., Alvain S., Broutin M., Caillault E., Courcot L., Cornille V., Chicheportiche J., Creach V., Degros N., Guiselin N., Hamad D., Hebert P.-A., Houliez E., Lefebvre A., Lizon F., Meriaux X., Owen K., Rijkeboer M., Rutten T., Schmitt F., Thyssen M., Veen A., Wacquet G., Zongo S., 2011. From microscope to satellite: DYMAPHY, an international, research project for the application and inter-calibration of different methods for the study of marine phytoplankton. Poster Session, International Symposium on Phytoplankton Blooms in Temperate Coastal Ecosystems, 19-21/09/2011, Wimereux, France (poster).
- CI-16.** Lefebvre A., Artigas F., Thyssen M., Bonato S., Creach V., Lizon F., Rijkeboer M., 2012. Implementation of high frequency approaches to characterize the phytoplankton community and the physico-chemical supporting parameters in the Eastern English Channel and the North Sea. Colloque BBE's Aqualife 2012, 5-6/06/2012, Kiel, Germany (communication orale).
- CI-17.** Artigas L.F., Alvain S., Bonato S., Broutin M., Caillault E., Courcot L., Cornille V., Chicheportiche J., Créach V., Degros N., Guiselin N., Hmad D., Hébert P.A., Houliez E., Lefebvre A., Lizon F., Mériaux X., Owen K., Rijkeboer M., Rutten T., Schmitt F., Thyssen M., Veen A., Wacquet G., Zongo S., 2012. Towards the development of a dynamic observation system for the assessment of marine water quality based on phytoplankton analysis, at high resolution, by combining multiple techniques (DYMAPHY). 15th Biennial Challenger Conference for Marine Sciences, University of East Anglia, Norwich, 3-6/09/2012 (Communication orale).
- CI-18.** Artigas L.F., Alvain S., Bonato S., Caillault E., Créach V., Hamad D., Hébert P.A., Lefebvre A., Lizon F., Rijkeboer M., Rutten T., Thyssen M., Veen A. Development of a Dynamic observation system for the assessment of marine water quality, based on phytoplankton analysis. JERICO Workshop, 16-18/10/2013, Villefranche sur Mer, FR (Communication orale).
- CI-19.** Artigas F., Breton E., Gomez F., Guisselin N., Gentilhomme V., Lefebvre S., Lefebvre A., 2012. Results and trends on twenty years of monitoring and observing phytoplankton dynamics in eastern English Channel (1992-2012). SRN – REPHY - SOMLIT RESOMAR networks and complementary prospective results symposium, 17-20/09/2012, Helgoland Roads, Germany (Communication orale).
- CI-20.** Hernández-Fariñas T., Soudant D., Barillé L., Belin C., Lefebvre A. & C. Bacher, 2013. Temporal changes in the phytoplankton community along the French coast of the eastern English Channel and the southern Bight of the North Sea. 53 Conference ECSA: Estuaries and coastal areas in times of intense change, 13 – 17/10/2013, Shanghai, China (Communication orale).
- CI-21.** Lefebvre A., Rousseeuw K., Caillault E., Hamad D., 2013. Implementation of high frequency approaches to characterize the phytoplankton community and the physico-chemical supporting parameters: Pocket Ferry Box / Algae Online Analyser (Lagrangian approach) & MAREL Carnot (Eulerian approach). DYMAPHY, Working Group Data Analysis, 20-22/03/2013, Calais, France (Communication orale).

