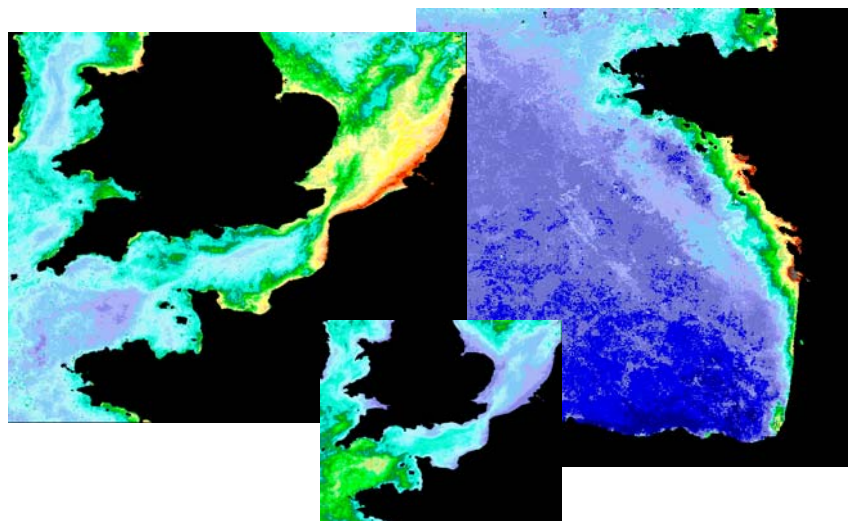


Rapport de contrat Ifremer-Agence de l'Eau Loire-Bretagne

Décembre 2006

Intégration dans un SIG de données issues de capteurs satellites en comparaison de données in situ pour le suivi de la qualité des eaux côtières



LOIC LOZAC'H (HOCER ET IFREMER/DYNECO BREST), FRANCIS GOHIN
(IFREMER/DYNECO BREST), HELENE OGER-JEANNERET (IFREMER/LER-MPL NANTES)

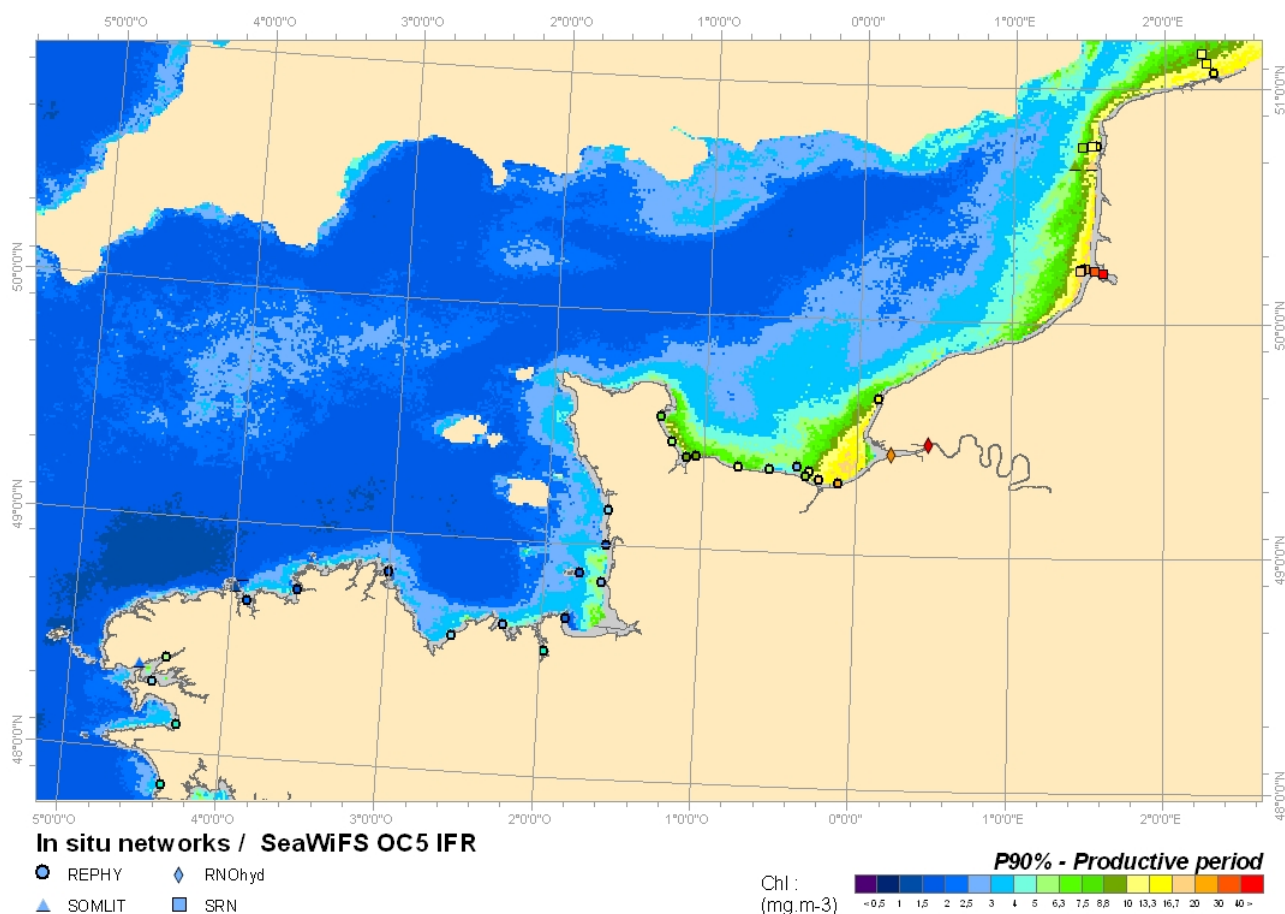


*En couverture :
Image SeaWiFS OC5 en chlorophylle,
matière en suspension minérale et
profondeur de disque de Secchi*

RESUME ET SYNTHESE DES RESULTATS

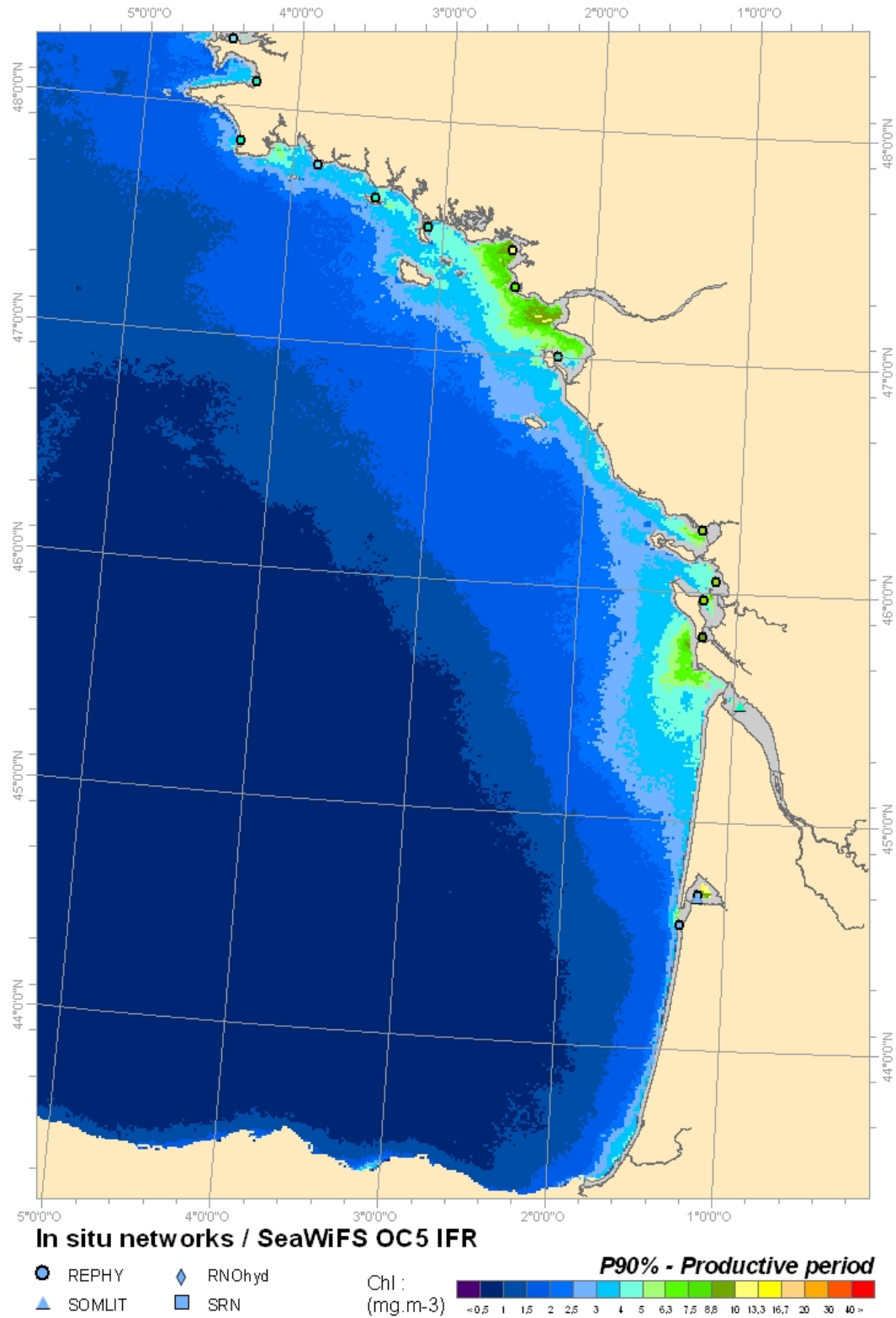
Le travail réalisé dans le cadre de cette étude est détaillé en seconde partie de ce document. Il a permis d'aboutir à une première synthèse des informations prises in situ ou à partir de capteurs embarqués sur des satellites d'observation de la terre.

Les graphes suivants illustrent le potentiel de la télédétection dans la surveillance du côtier. Ils concernent la chlorophylle de surface, particulièrement étudiée dans ce travail, mais aussi la température de surface de la mer.

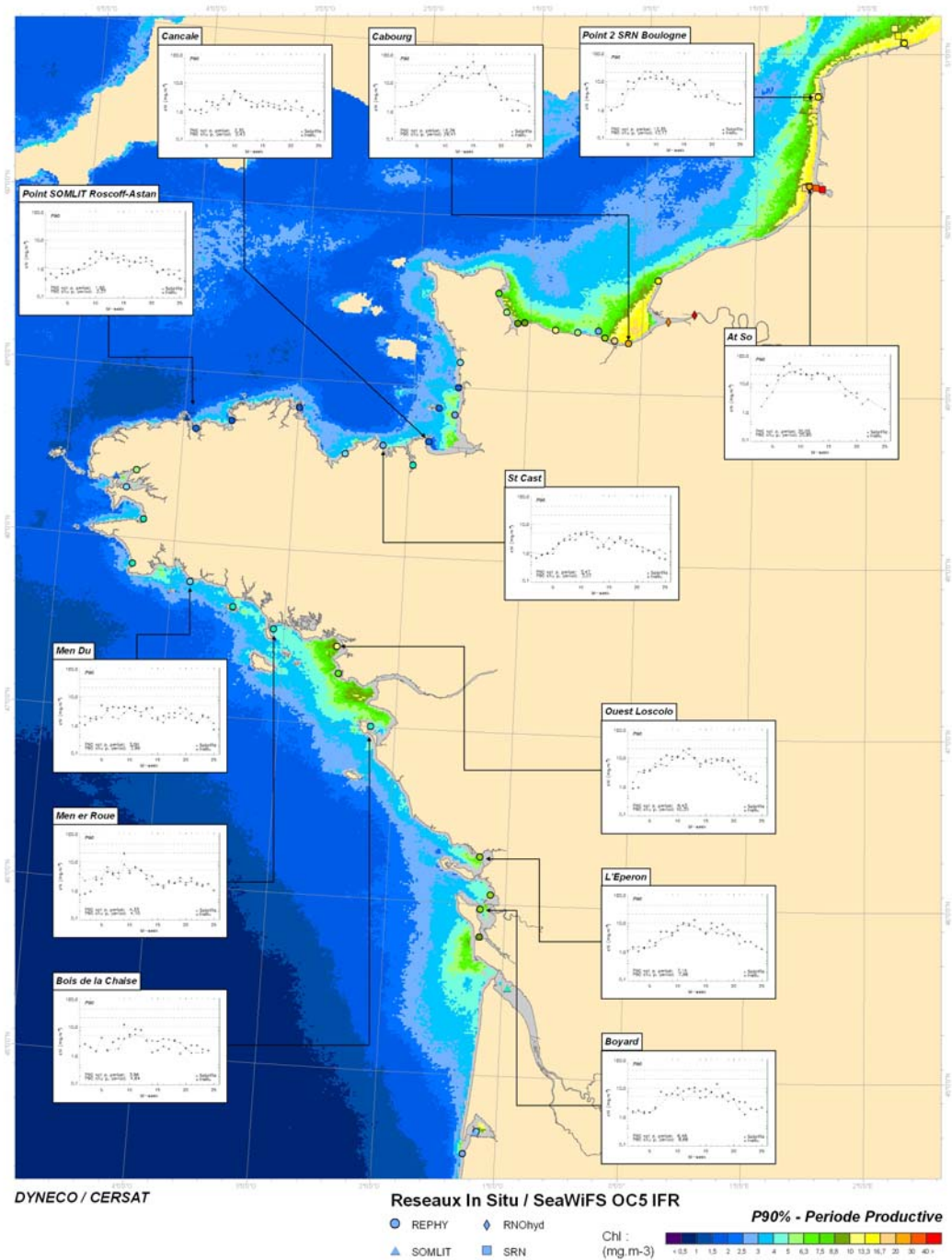


Exemple de synthèse satellite-in situ sur la Manche.

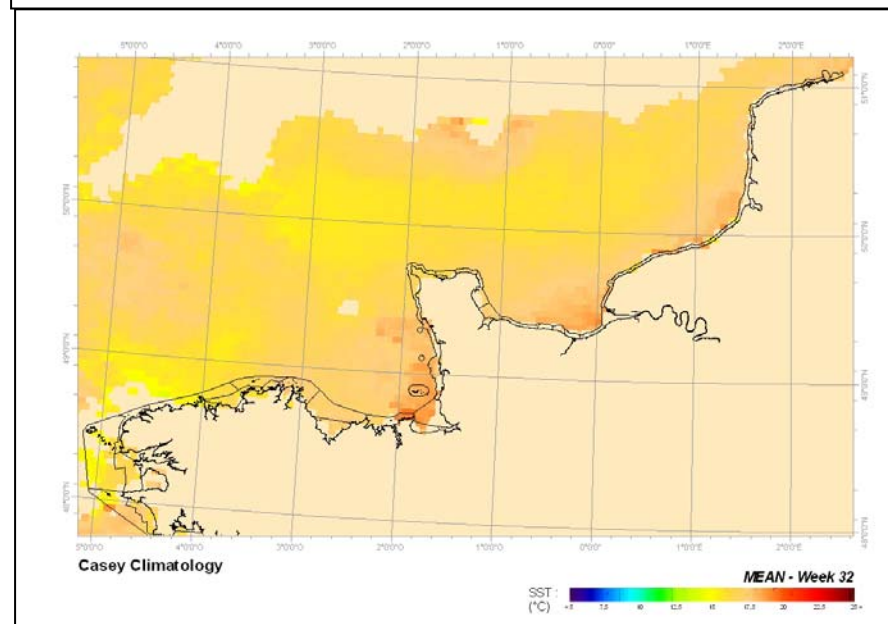
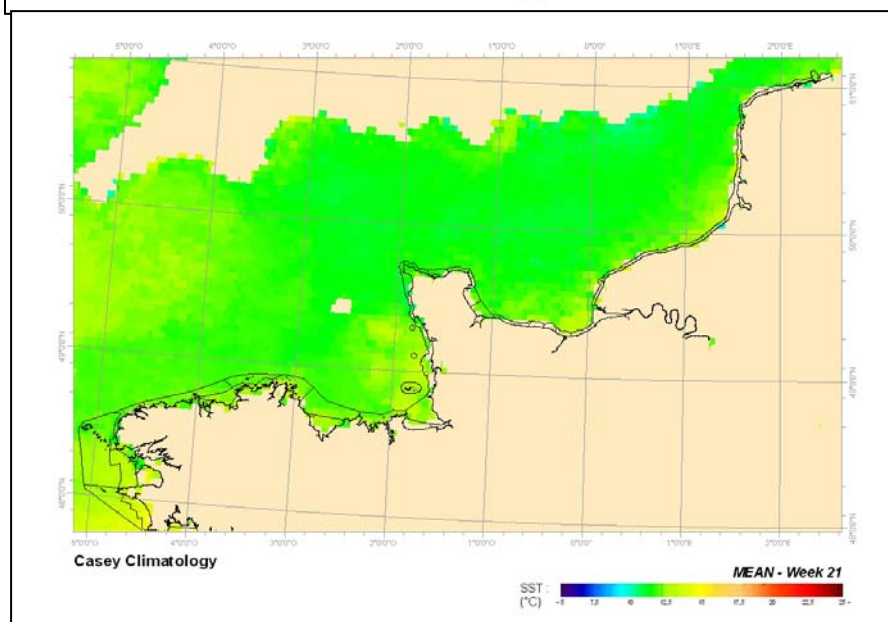
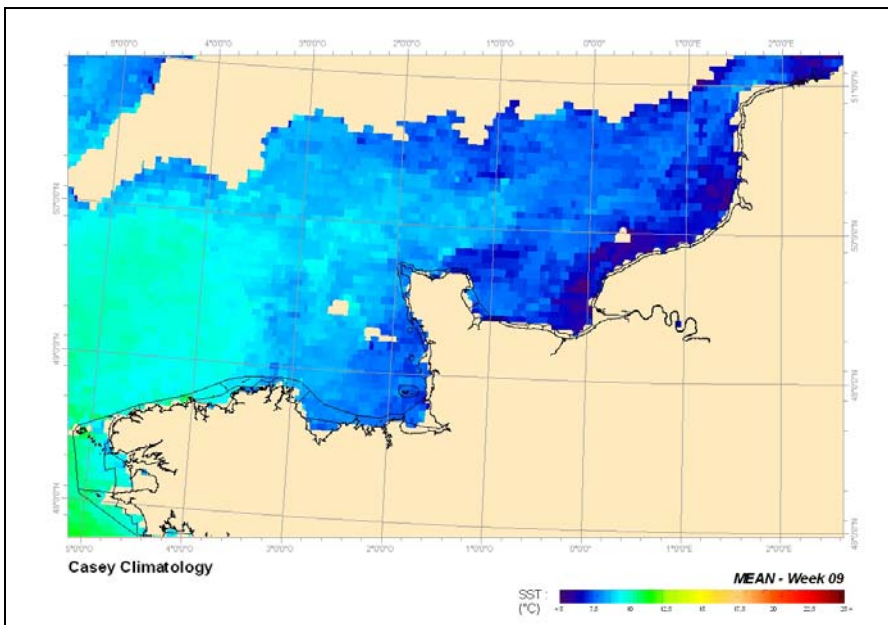
La variable environnementale représentée est le percentile 90 de la concentration en chlorophylle pendant la période productive (de mars à octobre). Le percentile représente la seconde valeur, en niveau, sur une série de 10 réalisations aléatoires d'une distribution statistique. Concernant la chlorophylle il est un des indicateurs du risque d'eutrophisation. Le percentile 90 à été calculé à partir des données du capteur SeaWiFS et des mesures in situ des différents réseaux au cours de la période 1998-2004.



Percentile 90 sur le Golfe de Gascogne



Percentile 90 sur la façade atlantique. Les séries temporelles moyennes (période de 15 jours) sont représentées à certains points



Les températures moyennes de la période 1985-2001 (moyenne des températures de surface de nuit du capteur satellite NOAA/AVHRR) pour les semaines 9, 21 et 32.

Sommaire

INTRODUCTION.....	2
CHAPITRE 1. DEFINITION ET ENJEUX D'UNE GESTION INTEGREE DES ZONES COTIERES	4
1.1 DEFINITION ET PERCEPTION DE L'ESPACE LITTORAL	4
1.1.1 Une définition complexe	4
1.1.2 Perception, représentation et demande sociale	6
1.1.3 Les conflits d'usage et d'intérêt.....	6
1.2 REGLEMENTATION ET ANALYSE DES ACTEURS	8
1.2.1 Cartographie des acteurs	8
1.2.2 Politique française en matière de gestion du littoral.....	8
1.2.3 Aperçu des principales mesures de protection des espaces et des espèces au niveau français, communautaire et international	11
1.3 GESTION INTEGREE DU LITTORAL DANS LA PERSPECTIVE D'UN DEVELOPPEMENT DURABLE	12
1.3.1 Définition.....	12
1.3.2 Enjeux.....	12
1.3.3 Quels outils ?.....	13
CONCLUSION DU CHAPITRE 1	14
CHAPITRE 2. PRODUCTION PRIMAIRE ET QUALITE DES EAUX COTIERES.....	15
2.1 DEFINITION DE LA QUALITE DE L'EAU	15
2.1.1 Cadre réglementaire : la directive cadre « eau ».....	15
2.1.2 Indicateurs de la qualité des eaux côtières.....	15
2.2 MECANISMES DE LA PRODUCTION PRIMAIRE	16
2.2.1 Caractéristiques de la production primaire	16
2.2.2 Dynamique spatio-temporelle.....	17
2.2.3 Evaluation de la biomasse.....	18
2.3 LES BLOOMS.....	18
2.3.1 Présentation du phénomène.....	18
2.3.2 Dynamique spatiale et temporelle d'un bloom.....	19
2.4 PHENOMENE D'EUTROPHISATION	19
2.5 ENJEUX SOCIO-ECONOMIQUES DE LA SURVEILLANCE DE LA PRODUCTION PRIMAIRE.....	19
CONCLUSION DU CHAPITRE 2	20
CHAPITRE 3. ETAT DE L'ART DU SUIVI OPERATIONNEL DE LA PRODUCTION PRIMAIRE ...	21
3.1 LES RESEAUX DE DONNEES <i>IN SITU</i>	21
3.1.1 <i>REPHY, réseau de surveillance du phytoplancton et des phycotoxines</i>	21
3.1.2 <i>Les autres réseaux de surveillance et d'observation</i>	22
3.1.3 <i>Intérêts et limites</i>	23
3.2 LES DONNEES SATELLITES.....	23
3.2.1 <i>Sélection du capteur</i>	23
3.2.2 <i>Présentation du capteur SeaWiFS</i>	24
3.2.3 <i>Algorithme de traitement des images SeaWiFS pour les eaux côtières</i>	25
3.2.4 <i>Apport et limites des données satellites de couleur de l'eau pour l'observation des eaux côtières</i> ...	26
3.3 KRIGEAGE ET COKRIGEAGE.....	27
3.4 NAUSICCA : OUTIL EVOLUE POUR LA SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT COTIER	28
3.5 MARCOAST	30
3.5.1 <i>Le projet</i>	30
3.5.2 <i>Compte-rendu des réunions avec nos utilisateurs</i>	31
CONCLUSION DU CHAPITRE 3	31
CHAPITRE 4. METHODES, TRAITEMENTS DES DONNEES ET RESULTATS	32

4.1 DEFINITION DE LA ZONE ETUDIEE.....	32
4.2 AUTOMATISATION DU SUIVI OPERATIONNEL DE LA PRODUCTION PRIMAIRE.....	33
4.2.1 Données satellites.....	33
4.2.2 Discussion.....	35
4.3 ÉTUDE DE LA REPRESENTATIVITE.....	36
4.3.1 Traitements avant comparaison.....	36
4.3.2 Localisation des stations étudiées.....	38
4.3.3 Etude temporelle.....	39
4.3.4 Intégration des données dans un Système d'Information Géographique.....	44
4.3.5 Discussion.....	48
CONCLUSION DU CHAPITRE 4.....	48
CONCLUSION GENERALE.....	49
ANNEXES.....	54

Tables des illustrations

Figures

FIG. 1 - LES MULTIPLES USAGES DU LITTORAL, MODIFIE D'APRES DAUVIN ET AL.....	8
FIG. 2 - LA RONDE DES ACTEURS, D'APRES DAUVIN ET LA COMMISSION OCEANOGRAPHIQUE INTERNATIONALE.....	8
FIG. 3 - ARTICLE 1 DE LA LOI LITTORAL.....	9
FIG. 4 - APERÇU DE QUELQUES TEXTES EN VIGUEUR ET D'OUTILS CONCERNANT LE LITTORAL, D'APRES OCEANIS, VOL. 28 N°1-2, 2002.....	10
FIG. 5 - MESURES DE PROTECTION DES ESPACES ET DES ESPECES AU NIVEAU FRANÇAIS, COMMUNAUTAIRE ET INTERNATIONAL.....	11
FIG. 6 - SPECTRE D'ABSORPTION DE LA CHLOROPHYLLE. LES DEUX FLECHES DESIGNENT LE MAXIMUM ET LE MINIMUM D'ABSORPTION DE LA CHLOROPHYLLE A.....	18
FIG. 7 - POINTS DE PRELEVEMENT REPHY ECHANTILLONNES REGULIEREMENT.....	22
FIG. 8 - SATELLITE SEASTAR ET SES 8 BANDES SPECTRALES UTILISEES PAR LE CAPTEUR SEAWIFS.....	25
FIG. 9 - SCHEMA EXPLIQUANT LA RECHERCHE DU POINT IN SITU POUR LE COKRIGEAGE PROGRAMMEE SOUS IDL.....	27
FIG. 10 -SERVEUR NAUSICAA (WWW.IFREMER.FR/NAUSICAA/ROSES/INDEX.HTM).....	29
FIG. 11 -ZONES D'ETUDES A) MANCHE B) GOLFE DE GASCOGNE, FOND DE CARTE : MOYENNE EN CHL-A DES CLIMATOLOGIE HEBDOMADAIRE PENDANT LA PERIODE PRODUCTIVE.....	32
FIG. 12 -SALINITE ET COURANT MARIN DANS LA MANCHE (SOURCE WWW.IFREMER.FR).....	32
FIG. 13 -MOYENNES CLIMATOLOGIQUES DE CONCENTRATION DE CHLOROPHYLLE (A DROITE) ET MATIERES EN SUSPENSION MINERALES (A GAUCHE) DE LA SEMAINE 25.....	34
FIG. 14 -DIAGRAMME DE PRODUCTION DES SYNTHESSES SATELLITES.....	35
FIG. 15 -CLIMATOLOGIES DE CONCENTRATION DE CHLOROPHYLLE POUR LA SEMAINE 25 EN MOYENNE (A DROITE) ET EN PERCENTILE 90% (A GAUCHE).....	37
FIG. 16 -LOCALISATION DES POINTS SELECTIONNES POUR L'ETUDE ET DES LIMITES DE MASSE D'EAU DCE, LE FOND DE CARTE REPRESENTA LA MOYENNE ANNUELLE CLIMATOLOGIQUE DE CONCENTRATION DE CHLOROPHYLLE.....	38
FIG. 17 -MOYENNE (A DROITE) ET ECART-TYPE (A GAUCHE) DES CLIMATOLOGIES HEBDOMADAIRE SUR LA PERIODE PRODUCTIVE.....	41
FIG. 18 -MOYENNE CHLOROPHYLLE DES CLIMATOLOGIES HEBDOMADAIRE SUR LA PERIODE PRODUCTIVE ET LES LIMITES DES MASSES D'EAU DE LA DIRECITVE CADRE EAUX.....	46
FIG. 19 -CLIMATOLOGIE DES CONCENTRATIONS DE CHLOROPHYLLE A L'INTERIEUR DES LIMITES DE MASSES D'EAU DCE EN MOYENNE A) ET ECART-TYPE B) CALCULES SUR LA PERIODE PRODUCTIVE.....	46
FIG. 20 -REPRESENTATIVITE DES PIXELS A L'INTERIEUR DES LIMITES DCE EN BAIE DE SEINE A), EN BAIE DU MONT SAINT-MICHEL B) ET EN BAIE DE VILAINE C).....	47

Tableaux

TAB. 1 -	ELEMENTS DE QUALITE BIOLOGIQUE : LE PHYTOPLANCTON, EXTRAIT DE LA DIRECTIVE 2000/60/CE..	16
TAB. 2 -	ETAT ECOLOGIQUE D'UNE MASSE D'EAU SUIVANT LES SEUILS DE L'INDICATEUR PERCENTILE 90%	37
TAB. 3 -	DEPLACEMENT AUTOUR DE LA POSITION IN SITU POUR OBTENIR LE PIXEL SATELLITE REPRESENTATIF, COLONNES ET LIGNES SONT EN PIXEL (0.015° EN LONGITUDE ET 0.01° EN LATITUDE).....	38

Graphiques

GRAPH. 1 -	EVOLUTION ANNUELLE DE LA CONCENTRATION DE CHLOROPHYLLE IN SITU ET SATELLITE, POUR LA STATION CABOURG (A : 2001, B : 2002, C : 2003) ET POUR LA STATION (D : 2001, E : 2002, F : 2003).....	39
GRAPH. 2 -	HISTOGRAMMES DES CONCENTRATIONS SATELLITES (A ET C) ET IN SITU (B ET D) A CABOURG (A ET B) ET CANCALE (C ET D).....	40
GRAPH. 3 -	GRAPHIQUES DE REGRESSION, GAUCHE: CABOURG, DROITE: OUEST-LOSCOLO	42
GRAPH. 4 -	EVOLUTION HEBDOMADAIRE DES MOYENNES (A ET C) ET PERCENTILES 90% (B ET D) CLIMATOLOGIQUES IN SITU ET SATELLITE A CABOURG (A ET B) ET OUEST LOSCOLO (C ET D).....	42
GRAPH. 5 -	GRAPHIQUE DE REGRESSION IN SITU/SATELLITE, A CANCALE (A), BREHAT (B), MEN DU (C) ET MEN ER ROUE (D).....	43
GRAPH. 6 -	EVOLUTION HEBDOMADAIRE DES CONCENTRATIONS DE CHLOROPHYLLE CLIMATOLOGIQUE IN SITU ET SATELLITE, A CANCALE (A), BREHAT (B), MEN DU (C) ET MEN ER ROUE (D)	44
GRAPH. 7 -	FIGURE 1 – IMAGE SEAWIFS OC5 ET CAMPAGNE DE MESURE SEINESAT, DATES DU 16/06/2001 - IMPRIME-ECRAN A PARTIR DE LA FENETRE DE VISUALISATION DU SERVEUR NAUSICCA	45

Introduction

En Europe, plus d'un tiers de la population vit à moins de 50 km des côtes, l'industrie alimentaire marine représente le quart de l'apport en protéine total et le tourisme est responsable d'approximativement 7% des emplois. Cependant les zones côtières sont exposées à des risques de plus en plus importants ; plus de 30% du fret pétrolier mondial passe par la mer Méditerranée et 70% des imports pétroliers européens (soit 20% de la production mondiale) passent le long des côtes espagnoles, françaises, et par la Manche. Les eaux européennes accueillent une large variété d'écosystème. La Mer du Nord est l'une des zones les plus productives au monde, avec de nombreuses variétés de phytoplancton, de poissons, d'oiseaux de mer et de communautés benthique, et la Méditerranée a un niveau de biodiversité des plus élevés, avec quasiment 9% des espèces marines mondiales présentes. Ces eaux sont exposées à un grand nombre de conditions environnementales parmi lesquels on retrouve principalement les glaces, l'érosion côtière et le transport de sédiments. De plus, ces côtes sont aussi soumises aux rejets des bassins versants pouvant provenir de zones urbaines, de l'agriculture ou des industries.

