HAL
open science

Étude de la distribution des principaux groupes de phytoplancton par télédétection satellitaire: Développement de la méthode PHYSAT à partir des données GeP&CO et application à l'archive SEAWIFS entre 1998 et 2004.

Séverine Alvain

To cite this version:

Séverine Alvain. Étude de la distribution des principaux groupes de phytoplancton par télédétection satellitaire: Développement de la méthode PHYSAT à partir des données GeP&CO et application à l'archive SEAWIFS entre 1998 et 2004.. Climatologie. Université Paris-Diderot - Paris VII, 2005. Français. NNT : . tel-00157372

HAL Id: tel-00157372

https://theses.hal.science/tel-00157372v1

Submitted on 26 Jun 2007

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

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

UNIVERSITE PARIS 7 – DENIS DIDEROT

Thèse de doctorat
Spécialité : Méthodes Physiques en Télédétection

Étude de la distribution des principaux groupes de phytoplancton par télédétection satellitaire: Développement de la méthode PHYSAT à partir des données GeP&CO et application à l'archive SEAWIFS entre 1998 et 2004.

SEVERINE ALVAIN

Thèse dirigée par François - Marie BREON et préparée au
Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE/IPSL, CEA-CNRS)

Soutenue le 19 Décembre 2005, devant le jury composé de :

Mr Stéphane Jacquemoud	Président du jury
Mr David Antoine	Rapporteur
Mr Patrick Monfray	Rapporteur
Mme Corinne Le Quéré	Examinateur
Mr François-Marie Bréon	Directeur de thèse
Mr Cyril Moulin	Co-directeur de thèse
Mr Yves Dandonneau	Invité

REMERCIEMENTS

Pour commencer, je tiens à remercier Laurent Turpin et Pascale Delecluse pour m'avoir accueillie au LSCE, et pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes recherches durant ces 3 années.

Je souhaite également remercier les membres de mon jury, David Antoine, Patrick Monfray, Corinne Le Quéré, Stéphane Jacquemoud et Yves Dandonneau, pour leurs participations très constructives et leurs encouragements.
Les perspectives ouvertes par les travaux réalisés pendant ma thèse nous donnerons l'occasion de collaborer dans les années à venir, et c'est là ce que je considère comme l'une des plus belles réussites de ma thèse.

Si j'ai pu réaliser ces travaux novateurs et apporter ma petite pierre sur un terrain particulièrement « sensible» c'est également, et surtout, grâce à Cyril. Je tiens vraiment à te remercier, Cyril, pour ces 4 années. Merci de m'avoir donné un peu (beaucoup !) de ta confiance, de ton optimisme contagieux et de ton temps. Ce n'est pas rien d'avoir su gérer avec autant de souplesse la direction de ma thèse et d'avoir accepté, souvent, de prendre le risque de me soutenir dans des directions parfois inattendues ...
Je pense vraiment qu'une des raisons pour lesquelles nous avons pu faire ce « pas en avant », et mettre en place PHYSAT, réside dans notre confiance mutuelle. Je suis ravie de poursuivre aujourd'hui dans une voie qui me permet de continuer de collaborer avec toi, comme tu le dis souvent, « ça va être génial » !

Je tiens ensuite à faire une dédicace particulière à l'ancienne équipe POLDER dans laquelle j'ai débarqué un matin de novembre 2001 en « cdd », et qui m'a permis d'orienter mes recherches vers le bon objectif dans des conditions professionnelles optimales.
Une spéciale dédicace ici à Francois-Marie, qui a eu ensuite le délicat rôle essentiel de « vrai-faux » directeur de thèse et a toujours été disponible et très efficace quand il le fallait, à Fabienne ma « grande sœur » ;-), à Jean pour son aide aux moments clef des montages de dossiers, et puis aux autres « cdd », compagnons de route et de réunions POLDER, Marie-Pierre, Nicolas, et Zegbeu à qui revient la palme du meilleur soutien dans les moments de galère.
A tous merci pour ces bons moments partagés, même si aujourd'hui l'un d'entre nous n'est plus là. Je pense à toi Pierre, ta compétence et ta gentillesse nous manquent.

Si j'ai commencé ma thèse dans l'équipe POLDER, je l'ai finie dans deux équipes à la fois. Alors voilà, pour n'oublier personne, je dirais merci aux colocataires des locaux « polder » et du sympathique « chalet 712 », à « l'équipe assimilation », et à ceux avec qui j'ai pu partager un bon moment lors de ces 4 années au LSCE.

J'ai également eu la chance pendant ma thèse de pouvoir mettre en place des collaborations variées et enrichissantes. Je tiens donc à remercier ici Hubert Loisel, Sauveur Belviso, Laurent Bopp, et bien d'autres, en France ou ailleurs, pour les échanges que nous avons pu avoir. Et cela ne fait que commencer !

Dans une thèse, il y a le travail et les petits plus qui font que la recherche se fait sans qu'on s'en rende compte. Je tiens donc ici à saluer et remercier tous mes voisins de bureau (et il y en a eu beaucoup, c'est que je suis du genre sans bureau fixe…), mes collègues de « pause thé » ou de pique-nique, « les petits canards du LSCE » (même si la « science » m'a trop souvent éloignée du bord de la piscine… c'est qu'il n'y a pas de phytoplancton là dedans… quoique…).
Je cite ici, en vrac, et en espérant n'oublier personne (sinon merci de renvoyer le bon de réclamation figurant en bas de cette page à l'adresse indiquée au dos du paquet) : Sylvia, Juliette, Anne, Jérôme,

Amaëlle, François, Sarah, Céline, Sophie, Nicolas, Christiane, Diego, Arnaud, Sébastien, « les Cédric », Patricia, Pascale, Edouard, Claire, Christopher, Reidun…

Un gros merci également à l'équipe administrative du LSCE avec une pensée particulière pour Maryse, Cécile et Nathalie que j'ai eu l'occasion « d'embêter » de temps en temps et qui m'ont toujours répondu efficacement et avec le sourire.

Finir une thèse, c'est un peu atteindre un sommet avant d'en attaquer un autre. On fait une pause, on observe le chemin accompli et pour finir, on choisit la suite.
Si j'ai pu atteindre ce sommet, c'est qu'une succession d'éléments m'ont permis de mettre en dehors du chemin les embûches qui s'y trouvaient. Ces dernières étaient souvent qualifiées d'infranchissables, mais pour finir toujours franchies, souvent avec l'aide déterminante de quelques personnes clef.
Ainsi, j'ai eu la « chance organisée », de rencontrer sur mon parcours, Pierre Brasseur, Yves Dandonneau, Jean-Louis Etienne, Michel Fily, Patrick Monfray et Cyril Moulin. Chacun d'eux, au bon moment, a contribué à tracer ma route vers l'objectif que je me suis fixé depuis toutes ces années. Je leur en suis infiniment reconnaissante.

Et puis, loin de la recherche, souvent, il y a tous ceux qui, sans toujours bien comprendre ce qui nous pousse à « chercher », nous aide à garder le cap malgré les moments de doutes qui sont souvent servis en accompagnement avec le parcours de thésard. Je pense ici à ma famille, mes parents, mon grand père, mon frère Olivier et Evelyne, et à mes tantes pour leur soutien moral et matériel depuis toutes ces années. Merci également à Olivier C. pour son aide décisive de longue date, ainsi qu'à Sophie, Delphine, Emeric, Audrey et Nathalie pour « le fil qui se tient » malgré l'éloignement géographique.

Je ne peux imaginer écrire des remerciements sans penser à faire une spéciale dédicace à tous nos compagnons à 2 ou 4 pattes, à poils ou à plumes qui nous évitent de nous prendre au sérieux et nous disent tant de choses si nous prenons le temps de les « écouter ». La richesse de la nature est pour moi une source intarissable d'émerveillement et de motivations à « chercher » que j'espère pouvoir faire partager à l'avenir.

Merci également à la SNCF (si si…) pour m'avoir permis des escapades hebdomadaires vers ma province, me permettant ainsi de trouver un équilibre à Paris.

Voilà, j'espère n'avoir oublié personne, et si je peux finir par un vœux, ce serait celui d'avoir la possibilité de poursuivre dans la voie que j'ai choisie et d'y faire encore d'aussi belles rencontres et d'aussi beaux voyages que ces dernières années…

« Entre les murs de cristal des grands ciels, chacun de nous est apparemment libre. Et tout au long de son existence, mêlé à la nature, enveloppé de pluies, de vent ou d'air léger, tendu de passionnés efforts, vibrant d'ensoleillés plaisirs ou mordu de douleur, chacun de nous avance sans parvenir à comprendre, et pour lui-même il est sa propre énigme. »

Anita CONTI, *L'Océan, les bêtes et l'homme*

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE 1.....12

INTRODUCTION GENERALE.....12

1.1 L'océan et le climat.....12

1.1.1 Formation des océans.....12

1.1.2 Les océans, berceau de la vie.....12

1.1.3 Rôles des océans dans le climat actuel.....13

1.1.4 Importance de la biologie marine pour le changement climatique futur.....14

1.2 Observer la biologie marine depuis l'espace.....17

1.2.1 La couleur de l'eau : généralités.....17

1.2.2 Principe de la mesure.....19

1.3 Limitations, besoins et objectifs de la thèse.....23

1.3.1 Un défi à relever.....23

1.3.2 Le phytoplancton : diversité et rôles.....23

1.3.3 Définition des groupes de phytoplancton dont il est question dans ce manuscrit.....25

1.3.3 Plan et objectifs de la thèse.....28

CHAPITRE 2.....30

IDENTIFICATION DES GROUPES DOMINANTS DE PHYTOPLANCTON A PARTIR DES INVENTAIRES DE PIGMENTS GEP&CO.....30

2.1 Les campagnes Gep&Co.....30

2.1.1 Présentation générale.....30

2.1.2 Méthodes de mesures.....31

2.1.3 Résultats antérieurs de GeP&CO.....34

2.1.4 Pigments utilisés.....37

2.2 Identification des groupes dominants dans les inventaires GeP&CO.....38

2.2.1 Choix des critères pigmentaires.....38

2.2.2 Labellisation des inventaires de pigments colocalisés en terme de groupes dominants.....39

CHAPITRE 3.....44

RELATION ENTRE GROUPES DE PHYTOPLANCTON DOMINANTS ET SPECTRES DE LUMINANCE MARINE.....44

3.1 SeaWiFS : caractéristiques et utilisations.....44

3.1.1 Caractéristiques du capteur.....44

3.1.2 Produits disponibles.....44

3.1.3 Analyses des données SeaWiFS.....45

3.2 Variabilité des spectres de nLw en fonction des groupes dominants*.....49

3.2.1 Recherche des points coïncidents.....49

3.2.2 Spectres de nLw* associés aux groupes dominants identifiés.....50

3.2.3 : Discussion sur le choix des critères pigmentaires.....55

CHAPITRE 4.....60

DEVELOPPEMENT D'UN ALGORITHME DE DETECTION DES GROUPES DE PHYTOPLANCTON DOMINANTS A L'ECHELLE GLOBALE.....60

4.1 La méthode PHYSAT.....60

4.2 Premiers résultats globaux pour l'année 2001.....64

4.3 Significations des régions non labellisées.....72

4.3.1: Identification des blooms de coccolithophoridés avec PHYSAT.....73

4.3.2 : Identification des Trichodesmium.....78

4.3.3 : Un signal Particulier dans l'océan Austral : Phaeocystis ?.....83

CHAPITRE 5.....88

REPARTITION ET SUCCESSION DES GROUPES DE PHYTOPLANCTON DOMINANTS A L'ECHELLE GLOBALE SUR LA PERIODE SEAWIFS.....88

5.1 Océan Mondial.....89

5.1.1 Groupes dominants et tendances générales.....89

5.1.2 Cycles saisonniers de chaque groupe....92
5.1.3 Variabilités interannuelles sur la période 1997-2004....93
5.2 Atlantique Nord....98
5.2.1 Groupes dominants et tendance générale....98
5.2.2 Cycles saisonniers de chaque groupe....101
5.2.3 Variabilités interannuelles sur la période 1997-2004....102
5.3 Océan Austral....106
5.3.1 Groupes dominants et tendance générale....106
5.3.2 Cycles saisonniers de chaque groupe....109
5.3.3 Variabilités interannuelles sur la période 1997-2004....110
5.4 Pacifique Equatorial....115
5.4.1 Groupes dominants et tendance générale....115
5.4.2 Cycles saisonniers de chaque groupe....117
5.4.3 Variabilités interannuelles sur la période 1997-2004....117

CHAPITRE 6....124

UTILISATION DE PHYSAT POUR L'AMELIORATION DU PRODUIT SEAWIFS « CONCENTRATION EN CHLOROPHYLLE A » 124
6.1 Un algorithme « couleur de l'eau » dépendant des groupes....124
6.1.1 Etat de l'art....124
6.1.2 Analyse de la base NOMAD avec PHYSAT 125
6.1.3 Application à des données SeaWiFS globales....129
6.1.4 Validation de l'algorithme OC4-SD....131

CHAPITRE 7....136

UTILISATION DE PHYSAT POUR LA VALIDATION DES MODELES DE BIOGEOCHIMIE MARINE 136
7.1 PHYSAT et modèles biogéochimiques: premières études et applications potentielles....136
7.1.1 Pacifique Equatorial : suivi de El Niño....138
7.1.2 La floraison printanière de l'Atlantique Nord....141
7.2 Groupes de phytoplancton et paramètres marins....142

CONCLUSION ET PERSPECTIVES....148

BIBLIOGRAPHIE....153

ANNEXE 1....162

Remote sensing of phytoplankton groups in case 1 waters from global SeaWiFS imagery, S. ALVAIN, C. MOULIN, Y. DANDONNEAU and F.M. BREON, Deep Sea Research I 52 (2005), 1989-2004....162

ANNEXE 2....164

A SPECIES-DEPENDENT BIO-OPTICAL MODEL OF CASE I WATERS....164
FOR GLOBAL OCEAN COLOR PROCESSING....164

ANNEXE 3....182

PHYSAT : ETUDES COMPLEMENTAIRES....182

ANNEXE 4....201

VALEURS DE LA TABLE UTILISEE POUR NORMALISER LES SPECTRES DE LUMINANCES SeaWIFS 201

ANNEXE 5 - COMPLÉMENT DU CHAPITRE 5....203

Pacifique Nord....203
Océan Indien....206
La Mer Méditerranée....210
L'Océan Atlantique des campagnes AMT....213

ANNEXE 6....217

CARTES GLOBALES PHYSAT MENSUELLES AU QUART DE DEGRE de septembre 1997 à décembre 2004 :....217

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GENERALE

1.1 L'océan et le climat

1.1.1 Formation des océans

Il y a 4.5 milliards d'années, la Terre était une sphère de poussières et de débris cosmiques qui, sous l'effet de leur masse, se sont peu à peu agglomérés. Puis, la jeune Terre a continué à disperser sa chaleur dans l'atmosphère primitive. L'eau, déjà présente, ne pouvait l'être que sous forme gazeuse en raison de la température. Cependant, il y a environ 4 milliards d'années, la température de l'atmosphère a diminué et est descendue sous les 100°C. L'eau a alors pu condenser et former lacs, mers et océans par l'intermédiaire de pluies diluviennes. Le décor est planté, reste à s'y installer…

1.1.2 Les océans, berceau de la vie

L'océan primitif disposait de toutes les caractéristiques nécessaires à l'apparition de la vie et, dans un premier temps, à la création de molécules simples. Celles-ci se sont accumulées dans l'océan, formant ce que l'on appelle la « soupe primitive ». Dans ce milieu propice, les premières algues microscopiques sont apparues vers 3.7 milliards d'années, dans les eaux tièdes et peu profondes. Ces algues, comme tous les végétaux, utilisaient du dioxyde de carbone et rejetaient du dioxygène dans l'atmosphère. Elles ont peu à peu colonisé une grande partie des océans et se sont agglomérées sous forme de constructions calcaires appelées « stromatolites », que l'on peut encore observer de nos jours sur certaines côtes, en particulier australiennes (Figure 1.1.1). Le dioxygène, dégagé en grande quantité et sur une longue période, s'est accumulé dans l'atmosphère, contribuant à la création d'une Terre propice à l'apparition d'êtres vivants de plus en plus complexes, jusqu'à ceux que nous connaissons aujourd'hui.