- CI-22.** Lefebvre A., Artigas F., Bonato S., Creach V., Rijkeboer M., Thyssen M., 2013. Combination of high frequency devices to characterize the phytoplankton community and the physico-chemical supporting parameters in the Eastern English Channel, the North Sea and the Dutch estuaries. 5th Ferry Box Workshop, Celebrating 20 years Alg@line, 24-25/04/2013, Helsinki, Finland (Communication orale).
- CI-23.** Lefebvre A., Soudant D., Hernández-Farinas T., Belin C., C. Bacher, Rousseeuw K., Caillault E., Hamad D., 2013. Temporal changes in the phytoplankton community and associated environmental parameters at the sight of the French phytoplankton and phycotoxin monitoring network (REPHY) and High Frequency instrumented station (MAREL). ICES Working Series workshop, 15-18/10/2013, Copenhagen, Denmark (Communication orale).
- CI-24.** Lefebvre A., Facq J-V, Artigas F, Bonato S., Creach V., Rijkeboer M, Melilotus Thyssen, 2013. Implementation of an automated system for high frequency measurements. DYMAPHY final meeting, 2-3/12/2013, Boulogne-sur-Mer, France (Communication orale).
- CI-25.** Lefebvre A., Nzigou A.-R., Lizon F, Artigas F., Bonato S., 2013. An overview of phytoplankton community (via spectral groups) and hydrology in spring in the eastern English Channel using high frequency monitoring systems and general perspectives. DYMAPHY final meeting, 2-3/12/2013, Boulogne-sur-Mer, France (Communication orale).
- CI-26.** Lizon F., Houliez E., Artigas F., Cornille V., Creach V., Degros N., Didry M., Lefebvre A., Rijkeboer M., Schmitt F., Thyssen M., 2013. Spectral fluorometric characterization of phytoplankton in coastal waters. DYMAPHY final meeting, 2-3 December 2013, Boulogne-sur-Mer, France (Communication orale).
- CI-27.** Rousseeuw K., Poisson-Caillault E., Lefebvre A., Hamad D., 2013. Monitoring system of phytoplankton blooms by using unsupervised classifier and time modeling. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 21-26 July 2013, Melbourne, Australie (Communication orale).
- CI-28.** Rousseeuw K., Lefebvre A., Poisson-Caillault E. and Hamad D., 2013. Detection of contrasted physico-chemical and biological environmental status using classification and modelling tools. 5th FerryBox Workshop – Celebrating 20 years Alg@line, April 24-25, 2013, Helsinki, Finland (poster).
- CI-29.** Thyssen M., Gregory G., Alvain S., Artigas F., Bachet C., Cornet V., Denis M., Grosse O., Lefebvre A. & D. Lefevre, 2013. Surface phytoplankton community structure within the deep water convection context in the northern mediterranean sea, an automated flow cytometry approach. 40th CIESM Congress, 28 October - 1 November 2013, Marseille, France (Communication orale).
- CI-30.** Bonato S., Artigas L.-F., Lizon F., Lefebvre A., Christaki U., 2014. Phytoplankton distribution assessed by high-frequency flow cytometry, in spring, across the eastern English Channel. 2014 Ocean Science Meeting, ASLO/AGU/The Oceanography Society, 23-28 Février 2014, Honolulu, Hawaiï, USA.(Communication orale).
- CI-31.** Antajan E., Colas F., Tardivel M., Danielou M.-M., Lunven M., Huret M., Wacquet G., Lefebvre A., 2014. Ifremer progress in development of software and hardware for semi-automatic identification and counting of plankton organisms. ICES Working Group Zooplankton Ecology, 24-28 March 2014, Reykjavik, Iceland (Communication orale).
- CI-32.** Lefebvre A., Nzigou A.-R., Artigas F., 2014. High resolution overview of phytoplankton community (via spectral groups) and hydrology in spring in the eastern English Channel. First attempt before a new Ship-Of-Opportunity line across the Channel ? 6th Ferry Box Workshop, 8-9 septembre 2014, Tallinn, Estonie (Communication orale).
- CI-33.** Rousseeuw K., Lefebvre A., Poisson Caillault E., Aimé-Roger Nzigou, 2014. Detection and estimation of environmental states by unsupervised dynamics modelling. Application to FerryBox data. 6th Ferry Box Workshop, 8-9 septembre 2014, Tallinn, Estonie (Poster).
- CI-34.** Lefebvre A., Poisson-Caillault E., Rousseeuw K., 2015. Towards a better understanding of phytoplankton bloom dynamics and assessment of ecological status using unsupervised

- dynamic modelling. Colloque ASLO, Aquatic Science Meeting 2015, 22-27 février 2015, Granada, Espagne (Communication orale).
- CI-35.** Artigas L.F., Bonato S., Creach V., Hébert P.A., Lefebvre A., Lizon F., Poisson-Caillault E., Rijkeboer M., Thyssen M., Veen A., 2015. On the combination of semi-automated approaches and tools for measuring phytoplankton dynamics in coastal waters: implications for monitoring networks. Colloque ASLO, Aquatic Science Meeting 2015, 22-27 février 2015, Granada, Espagne (Communication orale Artigas L.F.).
- CI-36.** Grosjean P., Denis K., Wacquet G., Ali N., Parent J.Y., Lancelot C., Hamad D., Artigas F., Lefebvre A., Belin C., 2015. Towards a better classification of plankton digital images: suspect detection, error correction and real-time. Colloque ASLO, Aquatic Science Meeting 2015, 22-27 février 2015, Granada, Espagne (Communication orale Grosjean P.).
- CI-37.** Doglioli A.M., Grégori G., André J.-M., Barrier N., Bellomo L., Berline L., Carlotti F., Cornet-Barthaux V., Costa A., d'Ovidio F., Diaz F., Dugenne M., Estournel C., Grosso O., Helias-Nunige S., Leblanc K., Lefebvre A., Lefevre D., Malengros D., Marsaleix P., Moutin T., Nencioli F., Nerini D., Pairaud I., Petrenko A., Pinazo C., Pulido E., Quéguiner B., Ross O., Rougier G., Schintu-Jacquet S., Taupier-Letage I., Thyssen M., Wagener T., Zakardji B., 2015. OSCAHR - Observing Submesoscale Coupling AtHigh Resolution. MERMEX 2015 Workshop, 7-10 avril 2015, Marseille-Luminy campus, Marseille (Poster).
- CI-38.** Karasiewicz S., Breton E., Lefebvre A., Hernández-Farinas T., Lefebvre S., 2016. Temporal realised niche analysis of the diatoms community and of *Phaeocystis globosa* on the French coast of the eastern English Channel. VLIZ Marine Science Day 2016, 12 février 2016, Bruges (Communication orale Karasiewicz S.).
- CI-39.** Tardivel M., Perchoc J., Forest B., Danielou M.-M., Crassous M.-P., Evrard J., Lunven M., Sourisseau M., Huret M., Antajan E., Lefebvre A., Colas F., Delauney L., 2016. Ifremer imaging systems for plankton analysis. International workshop on current advances in the application of (semi-)automated techniques for studying phytoplankton dynamics in coastal and marine waters, 31 mai - 2 juin 2016, Wimereux (Communication orale Delauney L.).
- CI-40.** Lefebvre A., Grosjean P., Neaud-Masson N., Artigas L.F., Colas F., Maurer D., Tardivel M., Wacquet G., Devreker D., Caillault-Poisson E., Belin C., 2016. Optimization of the monitoring strategy for the French National Phytoplankton and Phycotoxins Network (REPHY) using semi-automated digital images analysis. International workshop on current advances in the application of (semi-)automated techniques for studying phytoplankton dynamics in coastal and marine waters, 31 mai - 2 juin 2016, Wimereux (Communication orale).
- CI-41.** Grosjean P., Denis K., Rousseau V., Parent J.Y., Lancelot C., Hamad D., Artigas F., Lefebvre A., Neaud-Masson N., Maurer D., Tunin-Ley A., Belin C., 2016. Semi-automatic analysis of FlowCAM phytoplankton data using Zoo/PhytoImage. International workshop on current advances in the application of (semi-)automated techniques for studying phytoplankton dynamics in coastal and marine waters, 31 mai - 2 juin 2016, Wimereux (Communication orale Grosjean P.).
- CI-42.** Karasiewicz S., Breton E., Lefebvre A., Hernandez Farinas T., Lefebvre S., 2016. Environmental response of *Phaeocystis globosa* realised niche: does the diatom community play a role? ECSA 56, 4-7 Septembre 2016, Brême, Allemagne (Communication orale Karasiewicz S.).
- CI-43.** Karasiewicz S., Breton E., Lefebvre A., Hernandez Farinas T., Lefebvre S., 2016. Does the diatom community play a role in the environmental response of *Phaeocystis globosa* realised niche? North Sea Open Science Conference 2016, 7-10 Novembre 2016, Ostende, Belgique (Communication orale Karasiewicz S.).
- CI-44.** Karasiewicz S., Breton E., Lefebvre A., Hernandez Farinas T., Lefebvre S., 2016. The abiotic and biotic interactions effect on *Phaeocystis globosa* realised niche. Campus do Mar International Science Conference 2016, 17 au 18 Novembre 2016, Villa Real, Portugal (Communication orale Karasiewicz S.).