Par ailleurs, l'impact croissant de la présence humaine sur la zone côtière a créé un déséquilibre qui a manifestement accru les perturbations écologiques. Symptômes de l'anthropisation, la pollution croissante en nutriments, la destruction d'habitats naturels, le remaniement des cours d'eau, l'introduction d'espèces non indigènes et la diminution de la biodiversité, sont autant de facteurs qui peuvent encourager le développement de blooms phytoplanctoniques toxiques, ou « HABs » (Harmful Algal Blooms), qui produisent les toxines les plus puissantes connues de l'homme.

Le phytoplancton (du grec phyto : plante, et planctos : errant) se compose de végétaux unicellulaires microscopiques flottant dans la colonne d'eau. La plupart des espèces de phytoplancton ne sont ni toxiques ni nuisibles, et assurent la production primaire, à la base de la chaîne alimentaire, sans laquelle une vie plus élaborée ne pourrait exister dans les océans. Le phytoplancton représente en effet le premier niveau de la chaîne trophique : cet organisme photosynthétique, qui produit de la matière organique grâce à l'énergie du soleil, est « brouté » par le zooplancton, qui sera à son tour mangé par des organismes plus évolués comme les poissons. Le plancton est aussi la nourriture de base des organismes filtreurs comme les moules et les huîtres. Occasionnellement, les algues planctoniques croissent très rapidement et forment des efflorescences algales, ou « blooms », en s'accumulant en nappes denses visibles près de la surface. Ces espèces ne sont d'ordinaire pas nuisibles : parmi 5000 espèces de phytoplancton marin, 300 espèces peuvent colorer les eaux, et ne sont généralement pas en quantité suffisante pour que ce phénomène de coloration soit significatif. Cependant, dans certaines conditions, il peut arriver que des espèces nuisibles prolifèrent en blooms. Parmi ces espèces nuisibles, un petit nombre d'espèces (environ 80) produisent des neurotoxines puissantes qui peuvent être transférées dans les niveaux supérieurs de la chaîne alimentaire, où elles affectent, voire tuent, des organismes qui se nourrissent de ce phytoplancton, directement ou non, comme le zooplancton, les crustacés et coquillages, les poissons, les oiseaux, les mammifères marins, et même les humains.

Au niveau international, la volonté de protéger l'environnement marin, et les zones côtières en particulier, de ce danger est unanime. Or un système efficace de surveillance des HABs

nécessite des mécanismes locaux, nationaux, mais également internationaux. Il requiert également des estimations de l'état de la qualité de l'eau près de la surface et en eau profonde. Pour répondre à ce besoin, un système intégré est nécessaire. Ce système utilisera des informations concernant la surface de l'océan, obtenues grâce à la télédétection – comme les mesures effectuées par le satellite SeaWiFS ; des mesures *in situ* – obtenues depuis des bateaux ou des points de mesure côtiers ; et des modèles tri-dimensionnels pour simuler et prévoir les blooms et leur propagation. Le présent mémoire s'intéressera à l'analyse de ces données satellites et *in situ*, et à leur assimilation dans un Système d'Information Géographique.

La télédétection contribue à relever ce défi, en offrant une large gamme de produits standard sur le statut environnemental côtier, grâce notamment aux capteurs 'couleur de l'océan' (SeaWiFS, MODIS, MERIS...). Toutefois l'utilisation conjointe des données satellites et *in situ* est nécessaire pour un suivi efficace de la variation à court et long terme des risques d'eutrophisation, en eaux côtières. Les données satellites sont obtenues à des échelles spatiales et temporelles très différentes de celles des données *in situ*. Leur localisation dans le temps et l'espace est très précise mais leur répartition est irrégulière du fait de la couverture nuageuse, tout particulièrement en milieu côtier. Au contraire, les données *in situ* s'affranchissent de toute contrainte météorologique, mais sont ponctuelles et échantillonnées peu fréquemment

Le premier chapitre de ce mémoire présente les enjeux d'un système de gestion intégrée des zones côtières et le contexte dans lequel s'inscrit ce système. Nous nous intéresserons ensuite au phénomène biologique de la production primaire et à sa prise en compte dans la gestion de la qualité des eaux littorales. Le troisième chapitre fera l'état de lieux aux niveaux de l'IFREMER des données, méthodes et systèmes à notre disposition pour la mise en place d'un suivi opérationnel des paramètres biologiques de la qualité des eaux côtières. Et le quatrième chapitre aura pour but, dans un premier temps, de tester la capacité des estimations satellites à reproduire les propriétés statistiques des séries *in situ* sur plusieurs stations emblématique le long de la côte. Puis une fois cette condition essentielle vérifiée, l'intégration de ces données dans un Système d'Information Géographique pourra être utilisée pour l'optimisation de l'échantillonnage dans la planification de nouveau réseau *in situ* pour l'application de la Directive Cadre Eaux. La pertinence de la localisation des stations sélectionnées, considérées comme représentatives d'un type de masse d'eau, peut être évalué par télédétection.

Chapitre 1. Définition et enjeux d'une gestion intégrée des zones côtières

1.1 Définition et perception de l'espace littoral

Une question se pose avant tout autre : quel est l'espace concerné par une « gestion intégrée des zones côtières » ? Quel est ce « littoral » dont on parle tant sans jamais vraiment le définir ?

1.1.1 Une définition complexe

Longtemps perçu comme un simple trait séparant deux mondes, le littoral vaut beaucoup plus que cela. Situé « entre deux eaux » – l'eau salée de la mer d'un côté, l'eau douce des bassins versants côté terre – il forme un territoire vivant, porteur d'une histoire et d'une culture originale, de plus en plus menacé au fil du temps, faute d'une véritable reconnaissance. Le littoral, patrimoine naturel riche mais fragile, menacé par une pression anthropique croissante, est un espace dont la gestion est primordiale. Mais cette gestion est rendue difficile par la multiplicité des acteurs et les nombreux conflits d'usage. Plus surprenant encore, il apparaît que l'appréhension des problèmes de gestion des côtes se heurte à l'absence d'une définition précise de ce qui relèverait d'un champ spécifiquement littoral (Catanzo, 1995). Il nous faut donc avant tout caractériser ce qu'est le littoral, espace charnière dessiné à partir d'une mosaïque d'intérêts, de contraintes et d'interdépendances qui rendent sa définition complexe.

Les définitions du littoral sont en effet multiples, car on peut, tour à tour, tenir compte de critères naturels, écologiques, socio-économiques, sans que l'on puisse fournir une définition précise et unique. De plus, la grande variété de vocabulaire utilisée entretient la confusion : aux termes régions, bande, ligne, zone, espace, frange est associé soit le mot côtier, soit le mot littoral (Becet, 1987). Le terme littoral est le plus fréquemment employé dans le vocabulaire politique et juridique français ; on constate cependant qu'avec la mise en place d'une réglementation européenne, ce terme est petit à petit remplacé par le terme « zone côtière » qui traduit plus littéralement l'expression « coastal zone », largement utilisée au niveau international.

Le Robert donne la définition suivante du terme *littoral* :

Littoral, ale, aux. *adj.* et *n.m.* (1752 ; lat. *litoralis*, de *litus*, *litoris* « rivage ») **1 Adj.** Qui appartient, qui est relatif à la zone de contact entre la terre et la mer. *Zone littorale. Cordons littoraux. Topographie littorale ; profil, tracé littoral – faune, flore littorale.* **2 N. m** (1828). *Le littoral* : la zone littorale. **V. Bord, côte, rivage.** *Littoral rectiligne, découpé. Le littoral méditerranéen.*

Le terme apparaît comme très ambigu, et il semble que l'acceptation dans un sens donné du terme *littoral* soit liée à la perception de chaque catégorie d'utilisateurs du terme : la représentation du littoral dépend du filtre de la formation propre à chaque individu. Il semble qu'une définition simple et unique ne puisse exister, car l'analyse ne peut se fonder que sur des époques, des lieux, des contextes sociaux, culturels et économiques donnés. Nous allons donc présenter ici différents types de perception du littoral.

a) *Le point de vue des juristes*

Le terme *littoral* n'a aucune signification juridique précise (Becet, 1991). Il s'agit d'une « notion téléologique dont le contenu varie selon la finalité qu'on lui assigne ». Ainsi, selon la loi du 3 janvier 1986, le littoral est « une entité géographique qui appelle une politique spécifique d'aménagement, de protection et de mise en valeur ».

Par conséquent, comme le souligne A. Miossec (1998), « le législateur a renoncé à dissocier la définition du littoral – l'objet de la loi, de l'expression d'objectifs d'aménagement, de protection et de mise en valeur », contournant ainsi l'« obstacle que représente la recherche d'une délimitation globale pertinente du littoral pour la compréhension des problèmes et la mise au point de moyens d'action ».

b) *Le point de vue des géographes et des géomorphologues*

La géomorphologie privilégie la dimension physique du littoral, à travers une approche dynamique et systémique (Dauvin et al., 2001). Les géomorphologues définissent habituellement le littoral comme l'espace influencé par les forces marines agissant au contact du continent, c'est une interface où s'affrontent et s'interpénètrent la terre et la mer. Le littoral correspond donc à un milieu physique particulier qui dépend à la fois d'influences terrestres, marines et atmosphériques. La zone influencée par les processus littoraux est plus étendue que l'estran au sens strict, puisqu'elle comprend également l'arrière-côte (falaises, dunes, marais maritimes, estuaires...) et une partie des fonds immergés (avant-côte) dont l'extension, en particulier vers le large et en profondeur, n'est pas précisément définie. Il faut également souligner le fait que le trait de côte n'est pas figé : il fluctue à différentes échelles spatio-temporelles, en réponse notamment aux agents dynamiques et aux variations du niveau marin relatif.

L'espace littoral n'est pas seulement défini par une dimension physique qui relève de la géomorphologie, c'est aussi un espace de vie, humanisé, transformé et mis en valeur par les sociétés humaines. Bousquet (1990) distingue ainsi trois définitions possibles du littoral : le littoral de nature, sous la dépendance de la dynamique et de l'énergie du milieu, le littoral d'*oekoumène*, habité et mis en valeur par l'homme et le littoral d'institution que régissent les textes législatifs et réglementaires.

c) *Le point de vue des naturalistes*

Le « naturaliste marin » a une approche beaucoup plus large de la notion de littoral, en particulier pour le bassin versant mer : le littoral correspond à un ensemble de systèmes écologiques comprenant des composantes biotiques et abiotiques (Dauvin et al., 2001). Les organismes vivant dans la zone littorale sont totalement dépendants des facteurs biotiques et abiotiques et s'organisent en fonction de ceux-ci. Bien que vivant en mer ou dans la bande terrestre directement influencée par la mer, ils dépendent d'un environnement plus vaste (rejets des bassins versants, apports de la mer par les courants...). La zone qui influe sur le littoral tel que l'aborde le naturaliste a pour cadre le littoral du géomorphologue ou du géographe mais est nettement inférieure à celle qui est définie par le législateur.

d) *Le point de vue des économistes*

L'économiste n'aborde pas le littoral comme une réalité physique spécifique ou une réalité politique, sociale ou territoriale (Dauvin et al., 2001). Le littoral est plutôt l'occasion de s'intéresser à la problématique générale de l'intégration des enjeux environnementaux dans

l'analyse économique. Le littoral est en effet doté d' « actifs naturels » recherchés, qui ne sont pas des biens économiques standard, mais qui sont le support d'un certain nombre de services marchands comme le tourisme, les loisirs, la culture. La qualité de ces services dépendant du support patrimonial, ces actifs naturels doivent donc être protégés pour que leur contribution économique soit maintenue. Il s'agit alors de justifier l'investissement dans la préservation et l'amélioration de la qualité de l'environnement : c'est ici que l'économiste doit donner un prix fictif à la Nature, par des techniques de valorisation monétaire indirectes, par exemple en évaluant le coût de l'érosion du littoral, des pollutions par les hydrocarbures, ou la valeur que chaque individu attribue au littoral.

En conclusion, définir le mot « littoral » de façon simple et valant pour toute chose et pour chaque individu n'est pas chose facile, c'est la richesse d'une notion qui s'affirme : celle de la « spécificité géographique » reconnue au littoral par la loi du 3 janvier 1986. Ainsi, seule une approche fonctionnelle est concevable (Becet, 1991) : « le littoral, c'est le territoire vivant en symbiose directe avec la mer côtière, territoire au sein duquel il est possible de distinguer plusieurs secteurs selon la nature des activités exercées ».

1.1.2 Perception, représentation et demande sociale

Le Conservatoire du littoral, fondé en 1975, a lancé plusieurs consultations, enquêtes ou études visant à identifier la demande sociale des usagers très divers fréquentant les sites dont il est propriétaire (Marcel, 2005). En effet, afin d'associer les habitants et touristes du littoral à la protection de cet espace, il est important d'analyser quelles activités et quels usages sont ceux du public qui fréquente le littoral. Cet espace accueille des amateurs permanents, qui vivent dans sa proximité et y ont leurs habitudes (la pêche, la promenade, le sport...); mais aussi des visiteurs venus de plus en plus loin, pour qui le littoral constitue un objet de désir et de consommation.

Une demande sociale s'attache désormais aux grands espaces, au sable, à la mer et à sa lumière. Elle se construit depuis la fin du 18^{ème} siècle, transformant les zones côtières en lieux hautement valorisés, de jour en jour plus fréquentés, et parfois « surutilisés » par les sociétés contemporaines.

Une pratique de masse, qu'il faut accompagner et gérer, s'est ainsi développée.

1.1.3 Les conflits d'usage et d'intérêt

Le littoral constitue un espace de plus en plus sollicité, ce qui accentue sa très grande fragilité. L'importance de l'espace littoral est extrême, à beaucoup de points de vue : écologique et scientifique, social, économique entre autres. Et ces divers intérêts ne sont pas tous compatibles entre eux (Becet, 1987).

L'intérêt écologique et scientifique de la zone littorale, surtout maritime, n'est plus à démontrer. Ainsi, l'espace qui s'étend de la laisse de basse mer à la courbe bathymétrique des 30 mètres joue un rôle capital : il sert d'habitat et de lieu de reproduction à de très nombreuses espèces vivantes et notamment à la plus grande partie de la flore. Or de nombreux équipements, généralement réalisés par endigage (marinas, ports de plaisance), ont plus ou moins détruit les richesses de cette zone

Durant les quatre dernières décennies, un déplacement jamais égalé de populations, d'activités et d'échanges s'est réalisé vers les espaces littoraux. La littoralisation est une expression utilisée pour désigner ce bouleversement de la géographie des littoraux sous l'influence de la concentration des hommes, des activités, du tourisme et des échanges sur cet espace. Les

communes littorales regroupaient en 1999 5,85 millions d'habitants sur 4% du territoire métropolitain, soit une densité de population de 272 hab/km² (la densité moyenne nationale étant de 108 hab/ km²). La succession des recensements de population confirme ce glissement du peuplement vers le littoral.

L'intérêt économique présenté par le littoral explique pourquoi cet espace retient toujours d'avantage de population permanente. Le littoral est le siège d'une multitude d'activités plus ou moins dépendantes de la mer. Une première catégorie est formée par les activités purement marines qui englobent l'exploitation des ressources vivantes : pêche et cultures marines traditionnelles (ostréiculture et mytiliculture) ou nouvelles (aquaculture et production d'algues) et celles de ressources inertes (sels marins, agrégats marins et nodules polymétalliques). Une seconde catégorie comporte les activités liées à la mer comme la fonction portuaire ou le secteur de l'énergie (énergie marémotrice, mais aussi nucléaire et solaire, ou industrie du pétrole, etc...). Enfin, une troisième catégorie concerne les activités terrestres qui bénéficient de la proximité de la mer : au premier rang figure bien sûr le tourisme, dont l'essor a contribué à transformer le peuplement et l'occupation des littoraux, mais y rentrent aussi l'agriculture du littoral et les industries nécessitant une certaine proximité côtière. Pour faire vivre les populations locales, il faut développer tous ces domaines économiques et, pour cela, équiper le littoral. Mais, d'une part, il existe de moins en moins de zones disponibles et des problèmes d'occupation de l'espace et de cohabitation se posent d'une manière cruciale. D'autre part, il faut penser aux conséquences des équipements : toute action de l'homme, en général, comporte des risques, du fait de la sensibilité du littoral ; non seulement risque de pollution de toutes sortes et de dégradation du milieu, mais aussi, par exemple, risque de modification du trait de côte, renforçant l'érosion résultant des phénomènes naturels.

Du fait de ces multiples usages du littoral et des nombreuses menaces qui pèsent sur cet espace, on assiste à des conflits d'usages et d'intérêts récurrents (figure 1.1) entre, d'une part, une logique de défense des activités que la société doit essayer de faire cohabiter et, d'autre part, une volonté de préserver le patrimoine naturel (Dauvin et al.,2001). Le partage de l'espace littoral est donc sans cesse remis en question par les populations littorales. Deux principaux types de conflits se sont développés en rapport avec l'occupation de l'espace littoral (Miossec, 1998) :

- des conflits entre la préservation des espaces naturels et le développement des activités socio-économiques,
- des conflits entre les activités socio-économiques à l'intérieur de la zone côtière parce qu'elles exploitent les mêmes potentialités physiques ou fonctionnelles du milieu ou parce qu'elles nécessitent pour leur développement de « consommer » le même type d'espace sur la côte. Par exemple, l'agriculture littorale peut compromettre l'activité balnéaire (prolifération des algues vertes sur les côtes bretonnes...) ; la qualité de l'eau est également une source de conflit entre les agricultures littorales : les conchyliculteurs recherchent une eau de bonne qualité mais cette qualité peut être menacée par les rejets en mer des eaux riches en nitrates ou phosphates des agricultures continentales. Ces conflits sont donc souvent en rapport avec la qualité de l'eau.

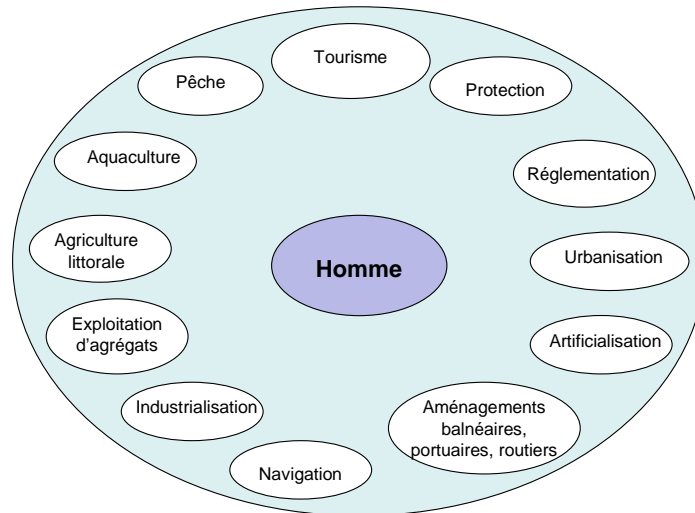


Fig. 1 - Les multiples usages du littoral, modifié d'après Dauvin et al.

1.2 Réglementation et analyse des acteurs

1.2.1 Cartographie des acteurs

Les usages du littoral sont multiples, les acteurs concernés sont donc nombreux et de catégories socioprofessionnelles diverses. La figure 1.2 donne un aperçu de cette multiplicité, qui se traduit par une réglementation complexe et abondante, que ce soit au niveau national, communautaire ou international.

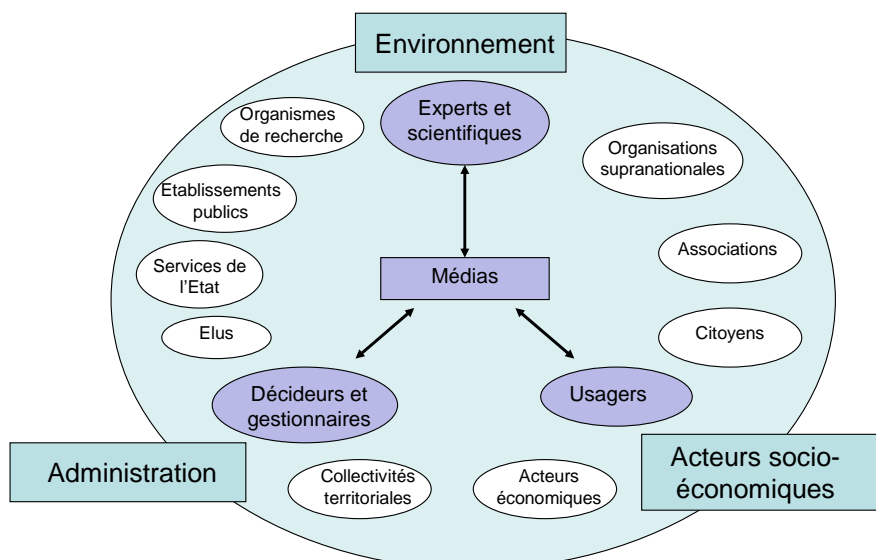


Fig. 2 - La ronde des acteurs, d'après Dauvin et la Commission Océanographique Internationale.

1.2.2 Politique française en matière de gestion du littoral

Le cadre d'une politique du littoral se construit en France depuis la fin des années 60. Les bases d'une gestion intégrée sont ainsi progressivement jetées (Miossec, 1998).

En novembre 1973, le gouvernement français publie un court rapport rédigé par un conseiller d'Etat, Michel Piquard, qui pilotait un groupe d'études chargé de :

- décrire la situation du littoral français (activités qui s'y déploient, sites qui le constituent et impacts des activités sur les sites) ;
- recenser les facteurs de mutations probables pour les années à venir ;
- élaborer un diagnostic d'ensemble et proposer une politique reposant sur l'aménagement en profondeur d'une part, sur « quelques moyens et quelques mesures » d'autre part.

Ce rapport ne donne pas une définition précise du littoral et en fait une description variée : zone d'activités dynamiques à des degrés divers ; « succession de sites dont chacun a une personnalité, suscite l'admiration, l'attachement passionné » ; « patrimoine exigu et précaire » ; milieu dont la richesse est fragile. L'état des lieux montre ainsi les forces et les faiblesses du littoral français dans une conjoncture plus favorable au développement économique qu'à la protection de l'environnement. Cependant, la notion de préservation est évoquée : « Il paraît indispensable de préserver pour les générations futures le libre accès et l'intégrité des sites les plus remarquables. »

Ainsi, dès le début des années 70, il y a en France une prise de conscience de la nécessité d'une gestion durable du littoral. Mais l'Etat ne peut envisager de casser le développement économique du littoral, il doit seulement en atténuer les excès.

La politique qui se met ensuite en place s'articule autour de trois grands axes : réglementer, protéger, développer et mettre en valeur.

Réglementer

La réglementation fut tout d'abord pratiquée par des circulaires et des directives, et en définissant une bande de l'ordre de 100 mètres réputée inconstructible pour préserver les sites et les paysages.

La loi du 3 janvier 1986 est venue compléter un dispositif réglementaire jugé trop peu efficace. Dans l'article 1, qui porte sur la protection, l'aménagement et la mise en valeur du littoral, la « loi littoral » insiste sur la nécessité de protéger les espaces les plus caractéristiques et les plus remarquables du littoral, et cherche à limiter l'extension du bâti. Elle intervient donc à la fois dans le domaine quantitatif en visant à limiter les aires urbanisables, et dans le domaine qualitatif à partir de seuils dans la logique d'un développement durable.

Art. 1^{er}. - Le littoral est une entité géographique qui appelle une politique spécifique d'aménagement, de protection et de mise en valeur.

La réalisation de cette politique d'intérêt général implique une coordination des actions de l'Etat et des collectivités locales, ou de leurs groupements, ayant pour objet :

- la mise en œuvre d'un effort de recherche et d'innovation portant sur les particularités et les ressources du littoral ;
- la protection des équilibres biologiques et écologiques, la lutte contre l'érosion, la préservation des sites et paysages et du patrimoine ;
- la préservation et le développement des activités économiques liées à la proximité de l'eau, telles que la pêche, les cultures marines, les activités portuaires, la construction et la réparation navales et les transports maritimes ;
- le maintien ou le développement, dans la zone littorale, des activités agricoles ou sylvicoles, de l'industrie, de l'artisanat et du tourisme.

Fig. 3 - Article 1 de la loi Littoral

L'esprit de la loi littoral réside dans son article premier : peut-on à la fois protéger l'environnement et assurer la mise en valeur économique du littoral ? Cet article est construit selon une certaine hiérarchie, qui place la protection des équilibres biologiques et écologiques avant toutes les formes du développement économique. On notera également que l'activité touristique est placée en dernière position, pour souligner sans doute qu'il s'agit de l'activité la plus contraignante pour l'environnement littoral.

Protéger

La protection du littoral fait l'objet d'une attention particulière de la part de l'Etat et des collectivités territoriales. Le Conservatoire du littoral et des rivages lacustres a ainsi été créé par une loi du 10 juillet 1975. Il a pour mission de « mener dans les cantons côtiers et dans les communes riveraines des lacs et des plans d'eau d'une superficie au moins égale à 1000 hectares, une politique foncière de sauvegarde de l'espace littoral, de respect des sites naturels et de l'équilibre écologique. »

Développer et mettre en valeur

C'est l'objectif des schémas de mise en valeur de la mer (SMVM). Ces schémas constituent un dispositif réglementaire, voulu par l'Etat, pour une gestion plus harmonieuse de la zone côtière. Leur originalité est dans leur définition : ils portent sur une partie du territoire qui constitue une « unité géographique et maritime ».

On peut synthétiser la politique française en matière de gestion du littoral par le schéma suivant :

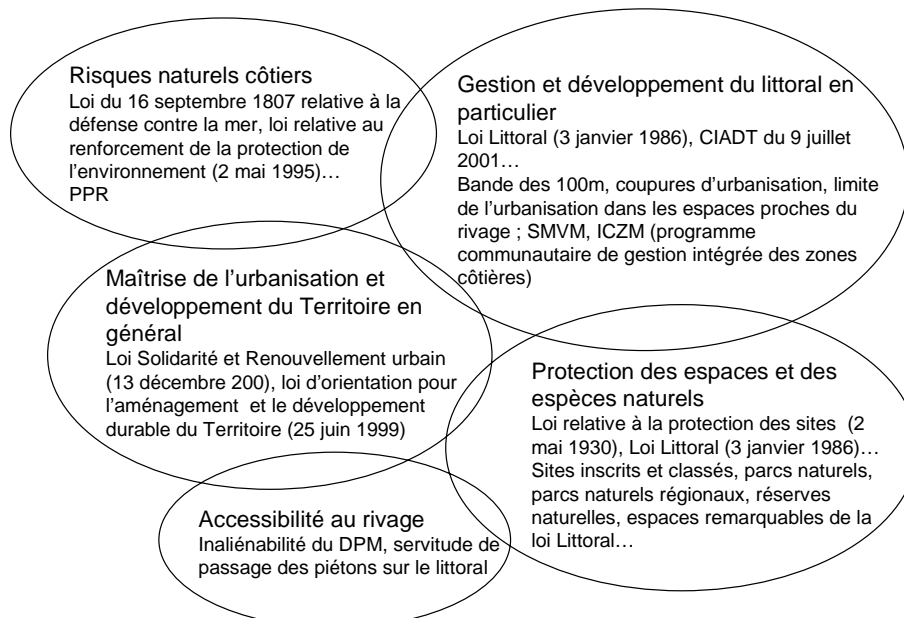


Fig. 4 - Aperçu de quelques textes en vigueur et d'outils concernant le littoral, d'après *Océanis*, vol. 28 n°1-2, 2002

1.2.3 Aperçu des principales mesures de protection des espaces et des espèces au niveau français, communautaire et international

Les règles applicables à la protection du patrimoine naturel du littoral sont nombreuses, diverses et concernent tant le droit international, que le droit européen ou le droit national. Mais toutes s'appliquent au territoire français, soit directement, soit par le biais du droit international et communautaire (Dauvin et al., 2001).

- | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Protection des espaces naturels littoraux et marins par le droit international <ul style="list-style-type: none"> ○ Convention de Ramsar (protection des zones humides d'importance internationales) ○ Programme Man & Biosphere de l'UNESCO (réserves de biosphère) ○ Convention de Barcelone (zones marines protégées en Méditerranée) ○ Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (protection du milieu marin) ○ Convention OSPAR (protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est) ○ Convention du Patrimoine Mondial
 ▪ Protection des espèces animales et végétales, de leurs habitats et de la diversité biologique du littoral par le droit international <ul style="list-style-type: none"> ○ Convention sur la diversité biologique ○ Convention de Bonn (protection des espèces migratrices) ○ Convention de Washington (réglementation du commerce de certaines espèces) ○ Convention de Berne (conservation de la vie sauvage et du milieu naturel en Europe)
 ▪ Protection des espaces littoraux et des espèces vivant dans les zones côtières par le droit communautaire <ul style="list-style-type: none"> ○ Directive 79/409/CE du 2 avril 1979 concernant la conservation des oiseaux sauvages ○ Directive 92/43/CEE du 21 mai 1992 relative à la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages |
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Protection du patrimoine naturel du littoral par le droit français <ul style="list-style-type: none"> ○ Les règles et les instruments de protection spécifiques au littoral : <ul style="list-style-type: none"> - Les dispositions de la loi Littoral (articles L.146-6 et L.146-4 du code de l'urbanisme) - Les dispositions relatives au domaine public maritime - L'action du Conservatoire du littoral (acquisition d'espaces naturels) - Les schémas de mise en valeur de la mer - Les contrats de baie ○ Les règles et les instruments de protection des espaces naturels non spécifiques au littoral : <ul style="list-style-type: none"> - Les directives territoriales d'aménagement - Les schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) et les schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) - La politique des espaces naturels sensibles (acquisition d'espaces naturels par les départements) - Les sites classés et inscrits - Les réserves naturelles - Les arrêtés de biotope - Les parcs nationaux et les parcs naturels régionaux |

Fig. 5 - Mesures de protection des espaces et des espèces au niveau français, communautaire et international

1.3 Gestion intégrée du littoral dans la perspective d'un développement durable

1.3.1 Définition

Au niveau international, le « Coastal Management » s'avère être une grande source de préoccupation, et de nombreuses actions sont réalisées dans le sens d'une gestion intégrée du littoral dans la perspective du développement durable. L'UNESCO détient un rôle leader par l'intermédiaire de l'IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission), qui développe depuis 1998 un programme d'aide à la mise en place d'une gestion intégrée des zones côtières (*Coastal Zone Integrated Management*).