Figure 1.1.1 : *Colonnes stromatolitiques à Shark Bay, au Nord Ouest de l'Australie*

1.1.3 Rôles des océans dans le climat actuel

De nos jours encore, l'océan joue un rôle essentiel dans l'équilibre de la 'machine climatique' qu'il est essentiel de comprendre et d'évaluer globalement. La première interaction de l'océan avec le climat s'effectue de façon mécanique par l'intermédiaire des courants. Ainsi, les eaux tropicales reçoivent une grande quantité d'énergie qui est transportée vers les plus hautes latitudes. Ces masses d'eau chaude se refroidissent et s'évaporent au contact de l'air froid, puis s'alourdissent, engendrant ainsi les courants qui transportent les composés dissous ou les algues marines…

Conjointement à l'action mécanique des courants, les océans jouent les rôles de réservoirs, de puits ou de sources, pour de nombreux éléments chimiques, régulant ainsi leur composition dans l'atmosphère. Pour illustrer ce rôle de régulation, le cas du carbone est particulièrement adapté en raison de son importance bien connue dans l'effet de serre. Le carbone anthropique émis dans l'atmosphère participe également au réchauffement des températures observé ces dernières années (rapport IPCC). Il joue donc un rôle clé dont il est essentiel de connaître les paramètres régulateurs.

Pour bien comprendre la place des océans dans la régulation du carbone (Figure 1.1.2), il faut savoir que le système océanique en contient environ 50 fois plus que le réservoir atmosphérique. Ce carbone est stocké dans l'océan par l'intermédiaire de processus chimiques dépendant de paramètres comme la température, la biologie ou les mouvements de masses d'eau. Ainsi, le processus de solubilité permet de dissoudre directement l'excès de CO_2 atmosphérique dans les eaux de surface lorsque les conditions sont favorables. Ceci s'effectue par une réaction avec l'eau (H_2O), les carbonates (CO_3^{2-}) et bicarbonates ($2HCO_3$-) :

$$CO_2 + H_2O + CO_3^{2-} \text{<----->} 2HCO_3^-$$

A l'échelle globale, l'océan pompe du CO2 dans les régions tempérées et aux hautes latitudes, et en rejette une moins grande quantité au niveau des tropiques, ce processus étant fortement dépendant de la température. La solubilité est toutefois une voie lente et limitée de stockage du carbone car elle s'effectue uniquement dans la couche superficielle de l'océan, seule à être en contact régulier avec l'atmosphère.

Une deuxième voie de stockage passe par ce que l'on appelle la 'pompe biologique'. En effet, les océans sont peuplés d'une végétation principalement constituée de phytoplancton. Ce terme regroupe l'ensemble des organismes végétaux microscopiques incapables de maintenir une distribution spatiale indépendante de celle des masses d'eau qui les contiennent. On les trouve dans toutes les eaux de surface du globe et ils peuvent représenter jusqu'à 95% de la production primaire marine. Ils comportent de nombreux groupes aux particularités propres mais aux caractéristiques végétales communes. Leur rôle de premier maillon de la chaîne alimentaire marine et de régulation des espèces chimiques dans l'océan en fait un domaine de recherche essentiel et passionnant.

Lors de leur croissance, les cellules de phytoplancton absorbent du carbone par le processus de la photosynthèse : chaque plante utilise la lumière, le dioxyde de carbone et l'eau pour créer sa propre matière et se nourrir. Les cellules de phytoplancton absorbent ainsi pendant leur croissance des nutriments (dont les principaux sont les phosphates, les nitrates, la silice et le fer) et fixent du carbone tout en rejetant de l'oxygène. À leur mort, ou lors de l'excrétion de détritus, une partie du carbone fixé se dissout et forme ce que l'on appelle le DOC (Dissolved Organic Carbon), ou se regroupe sous forme d'agrégats dits POC (Particulate Organic Carbon) qui coulent et exportent le carbone dans les couches profondes des océans. Une partie de ces particules sera ainsi stockée dans les sédiments, tandis qu'une autre retrouvera la surface après une très longue période, par les processus physiques (courants,

mélanges, ou mouvement du manteau) extrêmement lents. En bout de chaîne, les DOC et POC sont reminéralisés sous forme de DIC (Dissolved Inorganic Carbon) par l'intermédiaire d'autres organismes (bactéries) ou par les rayons ultra-violets.

1.1.4 Importance de la biologie marine pour le changement climatique futur

On sait aujourd'hui que l'océan a la capacité d'absorber le supplément anthropique à l'échelle des siècles à venir (Bolin and Eriksson, 1959), ce qui n'est pas le cas du réservoir atmosphérique qui, d'après nos connaissances actuelles, risque d'être rapidement saturé (Cox et al., 2000, Friedlingstein et al., 2001). Les processus de régulation du carbone via l'océan sont donc une des clefs de la régulation du carbone dans l'atmosphère. Cependant, le problème réside dans la vitesse à laquelle l'océan peut stocker le surplus de carbone (Broecker and Takahashi, 1977, Archer et al., 1997). Ne perdons pas de vue également que ce qui régule ces mécanismes est dépendant d'éléments qui pourraient bien évoluer rapidement, rendant l'océan plus ou moins efficace dans son rôle de pompe…

Des études récentes montrent que le changement climatique en cours a tendance à diminuer la quantité de carbone absorbée par l'océan (Figure 1.1.3). Ceci est en partie expliqué par l'augmentation de la température des eaux de surface et donc de la stratification, ce qui entraîne un apport moindre de nutriments en surface et des changements dans les processus de solubilité (Maier-Reimer, 1996, Sarmiento et al. 1999, Le Quéré et al. 2000, Bopp et al., 2001). Des études sont actuellement menées à l'aide de modèles globaux du carbone océanique (OGCM) pour mieux comprendre et quantifier ces interactions entre biogéochimie marine et climat (Orr et al. 2001, Le Quéré et al. 2003). Les conclusions actuelles sont que les rétroactions climat et cycle du carbone pourraient être responsables d'une augmentation supplémentaire de 10 à 50 % du CO2 atmosphérique d'ici 2100 !
Des bouleversements liés à la biologie marine, et encore mal connus, pourraient advenir suite au réchauffement des eaux de surface, comme par exemple l'allongement de la période de floraison ou des changements de composition des groupes de phytoplancton. Chaque groupe phytoplanctonique possède en effet des capacités différentes à fixer du carbone et à l'exporter vers le fond. Ces questions sont donc primordiales et le travail de thèse que j'ai réalisé s'inscrit directement dans ce cadre.

L'exemple du carbone abordé ci-dessus montre qu'il est indispensable d'avoir une connaissance approfondie des éléments qui entrent en jeu dans les réactions chimiques qui s 'effectuent dans l'océan. Une telle connaissance doit permettre de mieux appréhender les impacts présents et futurs des variations naturelles ou anthropiques du climat. Ceci passe par l'utilisation combinée d'outils comme les observations en mer, par satellite, et par l'élaboration et la validation de modèles couplés tenant compte de la physique, de la chimie et de la biologie dans l'océan. Au cours du travail de thèse présenté dans ce manuscrit, je me suis attachée à améliorer les possibilités offertes par la télédétection satellitaire afin de disposer d'un suivi plus adapté à l'étude du rôle de la biologie marine dans le cadre du changement climatique.

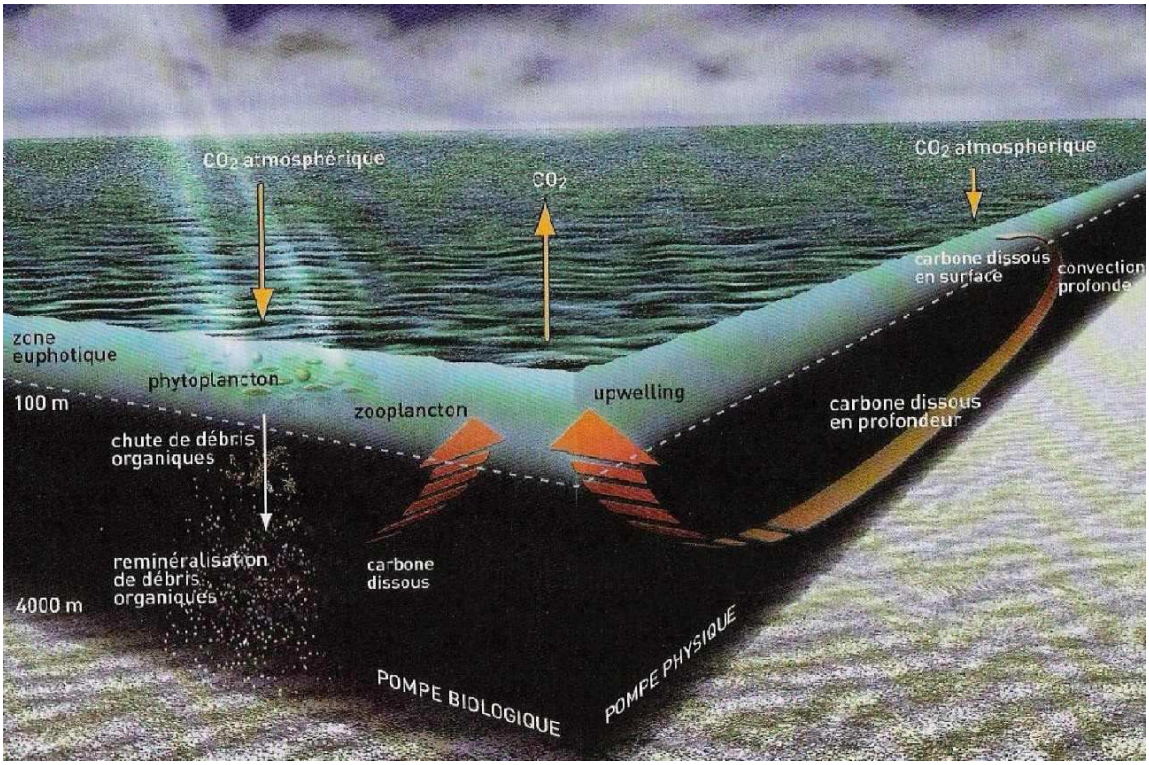


Figure 1.1.2 : *L'océan puits de carbone ; représentation schématique des processus d'échanges de carbone entre l'atmosphère et l'océan. Document tiré du hors Série 'La recherche- Les océans' en 2004.*

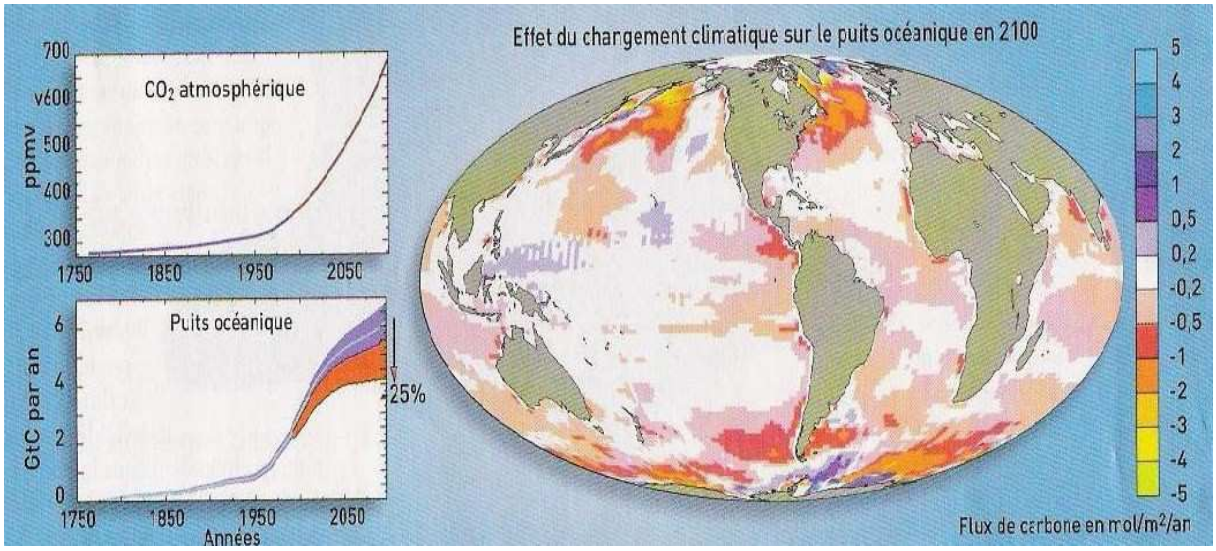


Figure 1.1.3 : *A gauche, en haut, courbe de l'augmentation du CO2 dans l'atmosphère à partir d'observations sur la période 1750-2000 (en bleu) et à partir de scénarios pour 2000-2100. A gauche en bas, estimation du puits océanique à partir de dix modèles du projet OCMIP (bleu) qui font l'hypothèse d'un climat constant. D'autres modèles, en rouge, incluent l'effet du changement climatique sur le puits de carbone. Ils montrent que l'effet du changement climatique peut diminuer le puits océanique de 25% en 2100. La carte globale de droite représente l'effet du changement climatique en 2100 sur les flux de carbone. On observe une réduction des flux de carbone principalement aux hautes latitudes. Document tiré du hors Série 'La recherche- Les océans' en 2004.*

1.2 Observer la biologie marine depuis l'espace

1.2.1 La couleur de l'eau : généralités

Il existe de nombreuses méthodes d'observation de la biologie marine avec en premier lieu, et depuis longtemps, les campagnes en mer, essentielles mais limitées dans l'espace et dans le temps. La fin des années 1970 a vu l'apparition d'un nouvel outil permettant d'observer l'océan, à l'échelle globale et quasiment en continu : les techniques de mesure par satellite et les moyens informatiques associés.

Depuis l'espace, il est ainsi possible d'observer une grande gamme de paramètres utiles à l'étude et à l'appréhension du fonctionnement du système océanique. Cela va de la détermination de la température, de l'altitude, de la vitesse des courants, des vents ou de ce qui va nous intéresser particulièrement par la suite : la 'couleur de l'océan'. Cette dernière appellation imagée s'applique à la technique de quantification de la concentration de la chlorophylle *a,* ce pigment présent dans tous les végétaux et utile à la photosynthèse. La détermination de la concentration en chlorophylle *a* est classiquement utilisée comme indicateur de la quantité de biomasse phytoplanctonique dans les eaux de surface.

Les océans présentent une grande variété de couleurs, allant du bleu profond au gris vert jusqu'à des tons plus rouges, dont on peut observer les nuances depuis l'espace. Pour les eaux non côtières, ces variations sont dues, au premier ordre, aux interactions de la lumière incidente avec l'eau, avec les cellules de phytoplancton et avec les composés organiques qui les accompagnent. Tous ces éléments engendrent des variations spectrales de la lumière réfléchie par les eaux de surface. L'étude de ces variations nous renseigne sur différents paramètres dont la concentration en chlorophylle *a* ou 'couleur de l'océan' (Figure 1.2.1). La télédétection de ce dernier paramètre a débuté en 1978 par le lancement du capteur CZCS (*Coastal Zone Color Scanner).* Il s'est poursuivi depuis, avec toutefois une interruption assez longue entre 1986 et 1996, jusqu'aux plus récents instruments, POLDER (POLarization and Directionality of the Earth's Reflectances), MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer) ou encore SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor), lancé en 1997 et toujours en activité. Ce dernier capteur présente la particularité d'être le seul à couvrir la période de 1997 à 2005, et c'est la raison pour laquelle je l'ai utilisé pendant ma thèse.