Communications nationales dans des colloques et congrès

- CN-1.** Lefebvre A., Ellien C., Davoult D., Thiébaud E., 2001. Spatio-temporal stability of populations of the brittle star *Ophiothrix fragilis* in a megatidal area: allochthonous or autochthonous origin of larvae hypotheses examines using an advection-diffusion model. XXVII Colloque UOF Ecosystèmes côtiers : flux et dynamiques, 5-7 septembre 2001, Villeneuve d'Ascq, France (Poster).
- CN-2.** Lefebvre A., 2002. Tendances saisonnières et à long terme (1992-2000) de la qualité des eaux littorales en Manche orientale. Relations avec les blooms de la Prymnesiophycée *Phaeocystis* sp. 5ème colloque Internationale de Limnologie et d'Océanographie (Impact des perturbations locales ou planétaires (naturelles ou anthropiques) sur les réseaux trophiques aquatiques, 9-12 septembre 2002, Paris Inst. Océanogr. (Communication orale).
- CN-3.** Lefebvre A., 2004. Importance des apports continentaux en éléments nutritifs dans la dynamique du bloom de *Phaeocystis*. Journée bilan Intermédiaire du CPER 2000-2006 : Étude et observation de l'écosystème côtier de la Manche orientale : le bloom de *Phaeocystis* et ses effets sur l'écosystème. Station Marine de Wimereux, 05 février 2004 (Communication orale).
- CN-4.** Lefebvre A., 2004. Tendances saisonnières et à long terme de la qualité des eaux littorales en Manche orientale. Relation avec les blooms de la Prymnesiophycée *Phaeocystis* sp.. Journées REPHY, 22-24 mars 2004, Nantes (Communication orale).
- CN-5.** Lefebvre A., 2004. The application of remote sensing in the eastern English Channel and the southern bight of the North Sea (1) Blooms of the Prymnesiophyceae *Phaeocystis* sp. (2) Modification of the zooplankton community during the canicular year 2003. The ESA GMES ROSES Project : training session : satellite data for algal bloom monitoring at coast – second agenda. 29-30 juin 2004, Brest (Communication orale).
- CN-6.** Lefebvre A., Vanhoutte-Brunier A., Ménesguen A., Cugier P., Lancelot C., Lacroix G., Billen G., Garnier J., 2004. Modélisation intégrée des transferts de nutriments depuis les bassins versants de la Seine, la Somme et l'Escaut jusqu'en Manche – Mer du Nord. Journée LITEAU, 18 novembre 04, Paris (Communication orale et poster).
- CN-7.** Boulart C., Flament P., Gentilhomme V., Deboudt K., Mignon C., Lefebvre A., 2005. Atmospheric versus fluvial nutrient inputs to a coastal ecosystem. 2005 International Ocean Research Conference, UNESCO Headquarters, 6-10 juin 2005, Paris (Poster).
- CN-8.** Lefebvre A., Billen G., Cugier P., Garnier J., Gypens N., Lacroix G., Lancelot C., Ménesguen A., Vanhoutte-Brunier A., 2006. LITEAU II « Modélisation intégrée des transferts de nutriments depuis les bassins versants de la Seine, la Somme et l'Escaut jusqu'en Manche et Baie Sud de la Mer du Nord ». Colloque « Développements récents de la recherche en environnement côtier » - PNEC - LITEAU, Nantes, 26-28 juin 2006 (Poster).
- CN-9.** Lefebvre A., Delpech J.-P., 2007. Outbreaks of the Prymnesiophyceae *Phaeocystis globosa* in the eastern English Channel: socioeconomic and/or environmental pollutions? Colloque de restitution finale du chantier PNEC Manche orientale - Le bloom de *Phaeocystis* : causes & conséquences. Wimereux, 29-30 janvier 2007 (Poster).
- CN-10.** Vanhoutte-Brunier A., Ménesguen A., Lefebvre A., Cugier P., 2007. Using a biogeochemical 3D-model to assess the respective role of nitrogen of French and Belgian origins in the fuelling of the *Phaeocystis* blooms along the coasts of the English Channel and of the southern North Sea. Colloque de restitution finale du chantier PNEC Manche orientale – Le bloom de *Phaeocystis* : causes & conséquences. Wimereux, 29-30 janvier 2007 (Communication orale).
- CN-11.** Lefebvre A., Artigas L. F., Guiselin N., Barbet F., 2007. Long-term changes on the phytoplankton communities, temporarily dominated by *Phaeocystis globosa* in relation with hydroclimatic conditions and eutrophication processes in the eastern English Channel and southern bight of the North Sea. Colloque de restitution finale du chantier PNEC Manche orientale - Le bloom de *Phaeocystis* : causes & conséquences. Wimereux, 29-30 janvier 2007 (Communication orale).