La Gestion Intégrée des Zones Côtières (traduction de *Coastal Zone Integrated Management*) est un processus dynamique qui réunit gouvernements et société, sciences et décideurs, intérêts publics et privés, en vue de la préparation et de l'exécution d'un plan de protection et de développement des systèmes et ressources côtières (Dauvin et al., 2001). Ce processus vise à maximiser les choix à long terme privilégiant les ressources et leur usage raisonné et raisonnable. Il apparaît comme l'instrument privilégié du développement durable d'« éco-socio-systèmes » complexes, en conciliant développement et bon état écologique des ressources, et en liant les questions environnementales, économiques et sociales (Commission Océanographique Internationale, 2001)

Au niveau communautaire, on assiste également à la mise en œuvre d'une stratégie de gestion intégrée des zones côtières en Europe : le Parlement européen et le Conseil de l'Union Européenne ont adopté le 30 mai 2002 une recommandation relative à la mise en œuvre d'une stratégie de gestion intégrée des zones côtières (GIZC) en Europe, afin d'inciter les Etats membres à appliquer les principes de bonne gestion des zones côtières à travers l'élaboration de stratégies nationales. Ces stratégies devraient être basées sur un inventaire national des acteurs, législations et institutions qui influencent la gestion du littoral. Cette recommandation marque une nouvelle étape dans la politique européenne en matière de gestion du littoral. Mais les travaux de la commission pour mettre en œuvre cette nouvelle stratégie ne sont pas achevés : un certain nombre d'instruments adoptés au cours des dix dernières années ayant une incidence sur les zones côtières (Directive Cadre Eau notamment...) souffrent d'un manque de coordination et de cohérence.

1.3.2 Enjeux

L'intérêt premier du concept de gestion intégrée est qu'il a pour vocation de promouvoir une organisation du territoire littoral intégrant la mixité physique, économique et culturelle de l'espace marin et de l'espace littoral. De ce fait, le concept de gestion intégrée est porteur d'une dynamique incontestable sur laquelle pourrait se baser une reconsidération de la protection du patrimoine littoral naturel, formulée à partir de la mer et intégrant l'espace terrestre proche.

Ainsi, la pêche, mais également les cultures marines, activités économiques indispensables à l'équilibre du littoral, activités traditionnelles, partie intégrante de notre patrimoine culturel, occupent une place importante dans le concept. La gestion durable des ressources halieutiques passe par un ensemble de mesures communautaires, nationales et régionales, prises en associant étroitement les professionnels de la pêche pour aboutir à la notion d'usage approprié des ressources halieutiques. Le tourisme doit également être pris en compte avec l'ensemble de ses potentialités de création d'emploi et de mise en valeur de l'espace.

1.3.3 Quels outils ?

La mise en place d'une gestion intégrée des zones côtières suppose la création de programmes adaptés. Certains organismes institutionnels se sont livrés à la rédaction d'une aide conceptuelle, comme la Commission Océanographique Intergouvernementale de l'UNESCO qui a produit deux volumes dans la série de Manuels et Guides, le premier en 1997 intitulé « Guide méthodologique d'aide à la Gestion Intégrée des Zones Côtières », puis le second en 2001 intitulé « Des outils et des hommes pour une Gestion Intégrée des Zones Côtières ». Les deux volumes ont pour ambition d'aider à construire un système d'information cohérent d'aide à la décision et de guider les différents acteurs (scientifiques, opérateurs, gestionnaires...) à travers les étapes de la démarche de planification de la Gestion Intégrée des Zones Côtières.

En 2003, dans la même série, est paru le 1^{er} dossier ICAM (Integrated Coastal Area Management), intitulé « Guide de référence sur l'utilisation d'indicateurs pour la Gestion Intégrée des Zones Côtières ». Ce guide définit huit catégories d'indicateurs environnementaux :

- Caractéristiques et étendue de la zone côtière
- Biodiversité
- Tourisme
- Pêche
- **Qualité de l'eau**
- Transport maritime
- Pétrole et gaz
- Processus globaux

Dans la suite de ce mémoire, nous allons nous intéresser en particulier à la catégorie « Qualité de l'eau ». Nous étudierons dans le chapitre suivant la réglementation nationale rattachée à ce sujet, mais il est intéressant de noter ici les recommandations du dossier ICAM sur la qualité de l'eau.

« Des données globales sur l'étendue et l'évolution des habitats côtiers clefs, comme les zones humides, ne sont pas disponibles.

Il existe beaucoup de programmes de surveillance nationaux et régionaux pour des polluants variés, mais la continuité et la précision des données collectées varient. Des paramètres et des méthodologies standardisés d'échantillonnage sont nécessaires pour réaliser des comparaisons sur une base globale.

Une surveillance directe accrue des paramètres de qualité de l'eau, couplée avec l'utilisation de capteurs satellitaires, peut améliorer grandement notre connaissance de l'état des eaux côtières du monde.

Les informations actuelles s'appuient principalement sur des observations anecdotiques d'événements extrêmes, comme les blooms d'algues toxiques, et sur un suivi non continu.»

L'accent est donc mis sur l'acquisition de données précises, continues, variées et sur leur diffusion. L'intérêt du couplage de séries temporelles de mesures *in situ* et de données issues de la télédétection est également souligné : il s'agit de mettre en place un suivi opérationnel de la qualité des eaux côtières.

Conclusion du chapitre 1

Le patrimoine naturel littoral est menacé, et cette menace est l'aboutissement d'un long processus de lente dégradation : l'histoire du littoral est marquée par une urbanisation et une industrialisation incessantes parallèlement à une dégradation générale de la qualité des eaux littorales et côtières et à l'épuisement des ressources halieutiques ou des gisements minéraliers. En dépit de cette dégradation, l'attraction pour cet espace ne cesse de s'accroître si bien que plus de 60% de la population mondiale vivra dans une bande littorale de 50km d'ici deux à trois décennies, ce qui pèsera lourdement sur l'environnement et ses ressources. Le littoral est par conséquent une zone de conflits d'intérêts extrêmement forts dans laquelle les nombreux acteurs doivent coexister.

Les difficultés de préservation et de gestion des zones côtières proviennent de plusieurs causes. Ainsi, l'absence de définition précise du littoral s'ajoute à la complexité d'une juridiction séparée pour les milieux terrestres et marins, complexité aggravée par la superposition des compétences depuis l'Etat jusqu'aux communes... Cependant, pour assurer le développement durable du littoral, il est indispensable que les acteurs coexistent dans un système simplifié : la gestion intégrée des zones côtières est de ce fait devenue une nécessité.

Nous allons maintenant nous intéresser à la prise en compte de la qualité de l'eau dans la gestion intégrée des zones côtières, et plus particulièrement à la surveillance de la composante biologique de la qualité de l'eau qu'est le phytoplancton. Avant d'étudier les modalités de cette prise en compte, il faut tout d'abord caractériser le phénomène étudié.

Chapitre 2. Production primaire et qualité des eaux côtières

2.1 Définition de la qualité de l'eau

2.1.1 Cadre réglementaire : la directive cadre « eau »

L'Union Européenne a adopté depuis 1975 une trentaine de directives ou décisions communautaires (eaux de baignades, zones conchylicoles, zones sensibles, Natura 2000, etc...) reposant sur une double approche : lutte contre les rejets de substances dangereuses dans l'environnement aquatique et définition de normes de qualité concernant des zones particulières. Pour améliorer l'efficacité de cette politique et assurer une meilleure cohérence entre les différentes directives, les Etats membres ont demandé à Bruxelles de préparer une directive cadre qui a été longuement discutée depuis 1995 avant d'être adoptée en octobre 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). Cette directive entraînera donc l'abrogation de nombreuses directives, selon un échéancier fixé ; la directive 79/923 modifiée par la directive 91/692 relative à la qualité requise des eaux conchylicoles sera ainsi abrogée en 2013. Seules seront maintenues les directives concernant les eaux destinées à la consommation humaine, les eaux de baignade, les eaux résiduaires urbaines et les nitrates d'origine agricole.

Les objectifs de cette nouvelle directive sont d'élaborer une politique durable et intégrée, tant pour la protection et l'amélioration de la qualité de l'environnement que pour l'utilisation prudente et rationnelle de la ressource. Les Etats membres doivent réduire progressivement les rejets de substances toxiques « *prioritaires* » et mettre en place des programmes de surveillance pour garantir dans un délai de quinze ans un *bon état* écologique c'est-à-dire une combinaison des états biologique, physico-chimique et hydromorphologique, de toutes les eaux, superficielles (dont les eaux côtières) et souterraines. Il est important de souligner que la directive définit explicitement et précisément le terme « eaux côtières ».

2.1.2 Indicateurs de la qualité des eaux côtières

La directive cadre sur l'eau définit des « éléments de qualité pour la classification de l'état écologique » des eaux côtières :

Paramètres biologiques

Composition, abondance et biomasse¹ du phytoplancton

Composition et abondance de la flore aquatique (autre que le phytoplancton)

Composition et abondance de la faune benthique invertébrée

Paramètres hydromorphologiques soutenant les paramètres biologiques

Conditions morphologiques : variations de la profondeur, structure et substrat de la côte, structure de la zone intertidale

¹ La biomasse est calculée à partir de la concentration en chlorophylle a.

Régime des marées : direction des courants dominants, exposition aux vagues

Paramètres chimiques et physico-chimiques soutenant les paramètres biologiques

Paramètres généraux : transparence, température de l'eau, bilan d'oxygène, salinité, concentration en nutriments

Polluants spécifiques : pollution par toutes substances prioritaires recensées comme étant déversées dans la masse d'eau, pollution par d'autres substances recensées comme étant déversées en quantités significatives dans la masse d'eau

Les états écologiques 'très bon', 'bon' et 'moyen' sont alors attribués en considérant des éléments de qualité biologique, hydromorphologique et physico-chimique.

Parmi les éléments de qualité biologique, le phytoplancton est caractérisé comme suit :

Très bon état	Bon état	Etat moyen
<p>La composition et l'abondance des taxa pytoplanctoniques correspondent totalement ou presque totalement aux conditions non perturbées.</p> <p>La biomasse moyenne de phytoplancton correspond aux conditions physico-chimiques caractéristiques et n'est pas de nature à détériorer sensiblement les conditions de transparence caractéristiques.</p> <p>L'efflorescence planctonique est d'une fréquence et d'une intensité qui correspondent aux conditions physico-chimiques caractéristiques.</p>	<p>La composition et l'abondance des taxa pytoplanctoniques montrent de légers signes de perturbations.</p> <p>Légère modification dans la biomasse par rapport aux conditions caractéristiques. Ces changements n'indiquent pas de croissance accélérée des algues entraînant des perturbations indésirables de l'équilibre des organismes présents dans la masse d'eau ou de la qualité de l'eau.</p> <p>La fréquence et l'intensité de l'efflorescence planctonique peuvent augmenter légèrement.</p>	<p>La composition et l'abondance des taxa pytoplanctoniques diffèrent modérément de celles des communautés caractéristiques.</p> <p>La biomasse des algues dépasse sensiblement la fourchette associée aux conditions caractéristiques et est de nature à se répercuter sur d'autres éléments de qualité biologique.</p> <p>La fréquence et l'intensité de l'efflorescence planctonique peuvent augmenter modérément. Une efflorescence persistante peut se produire pendant les mois d'été.</p>

Tab. 1 - Eléments de qualité biologique : le phytoplancton, extrait de la Directive 2000/60/CE

La Directive Cadre Eau confirme donc l'intérêt d'un suivi de l'évolution spatio-temporelle des populations phytoplanctoniques. Mais il faut avant tout comprendre les mécanismes qui régissent cette évolution, et analyser l'impact de l'homme sur ces mécanismes.

2.2 Mécanismes de la production primaire

2.2.1 Caractéristiques de la production primaire

L'océan côtier, à l'interface entre les continents et l'océan ouvert, est une zone présentant une dynamique physique et biologique complexe. L'hydrodynamique y est soumise aux apports d'eau douce, aux courants de marée, à différents forçages, dont celui du vent et de la circulation à grande échelle, avec selon les régions une combinaison de l'ensemble de ces influences. La production primaire est l'œuvre des organismes photosynthétiques, qui transforment le carbone de sa forme minérale à sa forme organique. Ces organismes sont principalement représentés en milieu océanique par les algues phytoplanctoniques pélagiques. En zone côtière, cette production primaire est souvent intensifiée sous l'effet des processus physiques décrits précédemment, auxquels viennent s'ajouter les apports continentaux en nutriments. Les échelons trophiques supérieurs, comprenant les espèces exploitées par la pêche ou l'aquaculture, dépendent étroitement de la production primaire, et sont fortement représentés dans les régions côtières.

Le plancton se définit comme l'ensemble des organismes pélagiques qui flottent et dérivent sous l'action du mouvement d'eau. Le phytoplancton, partie végétale du plancton, se compose de végétaux unicellulaires microscopiques flottant dans la colonne d'eau.

Le phytoplancton est constitué d'un ensemble hétérogène de microalgues unicellulaires, les cellules pouvant être solitaires ou groupées en colonies. La taille des cellules phytoplanctoniques varie de quelques microns jusqu'à quelques centaines de microns. Leur forme est extrêmement variée, la diversité morphologique étant souvent liée à une adaptation à la mobilité (flottaison, et mouvements verticaux). Le nombre d'espèces phytoplanctoniques marines a été estimé à 3910 ± 465 espèces, correspondant à 489 ± 15 genres répartis dans 15 classes.

Les deux classes de phytoplancton marin les plus riches en espèces sont celles des diatomées (164 genres et 1365 à 1783 espèces) et des dinoflagellés (115 à 131 genres et 1424 à 1772 espèces).

2.2.2 Dynamique spatio-temporelle

Au niveau temporel, la biomasse de phytoplancton varie en fonction des facteurs limitant la photosynthèse, à savoir l'énergie lumineuse, et la concentration en nutriments. De même, la succession des assemblages phytoplanctoniques est principalement déterminée par les conditions environnementales locales, ainsi que par la réponse des différentes espèces à leurs variations. Les variations de composition spécifique sont attribuées à plusieurs facteurs : des facteurs physiques (lumière, température, turbulence), chimique (nutriments, vitamines) et biologiques (compétition, broutage).

En domaine tempéré, le cycle saisonnier de la production phytoplanctonique est principalement contrôlé par la dynamique de mélange de la colonne d'eau : en effet, pour sa croissance et sa reproduction, le phytoplancton a besoin d'énergie lumineuse et de nutriments, d'où l'importance de la turbulence qui brasse la colonne d'eau et permet l'importation des nutriments dans la zone euphotique.

Mais les écosystèmes côtiers présentent des spécificités hydrodynamiques et biologiques propres : ils sont soumis à la fois aux influences océaniques et aux apports continentaux. En effet, les eaux côtières sont soumises aux cycles saisonniers de variation thermique et photopériodique, ainsi qu'aux variations saisonnières de la profondeur de la couche de la couche de mélange, mais de nombreux autres facteurs peuvent également influencer sur le développement des populations phytoplanctoniques (upwellings côtiers, fronts de marée, apports d'eau douce).

Au niveau spatial, une composante verticale et une composante horizontale peuvent être distinguées.

La distribution verticale du phytoplancton est difficile à apprécier, car le phytoplancton peut se développer sur l'ensemble de la zone euphotique. L'abondance de phytoplancton serait alors maximale entre 50 et 150 mètres, dans la partie inférieure de la zone euphotique, voire même en dessous. Mais cette répartition dépend fortement des conditions du milieu, et, de plus, on observe au cours de la journée des migrations verticales des organismes, en fonction de l'énergie lumineuse en surface.

La répartition horizontale, complexe elle aussi, dépend, entre autres, de la température, de la répartition des nutriments, des courants, du vent et des marées.

Enfin, si les conditions hydroclimatiques sont particulièrement favorables, les populations phytoplanctoniques (généralement une espèce spécifique) vont se multiplier, « fleurir », et former des efflorescences algales ou « blooms », dont on parlera plus loin.

2.2.3 Evaluation de la biomasse

Comment quantifier la biomasse phytoplanctonique ? Elle est évaluée par le biais de la concentration en chlorophylle a. Le phytoplancton est en effet une algue et contient de ce fait de la chlorophylle et éventuellement des pigments accessoires pour capter l'énergie solaire et la transformer en matière organique grâce à la photosynthèse.

La mesure de la concentration de chlorophylle a est donc utilisée pour estimer la biomasse phytoplanctonique dans la mesure où la synthèse organique d'origine végétale ne peut se faire qu'en passant par l'intermédiaire de ce type de chlorophylle.

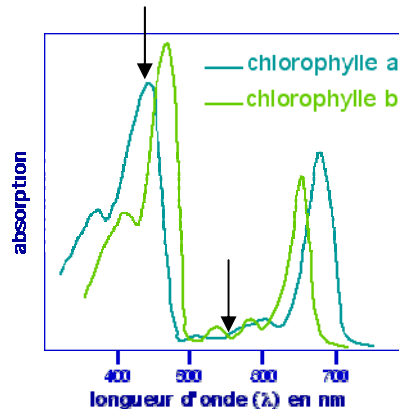


Fig. 6 - Spectre d'absorption de la chlorophylle. Les deux flèches désignent le maximum et le minimum d'absorption de la chlorophylle a.

2.3 Les blooms

2.3.1 Présentation du phénomène

Les proliférations microalgales, ou blooms, sont des phénomènes naturels, dont les premières descriptions sont anciennes (Gaillard, 2003) : les intoxications humaines associées à la consommation de coquillages sont connues depuis plusieurs siècles, en France, ainsi que dans d'autres pays, comme, par exemple, l'intoxication observée par le Capitaine Vancouver, lors d'une expédition le long des côtes de l'actuelle Colombie Britannique en 1793.

A partir des années 70, les événements toxiques ou «nuisibles» associés à la prolifération de microalgues semblent se développer en termes d'occurrence, de répartition spatiale, et de diversité des organismes impliqués, causant des préjudices croissants à la fois à la santé humaine, mais également à l'économie liée à l'exploitation des ressources marines.

La multitude de termes utilisés pour décrire ces événements (*bloom*, *bloom* toxique, *bloom* nuisible, marées rouges...) est aujourd'hui rassemblée sous l'appellation internationale «*Harmful Algal Bloom*» (HAB), ce qui remplace la terminologie très utilisée dans le passé de «*Red Tides*» (marées rouges). Les HABs se réfèrent à un ensemble varié d'événements, qui ont comme caractéristiques communes une origine microalgale, et des conséquences négatives sur les activités humaines. Les nuisances engendrées par ces événements ne sont pas nécessairement liées à une augmentation significative de la biomasse : de nombreuses espèces responsables de HABs sont «nuisibles» à faible concentration (quelques centaines de cellules par litre).

Trois groupes d'organismes impliqués dans des phénomènes HAB peuvent être distingués (Hallegraeff, 2004) :

1. Espèces qui, en général, produisent des colorations bénignes de l'eau, mais qui, dans des conditions exceptionnelles, peuvent croître en blooms si denses qu'ils tuent les poissons et les invertébrés à cause de l'appauvrissement en oxygène (phénomène d'anoxie),
2. Espèces qui produisent des toxines puissantes pouvant remonter la chaîne alimentaire jusqu'à l'homme, causant une variété de maladies gastro-intestinales et neurologiques,
3. Espèces non-toxiques pour les hommes mais nuisibles pour les poissons et les invertébrés, surtout en systèmes d'aquaculture intensive, car endommagent ou bouchent leurs branchies.

Le tableau fournit en annexe A décrit les différents types de nuisances associées à des proliférations de microalgues et les principaux organismes responsables.

2.3.2 Dynamique spatiale et temporelle d'un bloom

Dans les écosystèmes océaniques hauturiers, généralement oligotrophes (*ie.* pauvres en nutriments), les efflorescences phytoplanctoniques sont observées au printemps, lorsque les conditions sont favorables à la formation d'une couche de mélange qui permet au phytoplancton de se maintenir dans les eaux de surface, riches en nutriments et où la disponibilité en énergie lumineuse est importante. Ce bloom printanier épuise le milieu en sels nutritifs et entraîne une chute de la biomasse phytoplanctonique.

Cependant, en milieu côtier, les apports terrigènes permettent le maintien de concentrations élevées en sels nutritifs dans le milieu et plusieurs blooms successifs peuvent être observés. La dynamique du phytoplancton est ainsi plus complexe en domaine côtier.

2.4 Phénomène d'eutrophisation

L'eutrophisation est un processus naturel ou d'origine anthropique qui modifie un écosystème en l'enrichissant en sels nutritifs tels que nitrates et phosphates.

L'enrichissement en organismes vivants et en matières organiques qui s'ensuit peut engendrer divers effets négatifs sur l'écosystème, comme par exemple une diminution de l'énergie lumineuse disponible dans la zone euphotique. En outre, la décomposition de la matière organique associée à la forte biomasse phytoplanctonique peut créer un déficit en oxygène dans la colonne d'eau et dans le sédiment (hypoxie-anoxie). Les effets de la modification de la production primaire affectent le fonctionnement du réseau trophique, entraînant des modifications des structures des différentes communautés, et parfois des mortalités d'organismes marins associées à l'anoxie. L'eutrophisation peut également altérer la biodiversité du milieu.

2.5 Enjeux socio-économiques de la surveillance de la production primaire

Considérons tout d'abord le cas de la surveillance des efflorescences phytoplanctoniques. Les enjeux humains et économiques sont considérables car les blooms s'accompagnent généralement de nuisances et de pertes économiques significatives, du fait des pertes en aquaculture, de la destruction de stocks dans les installations conchylicoles (l'exemple de l'huître d'Arcachon, interdite à la vente pendant 5 semaines en mai 2005, est révélateur), des méventes consécutives aux périodes d'interdiction de consommation (Marchand, 1997) à

cause de la contamination récurrente de certains coquillages par des algues toxiques ; et de l'impact négatif sur le tourisme (peur des marées rouges). Toute la chaîne économique d'une région peut s'en trouver ralentie. Les blooms toxiques ont également une répercussion sanitaire : les personnes ingérant des coquillages contaminés seront empoisonnées à des degrés plus ou moins importants, et la qualité des eaux côtières sera très fortement altérée par la prolifération de phytoplancton. Enfin, les blooms ont un lourd impact sur l'écosystème marin : forte mortalité de poissons due aux toxines, à la présence de mucilage ou à l'appauvrissement du milieu en oxygène ; empoisonnement de mammifères marins ; anoxie du milieu. Un bloom toxique intense peut ainsi mettre un écosystème en péril, toute la chaîne écologique se trouvant affectée par ce phénomène. Il est ici aisé de dresser un parallèle économie / écologie : chaînes économiques et écologiques sont intimement liées en milieu côtier, et seront simultanément affectées par un bloom, la nuisance dépendant du degré de la chaîne auquel on se place. Le problème économique ne peut donc être analysé sans se pencher sur le problème écologique, tout particulièrement à une époque où la destruction d'un écosystème est quantifiée économiquement.

D'où l'intérêt de la mise en place d'un système opérationnel d'information et de surveillance de l'environnement dont l'un des objectifs serait la détection précoce des blooms et leur suivi.

En contrepartie des nuisances causées par les blooms, la production primaire présente un enjeu halieutique considérable, puisque les bancs de poissons recherchent les eaux productives riches en plancton pour se nourrir : une meilleure connaissance du processus de production primaire peut participer à une meilleure gestion des ressources halieutiques. Il est donc intéressant de connaître les zones de forte productivité pour guider et mieux gérer les pêcheries.

Conclusion du chapitre 2

La connaissance de la qualité de l'eau est une composante essentielle dans la gestion intégrée du littoral. L'aspect biologique de cette composante est sans aucun doute le plus difficile à prendre en compte, du fait de la complexité des mécanismes gouvernant la production primaire en milieu côtier et de l'impact croissant de la présence humaine sur le littoral qui a manifestement accru les perturbations écologiques, ce qui encourage le développement de blooms phytoplanctoniques toxiques.

Deux catégories de mesures peuvent être distinguées : les mesures « actives » limitant les impacts des activités littorales sur la qualité du milieu (gestion des eaux résiduaires et des déchets, gestion des activités maritimes et agricoles...), et les mesures « passives » concernant la surveillance de la qualité de l'eau et la protection contre les HABs (suivi des paramètres de la qualité de l'eau, identification des blooms nuisibles ou toxiques, contrôle de la toxicité des coquillages, diffusion de l'information auprès des catégories socioprofessionnelles concernées...). La suite du mémoire sera consacrée à ces mesures « passives » et à la mise en place d'un suivi opérationnel de la production primaire en milieu côtier.

Chapitre 3. Etat de l'art du suivi opérationnel de la production primaire

L'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) est un Etablissement public à caractère industriel et commercial, placé sous la tutelle conjointe des ministères chargés de la recherche, de l'agriculture et de la pêche, des transports, et de l'environnement. Il résulte de la fusion de l'Institut Scientifique et Technique des Pêches Maritimes et du Centre National pour l'Exploitation des Océans. L'IFREMER a pour missions de conduire et promouvoir des recherches fondamentales et appliquées, des actions d'expertise et des actions de développement technologique et industriel destinés à : *« connaître, évaluer et mettre en valeur les ressources des océans et permettre leur exploitation durable ; améliorer les méthodes de surveillance, de prévision d'évolution, de protection et de mise en valeur du milieu marin et côtier ; favoriser le développement socio-économique du monde maritime »*.

3.1 Les réseaux de données *in situ*

3.1.1 REPHY, réseau de surveillance du phytoplancton et des phycotoxines

Le REPHY a été créé par l'Ifremer pour observer les espèces phytoplanctoniques présentes dans le milieu marin côtier de la France métropolitaine, et suivre les épisodes de toxicité. Il a été mis en place en 1984, à la suite d'importants développements sur le littoral, de certaines espèces de Dinophysis. Ces dernières produisent des toxines s'accumulant dans les coquillages, à l'origine de nombreuses intoxications de type diarrhéique chez les consommateurs, en 1983 et 1984 sur les côtes bretonnes. Le REPHY est un réseau national d'observation et de surveillance dont les objectifs sont :

- la connaissance de la distribution spatio-temporelle des différentes espèces phytoplanctoniques des eaux côtières et lagunaires, et le recensement des événements tels que les eaux colorées, les efflorescences exceptionnelles, et les développements de toutes espèces toxiques ou nuisibles susceptibles d'affecter la faune marine,
- la protection des consommateurs, assurée par la détection des espèces phytoplanctoniques productrices de toxines, et la recherche de ces toxines dans les coquillages.

Le REPHY possède donc un double aspect patrimonial et réglementaire, puisque la constitution de séries temporelles de données sur les populations phytoplanctoniques des différentes façades maritimes (aspect patrimonial), permet également la détection des espèces phytoplanctoniques particulières que sont les espèces toxiques et nuisibles. Le suivi de ces épisodes de toxicité détermine la prise de décisions administratives ; cet aspect réglementaire est désormais étroitement lié à des obligations communautaires (directives européennes).

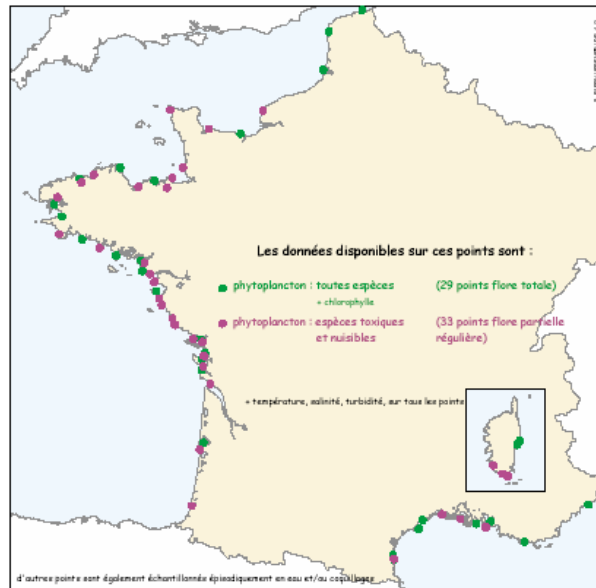


Fig. 7 - Points de prélèvement REPHY échantillonnés régulièrement

La fréquence de prélèvement est d'une fois par quinzaine en période normale (prélèvement d'eau seulement), et d'une fois par semaine en période de risque (prélèvements d'eau et de coquillages).

Le type d'observations effectuées sur les échantillons d'eau est différent suivant les sites. Soit il s'agit d'une observation « flore totale », c'est-à-dire l'identification et le dénombrement systématiques de toutes les espèces phytoplanctoniques présentes dans le milieu. Une « flore totale » fait obligatoirement l'objet d'un échantillonnage régulier, puisqu'elle a pour but l'acquisition de séries de données temporelles sur les espèces phytoplanctoniques. Les sites « flore totale » sont en outre accompagnés de mesure de chlorophylle a. Sinon, l'observation est de type « flore partielle », c'est-à-dire l'identification et le dénombrement des seules espèces toxiques, nuisibles et douteuses, dont la liste est donnée en annexe B.

Afin de mener cette étude, il a été choisi de s'intéresser uniquement aux données provenant du REPHY, par souci d'homogénéité dans les méthodes de prélèvement et de par sa plus grande couverture temporelle et spatiale de données par rapport à d'autres réseaux.

3.1.2 Les autres réseaux de surveillance et d'observation

- Le système MAREL

Le système MAREL (Mesure automatisée en Réseau pour l'Environnement Littoral) a été conçu principalement à l'IFREMER pour répondre au besoin de systèmes de mesure réguliers et de haute fréquence, pour un suivi à moyen et long terme d'écosystèmes aussi complexes que les estuaires. Ces stations de mesure automatisées, mesurant les principaux paramètres de la qualité de l'eau et divers paramètres océanologiques et météorologiques, ont été conçues pour fonctionner 2 mois sans maintenance, en zone estuarienne ou côtière et en eau douce. Les échantillons d'eau sont pompés à différents points de la colonne d'eau et sont analysés dans une cellule de mesure. La qualité des mesures est ensuite garantie par un système d'assurance qualité.