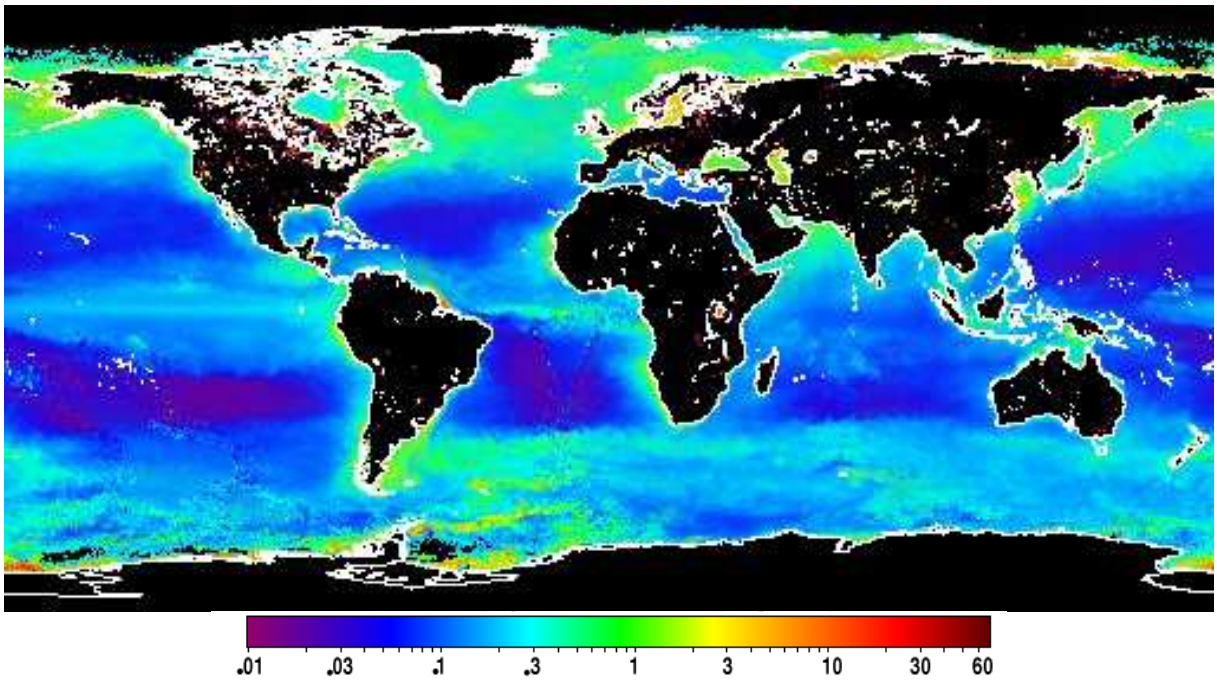


Figure 1.2.1 : *Carte de concentration moyenne de Chlorophylle a (mg.m^{-3}) pour l'année 2001, réalisée à partir de synthèses journalières de données du capteur SeaWiFS.*

1.2.2 Principe de la mesure

Voici, de façon relativement simplifiée, le principe de la quantification de la concentration en chlorophylle *a* depuis les capteurs embarqués sur satellite. De nombreux aspects de cette détermination ne seront pas détaillés ici, mais sont disponibles et accessibles dans de nombreux ouvrages et articles sur ce sujet (Morel et Gordon 1980, Morel et Gentili 1996). Notons également que tout ce qui est présenté par la suite est valable pour ce que l'on appelle les eaux « du cas 1 », c'est-à-dire les eaux du large, dont les propriétés optiques ne sont pas affectées par autre chose que l'eau de mer, le phytoplancton et les produits associés.

En règle générale, l'eau de mer nous paraît bleue à l'œil (depuis une distance raisonnable au-dessus de la surface), en raison de sa forte absorption dans les longueurs d'onde vertes et au-delà. La principale composante de la lumière réfléchie vers l'espace est donc préférentiellement dans les tons bleu. Cependant, il est en réalité rare que l'eau de mer soit constituée d'eau uniquement. Il existe dans l'océan ouvert toute une variété de constituants (phytoplancton, détritus associés) qui vont modifier la manière dont la lumière va interagir avec la couche de surface des océans. Ainsi, au premier ordre, les variations de la couleur de la mer sont liées à la concentration en pigments chlorophylliens avec, en premier lieu, la chlorophylle *a*. Le pic d'absorption de ce dernier pigment est situé dans les longueurs d'onde du 'bleu', là ou l'eau de mer absorbe le moins. Les modifications de la couleur de l'eau qui en résultent sont parfaitement connues et détectables depuis les capteurs dédiés à cela, c'est-à-dire effectuant des mesures dans les longueurs d'onde du visible adaptées. Il est ainsi possible, via des algorithmes spécifiques, d'obtenir une information concernant le contenu en chlorophylle *a* des couches superficielles de l'océan. Il faut garder à l'esprit ici qu'une des limites de ces observations concerne la profondeur optique observée, qui n'est pas fixe. On sait que 90% de la lumière réfléchie par les couches superficielles de l'océan provient de ce que l'on appelle la première profondeur de pénétration, soit en moyenne sur les premières dizaines de mètres (Morel et al, 1988 et 1998, Gordon et al 1988). On sait aussi que dans le cas d'eaux très stratifiées, où le profil vertical est très contrasté, la détermination de la concentration en chlorophylle *a* par satellite peut être biaisée (Stramska and Stramski, 2005). Ces situations sont toutefois assez exceptionnelles et nous considérerons par la suite que l'information fournie par les capteurs est représentative de l'ensemble de la couche supérieure de l'océan.

Pour les applications dites « couleur de l'eau », les capteurs mesurent directement le flux radiatif dans une direction donnée, par unité d'angle solide et par unité de surface projetée appelée plus simplement « luminances marines directionnelles » . Les mesures de luminances s'effectuent suivant une géométrie schématisée dans la figure 1.2.2. Par soucis pratiques, ces luminances sont généralement transformées en « remote sensing reflectance » ou Rrs, sachant que le lien entre les deux est défini par :

$$Rrs\ (0+\ ;\ \theta,\ \phi) = Lw\ (0+\ ;\ \theta,\ \phi)\ /\ Ed\ (0+) \quad (1.2.1)$$

Avec Rrs(0+ ; θ, ϕ) : Rrs juste au-dessus de la surface pour les angles (θ, ϕ), Lw (0+ ; θ, ϕ) la luminance sortante juste au-dessus de l'interface dans la direction (θ, ϕ) et Ed(0+) l'éclairement au-dessus de la surface.

Les réflectances présentent l'avantage d'être affranchies de la géométrie de l'observation. C'est aussi le cas des luminances marines dites normalisées, ou nLw, qui sont en quelque sorte les luminances telles qu'elles seraient observées si le satellite faisait toutes ses mesures au nadir, sans atmosphère et avec le soleil au zénith. On les définit par :

$$nLw(\lambda) = Rrs(0+ ; \theta, \phi) / Eo(\lambda) \qquad (1.2.2)$$

Avec $Eo(\lambda)$ l'éclairement solaire au sommet de l'atmosphère, dont les valeurs sont bien connues.

Pour mon travail de thèse, j'ai utilisé les mesures du capteur SeaWiFS, dédiées à la couleur de l'eau. Comme tous les capteurs embarqués à bord d'un satellite, SeaWiFS se trouve au-dessus de l'atmosphère terrestre. Il doit donc observer la surface des océans à travers cet écran, hautement diffusant et qui interagit avec le rayonnement de façon importante. Pour obtenir les nLw à partir des luminances mesurées par le capteur il faut donc tenir compte des effets de l'atmosphère. Cela restreint les études à des « fenêtres » de longueurs d'onde pour lesquelles la transmission de la lumière est suffisante pour les applications souhaitées. Les études dites « couleur de l'eau » classiques nécessitent des mesures dans la fenêtre des longueurs d'onde du visible, entre 400 et 700 nm. Cependant, les effets atmosphériques se font toujours sentir puisque la part du signal marin (recherché) sur le signal total au sommet de l'atmosphère n'excède pas 10%. Le reste du signal provient, à ces longueurs d'onde, des interactions de la lumière avec les molécules de l'atmosphère (eau, gaz) et les aérosols (Gordon et al, 1997). Il est donc essentiel d'estimer la contribution atmosphérique pour être en mesure de déduire du signal total mesuré la part du signal marin. C'est ce que l'on appelle les corrections atmosphériques (Gordon et al, 1997).

Si la contribution moléculaire est assez bien connue, celle des aérosols est en revanche plus délicate à estimer. Des algorithmes ont été et sont toujours développés dans ce sens en utilisant généralement des mesures effectuées dans le proche infra rouge, là où le signal marin est nul ou faible (Gordon et Wang, 1994, Gordon 1997). Dans ces longueurs d'onde le signal mesuré est donc essentiellement atmosphérique, il est alors possible de quantifier la contribution des aérosols à partir de la dépendance spectrale de ce signal et d'en corriger l'effet en extrapolant vers les plus courtes longueurs d'onde.

Une fois ces corrections effectuées, on utilise des modèles bio-optiques permettant de retrouver les concentrations en chlorophylle *a*. Il en existe deux grandes catégories, les premiers dits « classiques » consistent à établir des relations empiriques simples, à partir d'études statistiques, entre les concentrations en chlorophylle *a* et les données radiométriques mesurées. Sachant que la chlorophylle *a* présente un maximum d'absorption vers 440 nm et son minimum vers 550 nm (figure 1.2.3), le rapport des luminances ou réflectances à ces deux longueurs d'onde apporte une information sur le contenu de l'eau en chlorophylle *a* (Morel et al., 1988).

L'algorithme de traitement des données SeaWifS, correspondant aux données de niveau 3 utilisées pendant cette thèse, s'appelle actuellement OC4v4. Il est basé sur le rapport entre le maximum des nLw à 443, 490 et 510 nm sur la valeur de nLw à 555 nm (O'Reilly et al., 2000).

$$\log(Chl\ a) = a \log4(r) + b \log3(r) + c \log2(r) + d \log(r) + e \qquad (1.2.3)$$

avec r qui correspond au rapport « bleu /vert » :

$$r = \max(Rrs(443),Rrs(490),Rrs(510)) / Rrs(555) \quad (1.2.4)$$

et les facteurs a: -1,532 b : 0,649 c : 1,93 d : -3,067 et e : 0,366.

Dans la suite de cette thèse, toutes les valeurs de concentration en chlorophylle *a* font référence à l'équation (1.2.3), sauf indications contraires.

Notons qu'il existe également des algorithmes dits semi-analytiques qui mêlent des approches physiques à des relations empiriques. Ils permettent de mieux comprendre les causes des variations de la couleur de l'eau, mais sont moins précis que les algorithmes empiriques pour des applications comme la quantification du contenu en chlorophylle *a* (O'Reilly et Maritorena, 1998).

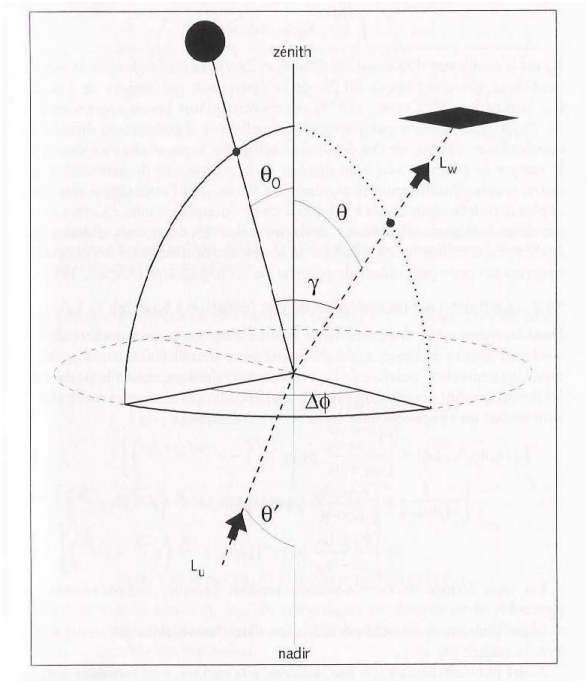


Figure 1.2.2 : *Représentation schématique de la géométrie de la mesure par satellite. D'après Morel et Gentili 1996.*

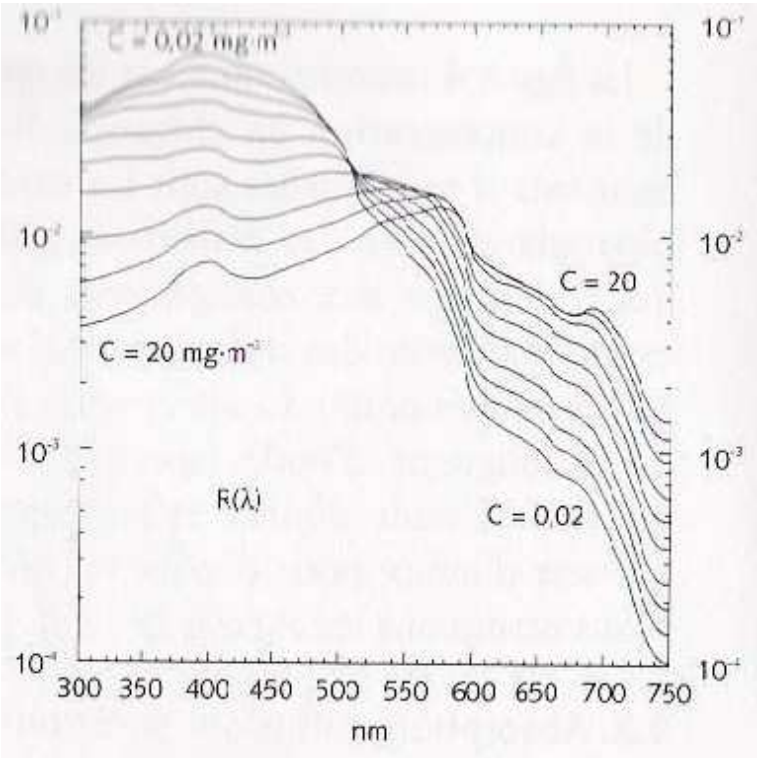


Figure 1.2.3 : *Spectre de réflectances pour diverses concentrations en chlorophylle a, Morel, 1988.*

1.3 Limitations, besoins et objectifs de la thèse

1.3.1 Un défi à relever

On dispose donc depuis plus de 20 ans de cartes globales de concentration en chlorophylle *a* (Figure 1.2.1). Ces cartes sont utilisées dans de nombreuses études visant à mieux comprendre la répartition de la végétation marine, son évolution dans le temps et dans l'espace, ou encore ses interactions avec d'autres paramètres. Cependant, la combinaison mesures en mer et détermination de la 'couleur de l'océan' ne donne qu'une vision simplifiée de la variabilité végétale océanique car elle n'apporte pas de renseignements sur la distribution des groupes de phytoplancton à l'échelle globale. Or, on sait que la distribution des groupes phytoplanctoniques est pilotée par les conditions physico-chimiques qui règnent au sein des masses d'eau (température, oxygène, nutriments…) mais aussi par les mouvements de celle-ci. Les différentes provinces océaniques voient ainsi se succéder, au fil des saisons et des conditions, des groupes phytoplanctoniques variés que la quantification de la chlorophylle *a* ne permet pas d'étudier.

Des études portant sur l'observation de certains groupes de phytoplancton par satellite avaient déjà été réalisées avant cette thèse. En effet, certaines floraisons de diatomées, de *coccolithophoridés*, ou encore de *Trichodesmium* se distinguent par des propriétés optiques très particulières en raison de la présence de coquilles de silice, de calcaire, ou de mucus blanchâtre, tous très réfléchissants. Ces caractéristiques ont permis l'élaboration d'algorithmes de détection de ces espèces, basé sur des valeurs spécifiques des luminances marines (Martin-Traykovski et al., 1998 ; Brown et al, 1994 ; Moore etal., 2002 ; Subramaniam et al, 2002 ; Sathyendranath et al, 2004).

D'autres recherches ont été réalisées à partir d'études des conséquences de la présence d'un groupe de phytoplancton particulier sur les propriétés optiques de l'eau de mer ou directement à partir de l'étude des propriétés d'absorption ou de rétro diffusion par les cellules de phytoplancton (Garver et al., 1994, Bricaud et al. 1988 et 1998, Stramski et al., 2001, 2002, Oubelkheir et al. 2005).

Cependant, ces approches ou bien concluaient à l'impossibilité d'identifier des groupes dominants depuis l'espace en raison de la complexité des interactions engagées, ou restaient limitées à quelques groupes, ou encore nécessitaient des informations préalables in situ et ne permettaient pas de caractériser un grand nombre d'eaux de surface. Un grand défi restait donc à relever au début de ma thèse : établir une méthode permettant de distinguer différents groupes de phytoplancton à partir de mesures spatiales, à l'échelle globale, au-delà de la concentration en chlorophylle *a* (De Young et al., 2004, Prentice et al., 2005).