- CN-12.** Lefebvre A., 2008. Haute fréquence et événements singuliers. Journées ROSLIT, 28 février 2008, Ifremer, Issy-les-Moulineaux (Communication orale).
- CN-13.** Billen G, Lefebvre A., Menesguen A., Cugier P., Vanhoute-Brunier A., Billen G., Garnier J., Thieu V., Lancelot C., Gijpans N., 2008. Journée de restitution du Programme LITEAU II, Projet N°19-G/2003 : Modélisation intégrée des transferts de nutriments depuis les bassins versants de la Seine, la Somme et l'Escaut jusqu'en Manche-Mer du Nord. Île d'Oléron, 2 et 3 avril 2008 (Communication orale).
- CN-14.** Lefebvre A., 2008. Bilan de fonctionnement de la station instrumentée MAREL Carnot. Séminaire de restitution du programme État-Région « Écosystèmes Perturbés du Littoral », 02 juillet 2008, Wimereux (Communication orale).
- CN-15.** Lefebvre A., 2008. Surveillance de la qualité des eaux côtières sur le littoral du Nord, Pas de Calais et Picardie : les réseaux mis en œuvre par l'Ifremer. Colloque International : Observation des écosystèmes marins et terrestres de la Côte d'Opale : du naturalisme à l'écologie. Wimereux, 3-4 juillet 2008 (Communication orale).
- CN-16.** Breton E., Rousseau V., Lefebvre A., Parent J.Y., Guiselin N., Lancelot C., 2008. Linking phytoplankton and Noctiluca blooms in the southern bight of the North Sea. Colloque International : Observation des écosystèmes marins et terrestres de la Côte d'Opale : du naturalisme à l'écologie. Wimereux, 3-4 juillet 2008 (Communication orale).
- CN-17.** Lefebvre A., 2009. Mise en œuvre d'un système de mesures automatisées en réseau de l'environnement littoral (Marel Carnot) en Manche orientale : une zone à problème potentiel au regard de l'eutrophisation sous haute surveillance. Atelier du Réseau National des Stations Marines sur les mesures à haute fréquence dans l'environnement marin, Wimereux, 22-23 octobre 2009 (Communication orale).
- CN-18.** Caillault E., Lefebvre A., Hamad D., 2009. Modélisation de la dynamique de l'efflorescence de l'écosystème côtier. Atelier du Réseau National des Stations Marines sur les mesures à haute fréquence dans l'environnement marin, Wimereux, 22-23 octobre 2009 (Communication orale).
- CN-19.** Lefebvre A., 2010. Présentation du réseau SRN : Suivi Régional des Nutriments sur le littoral du Nord, du Pas de Calais et de la Picardie. Journée Hydrologie, 9-10 février 2010, Station Ifremer d'Arcachon (Communication orale).
- CN-20.** Lefebvre A., Guiselin N., Artigas F., 2010. Long-term observation (1992-2007) of the hydrological conditions in the eastern English Channel and the southern bight of the North Sea and links with the phytoplankton community dynamics, temporarily dominated by the prymnesiophyte *Phaeocystis globosa*. Public Meeting InterReg VI A - CHARM III Project, 31 mars – 01 avril 2010, Rouen (Communication orale).
- CN-21.** Lefebvre A., 2011. Quelle est la situation dans le dunkerquois et quels sont les enjeux ? Conférence du projet AWARE : La qualité des eaux côtières : un enjeu collectif ! Dunkerque, 07 janvier 2011 (Communication orale).
- CN-22.** Lefebvre A., Thyssen M., Creach V., Forster R., Artigas F., 2011. Implementation of high frequency innovative approaches to characterize the water quality and the phytoplankton community in the North Sea. Colloque "Vulnérabilité des écosystèmes côtiers au changement global et aux événements extrêmes" - Session : Comprendre le fonctionnement des écosystèmes et des processus impliqués, du 18-21 octobre 2011, Biarritz (Poster).
- CN-23.** Artigas L., Alvain S., Creach V., Hamad D., Lefebvre A., Lizon F., Rijkeboer M., 2012. Development of a DYNAMIC observation system for the assessment of MARine water quality, based on PHYtoplankton analysis. Colloque du Défi Manche, Boulogne-sur-Mer, 12 juin 2012 (Communication orale).
- CN-24.** Lefebvre A., 2012. Première tentative d'évaluation du Bon État Ecologique de la DCSMM pour le descripteur 5 lié à l'eutrophisation. Journées REPHY, 26-27 septembre 2012, Nantes (Communication orale).
- CN-25.** Artigas L.F., Alvain S., Bonato S., Broutin M., Caillault E., Courcot L., Cornille V., Chicheportiche J., Créach V., Degros N., Guiselin N., Hamad D., Hébert P.A., Houliez E.,