Cependant, même si ces systèmes sont prévus pour avoir une bonne autonomie, ils sont parfois confrontés à des conditions extrêmes, et sont donc particulièrement exigeants du point de vue de leur maintenance. Mais cette dernière n'est possible que lors de bonnes conditions

météorologiques. En conséquence, certains capteurs, dont celui de fluorescence (qui mesure indirectement la concentration en chlorophylle), restent de longs mois sans fournir de données, ou fournissent des données qui ne seront pas validées du fait de la dérive de ces capteurs.

Les valeurs liées à la chlorophylle (on utilise la formule empirique $\text{chl a} = 2,4 * \text{fluorescence}$) sont données toutes les 6 heures (00h, 06h, 12h, 18h) pour les trois bouées de la baie de Seine.

- SRN

Le SRN (Suivi Régional des Nutriments) est un réseau environnemental dont les paramètres sont utilisés comme indicateur de la qualité du milieu en vue de dégager l'évolution de quelques paramètres significatifs. Treize paramètres sont analysés : température, salinité, turbidité, matières en suspension organiques et inorganiques, ammoniacque, nitrites, nitrates, phosphates, silicates, *chlorophylle*, phaeopigments, flore totale.

- SOMLIT

Le Service d'Observation en Milieu LITtoral de l'INSU-CNRS dispose de 2 stations de mesures en Bretagne (Roscoff et Mer d'Iroise) ainsi que d'une station à Wimereux. Un système de mesures hebdomadaires fonctionne sur la base de prélèvements manuels et d'analyses de paramètres physico-chimiques et biologiques.

3.1.3 Intérêts et limites

Les réseaux de mesures *in situ* permettent l'acquisition de séries temporelles renseignant sur l'évolution des populations phytoplanctoniques toxiques et nuisibles sur le littoral français ainsi que sur les risques sanitaires encourus par les populations. Mais ces données ponctuelles, peu fréquentes (2 à 4 fois par mois), et chères, ne permettent pas le suivi précis d'un bloom, d'où l'intérêt d'un instrument ayant une forte couverture spatio-temporelle : le satellite.

3.2 Les données satellites

Quel outil employer pour surveiller avec une précision spatio-temporelle satisfaisante, et à moindre coût, la production primaire en milieu côtier ? La réponse semble aujourd'hui évidente, du fait des développements technologiques des trente dernières années : il faut utiliser le satellite ! Mais cet outil, qui a révolutionné nos conceptions de l'étude de notre planète, n'est pas un outil « magique », et il faut rester critique quant à son utilisation.

3.2.1 Sélection du capteur

Une première question se pose : parmi la pléiade de satellites d'observation de la Terre, lequel sera le plus pertinent dans le cadre de notre étude ? Doit-on le choisir sur le critère de la résolution spectrale ou sur le critère de la résolution spatiale ? Pour répondre à cette première interrogation, il faut tout d'abord réfléchir au point suivant : en quoi un capteur, embarqué à bord d'un satellite en orbite à près de 1000 km d'altitude, peut-il nous renseigner sur la composition de l'eau et sur les organismes microscopiques qui la peuplent ? En étudiant les propriétés optiques de l'eau. Ces propriétés optiques sont majoritairement dues à la présence de chlorophylle et de matières en suspension, organiques et inorganiques. En connaissant les

propriétés optiques de l'eau, grâce aux mesures spectrales du capteur (réflectance à différentes longueurs d'onde), on devrait ainsi pouvoir obtenir des renseignements sur la composition de l'eau (Morel et Prieur, 1977), notamment la concentration en chlorophylle. Pour calculer cette concentration, on utilise classiquement le ratio des réflectances dans le bleu (pour une longueur d'onde de 443 μm , l'absorption est maximale) et dans le vert (pour une longueur d'onde de 550 μm , l'absorption est minimale). La difficulté majeure est alors d'accéder à la valeur de la réflectance de l'eau à ces longueurs d'onde. En effet, le capteur, situé à l'extérieur de l'atmosphère, ne mesure qu'une réflectance « globale », qui tient donc compte des réflectances induites par les molécules de l'atmosphère (que l'on peut déduire de modèles atmosphériques), et les aérosols. Une « correction atmosphérique » est nécessaire. Celle-ci se base sur l'« hypothèse du pixel noir », ou « black pixel assumption » (Siegel et al., 2000) : on considère que la radiance dans le proche infrarouge (PIR) n'est due qu'aux aérosols, ce qui permet de sélectionner un modèle optique propre aux aérosols.

On peut faire ici un premier bilan : le capteur que nous recherchons devra avoir une résolution spectrale spécifique, avec au moins un canal dans le proche infrarouge, et plusieurs canaux dans le visible, notamment dans le bleu et le vert. Notons que plus il y aura de canaux dans le visible, plus il sera aisé de développer des algorithmes efficaces pour le traitement de l'image, surtout dans le cas d'une étude en milieu côtier, comme nous le verrons par la suite. Quels satellites avons-nous à notre disposition ? Les plus performants sont sans aucun doute SeaWiFS (en service depuis 1997), MODIS (lancé en 2002) et MERIS (lancé en 1999). D'un point de vue résolution spectrale et spatiale, MERIS est incontestablement le plus intéressant (13 canaux dans le visible, 3 dans le PIR pour une résolution maximale de 300 m ; SeaWiFS et MODIS ayant respectivement 7 et 8 canaux dans le visible, 1 dans le PIR, et des résolutions spatiales de 1,1 et 1 km). Mais il faut également tenir compte du coût et des modalités d'acquisition et de traitement des images. Ces dernières raisons nous conduiront à utiliser le capteur SeaWiFS, bien que sa résolution spatiale ne soit pas optimale.

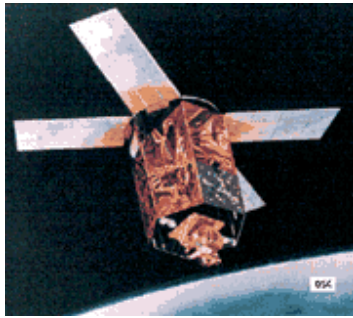
3.2.2 Présentation du capteur SeaWiFS

Le capteur SeaWiFS (Sea-Viewing Wide Field-of-view Sensor), à bord du satellite SeaStar, a été lancé le 1^{er} août 1997, dans le but de fournir des données sur les propriétés bio-optiques de l'eau. Cette mission fait partie d'une entreprise de la NASA (Earth Science Enterprise), dont les objectifs sont la compréhension du système Terre à partir de l'espace.

Le Goddard Space Flight Center (GSFC) développe le traitement et l'archivage des données, qui sont accessibles aux scientifiques sous forme de produits des principaux paramètres biologiques, notamment la chlorophylle *a* à la surface des océans. Les données SeaWiFS sont accessibles après un enregistrement auprès de la NASA. Un logiciel de traitement de ces données (Fu et al., 1998), SeaDas (SeaWiFS Data Analysis System) est également disponible gratuitement. Ce logiciel utilise le langage IDL (Interactive Data Language ©Research Systems). On se servira dans cette étude d'IDL pour l'ensemble du traitement des données.

SeaStar se trouve sur une orbite héliosynchrone à 705 km d'altitude. Le passage de l'équateur se fait à midi+20mn sur son orbite descendante. La résolution spatiale est de 1,1 km pour une largeur de fauchée de 2800 km, 4,5 km si l'on s'intéresse à une couverture globale des océans.

Les bandes spectrales utilisées par SeaWiFS sont présentées dans le tableau 2.1.



Bandes	Longueurs d'onde
1	402-422 nm
2	433-453 nm
3	480-500 nm
4	500-520 nm
5	445-565 nm
6	660-680 nm
7	745-785 nm
8	845-885 nm

Fig. 8 - Satellite SeaStar et ses 8 bandes spectrales utilisées par le capteur SeaWiFS

3.3.3 Principe de la mesure

La couleur de la surface des océans dépend des différentes particules en suspension (phytoplancton et sédiment), ainsi que de certaines substances dissoutes colorées (substances jaunes ou CDOM (Colored Dissolved Organic Matter)). La mesure par SeaWiFS des radiances dans différentes longueurs d'ondes permet d'obtenir une information quantitative sur les concentrations en éléments contenus dans l'eau. En plus des 6 canaux dans le visible, SeaWiFS mesure deux radiances dans le proche infrarouge (765 nm et 865 nm).

Les capteurs type « couleur de l'eau » sont des capteurs passifs. Ils mesurent la lumière solaire renvoyée par les surfaces terrestres dans le domaine du visible et du proche infrarouge. Pour cette raison, la disponibilité des données est fortement dépendante de la couverture nuageuse de la région d'étude.

Par temps clair, le signal mesuré par le capteur satellite correspond à la réflectance de l'irradiance solaire par la couche supérieure océanique, mais aussi à la diffusion atmosphérique qui représente plus de 80% du signal dans les eaux claires. Le signal corrigé de l'effet atmosphérique est représentatif à 90% d'une couche d'épaisseur égale à l'inverse du coefficient d'atténuation diffuse. Selon les espèces dissoutes et en suspension, cette profondeur peut varier de quelques dizaines de centimètres en zone estuarienne, à plus d'une dizaine de mètres dans les eaux claires océaniques.

3.2.3 Algorithme de traitement des images SeaWiFS pour les eaux côtières

L'algorithme développé par la NASA pour traiter les images de SeaWiFS donne de bons résultats de concentration de chlorophylle a dans les eaux claires océaniques, dites de cas 1 dans la classification optique proposée par Morel et Prieur (Morel et Prieur, 1977). Les propriétés optiques de ces eaux sont majoritairement dues à la présence de la chlorophylle et des pigments détritiques associés. La précision des résultats est de l'ordre de 35% dans ces eaux.

Pour les eaux côtières, eaux de cas 2, les choses sont plus compliquées du fait des nombreuses particules d'origine terrestre qui interviennent sur le signal mesuré par le capteur satellite. Le même algorithme appliqué pour les eaux côtières donne des valeurs trop fortes, surtout entre la fin de l'été et le début du printemps, quand les propriétés optiques de l'eau sont dominées par les substances jaunes, matières organiques terrestres en décomposition, et les matières en suspension minérales d'origine terrestre ou côtière. Des valeurs de radiance négative sont également observées après correction atmosphérique pour les courtes longueurs d'onde, surtout quand la teneur en substances jaunes, fortement absorbante dans ces longueurs d'onde, est élevée.

Ces erreurs sont dues à une mauvaise correction atmosphérique dans cette zone. On peut y voir 2 causes. La première est connue sous le nom de pixel « brillant » : des particules blanches d'origine terrestre et des particules associées au plancton augmentent la radiance dans le proche infra-rouge. Or, ce signal n'étant attribué qu'aux aérosols dans l'algorithme, on observe une trop forte correction atmosphérique et des valeurs de radiance erronées sur l'ensemble du spectre. La seconde est due aux caractéristiques particulières de l'atmosphère côtière, fortement influencée par l'atmosphère continentale, et par conséquent différente des modèles atmosphériques inclus dans SeaDAS. De plus, la présence des particules en suspension et des substances jaunes n'est pas prise en compte dans la valeur des radiances associées à la chlorophylle a. Or les spectres d'absorption de l'ensemble des éléments présents dans l'eau recouvrent en partie celui de la chlorophylle a. L'évolution de la teneur en ces particules est en outre indépendante de celle du phytoplancton.

Pour répondre à cette inadaptation de l'algorithme au milieu côtier, un algorithme « régional », conçu pour la zone Manche-Golfe de Gascogne, a été développé empiriquement à l'IFREMER (Gohin et al., 2001). Il modifie l'algorithme OC4 (Ocean Color 4 bands Algorithm) de la NASA en y incluant les bandes 412 et 555. La bande 555 donne des informations sur l'effet des matières en suspension sur les ratios utilisés dans OC4, alors que la bande 412 est utilisée pour estimer la trop forte correction atmosphérique et l'absorption par des substances jaunes. La calibration de l'algorithme, surnommé « OC5 », s'est faite sur des données issues de campagnes et de mesures *in situ*.

De par la nature de l'algorithme, il est très difficile d'estimer l'erreur qu'il induit. Cependant, les résultats sont bien plus cohérents que ceux de l'algorithme OC4, et la suite de notre étude participe à sa validation.

3.2.4 Apport et limites des données satellites de couleur de l'eau pour l'observation des eaux côtières

Les données « couleur de l'eau » peuvent apporter des informations précieuses sur la concentration en chlorophylle en milieu côtier, mais il existe des limites à cet outil.

Tout d'abord, la concentration telle que la perçoit le capteur est « moyennée » sur la hauteur de la colonne d'eau traversée par le rayonnement qui sera ensuite capté par le satellite : c'est la profondeur de pénétration, dépendant de la composition de l'eau, généralement une dizaine de mètres en milieu côtier. Cette donnée « moyenne » est-elle alors représentative de la concentration sur l'intégralité de la colonne d'eau, sachant que la production primaire a lieu entre la surface et la limite de la zone euphotique (Ballestero, 2000) ? Si la stratification verticale est faible, ou si le pic de chlorophylle est proche de la surface, l'estimation est assez bonne. Mais si le pic est situé au-delà de la profondeur de pénétration, le satellite ne peut rien voir...d'où une limitation essentielle.

Par ailleurs, mis à part les Coccolithophoridés, le satellite ne permet pas, pour l'instant, de renseigner catégoriquement sur la composition du phytoplancton : les méthodes spectrales, ou des méthodes « alternatives » (Brown, 1995), n'ont pas été concluantes jusqu'à présent. On ne peut donc pas savoir si un bloom est toxique ou non en se contentant de l'information satellite.

De plus, du fait de la résolution des images, il est évident que le satellite ne décèle pas l'existence de « patches » phytoplanctoniques, mais se limite à l'observation des blooms répartis sur des surfaces de l'ordre du kilomètre carré (Joint, 2000), d'où un effet de lissage.

Enfin, il faut souligner que les données « couleur de l'eau » sont fortement dépendantes des conditions météorologiques, notamment de la couverture nuageuse, puisque les nuages masquent l'océan dans le domaine du visible. Ceci est un obstacle non négligeable à la qualité d'un suivi en continu de la production primaire au sein d'une zone spécifique, c'est pourquoi

il nécessaire de développer une méthode permettant de s'affranchir au mieux de cette dépendance.

3.3 Krigage et cokrigage

Comme il a déjà été constaté, la couverture nuageuse est un obstacle essentiel à la surveillance du milieu côtier par le satellite. Pour remédier à cela, les images satellites sont complétées par interpolation des données, en utilisant des méthodes géostatistiques. De par les propriétés structurales du phénomène étudié, il a été choisi de travailler sur les anomalies et non sur les données satellites elles-mêmes. L'« anomalie » est la variable régionalisée qui se définit comme l'écart par rapport à la moyenne climatologique.

Après avoir identifié la fonction structurale caractérisant l'anomalie, la donnée est estimée par un cokrigage prenant en compte les données satellites et les données *in situ*. Puis, une fois l'anomalie krigée, la concentration en chlorophylle « classique » est obtenue en ajoutant la moyenne climatologique à l'estimation de l'anomalie obtenue par cokrigage.

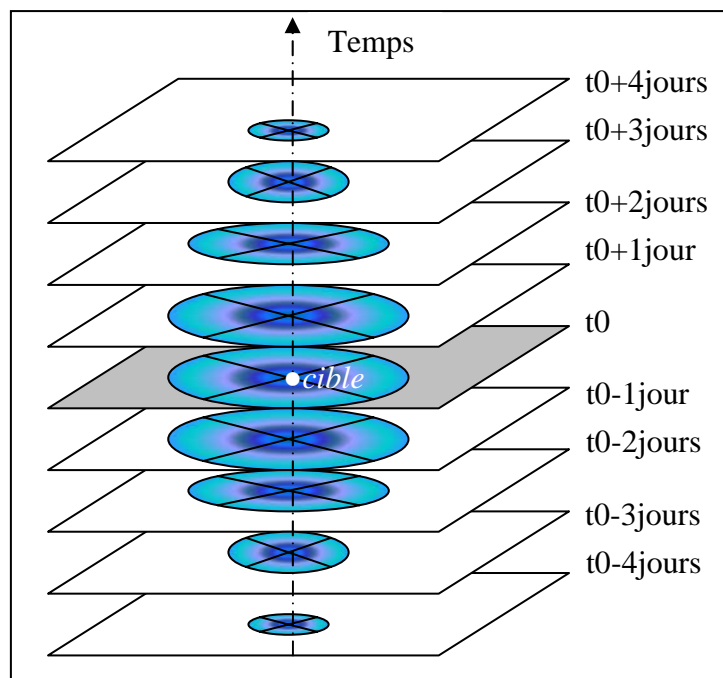


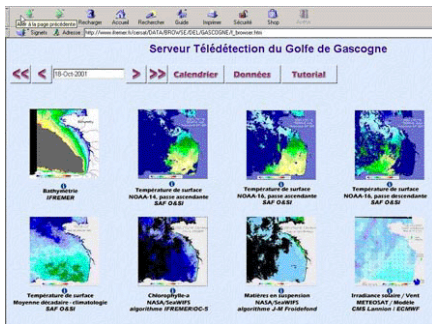
Fig. 9 - Schéma expliquant la recherche du point *in situ* pour le cokrigage programmée sous IDL

Les données *in situ* apportent une information supplémentaire par rapport à la télédétection, particulièrement en ce qui concerne les points à proximité de la côte – zone où la donnée satellite est relativement perturbée. Le cokrigage permettant ainsi de « recalibrer » sensiblement les données satellites au plus près de la côte (Gohin et Laffont, 2005).

Toutefois cette méthode est encore en cours d'élaboration. Il reste de nombreuses zones d'ombres comme par exemple la sélection du voisinage de krigage ou la représentativité de la climatologie. L'étude des propriétés statistiques dans l'évolution des concentrations de chlorophylle permettra de mieux cerner ces problèmes.

3.4 Nausicca : outil évolué pour la surveillance de l'environnement côtier

NAUSICAA est un browser d'images interactif accessible avec n'importe quel navigateur récent équipé de Java. Il présente des mosaïques journalières de données satellites et in situ sur des zones géographiques prédéfinies. Ces données peuvent consister d'images ou de données vectorielles (marqueurs, vecteurs, lignes de contour) et sont visualisables grâce à des fonctions interactives avancées (zoom, extraction des valeurs numériques, ajustement du contraste, superposition de couches). Nausicca vise avant tout la surveillance et la compréhension des échanges bio-géophysiques dans les zones côtières (efflorescences alguales, etc...).



Ce serveur est la deuxième génération de browser d'image satellite Ifremer. Il succède à une première version (ci-contre) qui présentait des images de paramètres multiples précalculées sur des zones prédéfinies tel que le Golfe de Gascogne, Baie de Seine, Manche-Mer du Nord, méditerranée... Bien que ce dernier ait l'avantage d'être rapide, il manquait de convivialité. Il présentait une interface statique sans interactivité ; il ne permettait pas la personnalisation en fonction de l'utilisateur, les valeurs numériques ne pouvaient pas être extraites et il n'offrait

aucune possibilité d'interopérabilité avec d'autres systèmes.

Nausicca reprend les mêmes fonctionnalités, c'est-à-dire une mosaïque d'image journalière mise à jour en temps quasi-réel, des images disponibles en petite/grande taille, une navigation dans le temps... Auxquelles s'ajoute une kyrielle de nouvelles fonctions :

- Thème géographique facilement déclinable
- Extraction des données numériques (image, netcdf, animation gif, bientôt GeoTiff/shapefile)
- Environnement personnalisable par utilisateurs (profil)
 - ✓ Sélection des variables d'intérêt
 - ✓ zone géographique
 - ✓ intervalle de temps
- Applet de visualisation
 - ✓ Affichage des coordonnées et valeurs sous la souris
 - ✓ Superposition de couches d'images
 - ✓ Fonctions de zoom
 - ✓ Ajustement du contraste
 - ✓ Palettes de couleur flexibles (linéaires, logarithmique, couleurs, niveaux,...)
- Interopérabilité
 - ✓ avec d'autres applications graphiques (accessibles par une URL) : par exemple, affichage des profils *in situ* de Coriolis
 - ✓ Export vers SIG
- Information sur les événements notables
- Multilingue

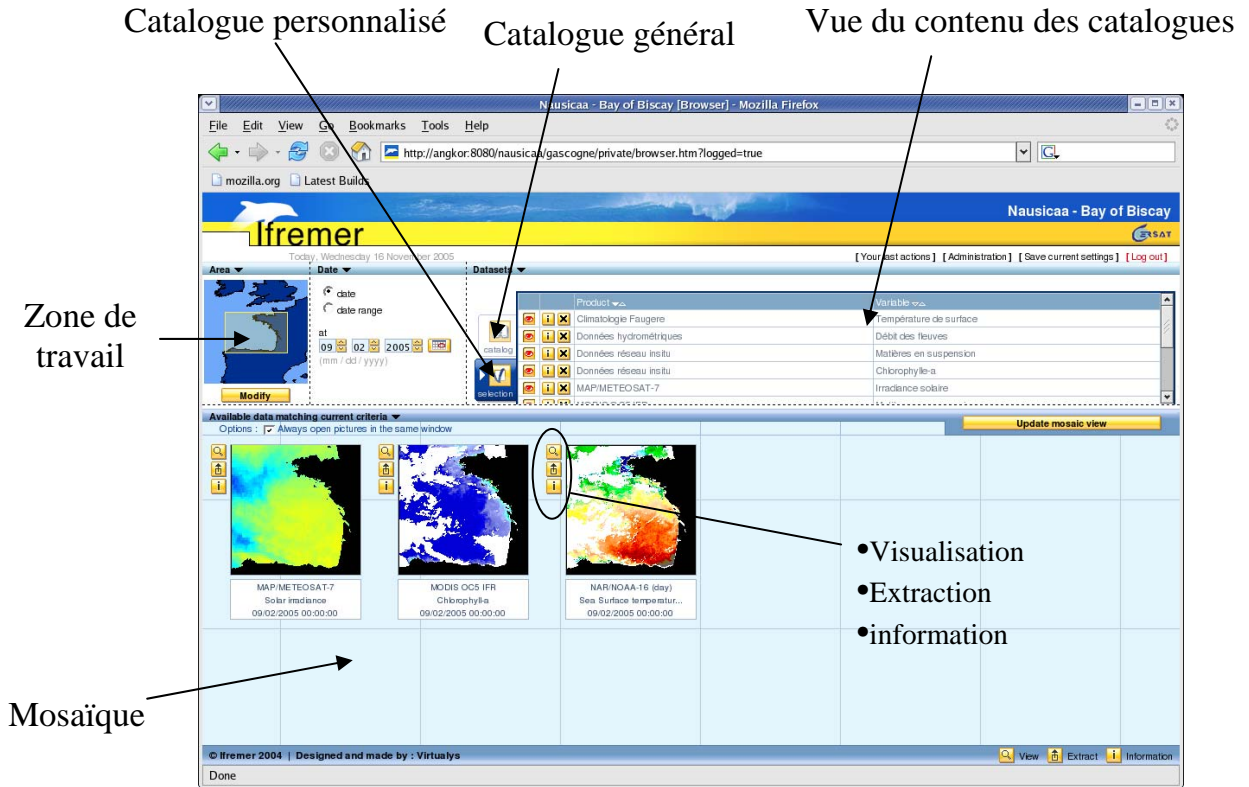
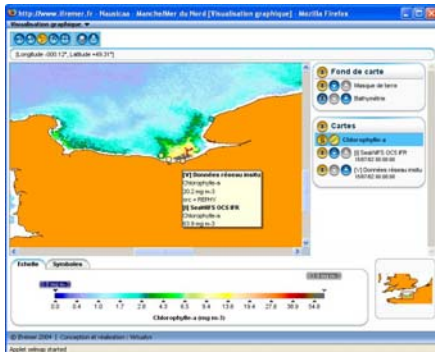


Fig. 10 - Serveur Nausicaa (www.ifremer.fr/Nausicaa/roses/index.htm)



La fenêtre de visualisation fonctionne comme un SIG, plusieurs couches d'image peuvent être affichées, et par un survol de la souris on obtient les valeurs et la position sur toutes les couches disponibles. Ces couches peuvent être des données vectorielles telles que les données *in situ* avec un lien vers d'autres applicatifs lorsque cette donnée le permet (exemple : lien vers le serveur de données *in situ* Coriolis). Des couches 'statiques' sont aussi disponibles, tel que le masque de terre, le carroyage ou la bathymétrie. Différentes options de zoom sont possibles, et il est aussi possible de jouer sur la palette de couleurs pour modifier les contrastes.

Un des avantages majeurs de cette nouvelle version est la personnalisation de l'environnement. Chaque utilisateur a un login et un mot de passe, ce qui permet leur suivi et la restriction d'accès de certains produits, mais surtout cela permet à l'utilisateur de sauvegarder les paramètres visualisés dans la mosaïque, la définition de la zone de visualisation, la date d'affichage, afin d'éviter de le faire à chaque connexion.

Les données peuvent être exportées vers différents formats (HDF, NetCDF, PNG, JPG...), et à partir de toute l'image ou de la vue en cours. Cet export sera bientôt amélioré afin de pouvoir extraire des formats SIG (GeoTIFF, Shapefile), et des images plus élaborées.

Ce serveur est maintenant en ligne, mais il est toujours en cours d'élaboration. De nombreuses autres applications sont à venir, tel que l'optimisation entre mémoire/communications navigateur/serveur afin d'obtenir une meilleure stabilité pour la visualisation des images haute résolution (SAR), une nouvelle interface générale ou encore de nouvelles fonctionnalités

graphiques. C'est donc un outil très puissant qui offre de réelle possibilité de surveillance de la qualité des eaux pour les acteurs de ce domaine, qui l'on très bien accueilli car 1 mois après son lancement plus de 130 utilisateurs s'y étaient inscrits.

3.5 MarCOAST

3.5.1 Le projet

Le programme GMES (Global Monitoring for Environment and Security) a pour but de doter l'Union Européenne des données et des moyens nécessaires à la définition de sa stratégie environnementale sur le court et long terme. Le projet MarCOAST (MARine & COASTal environmental information service), financé par l'Agence Spatiale Européenne, est un des services de GMES. L'Ifremer a naturellement trouvé sa place dans MarCOAST et le serveur Nausicaa est l'outil central de sa participation.

Le projet MarCOAST a pour but d'agrandir l'échelle des services qui ont été consolidés dans le cadre des projets de l'Agence Européenne Spatiale (ESA) ; ROSES et COASTWACHT. Le consortium de MarCOAST est composé de 32 partenaires regroupant 10 pays européens, et rassemble tous les acteurs principaux dans le domaine des applications marines et côtières. Ce projet permettra de délivrer un unique portfolio de services marin et côtier à l'échelle européenne.

Ce portfolio est composé de 6 services qui sont :

- La surveillance des déversements d'hydrocarbure et personnalisation de l'information
- La prévision de la dérive de ces déversements
- La surveillance et la mise en alerte de la qualité des eaux
- La surveillance, l'évolution et la prévision des HAB
- Evaluation de la qualité des eaux
- Données Met-Ocean

Toutes ces activités ont pour objectif de mettre en place un réseau qui aura l'assurance de ces services. Cet objectif de viabilité dirige toutes les autres activités transversales qui supporteront la délivrance de ces services (promotion, fédération des utilisateurs, portail internet, etc).

L'une des spécificités ce projet, à l'instar de chaque projet GMES, est le fort engagement des utilisateurs ; cet engagement est formalisé à travers un Service Level Agreement (SLA), signé entre chaque fournisseur de service et l'utilisateur. Signer le SLA est une obligation légale pour débiter n'importe quelle activité de service. L'étude réalisée ici, fait l'objet d'un Service Level Agreement signé, notamment avec l'Agences de l'Eau de Loire-Bretagne

MarCoast utilise tous les capteurs dédiés aux applications marines, comme les systèmes SAR (ASAR et RSAT-1) pour les déversements d'hydrocarbure, les capteurs de la couleur de l'océan (SeaWiFS, MERIS et MODIS) pour les applications sur la qualité de l'eau, des altimètres, des radiomètres et des diffusomètres fournissent les données Met-Ocean. Dans le futur, les services MarCoast reposeront principalement sur 2 missions des programmes GMES ; sentinel 1 (imagerie radar) et *sentinel 3* (couleur de l'océan).

3.5.2 Compte-rendu des réunions avec nos utilisateurs

Deux réunions avec nos utilisateurs ont eu lieu au cours de mon projet. La première a permis de définir les attentes de ces derniers. Tout d'abord la problématique principale est le trop grand nombre de masses d'eau DCE en jeu, ce qui rend le réseau de surveillance difficile. Il faut donc trouver une solution pour localiser des points de prélèvement plus effectifs, afin d'optimiser cette surveillance. Pour cela il est indispensable qu'une analyse fine et locale soit effectuée sur des points en particulier. A ce stade la constitution d'un Système d'Information Géographique devenait secondaire. A la suite de cela, Il a été déterminé des stations remarquables pour l'analyse. Ces stations sont celles utilisées dans la suite de ce mémoire.

Ensuite une demande importante était la production d'image satellite climatologique non pas en moyenne, mais en percentile 90%. Ceci permettra la comparaison directe les seuils fixés par la DCE et qui utilise cet indicateur. Il a aussi été demandé de produire les images au format Geotiff, qui un format plus convivial que le format NetCDF utilisé à l'IFREMER.

La deuxième réunion était une présentation des premiers résultats du projet sur la représentativité des points *in situ* par rapport au données satellite, et une démonstration du nouveau serveur d'images Nausicca. L'annexe C donne le compte-rendu de cette réunion.

Ces deux entretus ont été énormément profitables, car cela permet une confrontation d'idée qui est bénéfique à l'avancement du projet. Par exemple la production d'image en percentile 90% n'aurait pas vu le jour sans cette confrontation.

Conclusion du chapitre 3

Le suivi de la qualité des eaux côtières représente un défi pour l'océanographie opérationnelle : comment proposer un produit fiable, performant, en temps (presque) réel à des utilisateurs toujours plus exigeants (les Agences de l'Eau doivent appliquer la Directive Cadre Eau en vigueur depuis 2000, les conchyliculteurs sont de plus en plus sensibles aux périodes d'interdiction à la vente...) ? C'est le but que c'est fixé l'IFREMER à travers son nouvel outil en ligne pour le suivi de l'environnement côtier : le serveur Nausicca. Toutefois ce serveur est limité (pour le moment) à la consultation et l'extraction de données brutes.