1.3.2 Le phytoplancton : diversité et rôles

Sur terre, il existe une grande diversité de groupes végétaux, depuis les forêts denses des zones équatoriales aux herbes des savanes d'Afrique en passant par les régions tempérées et leur végétation que nous connaissons bien. De la même façon, les océans sont peuplés de nombreux groupes végétaux microscopiques, regroupés sous le terme de phytoplancton. Des critères de taille permettent classiquement de séparer les groupes de phytoplancton. Le picoplancton (inférieur à 2 µm), le nanoplancton (entre 2 µm et 20 µm) et le microplancton au-delà et jusqu'à quelques millimètres. Cette organisation des groupes présente l'avantage d'être basée sur un critère facilement accessible, mais a pour inconvénient de ne pas tenir compte des caractéristiques intrinsèques des groupes.

Une autre approche consiste donc à regrouper le phytoplancton par groupes fonctionnels (ou PFT pour Phytoplankton Functional Type), en se basant sur leurs processus biologiques de croissance et de mortalité (Table 1.3.1) (Claustre 1994, Falkowski et al. 1998, Bouman et al. 2003, Le Quéré et al. sous presse). Même si cette tâche n'est pas aisée, on peut tendre vers cela en utilisant différentes techniques,

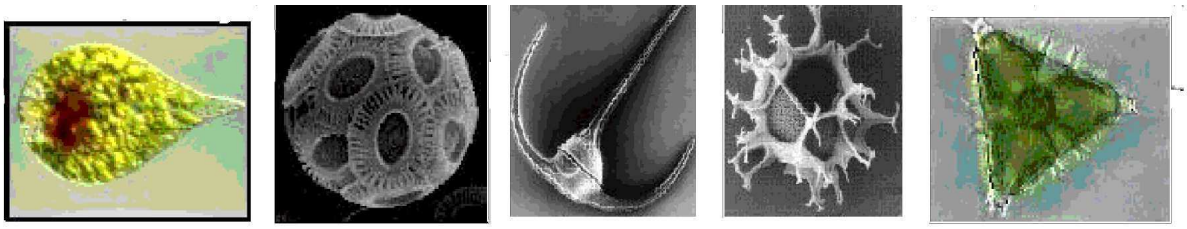
basées par exemple sur les différentes compositions en pigments autres que la chlorophylle *a*, ou encore par l'utilisation du marquage génomique.

Nom du PFT	Processus particulier(s)
Pico-hétérotrophes (Bactéries hétérotrophes)	Croissance rapide avec la possibilité de re-minéraliser la matière organique (particulaire et dissoute).
Pico-autotrophes *(Synechococcus/ Prochlorococcus)*	Participe peu à l'export de matière mais a une forte sensibilité à la lumière et aux nutritifs, ce qui lui permet d'occuper les zones oligotrophes et de participer ainsi à la production primaire de façon non négligeable
Fixateur d'azote (pico) (*Trichodesmium*)	Ce PFT peut utiliser l'azote de l'atmosphère contrairement aux autres PFTs, ce qui favorise sa croissance dans certaines régions.
Phytoplancton calcifiants (nano) (coccolithophoridés)	Utilise le calcaire pour former leur coquille et participe ainsi de façon efficace à la fixation et à l'export de carbone.
Producteurs de DMS (nano) *(Phaeocystis)*	Ce PFT est un producteur de DMS (dimethylsulfide) et affecte ainsi le cycle du souffre atmosphérique et la création d'aérosols.
Phytoplancton siliciants (micro) (diatomées)	Représente une grande partie du micro-phytoplancton et participe de façon importante à la production primaire et à l'export de carbone lors de floraisons de printemps. Ce PFT a besoin de silice et de fer pour sa croissance.
Phytoplancton « mixe »	Rassemble les phytoplanctons sans processus particuliers identifiés.

Table 1.3.1 : *Définitions des différents groupes phytoplanctoniques fonctionnels (PFT) d'après Le Quéré et al., 2005.*

Ainsi, certains groupes présentent la particularité de former des floraisons intenses lorsque les conditions leur sont favorables. C'est notamment le cas des Diatomées (ou Bacillariophycées) de taille moyenne à grande (microplancton) qui possèdent une carapace silicieuse et apprécient donc les eaux riches en silice, plutôt froides et avec un faible éclairement. Les Diatomées forment des floraisons de printemps importants et ont, grâce à leur taille, une vitesse de sédimentation plus élevée que les autres algues. Elles sont donc particulièrement efficaces pour transporter le carbone fixé pendant leur croissance vers le fond des océans. A l'opposé de ces grosses cellules, on trouve des groupes de picoplancton comme les Prochlorophytes, amateurs d'eaux chaudes et ensoleillées, capables de se protéger du soleil mais très peu efficaces en termes d'export de carbone vers les fonds…

Au-delà des deux exemples présentés ci-dessus, il existe donc une palette de phytoplancton de taille, de forme et de préférences trophiques aussi large qu'étonnante, dont je présente quelques exemples dans la figure 1.3.1. D'un point de vue pigmentaire, la plupart des groupes possèdent un inventaire propre, avec des pigments dits « bio marqueurs » spécifiques qui permettent de les différencier. J'ai utilisé cette méthode de spéciation, dont je reparlerai, pour identifier les différents groupes de phytoplancton.



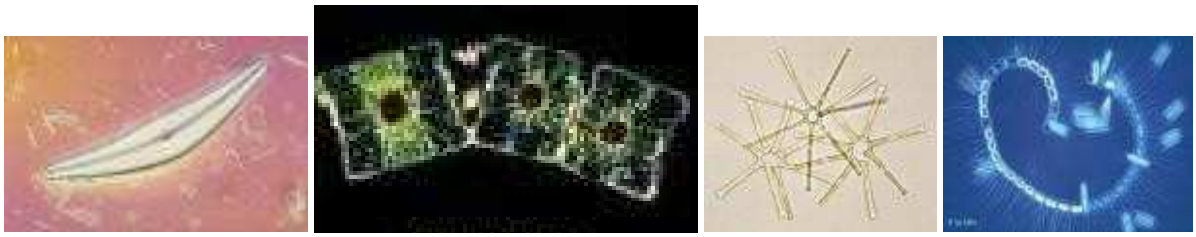


Figure 1.3.1: *Exemples de phytoplancton pour différents groupes, en haut, avec de gauche à droite, Cyanobactéries, Coccolithophoridés, Dinoflagellés, Diatomées et Haptophytes. En bas : exemples de cellules phytoplanctoniques à l'intérieur du groupe des diatomées (origines des photographies : LOB Marseille, LOV Villefranche-sur Mer).*

Dans la suite de ce manuscrit, nous tendrons donc vers cette catégorisation des différents ensembles de phytoplancton. Cependant, nous utiliserons le terme « groupe » plutôt que PFT pour caractériser plus aisément les sous-ensembles de phytoplancton dont il sera question. Il est toutefois important de signaler que, dans l'absolu, le terme « groupe » a également un sens bien précis dans l'arborescence taxonomique qui ne correspond pas intégralement à celui que nous lui donnerons. Certains des groupes ainsi définit plus en déatil ci-dessous sont en fait, d'un point de vue biologique, des classes, des genres (en italiques dans le texte), ou des PFTs.

1.3.3 Définition des groupes de phytoplancton dont il est question dans ce manuscrit

Voici succinctement les caractéristiques de chacun des groupes de phytoplancton au sens ou nous l'entendons dans la suite de ce manuscrit (Jeffrey et al. 1997 ; Y. Dandonneau communications personnelles ; documents IFREMER).

Les diatomées (micro phytoplancton, Figure 1.3.2a) :

Les diatomées sont un des constituants majeurs du phytoplancton aux moyennes et hautes latitudes, ainsi que dans les upwellings côtiers et équatoriaux car elles abondent surtout dans les eaux froides et riches en nutriments. Ce sont des algues des milieux riches printaniers. Elles contribuent de façon importante à la production océanique et à l'export de matière vers les fonds en raison de leur grande taille qui facilite leur sédimentation. Elles ont en majorité une taille comprise entre 20 et 200 µ m et peuvent former des chaînes. Les diatomées se constituent une paroi formée de silice et ont particulièrement besoin de fer, ce qui limite leur croissance en milieux dépourvus de ces éléments.

Les dinoflagellés (micro phytoplancton, Figure 1.3.2b) :

Les dinoflagellés (ou péridiniens) se présentent comme de simples cellules, nues ou entourées de cellulose. Ils sont présents dans tous les océans et occupent une place importante dans la contribution à la production primaire, la plupart du temps sans dominer réellement les assemblages phytoplanctoniques. Ainsi, une recherche dans les données de la station BATS, aux Bermudes, des campagnes en mer GeP&CO et AMT (Aiken et al. 2000) a montré que les concentrations relatives (par rapport à la chlorophylle *a*) en « péridinine » ne sont jamais significatives par rapport aux critères définis par Mackey et al. (1997). Ils sont plus nombreux cependant dans les régions tempérées et polaires, en été et en automne. Leur taille va de 10 à 200 µm bien que certaines cellules peuvent s'associer en longues chaînes ou colonies. Des flagelles leur permettent parfois de se stabiliser et même d'effectuer certains déplacements ou migrations verticales.

Les haptophytes (nano phytoplancton, Figure 1.3.2.e) :

Les haptophytes (ou prymnesiophytes) forment un groupe très abondant dans les mers froides et se présentent soit sous forme de cellules isolées sans flagelles, soit réunies en colonie. Les cellules sont parfois enfouies dans une enveloppe de mucus gélatineux. Ce type de phytoplancton accumule l'azote et le phosphore et aime particulièrement la présence d'ammonium et de nitrate, d'où la formation de floraisons spectaculaires le long de certaines côtes, du genre phaeocystis, entraînant une épaisse couche de mousse sur les plages… Notons que les coccolithophoridés et les phaeocystis sont associés au groupe haptophytes en terme de pigments mais sont séparés en terme de PFT. En effet, les premiers sont des organismes calcifiants et les seconds des producteurs de DMS.

Les cyanobactéries (pico phytoplancton Figure 1.3.2.c) :

Les cyanophycées planctoniques sont assimilées à des algues phytoplanctoniques de très petite taille associées au pico plancton (<2 µm). De formes variées, le plus souvent sphériques ou en colonies filamenteuses, elles sont dépourvues de véritable noyau. Elles sont surtout caractéristiques des mers chaudes et des milieux oligotrophes, mais on en trouve également dans l'Océan Austral.
On peut citer le cas particulier des *Trichodesmium* qui sont des cyanobactéries responsables de la coloration qui a donné son nom à la Mer Rouge. Les *Trichodesmium* sont présents également dans d'autres régions et ils sont associés à un PFT particulier, les fixateurs d'azote.

Les Prochlorococcus (pico phytoplancton Figure 1.3.2.d) :

Les *Prochlorophytes* sont habituellement classés avec les *Synechococcus* ou cyanobactéries. Cependant, leurs caractéristiques pigmentaires singulières nous permettent de les isoler (la Divinylle Chlorophylle *a* remplace la chlorophylle *a*). Leur importance et leur abondance au sein du picoplancton ont été mises en évidence par Chisholm and Morel, 1991.

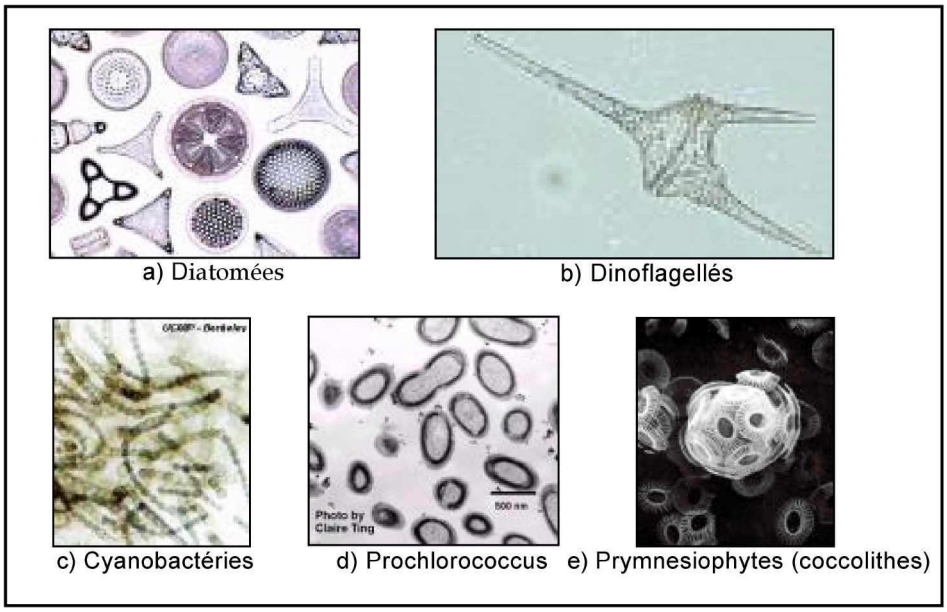


Figure 1.3.2 *: Quelques exemples de cellules des différents groupes phytoplanctoniques tels que définit dans ce manuscrit : diatomées (microplancton), dinoflagellés (microplancton), cyanobactéries (picoplancton), Prochlorococcus (picoplancton), et prymnesiophytes (nanoplancton en général). Il est important de noter que ce ne sont que des exemples et qu'une grande variété de forme et de taille se rencontre au sein de chaque groupe.*

1.3.3 Plan et objectifs de la thèse

Durant ma thèse, j'ai travaillé au développement d'un algorithme permettant de relier des signatures spectrales particulières à la présence de groupes de phytoplancton dans la masse d'eau au moment de la mesure. Pour cela, je me suis basée sur l'analyse du changement des propriétés optiques de l'eau de mer d'un assemblage de groupes à un autre, à partir de deux types de données : les mesures en mer de compositions pigmentaires (chlorophylle *a* et autres pigments) des campagnes Gep&CO (dont nous reparlerons) et les mesures spatiales coïncidentes du capteur SeaWiFS. L'étude parallèle de ces mesures m'a permis d'identifier un signal spécifique pour certains groupes de phytoplancton, comme les haptophytes, *Prochlorococcus*, SLC (pour Synechococcus like cyanobacteria), ou encore les diatomées.

Le travail concernant le traitement des données et l'identification des groupes dominants de phytoplancton dans les mesures en mer est présenté au chapitre 2. Ensuite, la recherche de signaux satellitaires spécifiques, associés à chaque groupe, est présentée dans le troisième chapitre.

L'élaboration de la méthode complète d'identification des groupes, appelée PHYSAT, et les premiers résultats obtenus sont présentés dans le chapitre quatre.

A l'aide de PHYSAT, il a ensuite été possible, pour la première fois, d'identifier des signaux spécifiques associés à des groupes de phytoplancton dominants à l'échelle globale, pour la période de données SeaWiFS, de Novembre 1997 à Décembre 2004. Ces premiers résultats globaux sont présentés dans le chapitre cinq.

Dans le sixième et le septième chapitre de mon manuscrit, je montre comment l'utilisation de la méthode PHYSAT peut permettre d'améliorer la quantification de la chlorophylle *a* ou encore la validation des modèles de biogéochimie marine.

Enfin je présente dans le dernier chapitre les perspectives ouvertes par l'utilisation, ou le perfectionnement, de la méthode élaborée durant ma thèse, ainsi que la conclusion de mon travail.

CHAPITRE 2

IDENTIFICATION DES GROUPES DOMINANTS DE PHYTOPLANCTON A PARTIR DES INVENTAIRES DE PIGMENTS GeP&CO

Ce chapitre reprend en partie des résultats présentés dans un papier disponible en annexe et publié dans la revue Deep Sea Research I.