- Lefebvre A., Lizon F., Mériaux X., Owen K., Rijkeboer M., Rutten T., Schmitt F., Thyssen M., Veen A., Wacquet G., Zongo S., 2012. Projet DYMAPHY : vers la mise en place d'un système dynamique d'observation et de suivi de la qualité des masses d'eau marines par l'application de techniques innovantes intégrées pour l'étude à haute résolution du phytoplancton. Journées REPHY, 26-27 septembre 2012, Nantes (Communication orale).
- CN-26.** Belin C., Hernández-Fariñas T., Soudant D., Lefebvre A., Bacher C., 2013. REPHY: french national phytoplankton and phycotoxins monitoring network, and examples of data processing. Atelier Résomar / Projet InterReg IV A DYMAPHY, 4-6 décembre 2013, Wimereux, France (Communication orale).
- CN-27.** Hernández-Fariñas T., Soudant D., Barillé L., Belin C., Lefebvre A., Bacher C., 2013. Temporal changes in the phytoplankton community along the French coast of the eastern English Channel and the southern Bight of the North Sea. Atelier Résomar / Projet InterReg IV A DYMAPHY, 4-6/12/2013, Wimereux, France (Poster).
- CN-28.** Lefebvre A., Poisson Caillault E., Rousseeuw K., Hamad D., Soudant D., Gohin F. Facq J.-V., Repecaud M., 2014. La station instrumentée MAREL Carnot : retours d'expériences de 10 ans d'observation à haute fréquence d'une zone côtière sous influence anthropique. Colloque Instrumentation haute fréquence pour l'observation et la surveillance de l'environnement marin. Colloque organisé à l'occasion des 10 ans de la station instrumentée MAREL Carnot. 12-13 juin 2014, CCI, Boulogne-sur-mer (Communication orale).
- CN-29.** Nzigou A.-R., Lefebvre A., 2014. Étude de la dynamique planctonique à haute résolution : contribution à la politique de gestion durable des eaux côtières du Gabon. Colloque Instrumentation haute fréquence pour l'observation et la surveillance de l'environnement marin. Colloque organisé à l'occasion des 10 ans de la station instrumentée MAREL Carnot. 12-13 juin 2014, CCI, Boulogne-sur-mer (Poster).
- CN-30.** Poisson Caillault E., Rousseeuw K., Lefebvre A., Fassinut-Mombot B., 2014. Complétion de séries temporelles en utilisant l'appariement élastique. Application aux données de la station MAREL Carnot. Colloque Instrumentation haute fréquence pour l'observation et la surveillance de l'environnement marin. Colloque organisé à l'occasion des 10 ans de la station instrumentée MAREL Carnot. 12-13 juin 2014, CCI, Boulogne-sur-mer (Poster).
- CN-31.** Rousseeuw K., Lefebvre A., Poisson Caillault E., Nzigou A.-R., 2014. Détection et estimation d'états environnementaux par modélisation dynamique non supervisée. Application aux données Ferry Box. Colloque Instrumentation haute fréquence pour l'observation et la surveillance de l'environnement marin. Colloque organisé à l'occasion des 10 ans de la station instrumentée MAREL Carnot. 12-13 juin 2014, CCI, Boulogne-sur-mer (Poster).
- CN-32.** Artigas L F., Ali N., Alvain S., Ben Mustapha Z., Bonato S., Broutin M., Courcot, L., Cornille V., Chicheportiche J., Créach V., Degros N., Gómez F., Grosjean P., Guiselin N., Hébert P.A., Hamad D., Houliez E., Lecuyer E., Lefebvre A., Lizon F., Mériaux X., Poisson-Caillault E., Owen K., Rijkeboer M., Rousseeuw K., Rutten T., Schmitt F., Thyssen M., Veen A., Wacquet G., Zongo S. Perspectives pour l'application de techniques semi-automatisées d'analyse au suivi à haute résolution du phytoplancton et de la qualité des eaux marines côtières. Colloque Instrumentation haute fréquence pour l'observation et la surveillance de l'environnement marin. Colloque organisé à l'occasion des 10 ans de la station instrumentée MAREL Carnot. 12-13 juin 2014, CCI, Boulogne-sur-mer (Communication orale).
- CN-33.** Répécaud M., Quéméner L., Duros W., Bucas K., Laes A., Facq JV., Allenou JP., Retho M., Gabellec R., Pairaud I., Ravel C., Lefebvre A., 2014. La mesure haute fréquence sur le littoral métropolitain : bilans et perspectives sur 20 années de recherche et développement à l'Ifremer : de la technologie à l'exploitation et la valorisation des données. Colloque Instrumentation haute fréquence pour l'observation et la surveillance de l'environnement marin. Colloque organisé à l'occasion des 10 ans de la station instrumentée MAREL Carnot. 12-13 juin 2014, CCI, Boulogne-sur-mer (Communication orale).
- CN-34.** Rousseeuw K., Poisson Caillault E., Lefebvre A., Hamad D., 2014. Modèle de Markov Caché hybride pour la surveillance de l'environnement marin. Colloque Instrumentation