La combinaison des mesures *in situ* et des informations sur la couleur de l'eau obtenues par télédétection permettrait un gain de précision. En effet, à partir d'images satellites, il est possible de réaliser, en un délai relativement court, des cartes d'anomalies sûres, dont la couverture nuageuse aura été filtrée au mieux par krigeage, et qui permettront de détecter rapidement des blooms potentiels et de les cartographier.

L'intérêt de ce nouvel outil de surveillance de la qualité de l'eau est certain, il reste maintenant à convaincre les gestionnaires du milieu côtier de l'intégrer à leur système de gestion du littoral. Mais, grâce la mise en place d'une gestion intégrée des zones côtières au niveau européen, qui fait largement appel à l'océanographie opérationnelle, les produits issus de la télédétection sont généralement bien perçus.

Mais une première étape de compréhension de la dynamique spatio-temporelle de la production primaire, tant au niveau *in situ* que satellite, est nécessaire afin de valider cette méthode de suivi opérationnel de la qualité des eaux côtières, et expressément demandée par ces gestionnaires.

Chapitre 4. Méthodes, traitements des données et résultats

4.1 Définition de la zone étudiée

Notre étude se focalisera sur la Manche et le golfe de Gascogne. Les zones proposées par d'autres projets travaillant sur la même région (projet ROSES, projet CLARA...) ont été réutilisées.

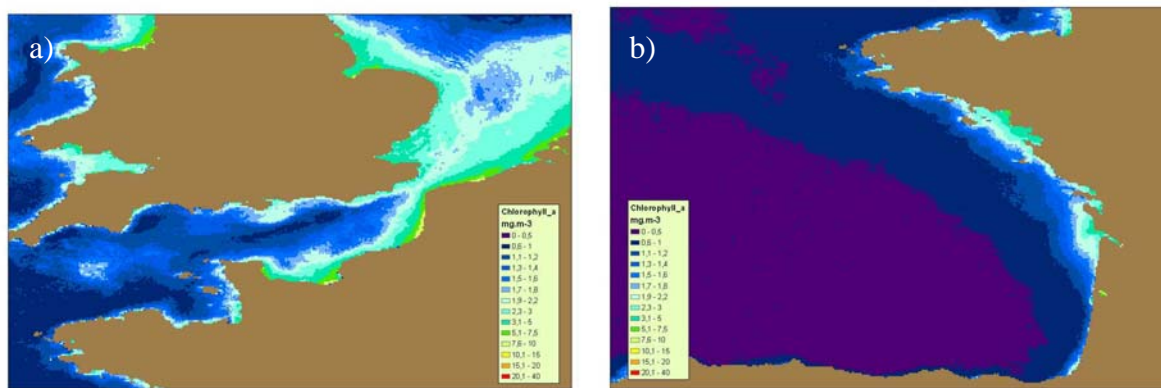


Fig. 11 - Zones d'études a) Manche b) golfe de Gascogne, fond de carte : moyenne en chl-a des climatologie hebdomadaire pendant la période productive, système de projection géographique WGS84

La Manche est une mer épicontinentale à marée semi-diurne située entre la Mer Celtique (du côté de l'Océan Atlantique) et la Mer du Nord, où les marées sont parmi les plus importantes du monde. On y trouve ainsi les seconds plus forts marnages de la planète, dans la baie du Mont Saint Michel par exemple (15 mètres).

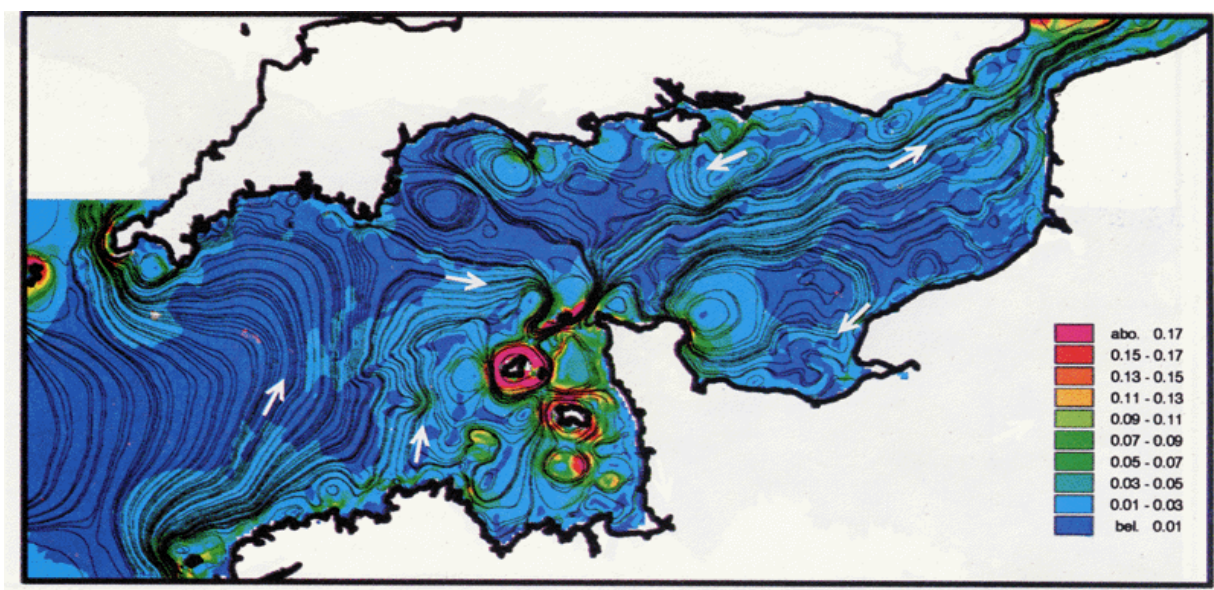


Fig. 12 - Salinité et courant marin dans la manche (source www.ifremer.fr)

La Manche est parcourue par des courants marins complexes, ayant deux origines bien distinctes : les courants de marée dits « gravitationnels » (leur origine est la force génératrice des marées) ; et les courants dits « radiationnels » (leur origine plus ou moins lointaine est le rayonnement solaire, responsable de phénomènes tels que le régime des vents, le cycle des saisons, les perturbations météorologiques, ou les variations spatiales de densité des océans pouvant générer des mouvements au sein des masses d'eau).

Le Golfe de Gascogne est une baie océanique largement ouverte sur l'Océan Atlantique. Il est bordé au Nord et à l'Est par la France et au Sud par l'Espagne. Le plateau continental s'étend de la côte jusqu'à environ 200m de profondeur. Sa largeur est maximale au large de la Bretagne (de l'ordre de 200 km). Elle s'amenuise vers le sud jusqu'à environ 30 km au large du pays Basque et des côtes espagnoles. La pente continentale, appelée aussi talus continental, représente la transition entre le plateau continental et la plaine abyssale, sa largeur n'excède pas quelques dizaines de kilomètres. Le centre du golfe est une zone dont les profondeurs atteignent 4000m. De nombreux fleuves et rivières se jettent le long des côtes françaises. Les plus importants sont la Loire, la Gironde et l'Adour. Les eaux douces qu'ils déversent forment des panaches d'eaux à salinité plus faible que l'eau de mer qui transportent les éléments dissous et particuliers issus des eaux fluviales. L'extension géographique et le comportement de ces panaches sur le plateau continental joue un rôle extrêmement important à la fois d'enrichissement du milieu mais aussi de contamination par différents polluants venant des bassins versants.

4.2 Automatisation du suivi opérationnel de la production primaire

Une chaîne de traitement a été réalisée afin de formater les données satellites et *in situ* en vue de leur exploitation opérationnelle. Ces travaux ont été réalisés sous IDL.

4.2.1 Données satellites

- **Démarche**

A partir de la série d'images SeaWiFS dont nous disposons (7 ans de données), nous aimerions calculer une série annuelle « de référence », exempte de toute perturbation nuageuse, qui serait représentative de la concentration en chlorophylle « normale » dans la zone étudiée au cours d'une année. Le but premier est de comparer les images brutes aux images « de référence » pour repérer facilement des phénomènes extrêmes comme des blooms, ou pour mettre en évidence des tendances à l'échelle de l'année. Pour plus de facilité, nous avons choisi d'appeler notre série de référence : « moyenne climatologique ». En d'autres termes, il s'agira d'une « carte de fond » de la concentration en chlorophylle sur laquelle viendront se superposer les blooms ou par rapport à laquelle on pourra identifier des décalages dans la production primaire.

- **Définition du terme de moyenne climatologique**

La moyenne climatologique fait ici référence au terme utilisé en météorologie pour désigner la valeur moyenne d'une variable climatique comme la température ou l'ensoleillement. En général, cette moyenne est calculée sur une période de trente ans. On voudrait faire de même pour la concentration en chlorophylle.

Première constatation : on ne dispose que de 7 ans de données. De plus, la concentration en chlorophylle est une variable beaucoup plus fluctuante que la température ou l'ensoleillement, avec des variations spatio-temporelles caractérisées par des échelles complètement différentes.

Le terme de moyenne climatologique employé ici est donc à prendre au sens large : les données auxquelles nous avons accès, et le phénomène étudié lui-même, ne permettent pas de calculer avec rigueur une moyenne climatologique au sens strict. On cherchera plutôt à mettre en évidence des tendances générales de la production primaire dans l'optique d'une surveillance opérationnelle de la zone.

- **Méthode et Traitements**

L'Ifremer possède une base de données d'images satellites de la couleur de l'océan qui rassemble 7 ans d'images SeaWiFS (1998 à 2004). Ces images ont été traitées avec l'algorithme OC5 afin d'obtenir les concentrations en chlorophylle et en matières en suspension minérales sur la Manche et le Golfe de Gascogne. Le but est de fournir une référence annuelle de ces concentrations en moyennant ces données sur 1 semaine et couvrant les 7 ans ; les semaines "i" de chaque année sont moyennées ensemble à plus ou moins deux jours (afin de conserver une continuité homogène entre chaque semaine). L'unité temporel de la semaine a été choisi conformément la fréquence d'échantillonnage demandée par la Directive Cadre Eau. On obtient ainsi 52 images représentant la moyenne climatologique par semaine des concentrations de chlorophylle *a* et de matières en suspension inorganique, tel que :

$$p_{clim}(s) = \frac{1}{n} \sum_{i=1998}^{2004} \sum_{j=1}^7 p_{ij}(s)$$

Où $p_{clim}(s)$ est la valeur du pixel climatologique de la $s^{ème}$ semaine, $p_{ij}(s)$ est la valeur du pixel du $j^{ème}$ jour de la $s^{ème}$ semaine dans la $i^{ème}$ année, et n est le nombre d'observation.

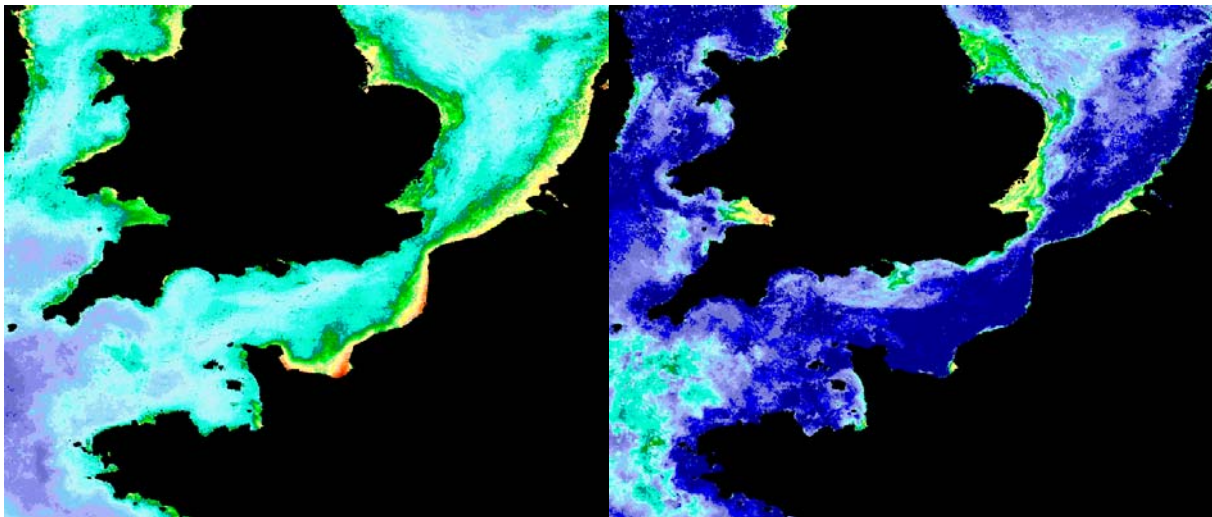


Fig. 13 - Moyennes climatologiques de concentration de chlorophylle (à droite) et matières en suspension minérales (à gauche) de la semaine 25

Toutes ces images ont été traitées afin d'obtenir 3 types de format en sortie : le NetCDF, format de base pour les traitement des données et la programmation sous IDL ; le PNG (ci-dessus), pour la visualisation directe des images avec la table de couleur Ifremer ; et le GeoTIFF, pour l'utilisation intégrée dans un SIG. De plus les programmes ont été réalisé de tel manière qu'ils soient utilisables pour le traitement de chaque paramètre (concentration en

chlorophylle *a* et matières en suspension minérale) et pour n'importe quelle zone d'étude (Manche, Golfe de Gascogne, et par extension mais non traité, les côtes méditerranéennes). Ces images de référence serviront ensuite à calculer une carte d'anomalie pour une journée donnée et ainsi repérer plus finement les blooms. Ceci s'inscrit directement dans les objectifs du projet MarCOAST pour la surveillance de la qualité des eaux côtières. Ensuite on utilise la méthode de cokrigage comme expliquée plus haut afin d'obtenir cette surveillance tout au long de l'année en s'affranchissant des problèmes de couverture nuageuse.

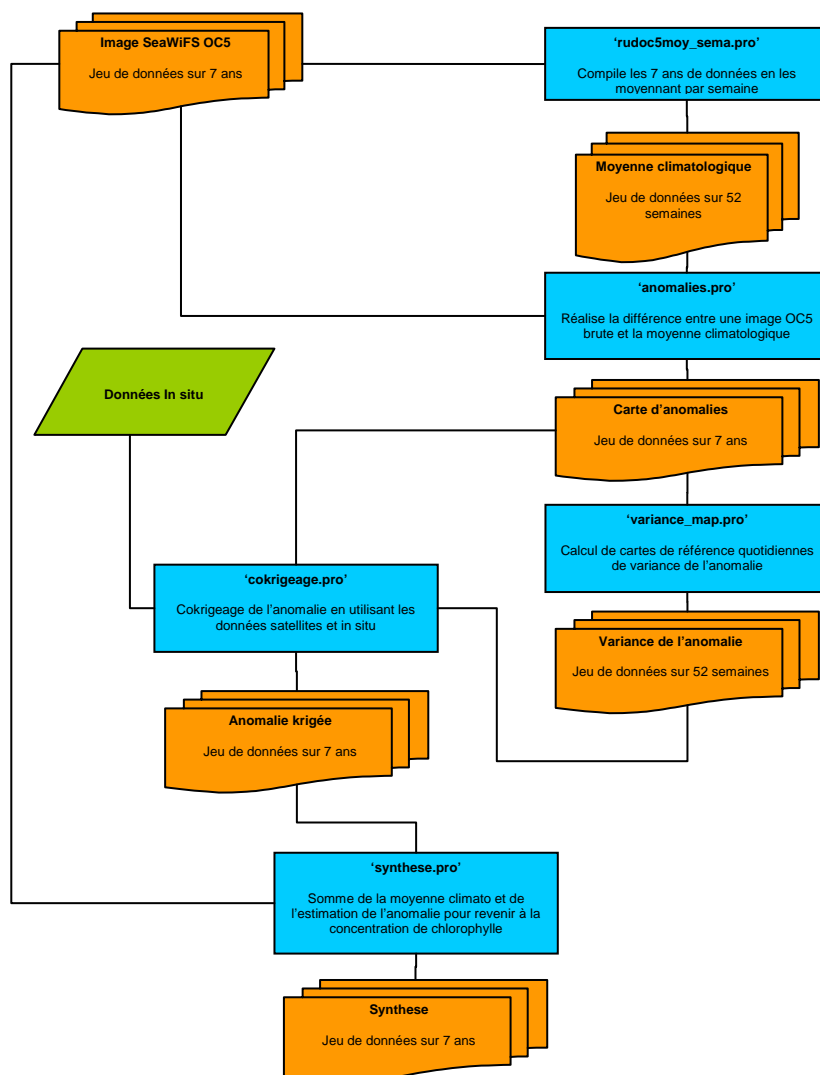


Fig. 14 - Diagramme de production des synthèses satellites

4.2.2 Discussion

Les synthèses obtenues sont globalement satisfaisantes. On constate cependant quelques écarts entre la synthèse et l'image initiale, ainsi que quelques estimations sujettes à discussion. Ces écarts et artefacts s'expliquent d'une part par l'intégration des données *in situ* dans le krigage, et d'autre part par le fait que les nombreuses opérations réalisées sur la donnée (1. soustraction de la moyenne climatologique, 2. cokrigage sur une maille de quatre pixels de côté pour diminuer le temps de calcul, 3. interpolation sur la maille d'origine pour retrouver la résolution originale, 4. ajout de la moyenne climatologique) ont ajouté un bruit.

Il a été choisi d'utiliser l'anomalie pour le cokrigeage, et non la donnée elle-même, pour la raison suivante ; bien que la création de synthèses représente un intérêt certain, c'est la création de cartes d'anomalies solides qui sera la plus utile pour un suivi opérationnel de la production primaire, car c'est sur ces anomalies que se baseront les utilisateurs du produit (Agences de l'eau par exemple) pour détecter les blooms et les décalages d'une année à l'autre. Il est évident que, pour l'instant, cette méthode est fragilisée par la méthode de calcul de la moyenne climatologique ; mais cette moyenne sera améliorée au fil des ans, consolidant ainsi la procédure mise en place au cours de cette étude.

Toutefois, avant d'appliquer cette chaîne de traitement sur l'ensemble des images, il est nécessaire de s'intéresser à l'évolution statistique des points *in situ* par rapport aux données satellites, notamment pour la sélection du voisinage de cokrigeage qui fera l'objet d'une étude ultérieure, mais surtout afin de répondre aux interrogations de nos utilisateurs MarCOAST sur la représentativité des données.

4.3 Etude de la représentativité

Afin de mieux appréhender les mesures satellites et *in situ* du domaine côtier une étude de représentativité a été menée à la fois spatiale et temporelle. L'étude temporelle s'est axée sur la comparaison entre certaines stations *in situ* du réseau REPHY et les images SeaWiFS « OC5 », rassemblant 7 ans de données. L'étude spatiale s'est focalisée sur les zones DCE, et sur leur stabilité en concentration de chlorophylle *a* pendant la saison productive.

4.3.1 Traitements avant comparaison

Les données brutes satellites et *in situ* ont été traités avec des routines IDL afin d'obtenir des valeurs climatologiques représentant 7 ans de données. Ainsi on a calculé les moyennes et percentile 90%, des 2 jeux de données, par semaine, et de 1998 à 2004.

- **Indicateur de biomasse : percentile 90%**

Pour chaque masse d'eau, l'indicateur de biomasse est calculé globalement sur 7 ans. Cet indicateur correspond au percentile 90% des données de chlorophylle *a* acquises pendant les période productives des 7 années. Le calcul du percentile est le suivant :

P_{90} : valeur de l'indicateur

$x_1, x_2 \dots x_n$: valeurs ordonnées de la variable

n : nombre de valeurs pour la variable

$p : 0.9$

$n.p = j + g$ avec j partie entière et g partie fractionnaire de $n.p$

$$P_{90} = (1 - g) \cdot x_j + g \cdot x_{j+1}$$

Le résultat de l'indicateur a été comparé à différents seuils afin de classer chaque masse d'eau selon son état écologique. Le tableau suivant regroupe ces différents seuils :

Etat écologique	Très bon état	Bon état	Etat moyen	Etat médiocre	Etat mauvais
Seuils percentile 90% des données de chlorophylle <i>a</i> (mg.m ⁻³)	0 – 5	5 – 10	10 – 20	20 – 40	> 40

Tab. 2 - Etat écologique d'une masse d'eau suivant les seuils de l'indicateur percentile 90%

Cet indicateur a été explicitement demandé par les utilisateurs dans le cadre du projet MarCOAST, car il permet une meilleure détection des pics de concentration tandis que la moyenne a tendance à les lisser, comme l'exemple de la semaine 25 ci-dessous :

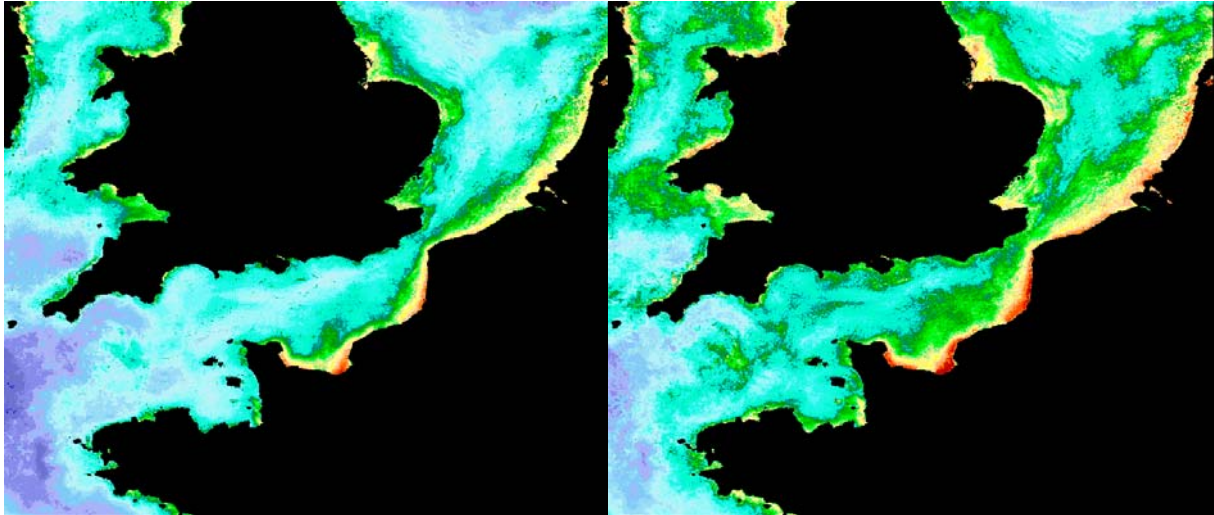


Fig. 15 - Climatologies de concentration de chlorophylle pour la semaine 25 en moyenne (à droite) et en percentile 90% (à gauche)

- **Pixel d'extraction des données satellites**

Afin de comparer les données *in situ* et satellites, plusieurs stations du REPHY ont été sélectionnées, en accord avec les utilisateurs, et de telle sorte qu'elles soient représentatives d'un type de masse d'eau. Toutefois la position de ces stations est dans la plupart des cas trop proche des côtes et, du fait de la résolution du capteur SeaWiFS de 1,1 km, leur position n'est pas atteinte par le satellite et se situe dans le masque. Il a donc fallu étudier le voisinage de ces points pour définir le pixel d'extraction.

Ainsi par l'intermédiaire d'une matrice de 11 par 11 éléments, centrée sur la position de la station, on a recherché la meilleure position de pixel dans son voisinage. Pour cela on a calculé le rang de chaque élément de la matrice suivant le critère de la variance hebdomadaire *in situ*/satellite pour chaque pixel. La position du pixel de meilleur rang a été retenue pour l'extraction des valeurs satellites. Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Stations	Déviatiion X en colonnes	Déviatiion Y en lignes
Cabourg	-2	4
Ouest Loscolo	0	-1
Cancale	4	3
Brehat	3	-1
Men Du	2	-3
Men ar Roue	3	0

Tab. 3 - Déplacement autour de la position in situ pour obtenir le pixel satellite représentatif, colonnes et lignes sont en pixel (0.015° en longitude et 0.01° en latitude)

4.3.2 Localisation des stations étudiées

A la suite du calcul de la climatologie des données in situ, on a sélectionné les stations rassemblant le plus d'information et caractérisant le plus de types d'eau possibles.

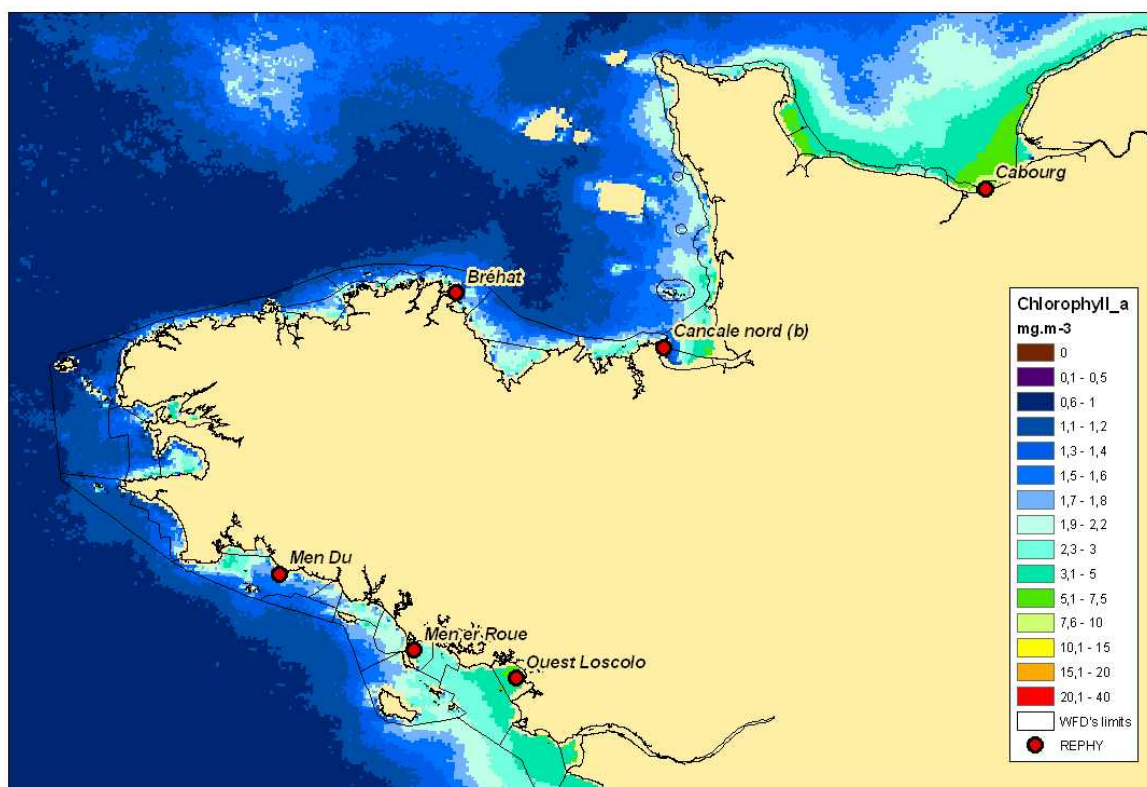


Fig. 16 - Localisation des points sélectionnés pour l'étude et des limites de masse d'eau DCE, le fond de carte représente la moyenne annuelle climatologique de concentration de chlorophylle

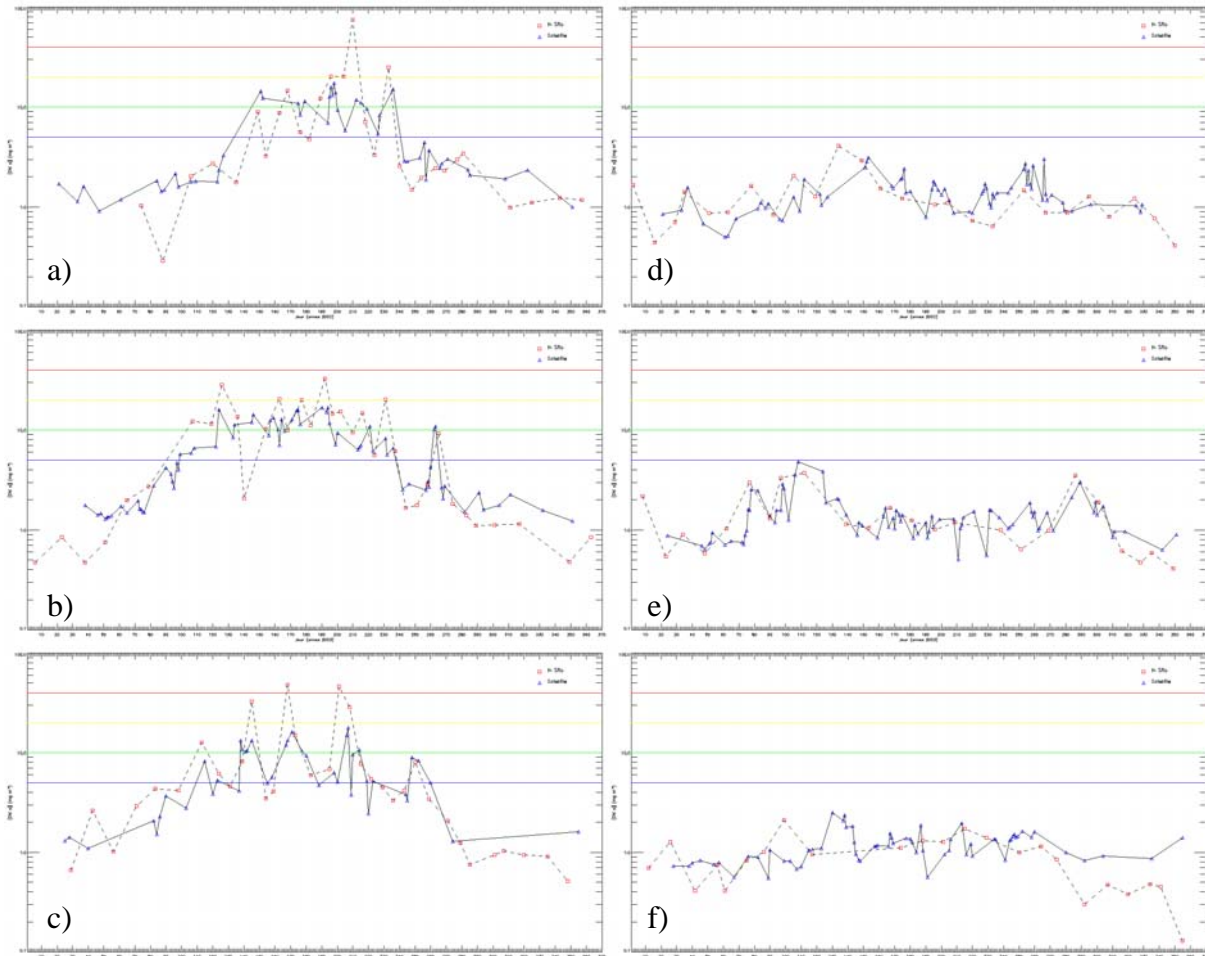
La Station de Cabourg se situe dans une zone de forte production du phytoplancton de la baie de Seine, juste à l'embouchure de la rivière de la Dives. La station de Ouest Loscolo se situe aussi dans une zone de production dans la baie de Vilaine. La station de Cancale se situe à l'ouest de la baie du Mont Saint-Michel où sont localisés les concentrations de chlorophylle les plus faibles. La station de Brehat se situe à l'intérieur du chenal entre l'île du même nom et la pointe de l'Arcoest, Men Du se trouve au sud de Concarneau et Men er Roue entre Quiberon et Carnac. Ces dernières stations sont placées dans des masses d'eau de type mélangé, où la concentration de chlorophylle reste relativement basse tout au long de l'année.