2.1 Les campagnes Gep&Co

2.1.1 Présentation générale

Une des clefs essentielles de la réussite de mon travail de thèse a été l'accès aux données des campagnes en mer GeP&CO (*Geochemistry, phytoplankton, and color of the Ocean*). Ces campagnes ont été réalisées dans le cadre du programme national PROOF (PROcessus biogéochimiques dans l'Océan et Flux,), sous la direction de Yves Dandonneau (LOCEAN, Paris). Elles avaient pour but de caractériser et de comprendre la variabilité des populations de phytoplancton et d'établir des liens avec la biogéochimie des océans. Ce travail représente un maillon important vers l'implémentation de la biogéochimie marine dans les simulations de changement climatique. Ainsi, les campagnes GeP&CO ont consisté en des trajets pluriannuels entre la France (Le Havre) et la Nouvelle-Calédonie (Nouméa), durant lesquels des mesures ont pu être effectuées en continu. Les trajets ont été réalisés à bord du porte conteneur 'Contship London', dont une salle était aménagée pour les prélèvements et certaines analyses.

La première campagne GeP&CO a eu lieu en novembre 1999 et la dernière en août 2002, à raison d'une campagne tous les trois mois. Les parcours des campagnes traversent une large gamme d'écosystèmes, à commencer par l'Atlantique nord, puis la Mer des Caraïbes, le golfe du Mexique, de Panama, le Pacifique équatorial, la région subtropicale du Pacifique sud pour finir par la Mer de Tasmanie (Figure 2.1.1). À l'issue de ces campagnes, la floraison printanière de l'Atlantique nord a été observé par trois fois, tout comme les variations saisonnières des autres régions. Les principales caractéristiques de chaque campagne Gep&Co sont données dans la Table 2.1.1. Il est important de signaler que les trois premières campagnes Gep&Co ont dues être éliminées des données utilisées en raison d'un défaut dans la mesure des pigments. En dehors de ces trois premières campagnes, toutes les mesures ont été réalisées par un unique opérateur suivant le même protocole appliqué aux mêmes instruments.

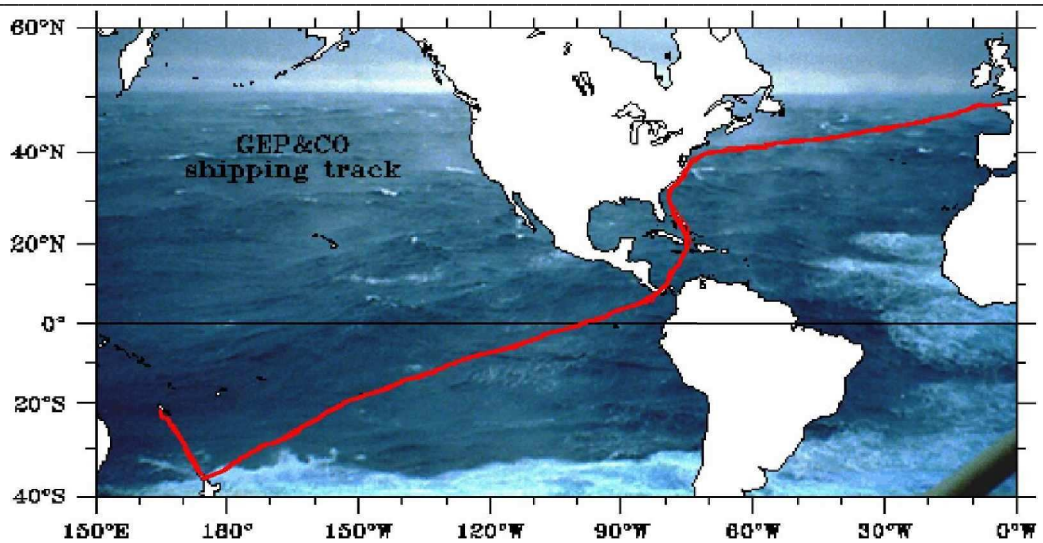


Figure 2.1.1 : *Trajet classique des campagnes Gep&Co, depuis Le Havre (France) jusqu'à Nouméa (Nouvelle Calédonie)*

	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Période	23/07/00 25/08/00	16/10/00 20/11/00	15/01/01 16/02/01	10/04/01 13/05/01	09/07/01 12/08/01	03/10/01 07/11/01	01/01/02 06/02/02	30/03/02 04/05/02	25/06/02 01/09/02

Table 2.1.1 : *Description des 9 campagnes GeP&CO dont les données ont été utilisées : noms et dates de début et de fin de campagne.*

2.1.2 Méthodes de mesures

Une cabine dédiée aux campagnes GeP&CO a pu être aménagée pour les prélèvements d'eau de mer à l'intérieur du navire marchand 'Contship London'. Ainsi, des échantillons d'eau (de 1 à 3 litres) ont pu y être filtrés et conservés pour des études ultérieures à terre, après avoir été prélevés en salle des machines toutes les 4 heures (i.e. 6 :00, 10 :00, 14 :00, 18 :00 et 22 :00). Les échantillons étaient recueillis à une profondeur d'environ 5 m sous la surface. La durée du trajet 'Le Havre' – 'Nouméa' était de 38 jours, auxquels venaient s'ajouter la même durée pour le retour et quelques semaines de stockage par -80°C, pour prévenir toutes dégradations des propriétés optiques ou biologiques des échantillons.

Les échantillons étaient stockés dès leur retour en France, au Laboratoire d'Océanographie Biologique d'Arcachon (pigments par HPLC), au LOCEAN (Chlorophylle *a,* CO2), au département de biologie marine de Bordeaux (Coccolithophoridés), ou encore à Roscoff et à la Réunion pour des comptages en cytométrie (par Jean Blanchot). Dans le cadre de ma thèse, je me suis principalement intéressée à ces dernières mesures. En voici donc succinctement le principe, détaillé de façon plus complète sur le site internet des campagnes GeP&CO (http://www.lodyc.jussieu.fr/gepco). La méthode de mesure employée, pour les pigments dits photosynthétiques, est la mesure par HPLC (High Performance Liquid Chromatography). Cela consiste à plonger les filtres des campagnes dans 2 ml de méthanol pur pendant une heure à 4°C, dans l'obscurité, après les avoir soumis à des ultrasons pendant quelques secondes. Le liquide ainsi extrait est refiltré pour retirer toute particule solide et chargé dans un système de séparation par chromatographie. Les pigments de l'échantillon sont ainsi séparés et détectés par absorption à 440 nm selon une méthode adaptée de Georicke and Repeta (1993). Un logiciel permet ensuite de convertir les données recueillies en concentration pour chaque pigment individuel.

Pour les pigments dits chlorophylliens, la méthode de mesure employée est la

spectrofluorométrie. Les mesures ont été réalisées au LOCEAN à Paris. Les échantillons dilués à l'acétone sont placés dans un spectrofluoromètre, puis centrifugés. Ensuite, un sous-échantillon est prélevé et placé dans une cellule de quartz de 1cm x 1cm permettant ainsi d'étudier son spectre d'excitation-émission fluorométrique. Tous ces spectres sont ensuite étudiés, d'après une adaptation de la méthode de Neveux et Lantoine (1993), qui suppose que l'ensemble des mesures de fluorescence d'un échantillon est la somme des contributions individuelles de chaque pigment isolé.

Chaque inventaire est composé de 22 pigments, mesurés par la méthode HPLC pour les pigments chlorophylliens et/ou par spectrofluorométrie pour les pigments photosynthétiques (ou caroténoïdes). L'ensemble des pigments est présenté dans la table 2.1.2.

Nom du pigment	Notation	Méthode de mesure	Message Taxonomique	Utilisé dans cette these ?
Chlorophylle a	Chl-a	Spectro +HPLC	Tous sauf Prochlorophytes	**OUI**
Chlorophylle b	Chl-b	Spectro + HPLC	Chlorophytes, Prasinophyte et Euglophytes	NON
Chlorophylle c2	Chl-c	Spectro + HPLC	Crytpophytes, Bacillariophytes, Dinophytes, Haptophytes	NON
Pheophytine a	Pheo-a	Spectro	Dégradation de Chl-a	**OUI**
Pheophytine b	Pheo-b	Spectro	Dégradation de Chl-b	NON
Pheophytine c2	Pheo-c2	Spectro	Dégradation de Chl-c2	NON
Divinyl Chlorophylle a	d-Chla	Spectro + HPLC	Prochlorophytes	**OUI**
Divinyl Chlorophylle b	d-Chlb	Spectro + HPLC	(trace) Prochlorophytes	NON
Divinyl Pheoph. a	d-Pheoa	Spectro	Dégradation de d-Chla	NON
Divinyl Pheoph. b	d-Pheob	Spectro	Dégradation de d-Chlb	NON
Chlorophylle c3	Chl-c3	Spectro + HPLC	Haptophytes et Chrysophytes	NON
Pheophytine c3	Pheo-c3	Spectro	Dégradation de Chl-c3	NON
Peridinine	Perid	HPLC	Dinophytes	**OUI**
19'-Butanoyloxyfucoxanthine	19'BF	HPLC	Haptophytes et Chrysophytes	NON
Fucoxanthine	Fuco	HPLC	Bacillariophytes (diatoms), Haptophytes, Chrysophytes (en faible abondance)	**OUI**
19'-Hexanoyloxyfucoxanthine	19'HF	HPLC	Hapotphytes principalement, chrysophytes	**OUI**
Prasinoxanthine	Prasi	HPLC	(trace) Prasinophytes	NON
Violaxanthine	Viola	HPLC	Chlorophytes, Prasinophytes	NON
Diadinoxanthine	Diadino	HPLC	Euglenophytes, bacillariophytes, Dinophytes, Haptophytes, Chrysophytes	NON
Alloxanthine	Allo	HPLC	(trace) Cryptophytes	NON
Zeaxanthine	Zea	HPLC	Cyanobacteria,Prochlorophytes	**OUI**
Béta- carotène	Béta-car	HPLC	Carotenoides et autres	NON

Table 2.1.2. *Description des vingt-deux pigments mesurés pendant les campagnes GeP&CO avec leur notation, leur message taxonomique principal associé, la, ou les, méthode(s) de mesure employée(s) (Jeffrey et al., 1997, Mackey et al., 1997) et leur utilisation ou non pour les travaux présentés dans cette thèse.*

Notons que pour pour la Divinyl Chlorophylle *a*, la méthode spectrofluorométrique a été préférée à celle par HPLC. Ce choix a été fait à la suite d'un exercice d'inter calibration réalisé pour quelques échantillons avec le laboratoire d'océanographie de Villefranche-Sur-Mer. La Figure 2.1.2 montre que les mesures GeP&CO du pigment Divinyl Chlorophylle *a* par HPLC sont fortement éloignées des mesures de Villefranche (par HPLC également), ce qui n'est pas le cas des mesures GeP&CO par spectrofluorométrie.

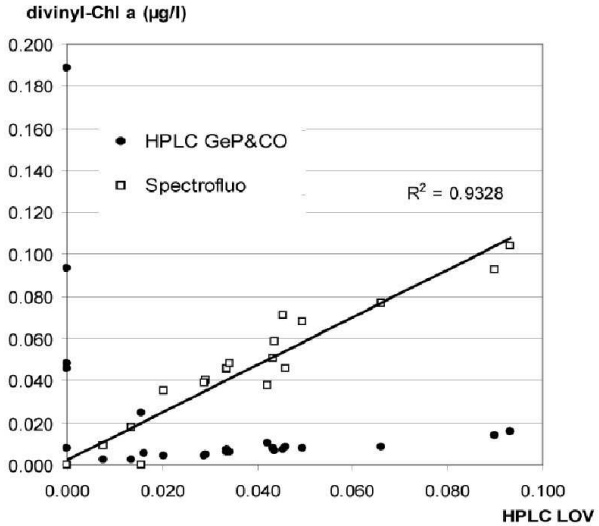


Figure 2.1.2 : *Comparaison des mesures HPLC et Spectrofluorométrique de Divinyl Chlorophylle a des campagnes GeP&CO avec des mesures HPLC effectuées au LOV.*

2.1.3 Résultats antérieurs de GeP&CO

Les campagnes GeP&CO ont déjà été analysées dans le cadre d'études diverses de la variabilité des populations de phytoplancton. Deux articles reprennent les principaux résultats de ces campagnes (Dandonneau et al., 2004 et Dandonneau et al., 2005). On trouvera en figure 2.1.3 la localisation des 7 régions traversées à plusieurs reprises par le navire lors des trajets GeP&CO. Ces régions correspondent à celles qui ont été définies par Longhurst (1991).

Les campagnes pluriannuelles et les études des principaux pigments biomarqueurs montrent que l'écosystème de la région de l'Atlantique Nord (NADR) est dominé par le nanoplacton (ou haptophytes ici), avec plus de 70% de la biomasse. Le microplancton (les diatomées ici) est également présent au moment de la floraison de printemps et parfois en été. Plus à l'Ouest, l'Atlantique Nord (NWCS) est également dominé par le nanoplancton mais de façon plus contrastée qu'à l'Est, avec une oscillation nette entre les populations de printemps et d'hiver. Ainsi, le microplancton est présent au printemps, le picoplancton (les *Prochlorococcus*) apparaît ensuite en été et automne, pour laisser la place au nanoplancton en hiver.

En continuant le trajet GeP&CO, on arrive en Mer des Caraïbes (CARB) où les mesures s'accordent pour dire que cette région est pauvre en termes de chlorophylle *a*. Dans ce milieu, ce sont les groupes du picoplancton qui dominent, avec notamment un grand nombre de *Prochlorococcus*.

La région du contre-courant équatorial du Pacifique (PNEC) est particulière en termes de courants et de couches de mélange. Une forte remontée de nutriments, favorables à la croissance du phytoplancton, explique les relativement fortes concentrations de chlorophylle *a* rencontrées dans cette région en hiver. C'est aussi une province océanique directement affectée par le phénomène climatique El Niño. Cependant, les campagnes GeP&CO ont montré que la composition du phytoplancton est relativement constante, avec une contribution à la fois du nano et du picoplancton toute l'année. Le

picoplancton est toutefois plus présent, surtout en début d'année.

La province océanique de la divergence équatoriale Pacifique (PEQD) est une région avec une variabilité saisonnière très faible. C'est aussi une zone dite HNLC (pour High Chlorophylle Low Nutrients) et largement occupée par le nanoplancton, les picoeucaryotes et les cyanobactéries. Les comptages de *Prochlorococcus* ont montré que leur présence est également importante dans cette région.

Le gyre pacifique sub-tropical (SPSG) est quant à lui une zone constamment oligotrophe avec des concentrations en chlorophylle *a* très faibles. D'après les campagnes GeP&CO, le picoplancton y représente toujours plus de 50% de la biomasse pigmentaire avec une contribution importante des *Prochlorococccus.*

La dernière région traversée par les campagnes GeP&CO se situe au nord de la Nouvelle Zélande (ARCB). On y observe un cycle saisonnier net, avec le nanoplancton dominant sauf lors de l'été austral où le picoplancton domine. Les *Prochlorococcus* sont abondants pour toutes les campagnes.

Ce tour d'horizon rapide des résultats des campagnes GeP&CO montre que les différentes régions océaniques du globe sont occupées par des micro paysages marins très différents. Les cycles saisonniers sont également plus ou moins marqués selon les localisations géographiques. Tout cela est très important en termes d'influence des écosystèmes marins sur les différents cycles des éléments chimiques présents dans l'océan. Cette approche, basée sur l'étude de quelques régions géographiques variées à partir de mesures en mer ponctuelles, est essentielle mais elle serait efficacement complétée si de telles observations pouvaient être réalisées à partir de données globales.