haute fréquence pour l'observation et la surveillance de l'environnement marin. Colloque organisé à l'occasion des 10 ans de la station instrumentée MAREL Carnot. 12-13 juin 2014, CCI, Boulogne-sur-mer (Communication orale).

- CN-35.** Wacquet G., Lefebvre A., Neaud-Masson N., Belin C., Grosjean P., 2014. Étude et caractérisation de la dynamique et de la diversité phytoplanctonique par analyse d'images et classification semi-automatisée. Colloque Instrumentation haute fréquence pour l'observation et la surveillance de l'environnement marin. Colloque organisé à l'occasion des 10 ans de la station instrumentée MAREL Carnot. 12-13 juin 2014, CCI, Boulogne-sur-mer (Communication orale).
- CN-36.** Rousseeuw K., Lefebvre A., Caillault E., Hamad D., 2014. Système de surveillance utilisant une classification non supervisée et une modélisation dynamique. Doctorale de la Mer du GIS Campus de la Mer, 9 octobre 2014, Boulogne-sur-Mer (Communication orale).
- CN-37.** Lefebvre A., Wacquet G., Grosjean P., Neaud-Masson N., Maurer D., Belin C., 2014. Le système FlowCam/ZooPhytoImage, évolution de l'observation et de la surveillance du phytoplancton. Journées REPHY (Réseau Phytoplancton et Phycotoxines de l'Ifremer), octobre 2014, Nantes (Communication orale).
- CN-38.** Lefebvre A., 2014. Le système FlowCam/ZooPhytoImage, évolution de l'observation et de la surveillance du phytoplancton. Journées REPHY (Réseau Phytoplancton et Phycotoxines de l'Ifremer), octobre 2014, Nantes (Communication orale).
- CN-39.** Lefebvre A., Poisson-Caillault E., Rousseeuw K., Hamad D., Soudant D., Gohin F., Facq J.-V., Repecaud M., 2014. La station instrumentée MAREL Carnot : Dix ans d'observation à haute fréquence d'une zone côtière sous influence anthropique (Manche orientale). Colloque Somlit Haute Fréquence, 26-27 novembre 2014, Bordeaux (Communication orale).
- CN-40.** Artigas L.F., Alvain S., Bonato S., Broutin M., Caillault E., Courcot L., Cornille V., Chicheportiche J., Créach V., Degros N., Guiselin N., Hamad D., Hébert P.A., Houliez E., Lefebvre A., Lizon F., Mériaux X., Owen K., Rijkeboer M., Rutten T., Schmitt F., Thyssen M., Veen A., Wacquet G., Zongo S., 2014. Projet DYMAPHY : vers la mise en place d'un système dynamique d'observation et de suivi de la qualité des masses d'eau marines par l'application de techniques innovantes intégrées pour l'étude à haute résolution du phytoplancton. Colloque Somlit Haute Fréquence, 26-27 novembre 2014, Bordeaux (Communication orale).
- CN-41.** Travers-Trolet M., Desroy N., Vaz S., Vérin Y., Coppin F., Lefebvre A., Antajan E., Lunven M., 2014. CAMANOC 2014 : Campagne Manche Occidentale Pluridisciplinaire : Etat des lieux de l'écosystème Manche et approche intégrée via l'utilisation d'outils innovants. Journée du Département RBE, 10 décembre 2014, Nantes (Communication orale).
- CN-42.** Artigas L.F., Bonato S., Créach V., Didry M., Gomez F., Guiselin N., Hamad D., Hébert P.A., Houliez E., Lefebvre A., Lampert L., Lizon F., Poisson-Caillault E., Prévost E., Rijkeboer M., Thyssen M., Veen A., Rutten T., Wacquet G., 2015. Monitoring of phytoplankton and Harmful Algal Blooms in coastal waters by combining innovative semi-automated tools (scanning flow cytometry & spectral fluorometry). Conférence GDR PhycoTox / GIS Cyano, 31 mars - 2 avril 2015, IUEM, Brest (Communication orale).
- CN-43.** Lefebvre A., Neaud-Masson N., Maurer D., Wacquet G., Grosjean P., Colas F., Tardivel M., Artigas L.F., Belin C., 2015. Optimization of the monitoring strategy for the French National Phytoplankton and Phycotoxins Network (REPHY) using semi-automated digital images analysis. Conférence GDR PhycoTox / GIS Cyano, 31 mars - 2 avril 2015, IUEM, Brest (Communication orale).
- CN-44.** Wacquet G., Grosjean P., Hamad D., Lefebvre A., Neaud-Masson N., Colas F., Maurer D., Artigas L.F., 2015. Zoo/PhytoImage : current advances in the semi-automated classification of plankton digital images. Conférence GDR PhycoTox / GIS Cyano, 31 mars - 2 avril 2015, IUEM, Brest (Communication orale).
- CN-45.** Lefebvre A., Poisson-Caillault E., Rousseeuw K., 2015. Spatio-temporal dynamics of phytoplankton biomass in the English Channel: high resolution strategy and modeling using

unsupervised classification and Hidden Markov Model. Conférence GDR PhycoTox / GIS Cyano, 31 mars - 2 avril 2015, IUEM, Brest (Communication orale).