4.3.3 Etude temporelle

Deux études temporelles ont été menées, l'une journalière sur les 7 années de données brutes et l'autre hebdomadaire sur les climatologies calculées.

- **Etude journalière chronologique**

Pour chaque station sélectionnée, les graphes annuels de l'évolution de concentration en chlorophylle *a* ont été tracés, ainsi que les histogrammes *in situ* et satellite du nombre d'occurrence par seuil de concentration de chlorophylle.

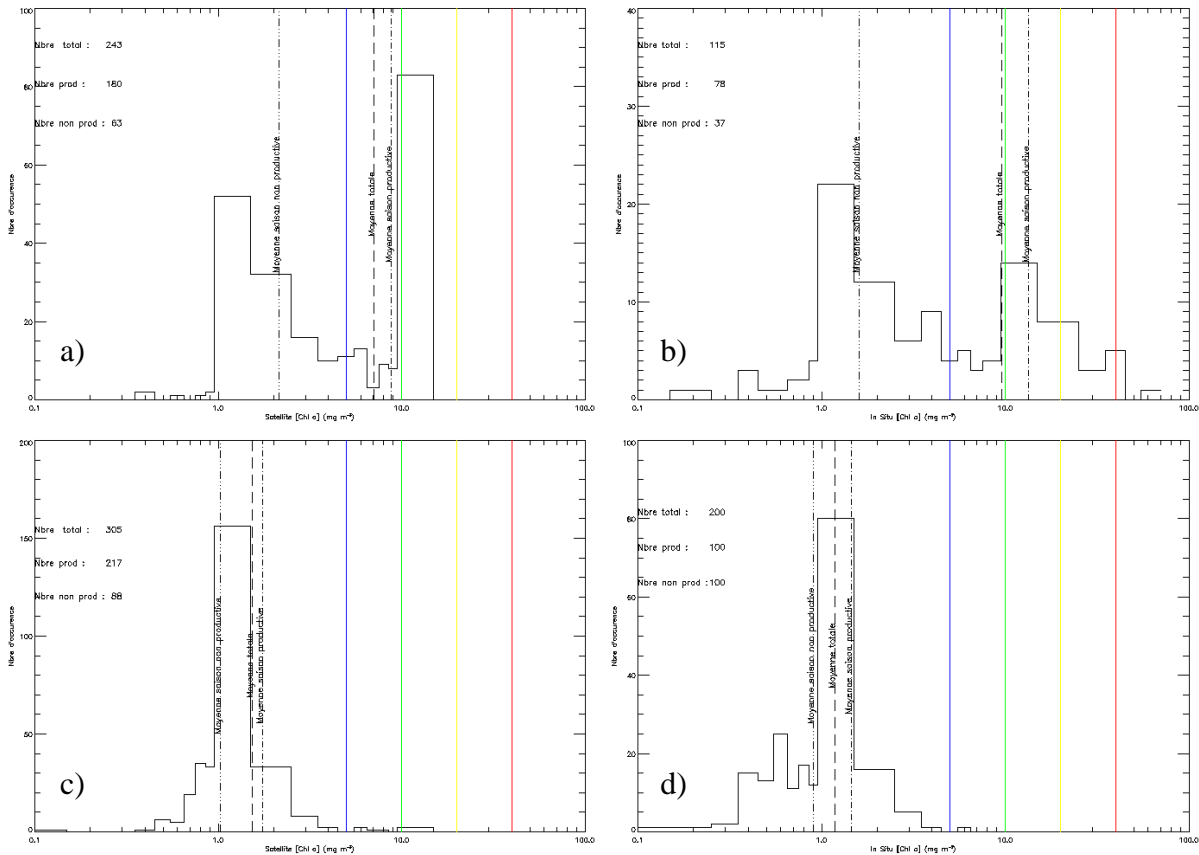


Graph. 1 - Evolution annuelle de la concentration de chlorophylle *in situ* et satellite, pour la station Cabourg (a : 2001, b : 2002, c : 2003) et pour la station Cancale (d : 2001, e : 2002, f : 2003)

Sur les exemples ci-dessus, les niveaux de couleurs représentent les seuils de concentration fixée par la DCE, soit 5, 10, 20 et 40 mg.m⁻³. Les concentrations de chlorophylle ont été tracées sur un axe logarithmique afin de s'affranchir de l'effet de dispersion des valeurs.

Les cycles annuels de concentration de chlorophylle ci-dessus semblent montrer une séparation en deux classes. D'un côté les stations sous influence directe d'une rivière auront une courbe en forme de cloche, qui est due à une production soutenue pendant la période productive par un apport constant de nutriments. Les stations de Cabourg et Ouest Loscolo (annexe E) font parties de cette classe. Les autres stations montrent un pic de concentration printanier suivi par une décroissance tout au long des mois d'été et d'automne.

Ces évolutions de masses d'eau sont confirmées par l'étude des histogrammes qui regroupent les données toutes années confondues.



Graph. 2 - histogrammes des concentrations satellites (a et c) et in situ (b et d) à Cabourg (a et b) et Cancale (c et d)

Les seuils DCE de concentrations de chlorophylle ont aussi été reportés sur ces histogrammes et les valeurs ont été regroupées sur une échelle logarithmique pour s'affranchir de la dispersion. Les lignes en pointillées représentent les moyennes totales, en période productive et hors période productive. Le nombre d'observation a aussi été reporté.

Deux commentaires peuvent être fait à partir de ces histogrammes. Tout d'abord la distribution des concentrations de chlorophylle à Cabourg, autant au niveau *in situ* que satellite, montre deux pics correspondant à deux périodes distinctes ; période productive et non productive. Cette distribution n'apparaît pas à Cancale, où la variation des concentrations est plus stable. La deuxième observation est liée à la distribution des valeurs. On obtient des histogrammes plus fins à partir des données satellites. Cela peut être attribué à la *Look-Up Table* utilisée pour estimer la concentration de chlorophylle à partir des luminances, mais il faut aussi prendre en compte la différence de volume d'échantillonnage. Cet effet peut être la conséquence de différents lissages résultant de la comparaison entre le petit volume *in situ* échantillonné (1 litre) et celui considérable détecté par le satellite (environ $6 \cdot 10^9$ litres, si l'on considère un pixel de $1,1 \text{ km}^2$ et une profondeur de 5 m). Ce phénomène est bien connu en géostatistique et appelé « effet de support » (Lajaunie et Wackernagel, 2000). Toutefois à Cabourg la différence est beaucoup plus grande ; à cet endroit, on retrouve des patches locaux de concentration de chlorophylle, appelé « microstructures », liés au rejet de la Dives et qui enrichissent le milieu en nutriments.

A la suite de ce travail, on a choisi de s'intéresser, au niveau des calculs, qu'à la période productive. Cette période a été sélectionnée entre mi-mars (semaine 9) et mi-septembre (semaine 38).

- **Etude de la climatologie hebdomadaire**

Les images ci-dessous représentent les moyennes et les écarts types de concentration de chlorophylle climatologique hebdomadaire. Chaque pixel représente la statistique obtenue sur la série temporelle des climatologies pendant la période productive. Les stations de mesure *in situ* sélectionnées pour l'étude y sont représentées, ainsi que leur moyenne sur la même période.

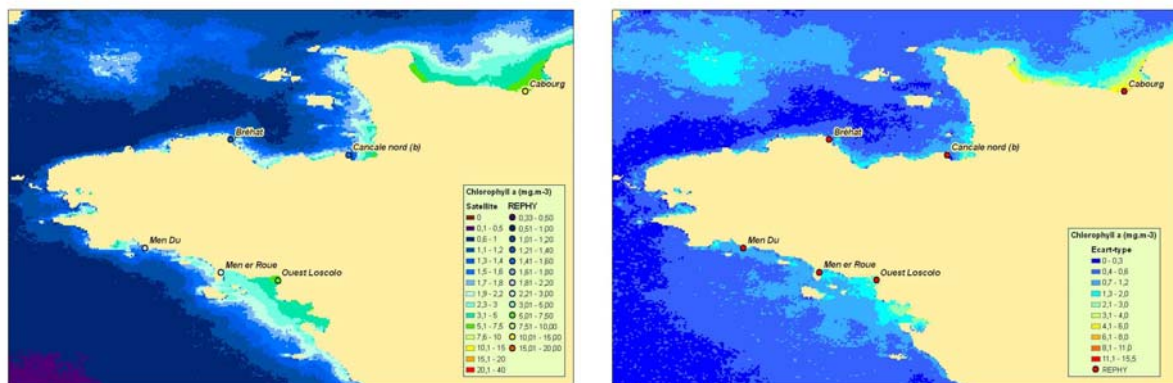
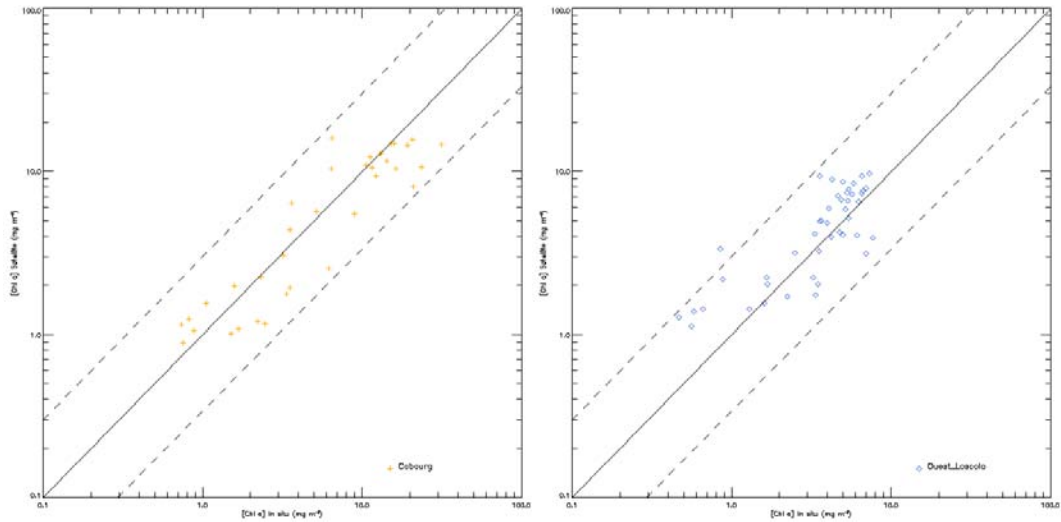


Fig. 17 - Moyenne (à droite) et écart-type (à gauche) des climatologies hebdomadaire sur la période productive

On constate que les moyennes et écart-types temporels sont fortement corrélés. Plus on se rapproche des côtes, plus la concentration de chlorophylle augmente, ainsi que sa variabilité. On remarque aussi la différenciation entre les deux types de masses d'eau vus plus haut; d'une part des zones eutrophiques avec de fortes concentrations de chlorophylle et une forte variabilité temporelle situées au niveau des golfes, baies ou estuaires, comme à Cabourg ou Ouest-Loscolo, et d'autre part des concentrations et variations temporelles faibles, tel qu'à Cancale, Bréhat, Men Du et Men er Roue.

a) *Stations situées dans les eaux eutrophiques*

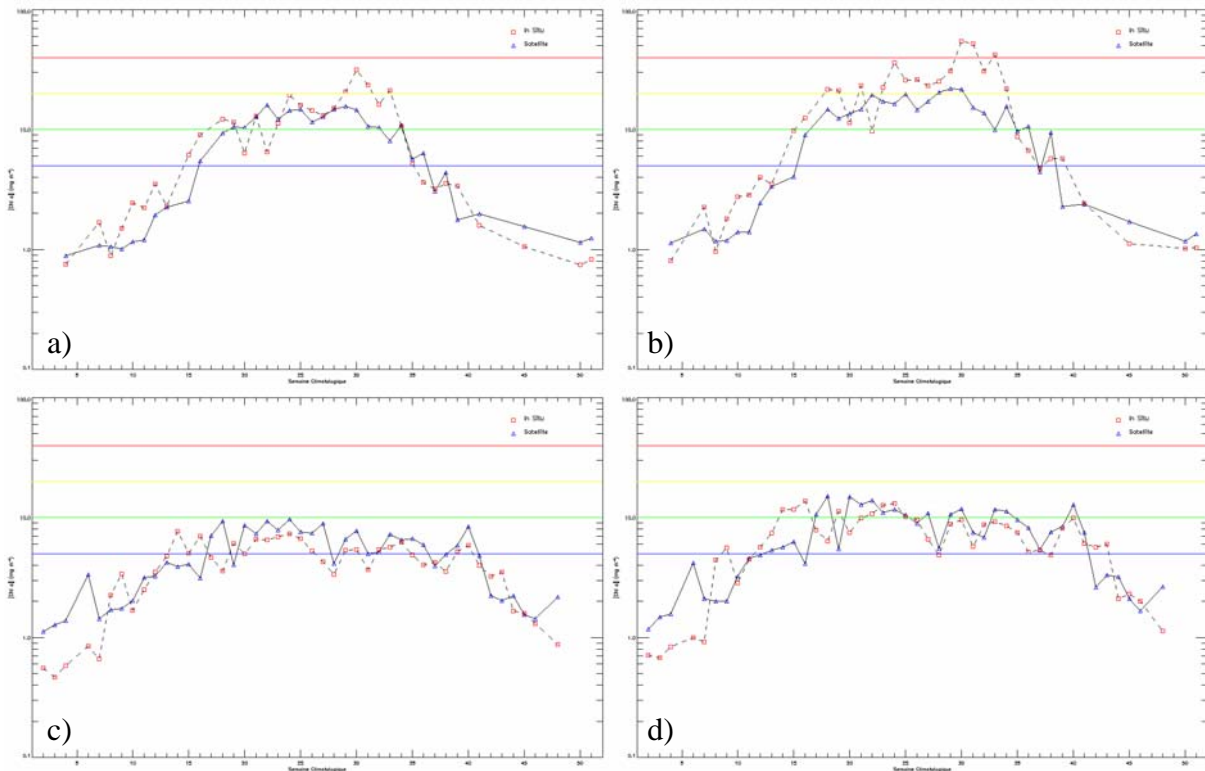
Les graphiques de régression entre les données *in situ* et satellites hebdomadaires ont été tracés. Les échelles de concentrations de chlorophylle *a* sont logarithmiques afin d'atténuer l'effet de dispersion des valeurs, et les droites en pointillées indiquent plus et moins 50% d'écart relatif.



Graph. 3 - Graphiques de régression, gauche: Cabourg, droite: Ouest-Looscolo

On remarque qu'il n'y a pas de biais entre les données, et l'écart relatif moyen est d'environ 30%. Les coefficients de corrélation sont respectivement de 0,8 et 0,7. Ces résultats sont très satisfaisant compte tenu du grand nombre de sources d'erreurs tant au niveau satellite que in situ. De plus le calcul de la climatologie sur 7 ans améliore considérablement la précision, qui, avec les données brutes, serait plutôt de l'ordre de 60%.

On va s'intéresser maintenant aux évolutions hebdomadaires de ces deux jeux de données. L'axe des abscisses représente les semaines climatologiques de 1 à 52, et sur l'axe logarithmique des ordonnées, sont reportées les concentrations de chlorophylle. Les droites en couleur représentent les seuils DCE à 5, 10, 20, et 40 mg.m⁻³.

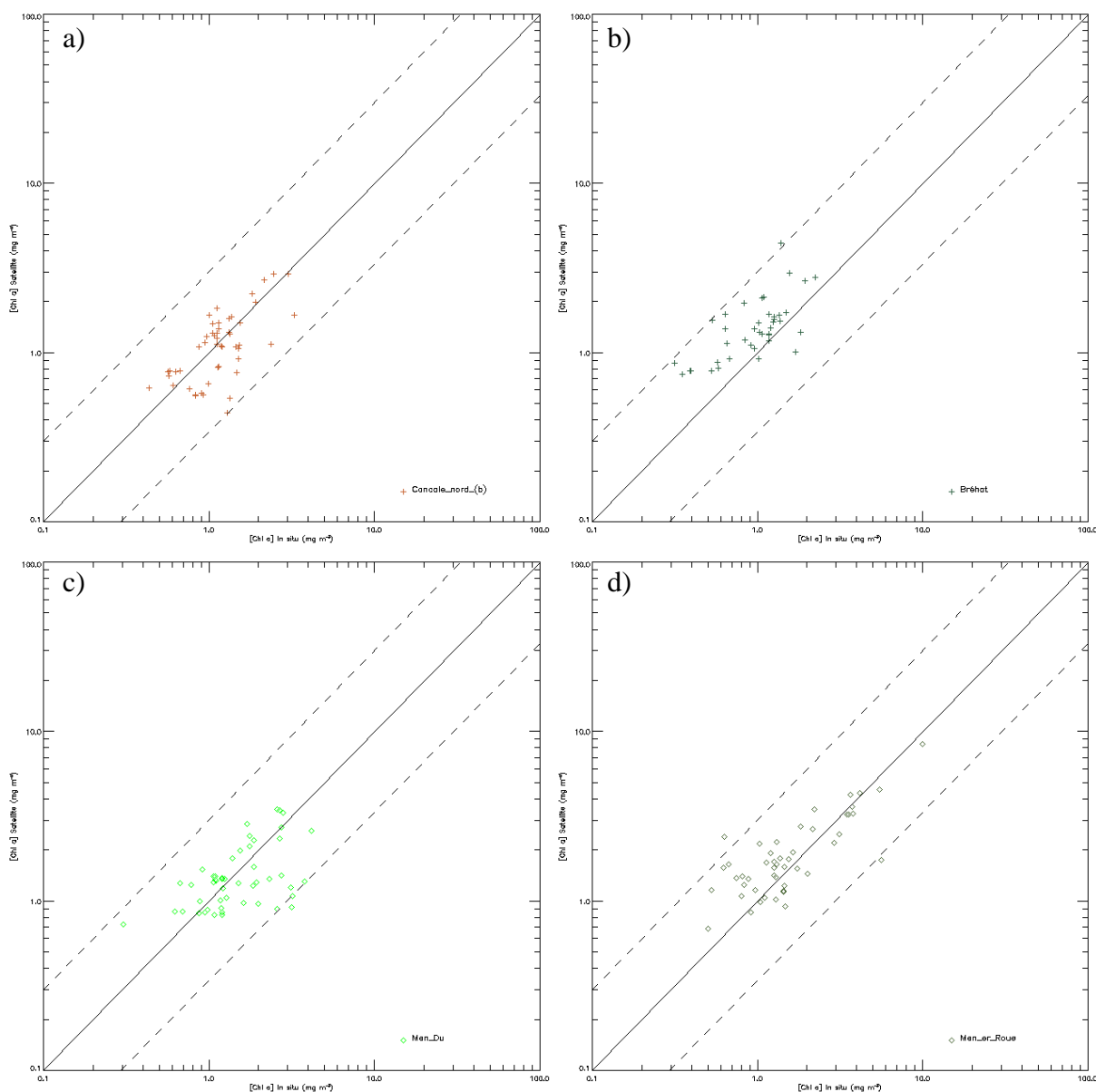


Graph. 4 - Evolution hebdomadaire des moyennes (a et c) et percentiles 90% (b et d) climatologiques in situ et satellite à Cabourg (a et b) et Ouest Loscolo (c et d)

Ces deux stations confirment les hypothèses énoncées plus haut. La forme des courbes en cloche est beaucoup plus visible et l'effet de support se remarque par l'aspect plus lissé de la courbe satellite, toutefois la forte concentration de chlorophylle *in situ* en fin de période productive à Cabourg semble être d'avantage relié à des gradient locaux à la sortie de la Dives. L'étude climatologique permet donc une généralisation du cycle de concentration de chlorophylle et une courbe théorique pourrait être mise en place pour caractériser les propriétés statistiques de la masse d'eau de la station.

b) Les autres stations

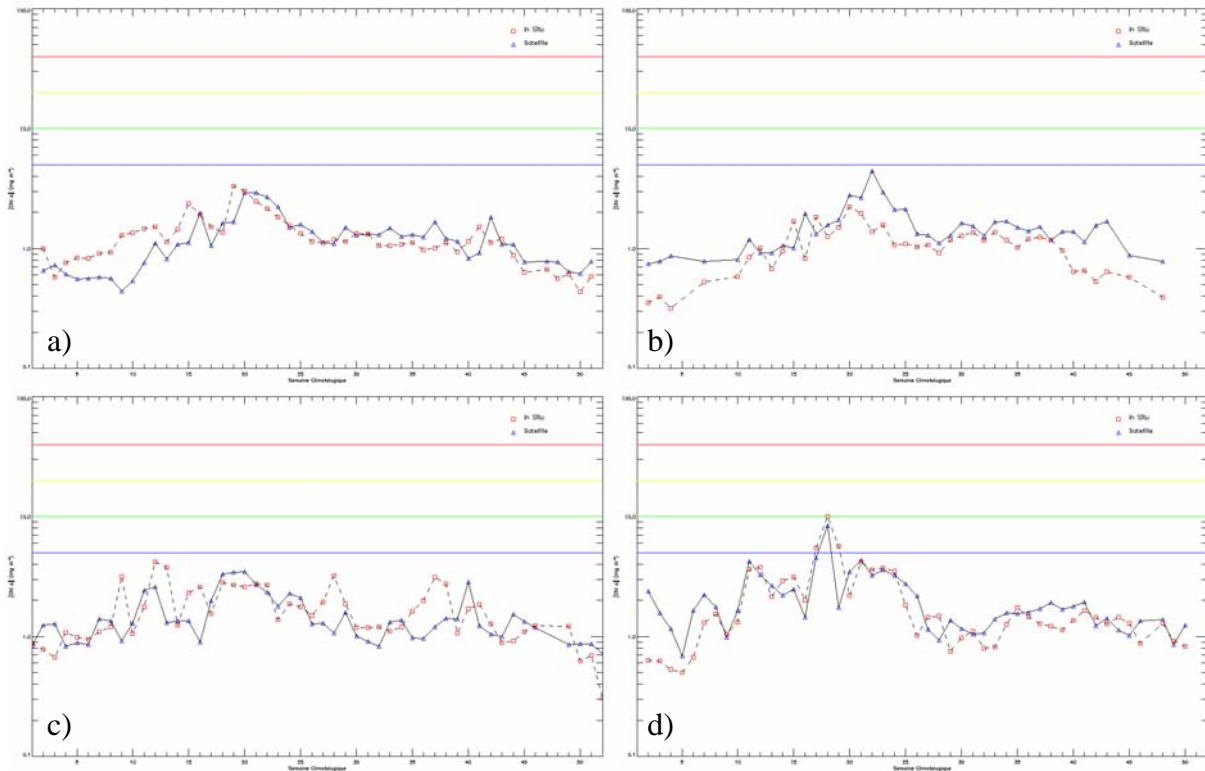
La même étude a été réalisée sur les stations de Cancale, Bréhat, Men Du et Men er Roue, et voici les résultats :



Graph. 5 - graphique de régression *in situ*/satellite, à Cancale (a), Bréhat (b), Men Du (c) et Men er Roue (d)

On obtient une nouvelle fois de très bonne régression avec des écarts relatifs moyens de l'ordre de 40%. Contrairement aux stations précédentes, le nuage de points est ici plus

compact dépassant rarement les $5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Ce qui réduit évidemment les coefficients de corrélation qui varient entre 0,5 et 0,7.



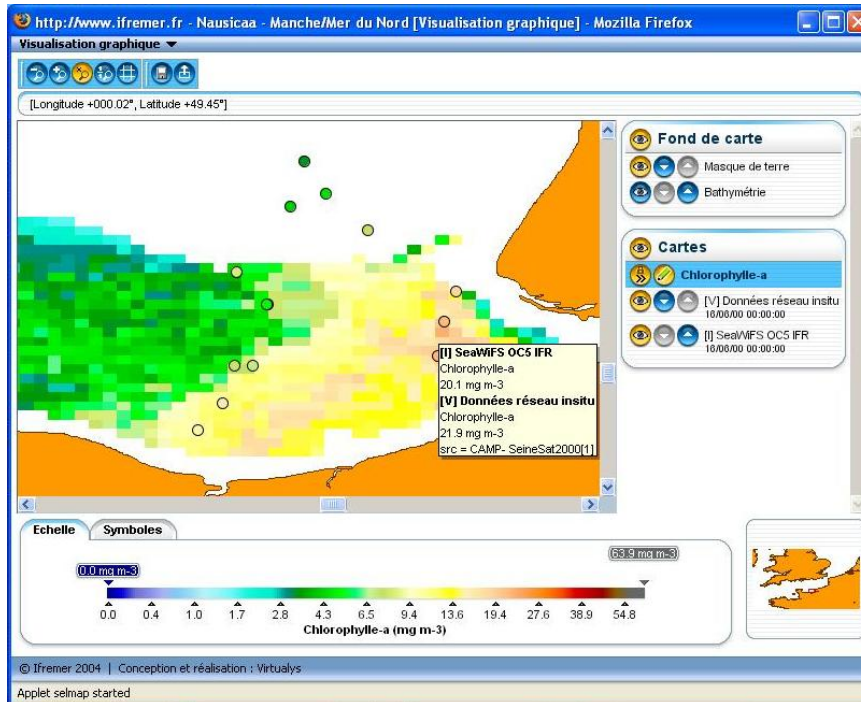
Graph. 6 - Evolution hebdomadaire des concentrations de chlorophylle climatologique in situ et satellite, à Cancale (a), Bréhat (b), Men Du (c) et Men er Roue (d)

On remarque évidemment le type de cycle de concentration de ces eaux, énoncés plus haut, où un pic de concentration s'effectue au printemps et s'estompe lentement jusqu'à la fin de l'année. De plus on obtient un très bon suivi temporel des données *in situ* et satellites, même pour ces faibles concentrations.

4.3.4 Intégration des données dans un Système d'Information Géographique

- **Serveur de données environnementales Nausicca**

Une première étude temporelle de comparaison in situ/satellite avait montré des décalages dans les concentrations de chlorophylle *a* surtout aux niveaux des faibles et fortes valeurs, la *look-up table* a donc été modifiée en fonction de cette étude. Les nouveaux résultats sont très satisfaisants comme le prouve l'exemple ci-dessous.



Graph. 7 - Figure 1 – Image SeaWiFS OC5 et campagne de mesure SeineSat, datés du 16/06/2001 -
imprime-écran à partir de la fenêtre de visualisation du serveur Nausicca

Une campagne de mesure a été effectuée en baie de Seine le 16 juin 2000, chaque point représente une mesure et sa couleur la concentration de chlorophylle *a* suivant l'échelle de couleur sous l'image. L'image SeaWiFS « OC5 » modifié date du même jour. L'encadré montre un exemple de la valeur du point et du pixel situé juste en dessous.

On remarque que la variabilité spatiale semble être conservée pour les données journalières. Ces données n'ont pas servi lors de l'étude comparative car trop peu nombreuses et elles donneraient un poids trop important à une journée et un lieu en particulier. Toutefois elles permettent de montrer le bien fondé de l'utilisation de l'algorithme « OC5 » en milieu côtier.

- **Intégration des données sous ArcGIS9©**

Afin d'étudier la représentativité spatiale, les séries de données satellites et *in situ* ont été traitées avec le logiciel ArcGIS9©. Les climatologies hebdomadaire ont été moyennées sur la période productive, c'est-à-dire à partir de mi-mars (semaine 9) à mi-septembre (semaine38). L'image ci-dessous représente donc les concentrations climatologiques moyennes de chlorophylle *a* en période productive.

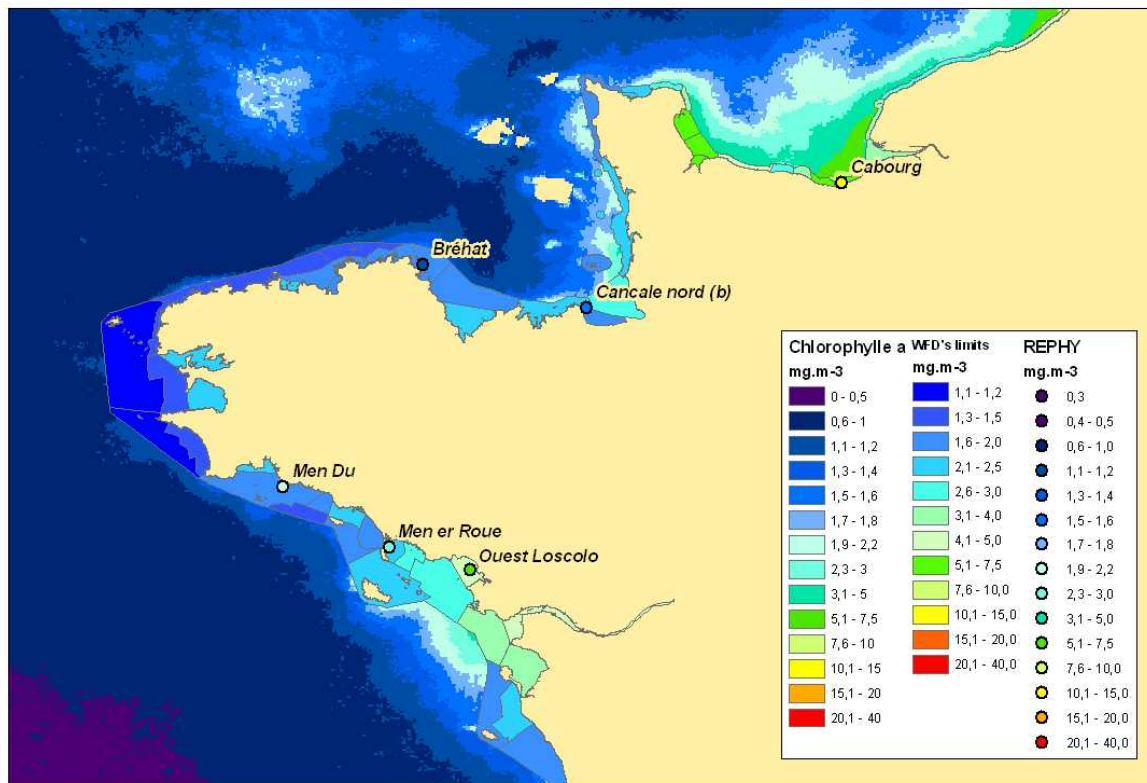


Fig. 18 - Moyenne chlorophylle des climatologies hebdomadaire sur la période productive et les limites des masses d'eau de la Directive Cadre Eau

On a rajouté aux fichiers de forme des limites DCE et des stations REPHY les tables de bases de données de leurs concentrations moyennes climatologiques de la période productive. On remarque que les niveaux de chlorophylle des stations de mesure sont légèrement supérieurs au niveau de leur masse d'eau respective.