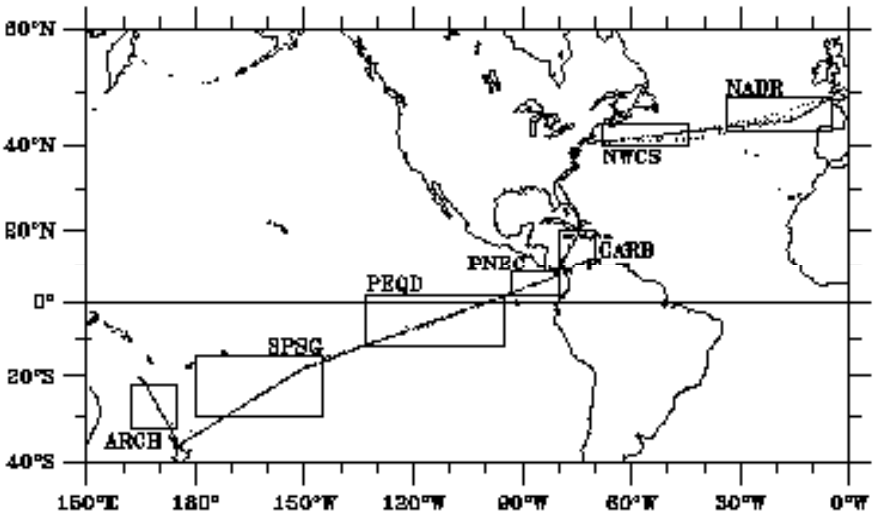


Figure 2.1.3 : *Localisation des observations effectuées lors des campagnes GeP&CO (pointillés), et régions océaniques étudiées (encadrés) avec du Nord au Sud et d'Ouest en Est, la province Nord Atlantique du drift (NADR), de l'Est (NWCS), la Mer des Caraïbes (CARB), le contre courant équatorial Pacifique (PNEC), la divergence du Pacifique équatorial (PEQD), le gyre subtropical Pacifique (SPSG) et un dernier bassin (ARCH) Dandonneau et al. 2004.*

2.1.4 Pigments utilisés

L'objectif est maintenant de tenter d'associer aux inventaires GeP&CO un groupe dominant de phytoplancton à partir des pigments caractéristiques, dans le but d'étudier par la suite le signal satellitaire correspondant. Nous considérerons donc dans ce chapitre uniquement les 176 inventaires GeP&CO (sur 1502 au total) pour lesquels on dispose des mesures coïncidentes du satellite SeaWiFS. Je reviendrai plus en détail sur la sélection de ces données dans le chapitre 3.

Les inventaires de pigments sont communément utilisés pour identifier les différents groupes fonctionnels de phytoplancton (Mackey et al., 1996 ; Vidussi et al., 2001 ; Barlow et al., 2002). Les campagnes GeP&CO ont ainsi pour but de décrire les variations saisonnières et interannuelles des populations de phytoplancton en se basant sur des mesures de pigments présentées ci-dessus. Cette base de données homogènes, de par les méthodes de mesures employées, couvre une grande variété de types d'eau en termes de phytoplancton, depuis la floraison printanière de l'Atlantique Nord jusqu'aux régions pauvres du Pacifique Sud. Cela offre une chance exceptionnelle de relier un éventuel signal mesuré par satellite aux groupes de phytoplancton dominant dans l'océan à l'échelle globale.

Parmi les 22 pigments mesurés pendant les campagnes GeP&CO (table 2.1.2), beaucoup ne sont pas caractéristiques d'un seul groupe, mais peuvent au contraire apparaître dans plusieurs d'entre eux. J'ai donc commencé par simplifier l'ensemble du jeu de données en conservant uniquement les pigments caractéristiques (ou biomarqueurs) d'un groupe, et ceux pour lesquels les concentrations mesurées n'étaient pas la plupart du temps nulles ou presque pendant les campagnes GeP&CO. C'est ainsi que, dans le cadre de ma thèse, j'ai utilisé uniquement 7 des 22 pigments mesurés pendant les campagnes GeP&CO (table 2.1.2, dernière colonne), dont 5 sont caractéristiques d'un groupe (les deux autres pigments étant la chlorophylle *a*, utilisée comme référence pour normaliser et la pheophytine *a*, produit de dégradation, utilisée comme indicateur de la « propreté » des eaux »). Il devient alors possible de rechercher 5 groupes de phytoplancton potentiellement dominants dans la base de données GeP&CO : les *Prochlorococcus*, les diatomées, les dinoflagellés, les haptophytes et les SLC (pour *Synechoccocus* Like Cyanobactéria).

2.2 Identification des groupes dominants dans les inventaires GeP&CO

2.2.1 Choix des critères pigmentaires

Cinq des sept pigments que nous avons conservé pour cette étude (table 2.1.2) sont caractéristiques d'un groupe de phytoplancton et peuvent être utilisés pour en détecter la présence dans un échantillon d'eau. Si cela est communément admis et utilisé, les critères concernant la concentration relative de chaque pigment pour chaque groupe restent très variables dans la littérature. Un travail d'étude des différents articles et méthodes de lecture des messages taxonomiques a donc dû être réalisé. Le critère traditionnellement utilisé pour ce genre d'étude est le ratio de pigment, P_{rel} défini par :

$$P_{rel} = P / (\text{Chl a} + \text{d-Chl a}) \qquad (2.2.1)$$

où P est la concentration mesurée du pigment dans l'eau de mer, et Chl *a* et d-Chl *a* respectivement la concentration en chlorophylle a et en divinyl chlorophylle a.

Il existe un logiciel, nommé CHEMTAX, développé au CSIRO en Australie, qui a pour but d'estimer les pourcentages respectifs des groupes de phytoplancton à partir d'inventaires de pigments (Mackey et al., 1996). Différents tests effectués à partir de ce logiciel n'ont pas été concluants en raison de la forte variabilité des résultats obtenus et du manque de visibilité et de contrôle des étapes du traitement. De plus, certains seuils en pigments de ce logiciel ont été fixés pour des types d'eaux spécifiques qui ne sont pas représentatifs de l'océan global (type d'eau côtière d'Australie par exemple).

Enfin, CHEMTAX ne peut s'appliquer de manière efficace que dans des régions où une expertise précise des groupes a été réalisée préalablement, ce qui n'est pas le cas pour les zones échantillonnées lors des campagnes GeP&CO. Cela nous a cependant permis d'envisager un traitement plus simple à partir d'un principe proche, basé sur des seuils moyens sur chaque pigment, définis par la littérature.

Finalement, les critères permettant de caractériser un maximum d'inventaires de pigments en termes de groupes dominants ont été principalement basés sur l'analyse bibliographique de Mackey et al. (1996) pour les populations des eaux équatoriales et tropicales et, sur l'étude de Lampert (2001), pour les eaux de l'Atlantique Nord. La table 2.2.1 résume les concentrations relatives trouvées dans la littérature pour les cinq biomarqueurs de notre étude et pour les cinq principaux groupes recherchés : les diatomées, les haptophytes, les cyanobactéries, les *Prochlorococcus* et les dinoflagellés.

	Div *a*	**perid**	**fucox**	**19'HF**	**Zeax**
Diatomées			0.15-0.80		
Prochlorococcus	1.00				0.15-0.85
Haptophytes				0.10-1.40	
SLC					0.10-0.60
Dinoflagellés		0.10-1.00			

Table 2.2.1 *: Plages de variation des concentrations relatives des 5 biomarqueurs pour les principaux groupes de phytoplancton, d'après la littérature.*

On sait ainsi que, même pour des assemblages purs de phytoplancton, les concentrations

relatives des biomarqueurs sont très variables. Il n'a donc pas été possible de trouver simplement un unique seuil pour chaque pigment. Cette difficulté a pu être surmontée en supposant que tous les groupes de phytoplancton, listés plus haut, sont présents dans les 176 inventaires GeP&CO conservés (avec une mesure SeaWiFS coïncidente), tout en fixant des ratios qui restent en accord avec les valeurs connues (Table 2.2.1). Ainsi, il est possible d'obtenir un jeu d'inventaires de pigments spécifique pour chaque groupe phytoplanctonique en isolant, par exemple pour les diatomées, les inventaires pour lesquels on a le plus de fucoxantine et peu des autres pigments et ainsi de suite, tout en cherchant à trouver des inventaires pour chaque groupe. Ceci a permis d'établir, par tests successifs, les critères résumés dans la table 2.2.2.

	Pheo *a*	**Div *a***	**perid**	**fucox**	**19'HF**	**zeax**
Diatomées	< 0.30	< 0.40	< 0.10	**> 0.18**	—	< 0.20
Prochlorococcus	< 0.30	**> 0.40**	< 0.10	—	—	**> 0.35**
Haptophytes	< 0.30	< 0.40	< 0.10	—	**> 0.14**	< 0.20
SLC	< 0.30	< 0.40	< 0.10	—	—	**> 0.20**
Dinoflagellés	< 0.30	< 0.40	**> 0.10**	—	—	< 0.20

Table 2.2.2 *: Seuils en pigments relatifs utilisés pour associer un inventaire de pigments à un seul groupe de phytoplancton spécifique. Les valeurs en gras correspondent aux biomarqueurs de chaque groupe.*

On note que la fucoxantine et la 19'HF sont les seuls pigments qui ne présentent pas de seuils maximums pour les groupes de phytoplancton dont ils ne sont pas caractéristiques. Ceci en raison de leur abondance quasi permanente dans les observations GeP&CO qui n'est pas complètement surprenante, dans la mesure où la fucoxantine et la 19'HF se retrouvent également dans d'autres groupes que ceux dont ils sont le biomarqueur principal (table 2.1.2). J'ai donc supposé ici que ces deux pigments étaient caractéristiques de leur groupe uniquement dans le cas où on ne retrouvait pas, dans les inventaires, une forte proportion d'autres biomarqueurs.

Un critère additionnel concernant la présence d'éléments organiques dégradés a été ajouté en se basant sur un seuil de la pheophytine *a*. Cela doit nous permettre d'éliminer au maximum les eaux aux propriétés optiques potentiellement influencées par la présence de matières organiques dissoutes.

2.2.2 Labellisation des inventaires de pigments colocalisés en terme de groupes dominants

Nous disposons désormais des critères qui doivent nous permettre de labelliser les inventaires GeP&CO en terme de groupes dominants. L'étape suivante consiste donc à appliquer ces critères aux 176 inventaires GeP&CO pour lesquels on dispose d'une mesure satellite SeaWiFS coïncidente, ceci de façon à pouvoir identifier par la suite un éventuel signal satellitaire pour chaque groupe.

Parmi eux, 41 inventaires, présentés dans la Figure 2.2.1, ont pu être associés à un groupe dominant. Les autres inventaires n'ont pas été conservés car ils ne remplissaient pas tous les critères correspondant à un groupe dominant, ce qui traduit en général un mélange plus ou moins important de groupes.

Notons qu'aucun des inventaires n'a été labellisé comme « dinoflagellés » malgré le très faible seuil sur la concentration relative en peridinine retenue dans la Table 2.2.2. Cela n'est toutefois pas surprenant car les dinoflagellés sont connus pour être présents à peu près partout sans jamais dominer réellement les populations de phytoplancton dans les eaux du large (Jeffrey et al., 1997).

Notons aussi que seuls trois inventaires sont labellisés comme « diatomées ». La rigueur des critères utilisés laisse tout de même penser que ces trois inventaires sont représentatifs.

Ainsi, on dispose de 41 inventaires de pigments dont on connaît le groupe dominant. L'étape suivante consiste à étudier les mesures SeaWiFS correspondantes pour identifier un éventuel signal spécifique.

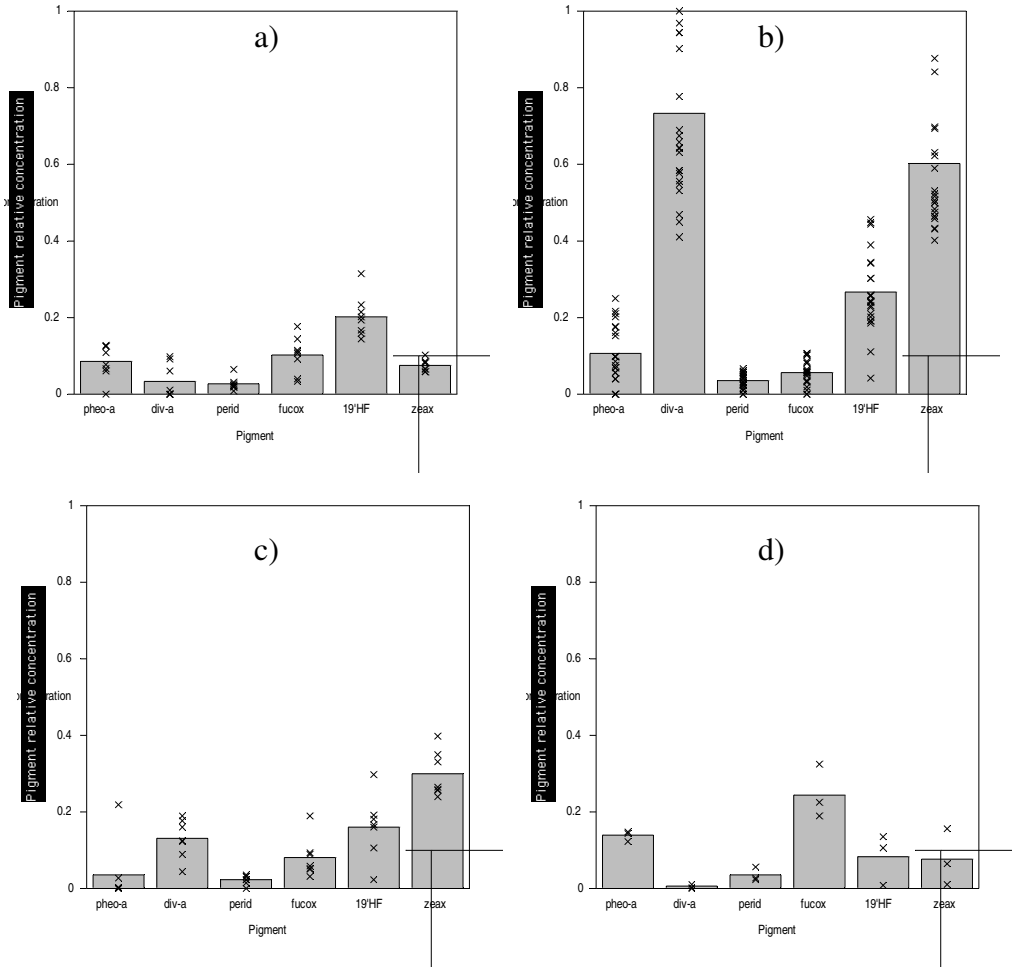


Figure 2.2.1 : *Inventaires de pigments individuels (croix noires) pour les 41 mesures GeP&CO labellisées en a) haptophytes, b) Prochlorococcus, c) SLC et d) diatomées. Les barres grises correspondent aux concentrations relatives moyennes.*

RESUME DU CHAPIRE 2 :

La richesse des inventaires de pigments mesurés lors des campagnes GeP&CO nous a permis de rechercher, à partir des pigments caractéristiques disponibles, cinq groupes de phytoplancton potentiellement dominants: les diatomées, les *Prochlorococcus*, les cyanobactéries, les haptophytes et les dinoflagellés.

Les critères définissant la dominance d'un inventaire par l'un de ces groupes ont été fixés à partir des proportions en pigments caractéristiques trouvées dans la littérature. La difficulté de ce travail résidait dans le fait que ces valeurs sont très variables à l'intérieur d'un même groupe. Finalement, ce problème a pu être surmonté en supposant que tous les groupes de phytoplancton listés plus haut sont présents dans les inventaires GeP&CO, tout en conservant des ratios qui restent en accord avec les valeurs de la littérature. Ceci a permis d'établir, par tests successifs, et pour chaque groupe, un jeu de critères pour les pigments caractéristiques.

Les critères ainsi définis ont été appliqués aux 176 inventaires GeP&CO pour lesquels ont dispose d'une observation satellite coïncidente, ceci de façon à pouvoir identifier par la suite un éventuel signal spécifique. Parmi ceux-ci, 41 ont pu être associés à un des quatre groupes suivants : les diatomées, les haptophytes, les *Prochlorococcus* et les SLC (pour *Synechococcus* like cyanobacteria). Notons qu'aucun des inventaires GeP&CO n'a pu être associé à des dinoflagellés, malgré des critères pour ce groupe les plus souples possible, d'après la littérature.

CHAPITRE 3

RELATION ENTRE GROUPES DE PHYTOPLANCTON DOMINANTS ET SPECTRES DE LUMINANCE MARINE

Ce chapitre reprend en partie les résultats présentés dans une publication disponible en annexe et parue dans la revue Deep Sea Research I.