- CN-46.** Delegrange A., Lefebvre A., Amara R., Courcot L., Vincent D., 2015. Seasonal variability of *Pseudo-nitzschia* sp. And domoic acid concentrations in the southern bight of the North Sea. Conférence GDR PhycoTox / GIS Cyano, 31 mars - 2 avril 2015, IUEM, Brest (Communication orale Delegrange A.).
- CN-47.** Doglioli A.M., Grégori G., André J.-M., Barrier N., Bellomo L., Berline L., Carlotti F., Cornet-Barthaux V., Costa A., d'Ovidio F., Diaz F., Dugenne M., Estournel C., Grosso O., Helias-Nunige S., Leblanc K., Lefebvre A., Lefevre D., Malengros D., Marsaleix P., Moutin T., Nencioli F., Nerini D., Pairaud I., Petrenko A., Pinazo C., Pulido E., Quéguiner B., Ross O., Rougier G., Schintu-Jacquet S., Taupier-Letage I., Thyssen M., Wagener T., Zakardji B., 2015. OSCAHR - Observing Submesoscale Coupling AtHigh Resolution. MERMEX 2015 Workshop, 7-10 avril 2015, Marseille-Luminy campus, Marseille (Poster).
- CN-48.** Lefebvre A., 2015. Intérêts de la mesure haute fréquence pour la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin. Atelier Résomar Haute Fréquence, 15-16 octobre 2015, IUEM, Brest (Communication orale).
- CN-49.** Lefebvre A., 2015. Présentation de l'interface R pour l'analyse exploratoire des données et le calcul des tendances : TTA interface. Atelier Résomar Haute Fréquence, 15-16 octobre 2015, IUEM, Brest (Communication orale).
- CN-50.** Rousseeuw K., Caillault-Poisson E., Lefebvre A., 2015. Modélisation de signaux temporels hautes fréquences, multi-capteurs à valeurs manquantes. Application à la compréhension et à la prédiction des efflorescences phytoplanctoniques. Journée Coriolis Côtier, 19 novembre 2015, Montpellier (Communication orale).
- CN-51.** Artigas F., Lefebvre A., 2015. Surveillance des habitats pélagiques. Colloque annuel du Résomar, 16-18 novembre 2015, Montpellier (Communication orale Artigas F.).
- CN-52.** Breton E., Agaziack B., Lefebvre A., Artigas F., 2015. Effet de la diminution en azote en Manche orientale sur la diversité taxonomique et fonctionnelle de la communauté de diatomées et relation avec l'efficacité d'utilisation de l'azote. Atelier Phytoplancton SOMLIT, Luc-sur-Mer, 24-26 novembre 2015 (Communication orale Breton E.).
- CN-53.** Lefebvre A., Devreker D., 2015. Interface utilisateur R pour l'analyse exploratoire et la détection des ruptures et des tendances des séries temporelles. Atelier Phytoplancton SOMLIT, Luc-sur-Mer, 24-26 novembre 2015 (Communication orale).
- CN-54.** Lefebvre A., Poisson-Caillault E., 2016. Analysis of phytoplankton bloom phenology by identification of Gaussian mixture for the period 1989-2014 in the southern bight of the North Sea. GDR Phycotox annual conference, 15-16 mars 2016, Villefranche-sur-Mer, France (Communication orale).
- CN-55.** Artigas F., Blauw A., Bonato S., Claquin P., Creach V., Deneudt K., Grégory G., Grosjean P., Guiselin N., Hamad D., Hébert P.A., Houliez E., Karlson B., Kromkamp J., Lefebvre A., Lampert L., Lizon F., Petersen W., Poisson-Caillault E., Revilla M., Rijkeboer M., Rutten T., Terneuzen L., Thyssen M., Seppälä J., Stemmann L., Veen A., Wacquet G., Vyverman W., 2016. On the combination of optical sensors for the observation of phytoplankton dynamics in coastal waters : implications for the monitoring of Harmful Algal Blooms (JERICO-Next European network). GDR Phycotox annual conference, 15-16 mars 2016, Villefranche-sur-Mer, France (Communication orale Artigas F.).

Articles de vulgarisation, presse et autres médias, actions de communication (bilan 2013-2015)

- ArtV-1.** Lefebvre A., 2013. Animation « Océanologie » dans le cadre du Projet d'échange scientifique avec la mission Groënland. 31 janvier 2013, École Camus, Le Portel.
- ArtV-2.** Lefebvre A., Antajan E. & Wacquet G., 2013. Journée Mondiale de l'Océan. Journée portes ouvertes au centre Ifremer en collaboration avec l'UMR LOG : A la recherche des

microalgues et des invasifs gélatineux (projets InterReg IVa-2 Mers DYMAPHY et MEMO) et démonstration des outils de collecte en mer à bord du NO Sépia II. 6 juin 2013.