A partir du fichier de forme des limites DCE, les statistiques de chaque zone ont donc été calculées grâce à cette image. Afin d'estimer la représentativité spatiale de chaque zone, on peut s'intéresser tout d'abord aux moyennes et écart-types de valeurs.

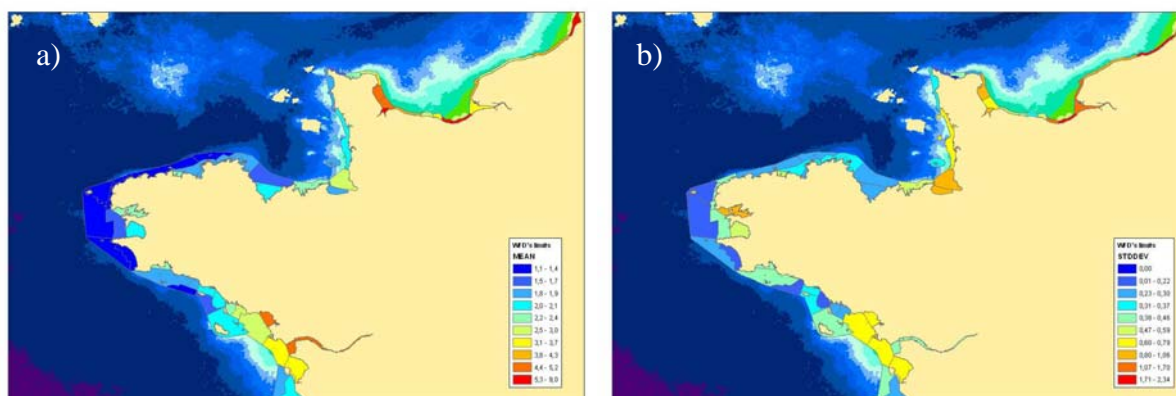


Fig. 19 - Climatologie des concentrations de chlorophylle à l'intérieur des limites de masses d'eau DCE en moyenne a) et écart-type b) calculés sur la période productive

On observe sur la figure (19) une forte corrélation entre la moyenne et l'écart-type des masses d'eaux. Plus la concentration moyenne de chlorophylle est forte, plus cette concentration est

variable à l'intérieur de la masse d'eau. Toutefois, certaines zones DCE, comme celle autour de la station de Cancale, peuvent avoir une faible moyenne et un fort écart-type. Ces zones semblent donc assez mal désignées pour représenter la production du phytoplancton.

Une classification sur la représentativité ou non des pixels inclus dans les masses d'eau a été réalisée. Cette classification est basée sur l'écart de ces pixels par rapport à la moyenne de leurs zones, tout en prenant en compte les écart-types de celles-ci. Un pixel sera considéré comme représentatif de la masse d'eau si sa concentration moyenne en chlorophylle C_p est dans le voisinage la moyenne m de cette masse d'eau. Cette condition peut être exprimée de la manière suivante :

$$C_p \in \left[m - \frac{\sigma}{2}; m + \frac{\sigma}{2} \right]$$

Où σ est l'écart-type de la masse d'eau.

La figure () représente les pixels sélectionnés par cette condition sur trois sites, à Cabourg, Cancale et Ouest Loscolo. On observe sur cette figure trois situations typiques. En baie de Seine (Cabourg), la masse d'eau est très étroite et la distribution des pixels est chaotique. Il n'y a en fait aucune zone représentative car il y a trop peu de pixels pour définir la masse d'eau et ceux-ci, trop près de la côte, sont souvent fortement bruités. La configuration est totalement différente dans la baie du Mont Saint-Michel (Cancale) et dans l'estuaire de la Vilaine (Ouest Loscolo), où les limites DCE sont plus larges. Les isolignes de concentration de chlorophylle coupent perpendiculairement la masse d'eau vers la côte en baie du Mont Saint-Michel tandis qu'elles sont parallèles à la côte dans l'estuaire de la Vilaine.

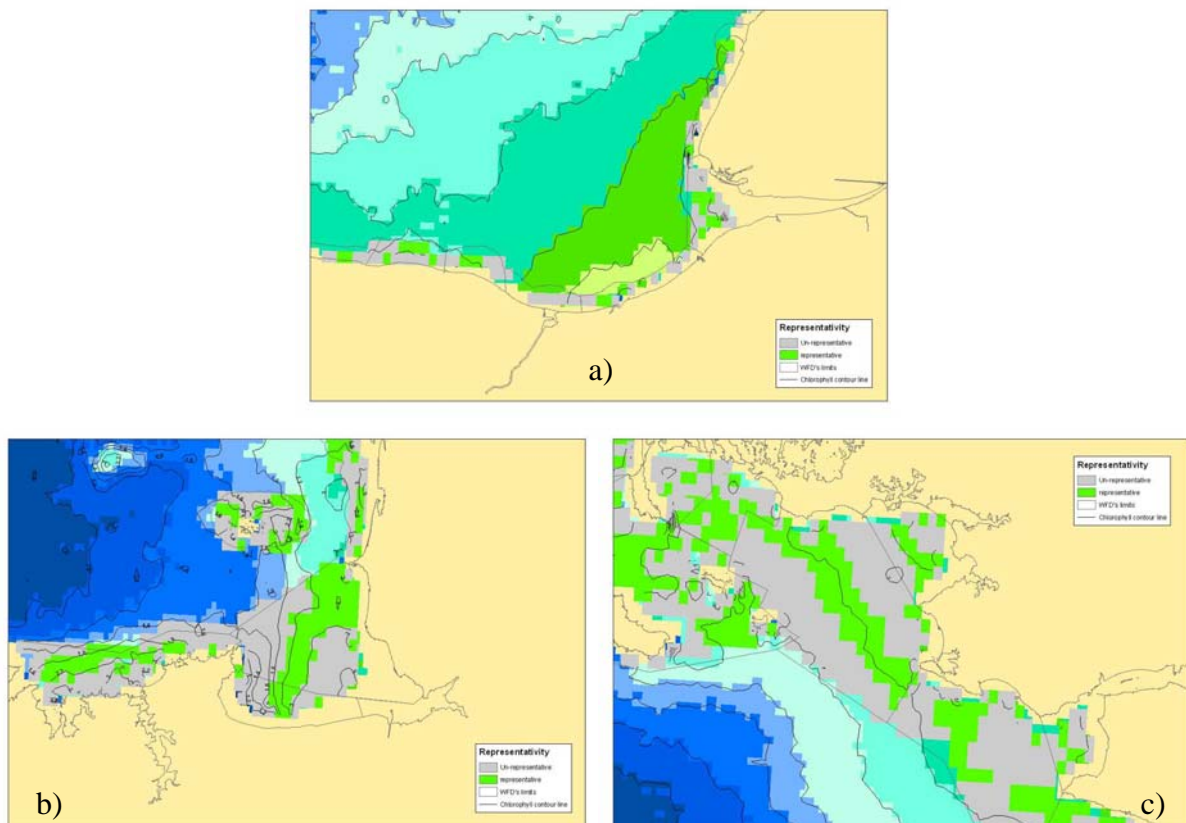


Fig. 20 - Représentativité des pixels à l'intérieur des limites DCE en baie de Seine a), en baie du Mont Saint-Michel b) et en baie de Vilaine c)

Dans les deux cas les pixels sélectionnés sont localisés entre deux isolignes centrées sur la moyenne de la masse d'eau. Toutefois dans le premier cas c'est cette distribution des isolignes

qui entraînent le fort écart-type, discuté plus haut, en baie du Mont Saint-Michel. Est-ce judicieux d'avoir partagé cette baie de cette manière ? C'est une des questions qu'il faut discuter avec les acteurs locaux. Tout comme la mise en place de nouvelles stations de mesure, cet étude permettra d'aider ces acteurs d'en leurs décisions.

4.3.5 Discussion

Les allures des cycles de concentration de chlorophylle sont similaires quelque soit l'origine de l'observation, *in situ* ou satellite, pour n'importe quelle station. Les événements chronologiques ou climatologiques sont conservés dans les deux cas. Toutefois la distribution temporelle des données satellites est plus étroite et peut être en partie attribuée à l'effet de support. Une étude équivalente à partir de l'estimation de la qualité de l'air a été développée par Lajaunie et Wackernagel (2002). Dans les eaux de fort mélange, cet effet peut être relativement négligé du fait des faibles niveaux de concentration de chlorophylle. Par contre il est largement illustré sur la station de Cabourg, sans perdre de vue que les très fortes valeurs à cet endroit peuvent aussi être influencées par un gradient local issu de la rivière de la Dives qui ne peut pas être détecté avec la résolution du capteur SeaWiFS. Dans cette hypothèse la station serait représentative d'une masse très restreinte. Une chaîne d'acquisition d'images MERIS de résolution 250 m est en cours d'élaboration à IFREMER, et une étude de ces images de plus forte résolution permettra d'aider à la validation de cette hypothèse. De plus de nombreux golfes, baies et estuaires, délimités en zones DCE, sont souvent trop petites pour être captés par l'observation satellite, alors que ceux sont généralement des sites où les dynamiques environnementales et anthropiques sont les plus fortes, et donc d'un intérêt majeur pour les acteurs locaux.

Conclusion du chapitre 4

Les côtes françaises sont le lieu de phénomènes hydrologiques, climatiques, biologiques et anthropiques remarquables. C'est pourquoi il est très intéressant d'étudier une telle zone, car le suivi opérationnel de la production primaire dans ces eaux se trouve au centre d'enjeux à la fois locaux, nationaux et communautaire, voir internationaux. Ce premier suivi opérationnel, développé par Gohin F. et Laffont K. (2005), ne peut être mis en place qu'à la suite d'une étude approfondie sur la représentativité des données *in situ* et satellites, dont fait l'objet ce présent mémoire. Cette étude a donc permis une meilleure calibration des données satellites sur les données *in situ* et montré la cohérence de l'utilisation de la moyenne climatologique. De plus cette étude intéresse énormément nos utilisateurs au niveau du projet MarCOAST, qui ont, en grande partie, fixé les lignes d'orientation. Ainsi par l'intermédiaire du SIG, des cartes de représentativité des masses d'eau ont pu être dressées, qui serviront pour la détermination de nouveaux sites de prélèvements dans le cadre du suivi opérationnel de la production primaire.

Conclusion générale

Le phénomène de littoralisation pèse lourdement sur l'environnement côtier et ses ressources. Le littoral est devenu en quelques décennies une zone de conflits d'intérêts extrêmement forts et complexes entre des acteurs de catégories socioprofessionnelles multiples, mais à ces conflits et aux intransigeances des acteurs doit se substituer une coexistence pour assurer le développement durable du littoral. La gestion intégrée des zones côtières est ainsi devenue une nécessité.

Un aspect crucial de cette gestion intégrée est la gestion de la qualité de l'eau, facteur commun à la majorité des conflits d'intérêts littoraux, gestion orchestrée depuis 2000 par la Directive Cadre Eau. Au sein de ce mémoire, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à la prise en compte de la composante biologique de la qualité de l'eau qu'est le phytoplancton : quels sont les enjeux de la surveillance de la production primaire en milieu côtier, quels en sont les mécanismes ? Une approche environnementale de la problématique posée a permis de faciliter l'identification des mesures à prendre pour gérer le problème environnemental des HABs ; deux catégories de mesures ont pu être distinguées : les mesures « actives » limitant les impacts des activités littorales sur la qualité du milieu (gestion des eaux résiduaires et des déchets, gestion des activités maritimes et agricoles...), et les mesures « passives » concernant la surveillance de la qualité de l'eau et la protection contre les HABs (suivi des paramètres de la qualité de l'eau, identification des blooms nuisibles ou toxiques, contrôle de la toxicité des coquillages, diffusion de l'information auprès des catégories socioprofessionnelles concernées...).

Le choix a été fait de mettre l'accent sur ces mesures « passives », car le suivi de la qualité des eaux côtières représente un défi pour l'océanographie opérationnelle : comment proposer un produit fiable, performant, en temps (presque) réel à des utilisateurs toujours plus exigeants ? Une surveillance directe des populations phytoplanctoniques, couplée avec l'utilisation de capteurs satellitaires, peut améliorer grandement notre connaissance de l'état des eaux côtières : cette constatation est à la base du développement d'un nouveau produit de l'océanographie opérationnelle, répondant à une certaine demande des gestionnaires. Ce produit consiste en la réalisation en temps presque réel d'une carte des anomalies de la biomasse phytoplanctonique en milieu côtier, calculée à partir d'images satellites et vérifiée (voire complétée) par des mesures *in situ*. Toutefois pour rendre ce produit opérationnel, il est nécessaire de s'intéresser à la représentativité des données *in situ* et satellites, et de mieux cerner les propriétés statistiques d'une masse d'eau. Cette problématique intervient en amont et concerne directement les acteurs locaux. On a montré la cohérence de l'utilisation des moyennes climatologiques et celles-ci ont permis de souligner le caractère eutrophique ou d'eau de mélange dans le cycle de production primaire. La distribution spatiale du phytoplancton et la représentativité des limites DCE par rapport de cette distribution sont maintenant illustrées par des cartes issues du logiciel ArcGIS©, et celles-ci serviront aux acteurs locaux, notamment aux Agences de l'Eau pour l'implantation de nouvelles stations de mesures plus représentative des masses d'eau. Une discussion rassemblant fournisseurs de données et utilisateurs sera entreprise dans les mois prochains pour déterminer, au vu de ces résultats, les meilleures solutions envisageables.

S'il peut sembler paradoxal de confier à un capteur, en orbite à plusieurs centaines de kilomètres au-dessus de l'océan, la responsabilité de nous mettre en garde contre des organismes microscopique, il apparaît néanmoins que le satellite est devenu un outil

indispensable pour la gestion du littoral. Qui plus est, l'intérêt du satellite, cerbère de l'ensemble de la planète, est confirmé par la littoralisation problématique des pays en voie de développement : la gestion du littoral deviendra bientôt un problème environnemental récurrent.

Bibliographie

- BALLESTERO D. – Remote sensing of vertically structured phytoplankton pigments, *Top. Meteor. Oceanog.* 6(1) : 14-23, 1999
- BECET J.-M., LE MORVAN D. – Le droit du littoral et de la mer côtière, Ed. Economica, 1991.
- BECET J.-M. – L'aménagement du littoral, *Que Sais-je ?* n°2363 (août 1987)
- BELFIORE S., BALGOS M., McLEAN B., GALOFRE J., BLAYDES M., and Tesch D. – A Reference Guide on the Use of Indicators for Integrated Coastal Management, ICAM Dossier n°1, UNESCO 2003
- BELIN C., RAFFIN B. – Les espèces phytoplanctoniques toxiques et nuisibles sur le littoral français de 1984 à 1995, résultats du REPHY (réseau de surveillance du phytoplancton et des phycotoxines, IFREMER, décembre 1998, Tome 1 et 2.
- BOUGIS P. – Ecologie du plancton marin. I. Le Phytoplancton, MASSON et Cie, *Bulletin d'écologie*, Collection d'écologie.2, 1974.
- BOUSQUET B. – Définition et identification du littoral contemporain, *Revue Juridique de l'Environnement*, 4/1990, pp. 451-468
- BROWN C.W., ESAIAS W.E., THOMPSON A.M. – Predicting Phytoplankton Composition from Space – Using the Ratio of Euphotic Depth to Mixed-Layer Depth : An Evaluation, *Remote Sensing of Environment*, 53 (1995), 172-176
- DANIEL A. – Réseau Hydrologique Littoral Normand : Cycles annuels 2001-2003 et proposition d'indicateurs d'eutrophisation, *Rapport IFREMER*, décembre 2004
- DAUVIN J.-C. – Gestion intégrée des zones côtières : outils et perspectives pour la préservation du patrimoine naturel, Publication du Muséum Nationale d'Histoire Naturelle, 2001
- DRUON J.N., SCHRIMPF W., DOBRICIC S., STIPS A. Comparative assessment of large-scale marine eutrophication: North Sea area and Adriatic Sea as case studies. *Marine Ecology Progress Series*, 272, 1-23, 2004
- FISSON, C., ET BELIN, C., 2005. Indicateur de biomasse chlorophylle a. Simulation de classement des masses d'eau DCE. *Rapport Ifremer, DYNECO/VIGIES*, 9 p.
- GAILHARD I. – Analyse de la variabilité spatio-temporelle des populations microalgales côtières observées par le "REseau de surveillance du PHYtoplancton et des phycotoxines" (REPHY), Thèse de l'Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II, février 2003. *Chapitre 1 - Variabilité spatio-temporelle des populations microphytoplanctoniques.*
- GOHIN F., DRUON J.N., LAMPERT L. – A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 23 , 8, pp 1639-1661, 2002.
- GOHIN F., LANGLOIS G. – Using geostatistics to merge *in situ* measurements and remotely sensed observations of sea surface temperature, *International Journal of Remote Sensing*, 14 (1993), 9-19
- GOHIN F., LOYER S., LUNVEN M., LABRY C., FROIDEFOND J.M., DELMAS D., HURET M. and HERBLAND A., Satellite-derived parameters for biological modelling in coastal waters: Illustration over the eastern continental shelf of the Bay of Biscay. *Remote Sensing of Environment*, volume 95, Issue 1, pp 29-46, 2005.
- HALLEGRAEFF G.M., ANDERSON D.M., CEMBELLA A.D. – Manual on Harmful Marine Microalgae, 2004, UNESCO Publishing

- HURET M. – Apport du capteur SeaWiFS et des bouées MAREL pour l'observation des évolutions phytoplanctoniques en baie de Seine, 2001, Mémoire de fin d'études DAA ENSARennes/IFREMER.
- JOINT I., GROOM S.B. – Estimation of phytoplankton production from space: current status and future potential of satellite remote sensing, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 250 (2000), pp. 233-255
- LAJAUNIE, C. and . WACKERNAGEL, H. - Geostatistical Approaches to Change of Support Problems – Theoretical Framework – Report No 19 of Contract IST-1999-11313 Technical Report N-30/01/G of the ENSMP, Centre de Géostatistique, December 2000
- MARCEL O. et KALAORA B. – Un littoral durable pour des usages sociaux ménageant la ressource et sa fragilité, *Revue du Palais de la Découverte* n°326-327, mars-avril 2005, pp. 62-72.
- MARCHAND M., BRUNOT C. – L'environnement littoral et marin, *Etudes et travaux* n°16 de l'IFEN, 1997
- MÉNESGUEN A. and F. GOHIN – Observation and modelling of natural retention structures in the English Channel. In Press *Journal of Marine Systems*.
- MIOSSEC A. – Les littoraux : entre nature et aménagement, Editions SEDES, 1998
- MOREL A. ET PRIEUR L. – Analysis of variations in ocean colour, *Limnology and Oceanography*, vol.22, 1977, pp. 709-722.
- O'REILLY, J.E., MARITORENA, S., MITCHELL, B.G., SIEGEL, D.A., CARDER, K.L., GARVER, S.A., KAHRU, M., & McCLAIN, C. (1998). – Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research*, 103, 24937-24953.
- PRIEUR L., & SATHYENDRANATH, S. (1981). An optical classification of coastal and oceanic waters based in the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter and other particulate materials. *Limnology and Oceanography*, 26, 671-689.
- SIEGEL, D., WANG, M., MARITORENA, S., and ROBINSON, W., 2000, Atmospheric correction of satellite ocean colour imagery: The black pixel assumption. *Applied Optics*, 39, 3582-2591.
- TANG DL., KESTER D.R., NI I-H., GI YZ., KAWAMURA H. – *In situ* and satellite observations of a harmful algal bloom and water condition at the Pearl River estuary in late Autumn 1998, *Harmful Algae* 2 (2003) 89-99
- ZINGONE A., ENEVOLDSEN H.O. – The diversity of harmful algal blooms: a challenge for science and management, *Ocean & Coastal Management*, 43 (2000), pp. 725-748

Textes législatifs

- Directive cadre "Eau" – 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
- Loi Littoral - Loi n° 86-2 du 3 janvier 1986 relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral (*Journal officiel* du 4 janvier 1986)
- Recommandation du Parlement Européen et du Conseil du 30 mai 2002 (2002/413/CE), relative à la mise en œuvre d'une stratégie de gestion intégrée des zones côtières en Europe

Ressources Internet

- REPHY info toxines : <http://www.ifremer.fr/depot/del/infotox/>
<http://www.ifremer.fr/envlit/surveillance/rephy.htm>
<http://seadas.gsfc.nasa.gov/>



<http://www.ifremer.fr/nausicaa/rozes/index.htm>

<http://www.esa.int/esaLP/LPgmes.html>

<http://europa.eu.int/comm/environment/iczm/home.htm>

<http://ioc.unesco.org/icam/>

<http://www.nersc.no/HAB/>

Annexes

Annexe A : Impacts des HABs	55
Annexe B : Espèces observées par le réseau REPHY	56
Annexe C : Compte-rendu de la réunion du 22/06/2006 avec les utilisateurs	57
Annexe D : Exemples de produits dérivés SeaWiFS	59
Annexe E : Cycles annuelles de concentration de chlorophylle	61

Annexe A

Impacts des HABs

Impacts	Exemples d'organismes responsables	
Santé humaine		
Intoxications paralysantes par les fruits de mer (PSP)	Dinoflagellés	<i>Alexandrium</i> spp., <i>Pyrodinium bahamense</i> var. <i>compressum</i> , <i>Gymnodinium catenatum</i>
	Cyanobactéries	<i>Anabena circinalis</i>
Intoxications diarrhéiques par les fruits de mer (DSP)	Dinoflagellés	<i>Dinophysis</i> spp., <i>Prorocentrum</i> spp.
Intoxications neurologiques par les fruits de mer (NSP)	Dinoflagellés	<i>Karenia brevis</i>
Intoxications amnésiantes par les fruits de mer (ASP)	Diatomées	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.
Intoxications par les azaspiracides (AZP)	Inconnu	Inconnu
Intoxications de type "ciguatériques" (CFP)	Dinoflagellés	<i>Gambierdiscus toxicus</i>
Troubles respiratoires et irritation cutanée, effets neurologiques	Dinoflagellés Cyanobactéries	<i>Karenia brevis</i> , <i>Pfiesteria piscicida</i> <i>Nodularia spumigena</i>
Hépatotoxicité	Cyanobactéries	<i>Microcystis aeruginosa</i> , <i>Nodularia spumigena</i>
Ressources marines naturelles et exploitées		
Effets hémolytiques, hépatotoxiques, osmorégulateurs	Dinoflagellés	<i>Gymnodinium</i> spp., <i>Cochlodinium polykrikoides</i> , <i>Pfiesteria piscicida</i> , <i>Gonyaulax</i> spp.
	Raphidophycées	<i>Heterosigma akashiwo</i> , <i>Chattonella</i> spp., <i>Fibrocapsa japonica</i>
	Prymnésiophycées	<i>Chrysochromulina</i> spp., <i>Phaeocystis pouchetii</i> , <i>Prymnesium</i> spp.
	Chrysophycées	<i>Aureococcus anophagefferens</i>
	Cyanobactéries	<i>Microcystis aeruginosa</i> , <i>Nodularia</i> spp.
Lésions mécaniques	Diatomées	<i>Chaetoceros</i> spp.
Obstructions et nécroses des branchies	Prymnésiophycées	<i>Phaeocystis</i> spp.
Activités touristiques		
Production d'écume, de mucilage, variation de la couleur de l'eau, et odeurs nauséabondes	Dinoflagellés Prymnésiophycées Diatomées Cyanobactéries	<i>Noctiluca scintillans</i> , <i>Prorocentrum</i> spp. <i>Phaeocystis</i> spp. <i>Cylindrotheca closterium</i> <i>Nodularia spumigena</i> , <i>Lyngbya</i> spp., <i>Aphanizomenon flos-aquae</i> , <i>Microcystis aeruginosa</i>
Fonctionnement de l'écosystème marin		
Hypoxie, anoxie	Dinoflagellés Diatomées Prymnésiophycées	<i>Noctiluca scintillans</i> , <i>Heterocapsa triquetra</i> <i>Skeletonema costatum</i> <i>Phaeocystis</i> spp.
Effets négatifs sur le comportement de recherche de nourriture, et réduction de la clarté de l'eau	Chrysophycées	<i>Aureococcus anophagefferens</i> , <i>Aureoumbra lagunensis</i>
	Dinoflagellés	<i>Prorocentrum minimum</i>
Toxicité pour les organismes marins (invertébrés, poissons, mammifères marins, et oiseaux)	Dinoflagellés Diatomées	<i>Karenia brevis</i> , <i>Alexandrium</i> spp. <i>Pseudo-nitzschia australis</i>

Tab. A.1 – Effets nuisibles causés par des efflorescences algales en domaine côtier. (In *Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms, GEOHAB 2001* – modifié d'après Zingone & Enevoldsen 2000 par Gailhard).

Annexe B

Espèces observées par le réseau REPHY

- Diatomées de grande taille : *Rhizosolenia delicatula* et *stolterforthii*
- Petites diatomées à large tolérance haline : *Chaetoceros socialis*, *Skeletonema costatum*
- En période froide : *Paralia sulcata* et *Skeletonema*
- *Phaeocystis*, appartenant à une petite classe (Prymnésiophycées ou Phytoflagellés) peut atteindre également des concentrations importantes et, malgré sa petite taille (10µm), participe à la formation de certains blooms
- *Paralia* subsiste en hiver → maintien d'une concentration en chl a >1 µg/l
- *Skeletonema*, *Chaetoceros* ou *Rhizosolenia delicatula* participent au 1^{er} bloom printanier, alors que les autres *Rhizosolenia* vont se succéder à tour de rôle en fonction des conditions du milieu. Ainsi, on observe une succession des espèces au cours de l'année, succession se répétant chaque année avec certains décalages dans le temps en fonction des conditions météorologiques et de la disponibilité en certains éléments nutritifs
- Parmi les autres espèces observées en nombre important dans d'autres zones de la baie, on peut citer *Asterionella glacialis* et *Cylindrotheca closterium* qui caractérisent les milieux côtiers, alors qu'on observera plus facilement au large *Coscinodiscus*.

Encadré B.1 – *Espèces observées par le réseau REPHY*

Annexe C

Compte-rendu de la réunion du 22/06/2006 avec les utilisateurs

COMPTE RENDU DE REUNION – Fiche rédigée le 05/07/2006

Rédactrice : Hélène Jeanneret

DATE 22/06/2006 LIEU Ifremer La Trinité-sur-mer

OBJET Etat d'avancement du stage de Loïc Lozac'h sur imagerie satellite et DCE

EXTERIEUR	IFREMER
L Lozac'h + P. Bryere	F Gohin, C Le Bec, M Ryckaert, G Thomas, JP Allenou, P Camus, Y Thomas, D Baud, M Fortune, H Jeanneret

ELEMENTS MARQUANTS ou POINTS FORTS

- Présentation par F Gohin du serveur Nausicaa. Un nouveau serveur est en préparation pour 09/2006. Il sera bientôt possible d'accéder aux images MERIS (Chla, MES) en temps réel.
- L Lozac'h a réalisé des cartes de référence annuelles sur la période 1998-2004 pour la Chla (en utilisant le percentile 90, conformément aux recommandations DCE). Il a présenté la méthodologie employée pour comparer les données satellites et les données in situ dans certaines masses d'eau DCE (Cabourg, Cancale, Bréhat, Men Du, Men er Roué, Ouest Loscolo). Dans certains cas, surestimation ou sous estimation par le satellite en début de période productive (faibles valeurs).
- Y Thomas a présenté la validation des données satellites (Chla et MES) en baie du Mont St Michel, dans une optique de compréhension des apports trophiques et non une optique DCE. L'objectif est de simuler l'évolution de la production de moules à l'échelle de la baie en utilisant le modèle DEB (<http://www.bio.vu.nl/thb/deb/>). Il existe un fort gradient d'est (+) en ouest (-) pour la Chla ; la corrélation entre satellite et données in situ est bonne, avec toutefois une sous-estimation par le satellite.

RELEVÉ DE DECISION et SUITE A DONNER

- Les représentants des LER ont demandé à L Lozac'h de tester l'homogénéité des masses d'eau DCE (pour T, Chla, MES) afin de les aider à positionner au mieux les points de surveillance. H. Jeanneret doit fournir à Loïc les masses d'eau dans lesquelles cette réflexion est prioritaire = là où il n'existe pas de point REPHY ou bien où il faut déplacer le point REPHY existant en dehors de la zone estran.
- Discussion sur l'intérêt de tester l'utilisation des images MERIS avec une résolution de 250 m (qui est environ la taille des mailles sur les modèles de façade). Ces images ne sont pas toujours faciles à utiliser et F Gohin va commander des images avec de bonnes corrections atmosphériques.
- Pour la salinité, la taille du pixel est de 40-50 km, donc trop grand en zone côtière. F Gohin demandera à J Legrand s'il est possible d'intégrer le résultat des modèles de DYNECO dans le serveur Nausicaa, comme cela existe en Méditerranée.

- Consensus sur l'intérêt de développer des nouvelles méthodes permettant d'optimiser la surveillance, aussi bien dans le cadre DCE que dans la perspective de la nouvelle directive « Stratégie marine » qui fixe un objectif de bon état des masses d'eau jusqu'aux 12 milles (donc moyens classiques de surveillance inadaptés).
- Intérêt de l'approche « apports trophiques » pour répondre aux demandes des conchyliculteurs sur la croissance des coquillages en lien avec la production primaire.