3.1 SeaWiFS : caractéristiques et utilisations

3.1.1 Caractéristiques du capteur

L'instrument SeaWiFS (Figure 3.1.1) a été lancé à bord du satellite Seastar en Août 1997, et observe la terre depuis lors à une altitude de 705 Km avec une résolution spatiale de 1 Km. Le capteur observe chaque point de la terre au minimum 1 jour sur 2. Il faut environ une semaine pour obtenir une couverture globale en raison de la présence importante de nuages qui empêche l'observation de la surface sous jacente. L'instrument comporte 6 canaux dans le visible (412, 443,490, 510, 555, 670 nm) et deux dans le proche infra rouge (765 et 865 nm).

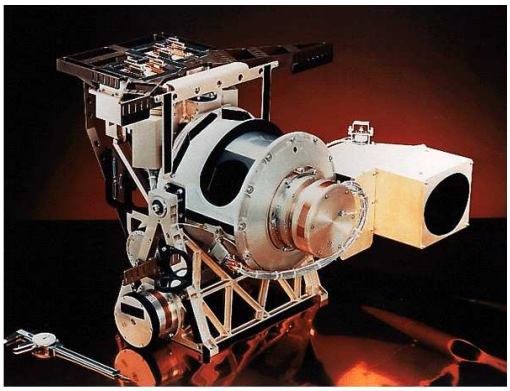


Figure 3.1.1 *: Photographie du capteur SeaWiFS. Photo NASA.*

3.1.2 Produits disponibles

Les produits opérationnels issus du capteur SeaWiFS sont disponibles à différents niveaux pour le traitement OC4V4 :

Niveau 1 : comptes numériques correspondant aux luminances brutes, mesurées par le capteur dans chaque canal, avec les données de télémétrie, calibration, navigation associées. Ces données sont disponibles en mode LAC (« Local Area Coverage » - 1 Km de résolution) pour certaines régions ou en GAC (« Global Area Coverage » - 4 Km de résolution par échantillonnage) à l'échelle globale.

Niveau 2 : Paramètres géophysiques issus du niveau 1 par application des facteurs de calibration, des corrections atmosphériques et des différents algorithmes bio-optiques. La résolution de ces produits est de 4Km (GAC).

Niveau 3, dit 'binned' : données GAC de niveau 2, moyennées sur 1 jour, 8 jours, 1 mois ou une année et projetées sur une grille. Cette dernière est régulière avec des pixels d'égale surface, de 9 Km par 9 Km environ. Ces produits, à 9Km de résolution, sont obtenus en moyennant les produits GAC sur une des périodes suivantes, journalières, hebdomadaires ou mensuelles. C'est ce type de produit qui a été utilisé pour le travail présenté dans ce manuscrit. Plus précisément, les paramètres suivants ont été utilisés: les luminances marines normalisées journalières à 412nm, 443nm, 490nm, 510nm et 555nm, la concentration en chlorophylle *a* et l'épaisseur optique des aérosols à 865nm.

Niveau 3, dit 'mapped' : ces produits sont des cartes, au format image, de synthèse de paramètres sur une projection équi-cylindrique du globe. Cinq paramètres sont disponibles pour SeaWiFS, pour chaque jour, semaine, mois ou année : la concentration en chlorophylle *a*, le coefficient d'angström à 510 et 865 nm (qui est utilisé dans le cadre d 'études portant sur les aérosols), les luminances normalisées à 555 nm, l'épaisseur optique aérosol à 865nm et le coefficient d'atténuation diffuse à 490nm.

Il est important de signaler que la qualité des données et produits SeaWiFS est contrôlée en permanence par des procédures de calibration et de validation très précises. Le système de calibration à bord est basé sur un diffuseur solaire qui permet de calibrer le capteur relativement à l'éclairement. Ainsi, en théorie, il n'y a pas de possibilité de dérive du capteur au cours de son fonctionnement. En réalité, la dégradation du diffuseur doit également être contrôlée par des visées régulières vers la surface de la lune, utilisée comme un diffuseur stable.

En parallèle, un programme de validation - calibration a été mis en place. Il consiste à réaliser des mesures de terrain, dans plusieurs régions de l'océan mondial par différentes équipes qui doivent se conformer à un protocole précis. Parmi ces projets, on retiendra la bouée MOBY, les campagnes AMT dans l'Atlantique et même quelques campagnes GeP&CO…

La qualité des images acquises par SeaWiFS permet d'envisager de nombreuses applications, à diverses échelles d'observation. Les projets basés sur les données SeaWiFS visent à utiliser les concentrations en chlorophylle *a* pour estimer le taux de fixation de carbone dans l'océan, l'échange de CO2 à l'interface océan-atmosphère ou encore le flux de carbone organique absorbé par la couche océanique superficielle (Mc Clain et al, 2004). A l'échelle régionale, ou à mésoéchelle, ces images mettent en évidence le rôle de la circulation océanique sur la distribution de chlorophylle et sont le point de départ d'études du couplage entre la physique et la biologie marine.

3.1.3 Analyses des données SeaWiFS

Les données satellites utilisées dans ce manuscrit sont les niveaux 3 journaliers fournis par la NASA/GSFC/DAAC. Ainsi je disposais des cartes de chlorophylle *a*, d'épaisseur optique à 865 nm et de luminances normalisées (nLw) à 412, 443, 490, 510 et 555 nm correspondants aux mesures Gep&CO. Notre objectif étant de mettre en évidence les

changements de nLw avec ceux des pigments autres que la chlorophylle *a*, utilisés comme biomarqueurs de groupes de phytoplancton, il était nécessaire de s'affranchir des variations de premier ordre, dues justement à la chlorophylle *a*. Afin d'isoler les variations de second ordre dans la variabilité spectrale totale des nLw, nous avons donc défini une luminance marine spécifique, nLw*, défini par :

$$nLw^*(\lambda)=nLw(\lambda)/nLw_{ref}(\lambda,\text{Chl a}) \qquad (3.1.1)$$

Où nLw_{ref} est un modèle simple de nLw qui tient compte seulement de la chlorophylle *a* standard (Figure 3.1.2), calculées par l'algorithme SeaWiFS classique. Idéalement ce modèle aurait dû être la fonction inverse de OC4V4. Cependant, ce dernier étant basé sur un choix entre plusieurs rapports de nLw il ne pouvait pas être inversé analytiquement. Nous avons donc défini numériquement le modèle inverse d'OC4V4, à partir d'un grand jeu de données SeaWiFS de chlorophylle *a* et de nLw associées. Les données utilisées, composées de 28800 ensembles de nLw et chlorophylle *a*, proviennent des données SeaWiFS extraites autour de chaque mesure Gep&Co, et dans un rayon de plus ou moins 60 Km et de plus ou moins un jour. Nous aurions bien sûr pu utiliser d'autres critères, mais ceux-ci permettent de créer un ensemble de données bien représentatif de l'ensemble de la variabilité des régions océaniques. Les valeurs moyennes de $nLw(\lambda)$ ont ainsi été calculées pour 26 plages étroites de valeurs de chlorophylle *a*, permettant ainsi de créer une table de valeurs ou LUT (pour Look Up Table) de $nLw_{ref}(\lambda,\text{Chl } a)$. Les valeurs obtenues sont présentées de façon synthétique dans la figure 3.1.2 , et sont disponibles en annexe.

Cette étape effectuée, il est désormais possible de calculer des spectres de nLw* à partir des produits SeaWiFS « nLw » et « concentration en chlorophylle *a* », en interpolant les valeurs de la LUT définie ci-dessus si besoin. On obtient ainsi un nouveau produit, non dépendant de la chlorophylle *a*, présenté dans la figure 3.1.3, mais qui présente encore une variabilité organisée géographiquement On peut alors penser à ce stade que cette variabilité des valeurs de nLw* correspond à un changement des propriétés optiques de l'eau de mer dû à d'autres éléments que la chlorophylle *a*. En ne considérant que les eaux du cas 1, on peut donc penser que cette variabilité est potentiellement liée à la composition en groupes de phytoplancton dans l'eau au moment de la mesure, et aux éléments qui y sont associés.

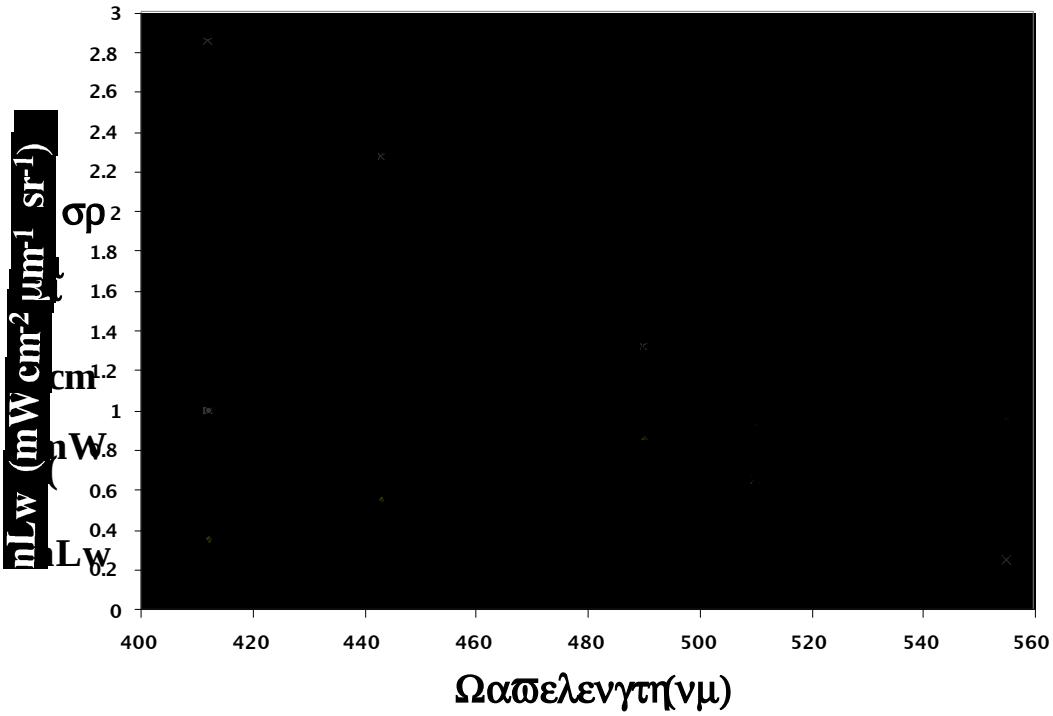


Figure 3.1.2: *Valeurs des luminances marines de références $nLw_{ref}(\lambda, Chl\ a)$, calculées à partir de moyennes pour des petites plages de valeurs de chlorophylle a (valeurs centrales sur la gauche, de 0.04 à 4 mg.m-3), à partir de 28800 ensembles de données SeaWiFS Chlorophylle a et $nLw(\lambda)$ extraites le long du trajet GeP&CO.*

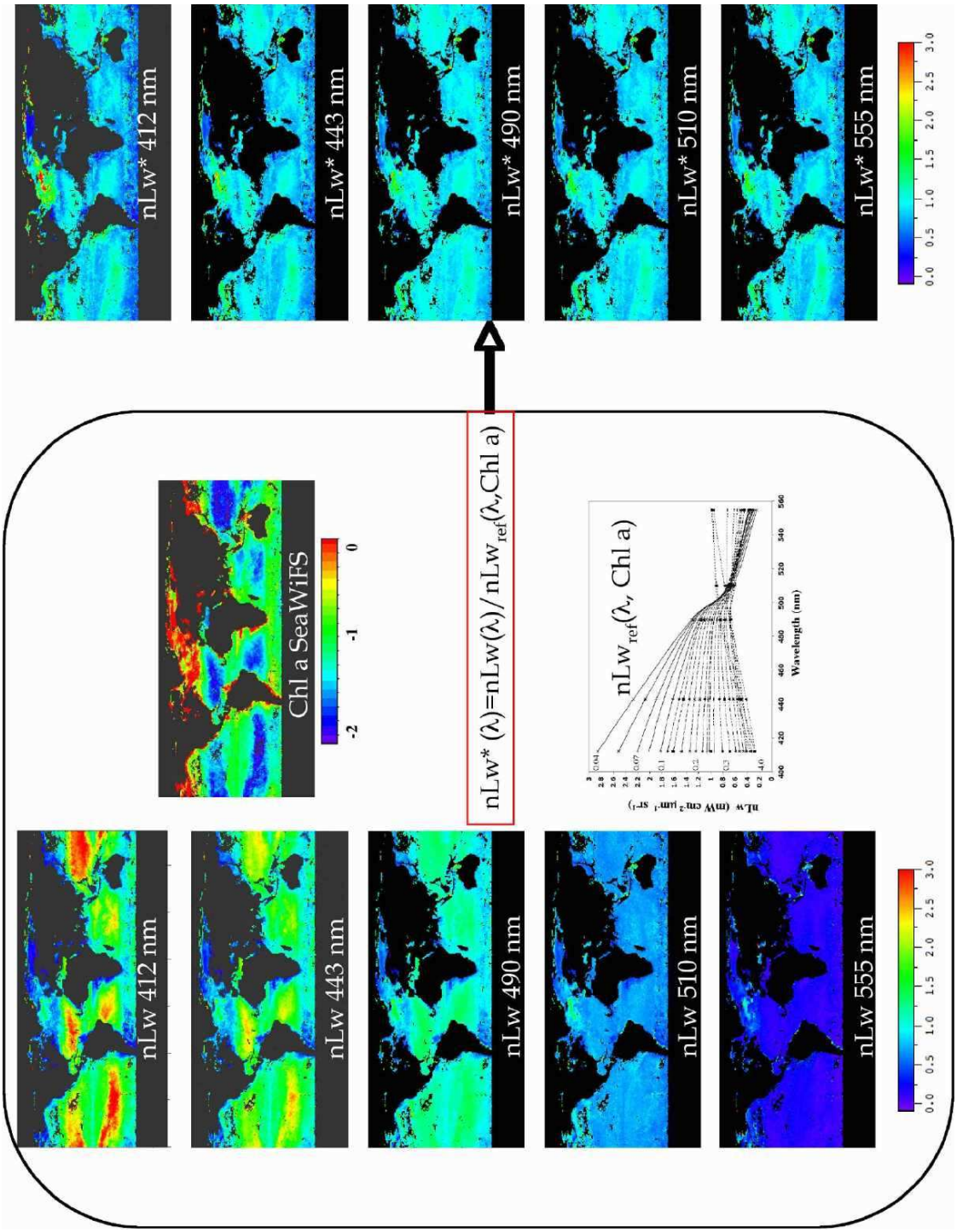


Figure 3.1.3 : *Présentation schématique de la méthode de calcul des luminances marines re-normalisées (nLw*) à partir des luminances marines (nLw) SeaWiFS et des valeurs de chlorophylle a associées.*

3.2 Variabilité des spectres de nLw* en fonction des groupes dominants

3.2.1 Recherche des points coïncidents

Afin d'étudier la variabilité des spectres de nLw* en fonction des groupes de phytoplancton dominants, un jeu de données a été créé en sélectionnant uniquement les pixels SeaWiFS lors de conditions claires, du même jour que la mesure GeP&CO et dans un rayon de un pixel autour de celle-ci (pavé de 3x3). De cette façon, le nombre de pixels SeaWiFS valides, associé à une mesure GeP&CO, est au maximum de 9. Pour chaque observation GeP&CO, les nLw*(λ) ont été calculés pour chaque pixel valide, à partir de l'équation (3.1.1).

Trois critères ont également été appliqués de manière à garder uniquement les mesures de très bonne qualité :

-L'épaisseur optique aérosol SeaWiFS de chaque pixel doit être au maximum de 0.15, afin de minimiser les risques d'erreurs sur les nLw liés à la correction atmosphérique ou à la contamination par les bords de nuages.

-La chlorophylle *a* SeaWiFS doit être inférieure à 3 $mg.m^{-3}$, pour éliminer les eaux potentiellement côtières, et supérieure à 0.04 $mg.m^{-3}$ pour éviter les eaux ultra-oligotrophes, pour lesquelles on a considéré qu'il n'était pas utile de tenter d'identifier un groupe dominant dans le cadre de cette thèse.