- ArtV-3.** Lefebvre A., 2013. Article de la Voix du Nord du 09 juin 2013. Journée Mondiale de l'Océan : Grâce au boom des technologies, on perce les secrets du plancton.
- ArtV-4.** Antajan E. & Lefebvre A., 2013 Article de la Semaine du Boulonnais du 12 juin 2013. Espèces nuisibles et invasives sous la loupe des chercheurs. (Contexte des projets InterReg IVa-2 mers MEMO et DYMAPHY).
- ArtV-5.** Lefebvre A., 2013. Direct TV au centre national de la mer, Nausicaa le 28 juin 2013 : enregistrement d'une émission à destination du site web de Nausicaa sur l'eutrophisation (contexte des projets InterReg ISECA & DYMAPHY).
- ArtV-6.** Lefebvre A., 2014. Expert invité par Nausicaa pour une conférence-débat sur l'Eutrophisation dans le cadre du projet InterReg IV A 2 Mers ISECA (Information System on the Eutrophication of Our Coastal Areas) et de la Journée Mondiale de l'Eau. Nausicaa, 20 mars 2014, Boulogne sur Mer.
- ArtV-7.** Lefebvre A., 2014. Article « Que faut-il penser de la tempête de vent qui fait mousser le littoral ? (article sur le bloom de *Phaeocystis*). La semaine dans le Boulonnais, 14 mai 2014.
- ArtV-8.** Lefebvre A., 2014. Interview sur France Bleu Nord du 26 juin 2014. L'Ifremer fête ses 30 ans : la station Marel de la digue Carnot.
- ArtV-9.** Lefebvre A., 2014. Article « Une sentinelle du milieu marin » à l'occasion des 10 ans de Marel Carnot et du colloque Ifremer/LOG des 12 et 13 juin 2014, dans l'écho du Pas de Calais N°146 – Juillet-août 2014 – ISSN-1254-5171.
- ArtV-10.** Lefebvre A., 2014. Interview pour TV Nausicaa - 3 questions à Alain Lefebvre d'Ifremer sur l'eutrophisation dans le cadre du projet européen InterReg IV A 2 Mers ISECA. <http://www.youtube.com/watch?v=MQeQbYfQJuo>
- ArtV-11.** Lefebvre A., 2015. L'observation et la surveillance de l'environnement marin en Manche orientale : de la basse fréquence vers la haute fréquence. Comité de bassin de l'Agence de l'Eau Artois Picardie, 24 avril 2015, Boulogne-sur-Mer.
- ArtV-11.** Lefebvre A., 2015. Projet H2020 JERICO-next, la traque des microalgues en temps réel. Article pour Le Marin, 22 mai 2015.
- ArtV-13.** Lefebvre A., Belin C., 2015. Article pour le document « Les temps forts » de l'ONEMA. Suivi du phytoplancton côtier : vers des analyses automatisées, octobre 2015.
- ArtV-14.** Lefebvre A., Antajan E., 2015. Reportage pour la chaîne Wéo et son émission Grand Place illustrant les activités du centre Ifremer Manche Mer du Nord avec un zoom sur les activités liées aux compartiments hydrologie, phytoplancton et zooplancton : de la basse vers la haute résolution et zoom sur des taxons clefs d'activités de recherche, *Phaeocystis globosa* et *Mnemiopsis Leidyi*. 21/09/2015, Centre Ifremer Manche Mer du Nord. Première diffusion entre le 29 septembre et le 1^{er} octobre 2015.
- ArtV-15.** Lefebvre A., 2015. L'observation et la surveillance de l'environnement marin en Manche orientale : de la basse fréquence vers la haute fréquence. Comité de bassin de l'Agence de l'Eau Artois Picardie, 24 avril 2015, Boulogne-sur-Mer.
- ArtV-16.** Lefebvre A., 2015. Jerico-next, la traque des microalgues en temps réel. Le Marin, 22 mai 2015.
- ArtV-17.** Lefebvre A., Antajan E., 2015. Reportage pour la chaîne Wéo illustrant les activités du centre Ifremer Manche Mer du Nord avec un zoom sur les activités liées aux compartiments hydrologie, phytoplancton et zooplancton : de la basse vers la haute résolution et zoom sur des taxons clefs d'activités de recherche, *Phaeocystis globosa* et *Mnemiopsis Leidyi*. 21 septembre 2015.

« Pour moi, une nouvelle vie commençait, et, dorénavant, ce serait MA vie, fruit de mes décisions, de mes choix, de ma volonté. Adieu les doutes, les hésitations, les peurs d'être jugé, de ne pas être capable, de ne pas être aimé. Je vivrai chaque instant en conscience, en accord avec moi-même et avec mes valeurs. Je resterai altruiste, mais en gardant à l'esprit que le premier cadeau à faire aux autres est mon équilibre. J'accepterai les difficultés comme des épreuves à passer, des cadeaux que m'offre la vie pour apprendre ce que je dois apprendre afin d'évoluer. Je ne serai plus victime des événements, mais acteur d'un jeu dont les règles se découvrent au fur et à mesure, et dont la finalité gardera toujours une part de mystère »
(Gounelle Laurent, *l'homme qui voulait être heureux*, 2014).