Annexe D

Exemple de produits dérivés SeaWiFS OC5

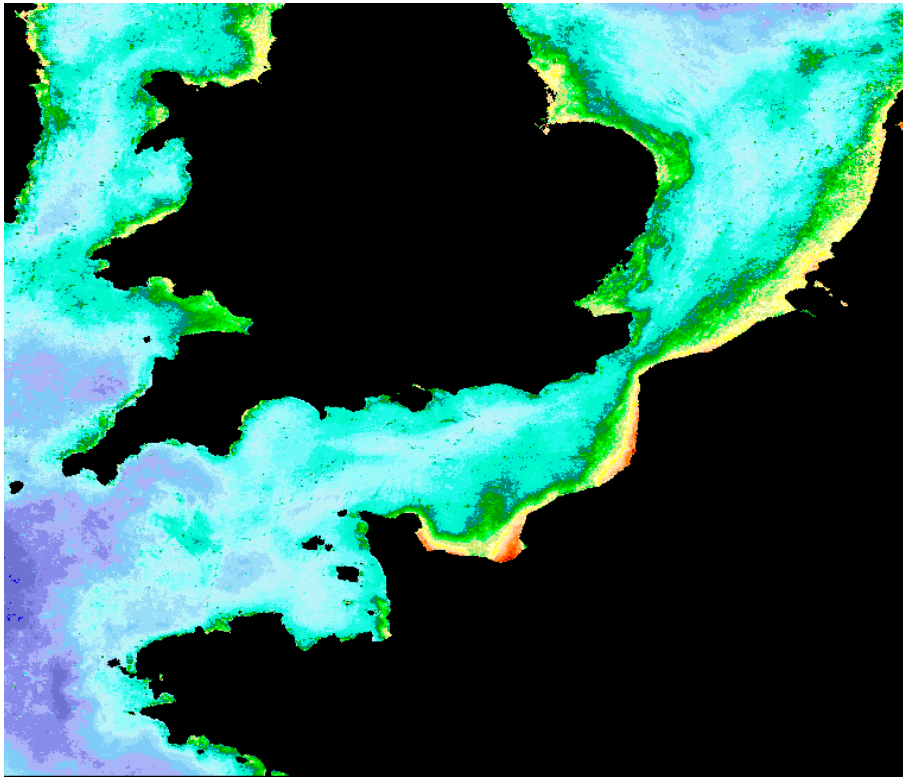


Fig. D.1 -
*Climatologie
hebdomadaire des
moyennes de
concentrations de
chlorophylle a pour
la semaine 25, sur la
zone Manche*

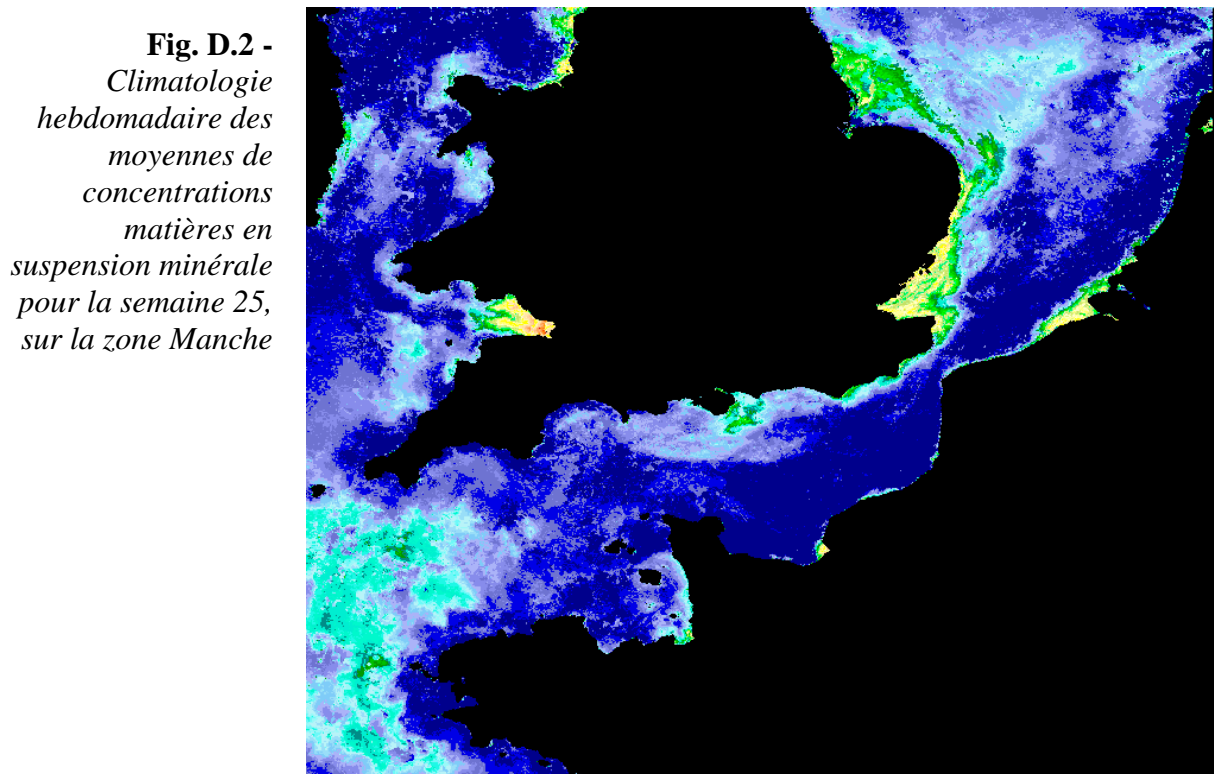


Fig. D.2 -
*Climatologie
hebdomadaire des
moyennes de
concentrations
matières en
suspension minérale
pour la semaine 25,
sur la zone Manche*

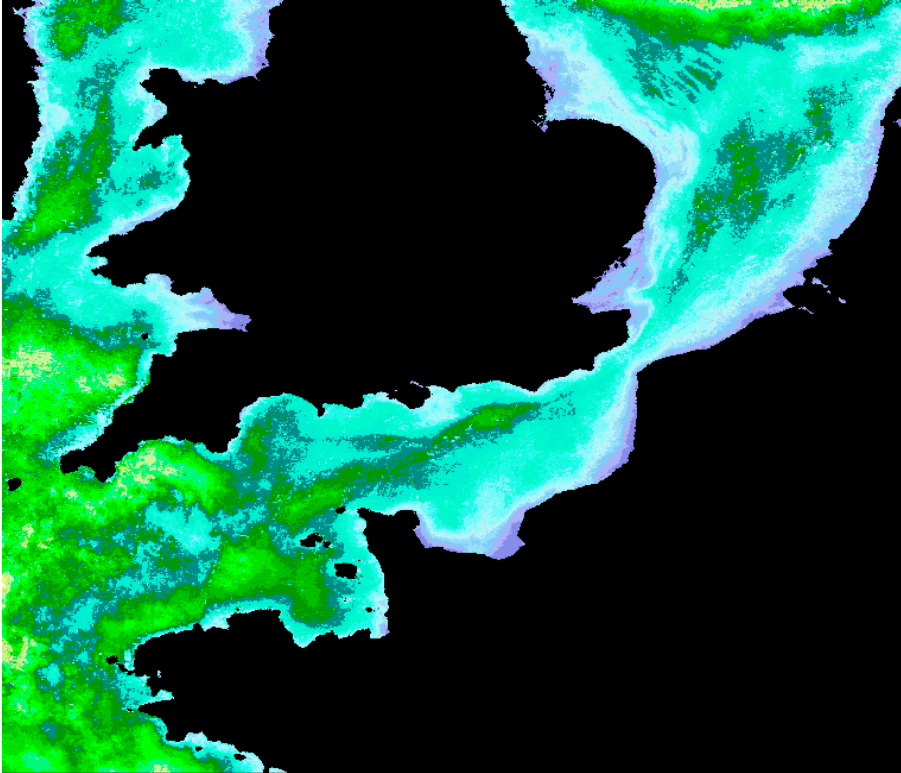
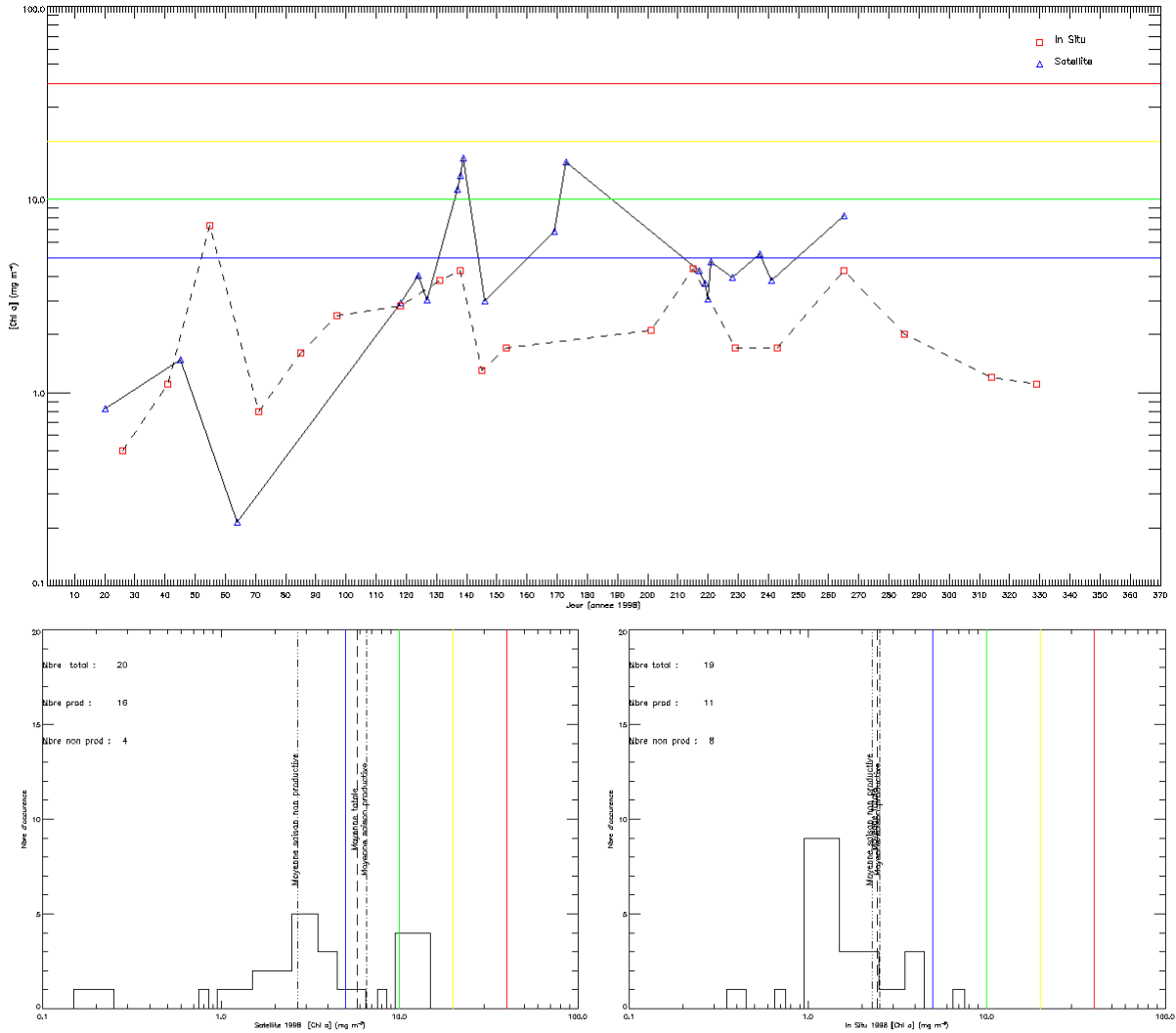


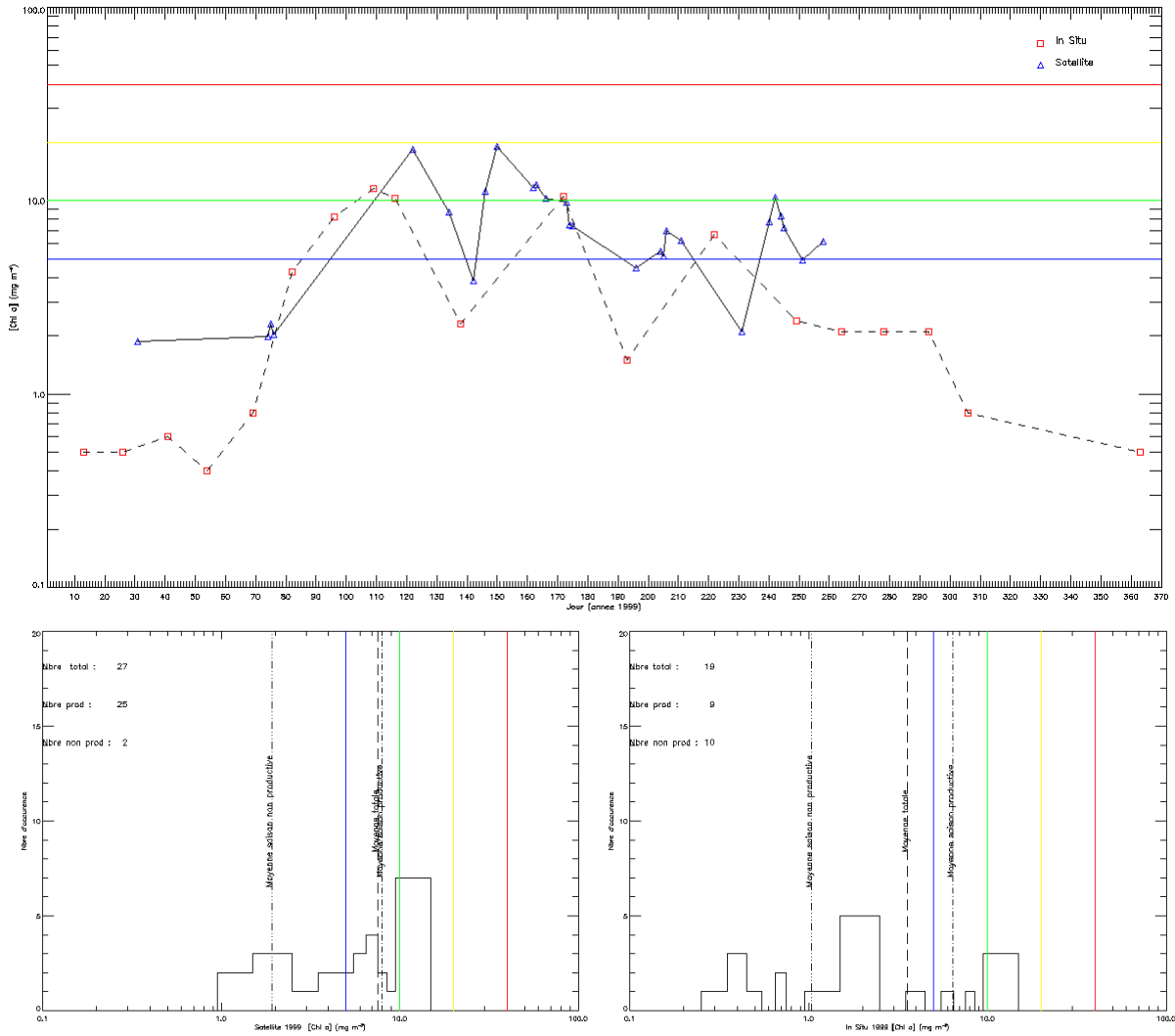
Fig. D.3 -
*Climatologie
hebdomadaire des
moyennes de
profondeur de
disque de Secchi
pour la semaine 25,
sur la zone Manche*

Annexe E

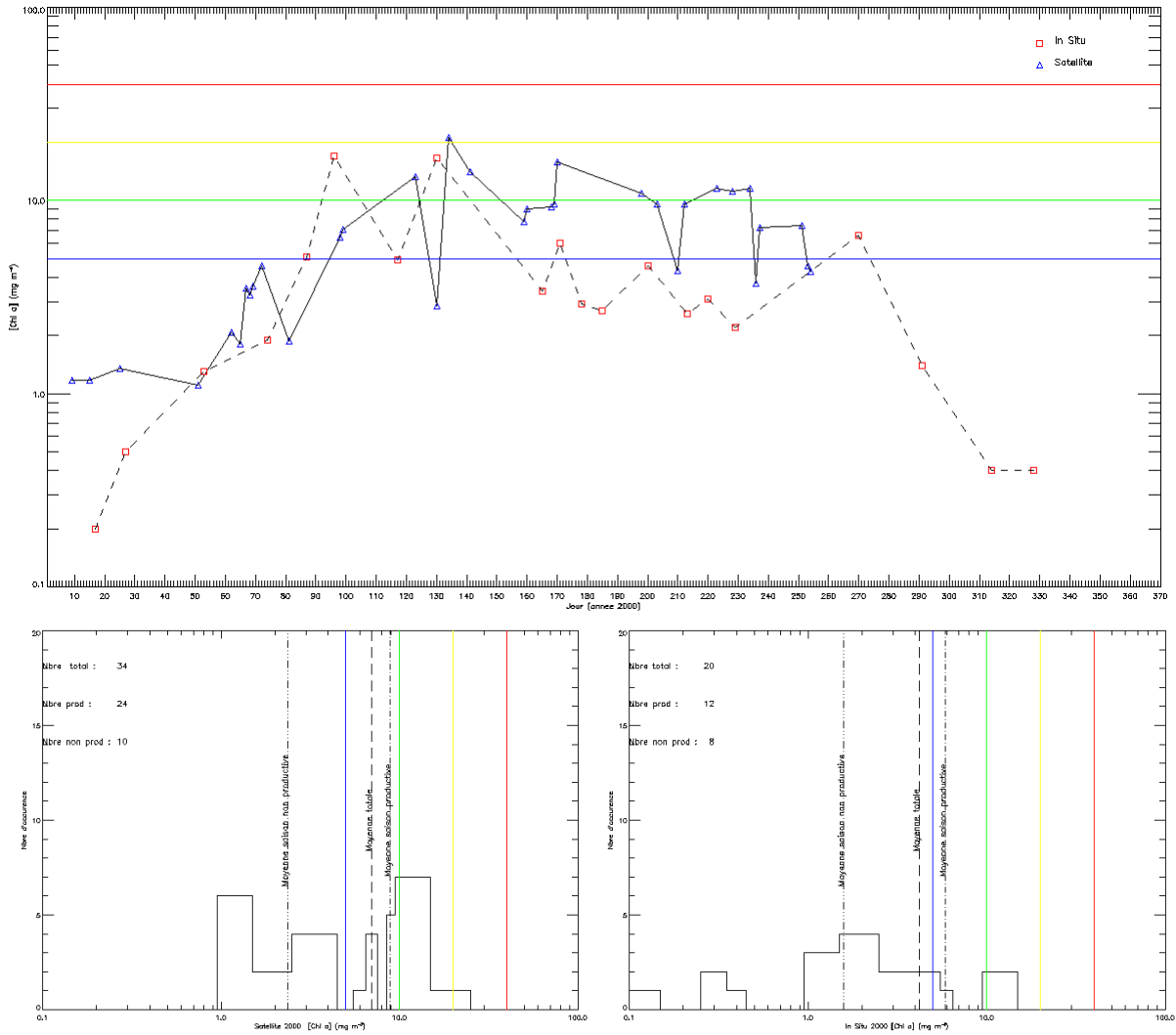
Cycles annuels de concentration de chlorophylle à Ouest

Loscolo de 1998 à 2003

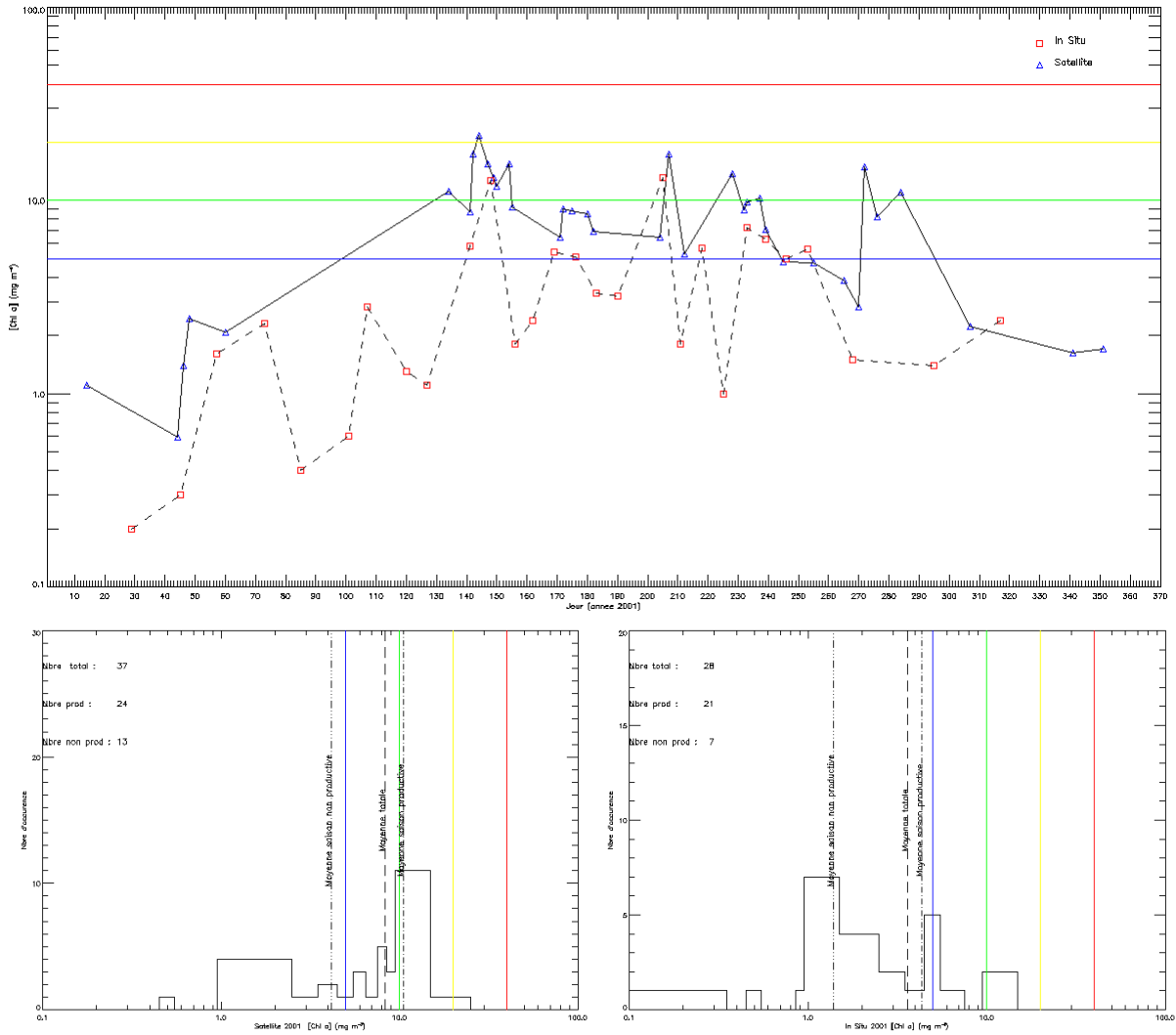




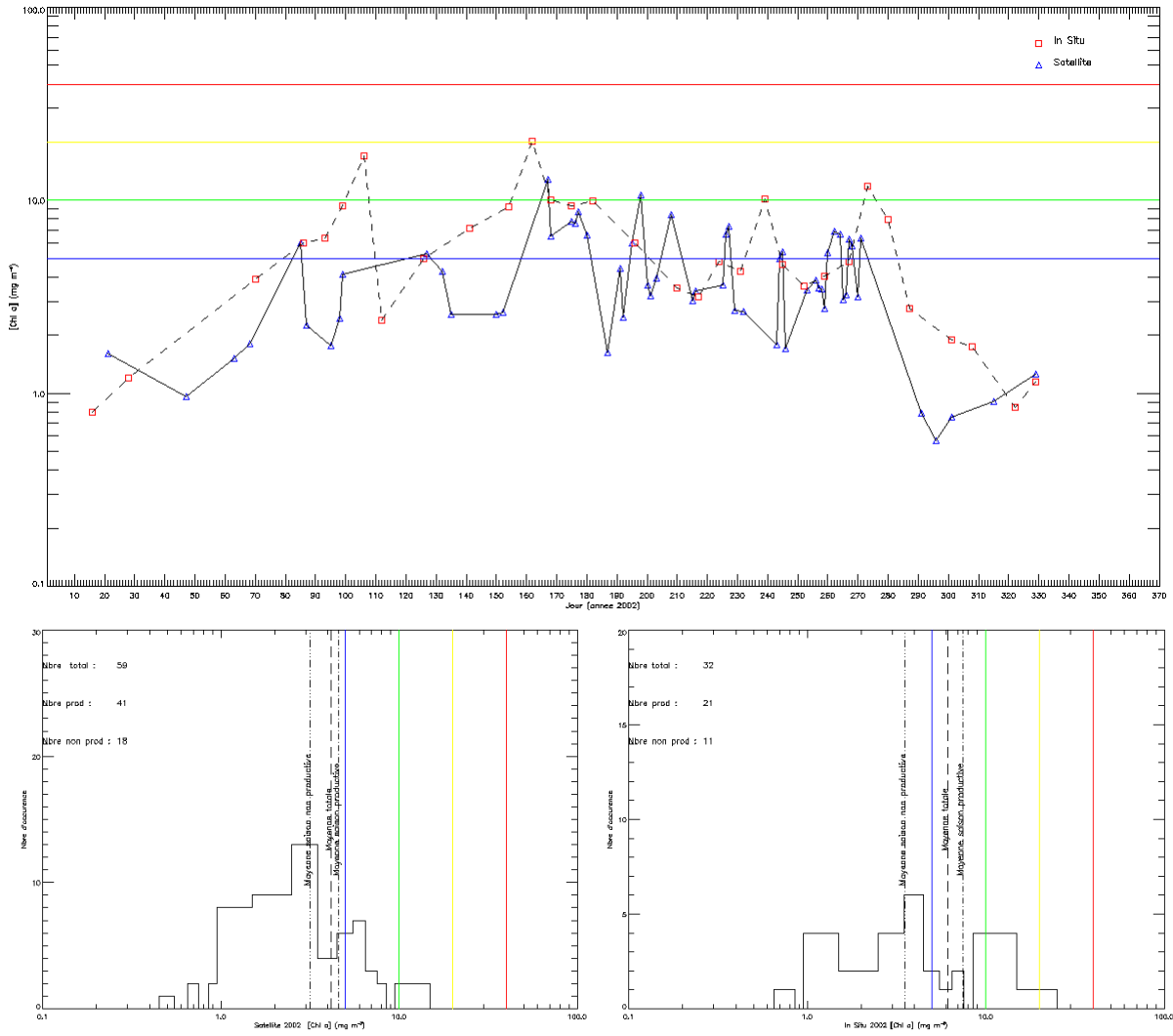
Graph. E.2 – Cycles de concentration de chlorophylle a pour l'année 1999

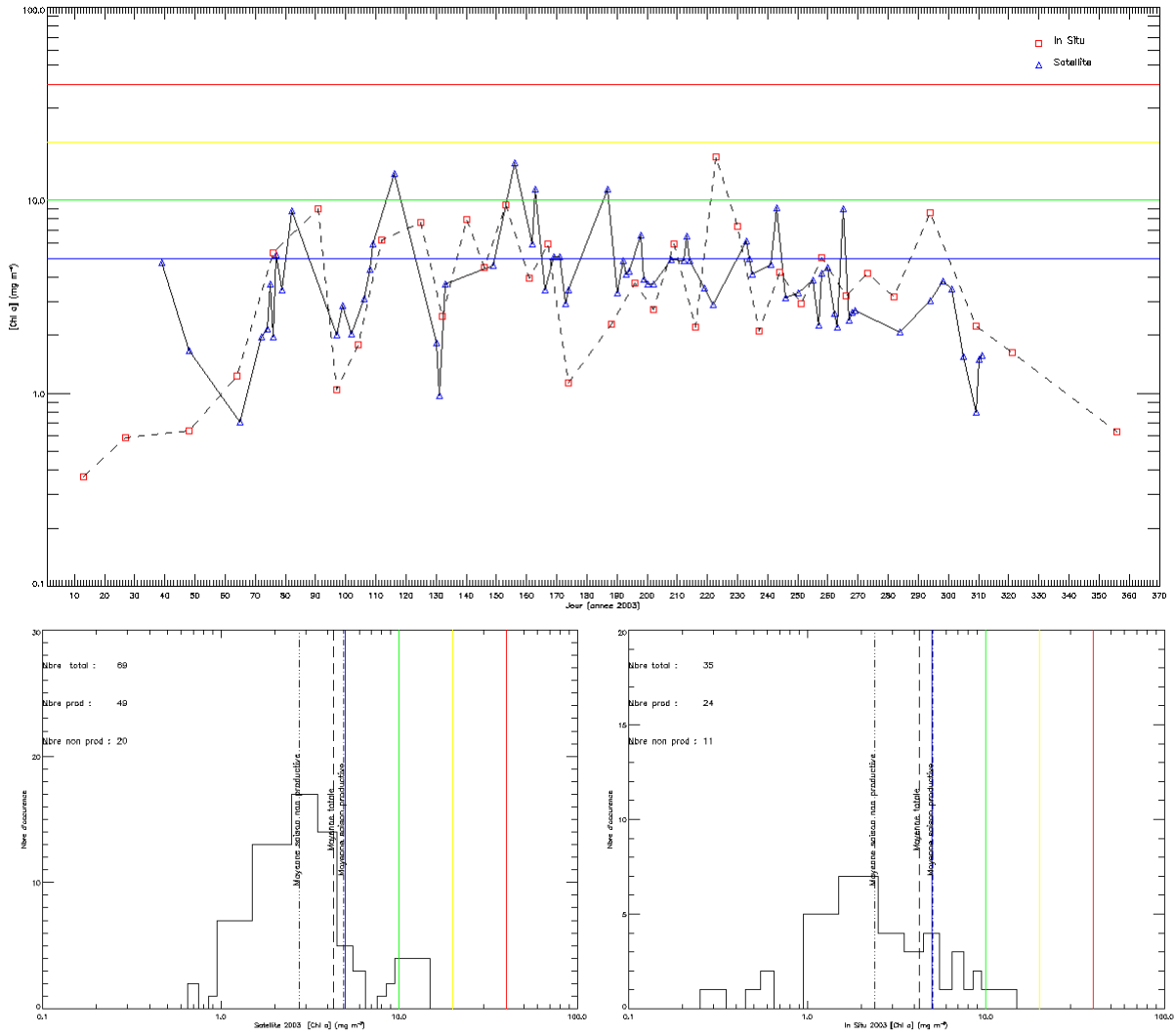


Graph. E.3 – Cycles de concentration de chlorophylle a pour l'année 2000



Graph. E.4 – Cycles de concentration de chlorophylle a pour l'année 2001





Graph. E.6 – Cycles de concentration de chlorophylle a pour l'année 2003