-La moyenne et la déviation standard de nLw*(λ) sont également calculées dans le but d'associer un seul spectre de nLw* à une mesure GeP&CO donnée. Ainsi, nous avons appliqué un dernier critère en éliminant les données pour lesquelles la déviation standard des nLw*(λ) était plus grande que 0.1 (environ 10% des nLw*(λ)), pour au moins une des longueurs d'onde SeaWiFS. Ce critère permet de s'assurer que la zone étudiée est suffisamment homogène en terme des propriétés optiques des eaux de surface.

Pour finir, 176 inventaires de pigments GeP&CO ont pu être associés à un spectre de mesures SeaWiFS de haute qualité. Ce relatif petit nombre de mesures coïncidentes (15% de la base de données GeP&CO initiale) est essentiellement dû à la couverture nuageuse et montre de façon claire l'importance et le besoin de mesures régulières de pigments en mer, telles que celles qui ont été réalisées durant les campagnes GeP&CO. Les spectres de nLw* associés à ces 176 inventaires présentent une diversité de formes et d'amplitudes importantes comme le montre la figure 3.2.1 Cela confirme que la base de données GeP&CO comporte des eaux variées en termes de propriétés optiques.

Différents tests ont été réalisés pour essayer d'augmenter le nombre de données coïncidentes, comme l'élargissement de la zone à 4x4 pixels autour de la mesure GeP&CO ou de la période à plus ou moins un jour. Mais, en faisant cela, la déviation standard des nLw* augmente tellement que le troisième critère n'est plus jamais vérifié.
Le choix de garder les critères 'stricts' définis ci-dessus a donc été fait. La figure 3.2.2 montre cependant que la base de données des 176 mesures reste représentative de l'ensemble des régions et saisons échantillonnées lors des campagnes. On notera que le nombre plus faible de données dans l'Atlantique Nord est dû à la couverture nuageuse toujours plus importante dans cette région que dans les plus basses latitudes.

3.2.2 Spectres de nLw associés aux groupes dominants identifiés*

On peut donc maintenant s'intéresser aux spectres de nLw* associés aux 41 mesures GeP&CO labellisées par un groupe de phytoplancton dominant. La figure 3.2.3 montre les 41 spectres de nLw* associés à chaque groupe dominant. Un résultat essentiel est le fait que l'ensemble des spectres de nLw* d'un groupe sont remarquablement similaires. Cela suggère qu'un lien existe entre la forme et l'amplitude du signal satellite et le groupe dominant dans l'eau au moment de la mesure, au moins pour les 4 groupes identifiés dans GeP&CO.

Ainsi, les haptophytes sont caractérisés par des nLw* relativement faibles à toutes les longueurs d'onde SeaWiFS avec une chute particulière à 412 nm et 443 nm. Les *Prochlorococcus* sont associés à un spectre de nLw* plus fort mais inférieur à la moyenne, les cyanobactéries aussi mais plutôt supérieur à la moyenne avec une légère pente entre 412 et 443 nm et, pour finir, les diatomées sont détectables par des valeurs de nLw* fortement au-dessus de la moyenne avec une diminution de 412 à 490 nm. À partir de ces résultats, des critères ont été fixés afin de caractériser les spectres de nLw* de chaque groupe (Table 3.2.1). Ces critères sont définis de façon à ce qu'aucune ambiguïté ne puisse apparaître entre deux groupes, tout en maximisant le nombre de spectres répondant aux critères. Ainsi, 29 spectres sur 41 sont classés parmi un des quatre groupes par ces critères. Les 12 spectres non classés ne sont toutefois pas mal classés puisqu'ils n'appartiennent à aucun groupe, et non pas à un mauvais groupe.

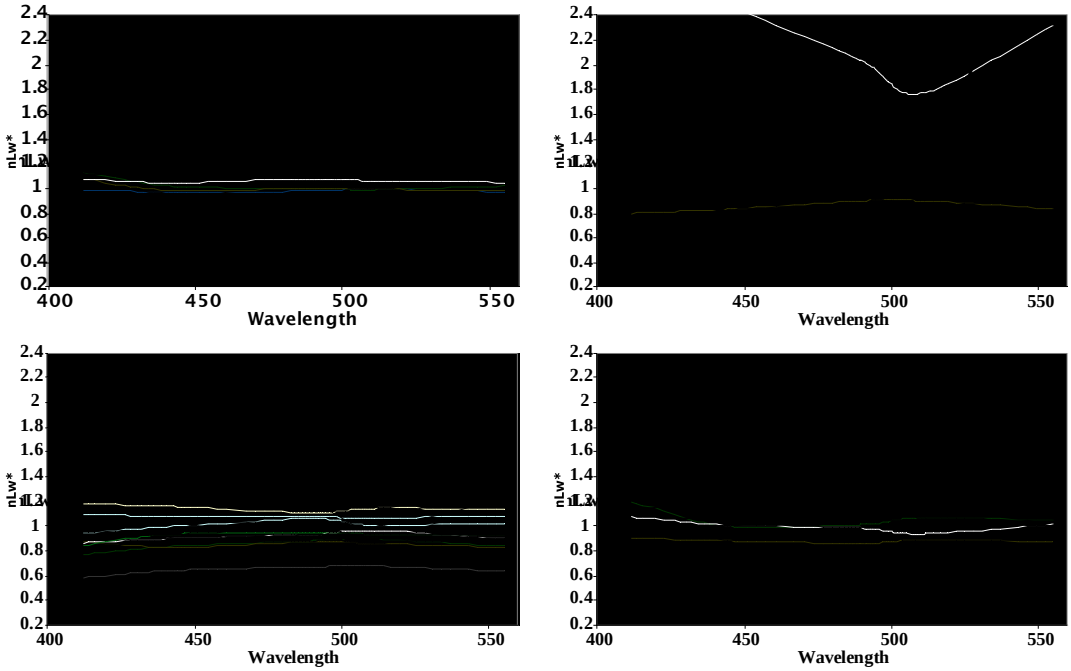


Figure 3.2.1 : *Formes et amplitudes spectrales des nLw* calculées à partir des nLw SeaWiFS, pour les mesures GeP&CO sélectionnées et pour a) juillet à septembre, b) octobre à décembre, c) janvier à mars et d) avril à juin.*

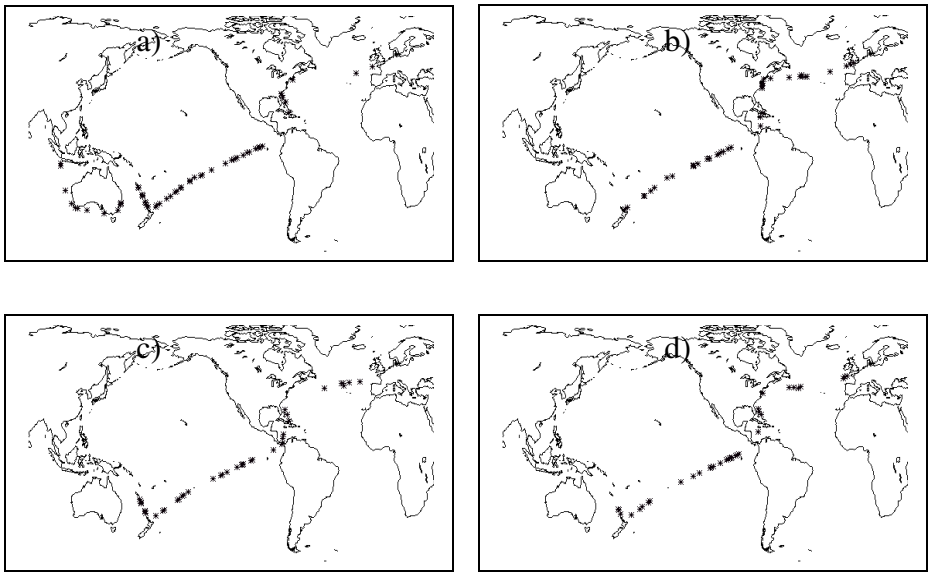


Figure 3.2.2 : *Cartes de l'emplacement des données GeP&CO sélectionnées, c'est-à-dire pour lesquelles une mesure coïncidente SeaWiFS a pu être trouvée, pour a) Juillet à Septembre, b) Octobre à Décembre, c) Janvier à Mars et d) Avril à Juin.*

.

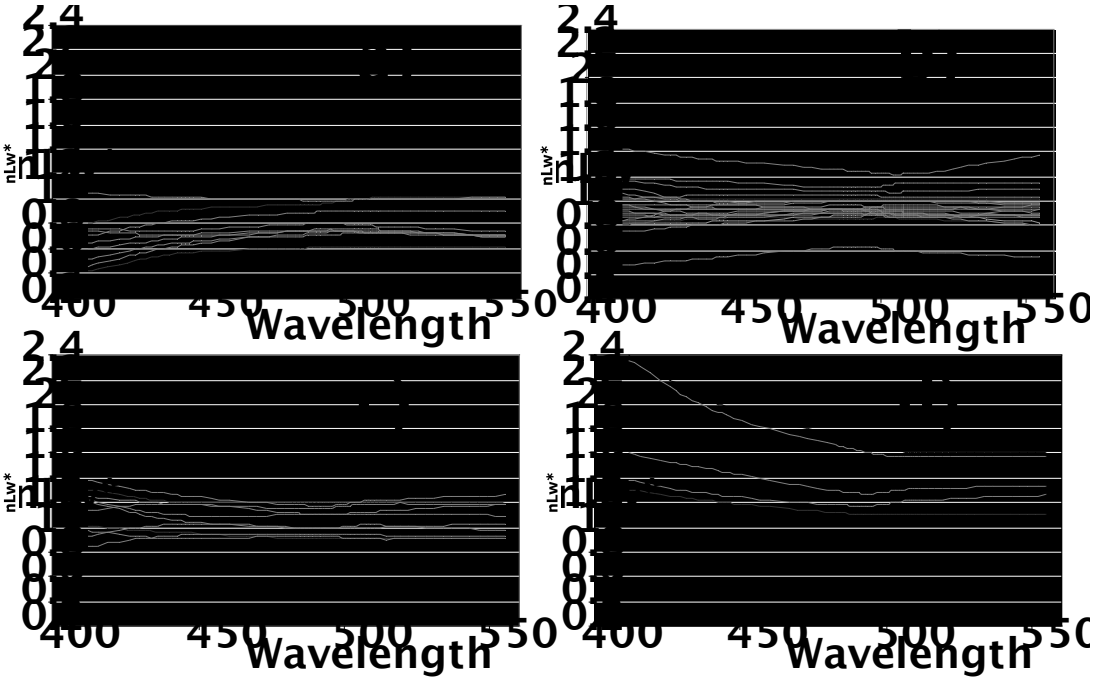


Figure 3.2.3 : *Signatures spectrales des nLw* pour chacun des 4 assemblages de phytoplancton dominés par a) haptophytes, b) Prochlorococcus, c) Cyanobactéries et d) diatomées. Les spectres individuels sont en gris clair et les bornes minimales et maximales définissant chaque espèce en traits pleins noirs.*

	412	**443**	**490**	**510**	**555**	**Critères supplémentaires**
Haptophytes min.	0.4	0.55	0.6	0.6	0.6	nLw*(412)<nLw*(443)
Haptophytes max.	0.8	0.9	0.95	1.0	1.0	nLw*(443)< nLw*(490)
Prochlorococcus min.	0.8	0.85	0.85	0.85	0.8	
Prochlorococcus max.	1.0	1.0	1	1.0	1.0	
SLC min.	1.0	0.95	0.9	0.9	0.9	nLw*(412)>nLw*(443)
SLC max.	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	nLw*(412)>nLw*(490)
Diatomées min.	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	nLw*(412)>nLw*(490)
Diatomées max.	2.4	2	1.7	1.6	1.6	nLw*(490)>nLw*(555)

Table 3.2.1 : *Caractéristiques des seuils de nLw* acceptés pour chaque groupe de phytoplancton. Ces critères sont définis à partir de la figure 2.3.5*

3.2.3 : Discussion sur le choix des critères pigmentaires

Nous disposions, au départ de cette étude, de 176 inventaires de pigments colocalisés avec des mesures SeaWiFS répondant aux critères de qualité fixés. L'utilisation des pigments biomarqueurs et des seuils en concentration relative de la littérature nous a permis de labelliser 41 inventaires en termes de groupes dominants. Nous avons vu que chaque groupe dominant peut être associé à une forme et une amplitude particulières des spectres de nLw* . Mais qu'en est-il des 135 inventaires qui n'ont pas été classés par les critères sur les pigments ? Pour que les résultats présentés au 3.2.2 soient utilisables pour analyser des données satellites, il faut vérifier qu'en appliquant les critères sur les nLw* aux 135 inventaires restants, on ne les labellise pas à tort.

Le résultat de cet exercice est que sur ces 135 spectres, 11 ont répondu aux critères « haptophytes » , 31 aux critères *« Prochlorococcus »* et 40 aux critères « cyanobactéries ». Aucun des spectres associés aux inventaires non classé à partir des critères sur les pigments n'a été classé à posteriori en « diatomées ».

Ce résultat peut sembler ennuyeux car il peut signifier que nos critères sur les nLw* «identifient » potentiellement trop de pixels.

Afin de mieux évaluer les résultats de PHYSAT, les concentrations relatives des pigments biomarqueurs, pour ces 82 spectres sont présentées, en fonction de leur groupe dominant, dans la figure 3.2.4.

Il apparaît nettement que les inventaires associés aux haptophytes par PHYSAT sont bien différents, en termes de composition pigmentaire (surtout pour la divinyl chlorophylle *a* et la zéaxanthine) (voir table 2.2.2), de ceux associés aux SLC et *Prochlorococcus*. Toutefois, une réserve doit être faite en ce qui concerne la différence entre ces deux derniers groupes. En effet, contrairement aux résultats précédents (figure 2.2.1), les SLC et les *Prochlorococcus* sont très proches en termes de composition pigmentaire, avec des valeurs fortes de divinyl chlorophylle *a* pour les SLC également. Cela traduit potentiellement un mélange des deux groupes et donc une sur-labellisation de PHYSAT. Cependant, il faut noter que les SLC et les *Prochlorococcus* sont connus pour être présents dans les même types d'eaux, et font tous les deux partie du picoplancton. On peut donc imaginer que des mélanges de ces deux groupes soient associés à des spectres nLw* qui présentent les caractéristiques de ceux définis par PHYSAT soit comme SLC ou *Prochlorococcus* dominant…

Il conviendra donc par la suite de considérer avec prudences la distinction SLC / Prochlorococcus, tout en sachant que les deux groupes sont proches et que cela explique certainement cette difficulté. Une validation plus poussée devra bien sûr être réalisée dès que des mesures in situ seront disponibles pour éclaircir ce point.

Ainsi, sans être totalement en accord avec les critères définis dans la table 3.2.1, les 81 inventaires de pigments étudiés ici montrent néanmoins que les spectres classés « haptophytes » par PHYSAT sont associés à des inventaires cohérents avec ce résultat (19'HF élevée et relativement peu des autres pigments). En ce qui concerne les *Prochlorococcus* et les SLC, on peut conclure, grâce à ce test, que les types d'eau sont respectés mais qu'il faudra considérer avec prudence à l'avenir la différenciation SLC et *Prochlorococcus*.

Il est donc possible que certaines eaux soient labellisées par un groupe dominant sans que les critères de pigments de la table 3.2.1 soient strictement remplis. Pour la grande majorité de ces cas, le groupe identifié à partir des spectres de nLw* est présent dans l'eau,

mais de façon moins dominante que pour les critères de la table 3.2.1. On peut en déduire que ces derniers sont donc potentiellement trop stricts pour certains inventaires de pigments ou que PHYSAT labellise trop de spectres. Nous aurions pu alors établir de nouveaux seuils et refaire cette étude jusqu'à ce que le nombre de spectres et le nombre d'inventaires labellisés soient exactement identiques. Cependant, j'ai choisi de conserver les seuils établis précédemment pour l'élaboration de la méthode. Chacun de ces seuils est défini de façon à identifier des eaux où un groupe domine nettement, et il serait vain de tenter de les modifier tout en restant cohérent pour chaque espèce, sans ajouter de bruit supplémentaire.

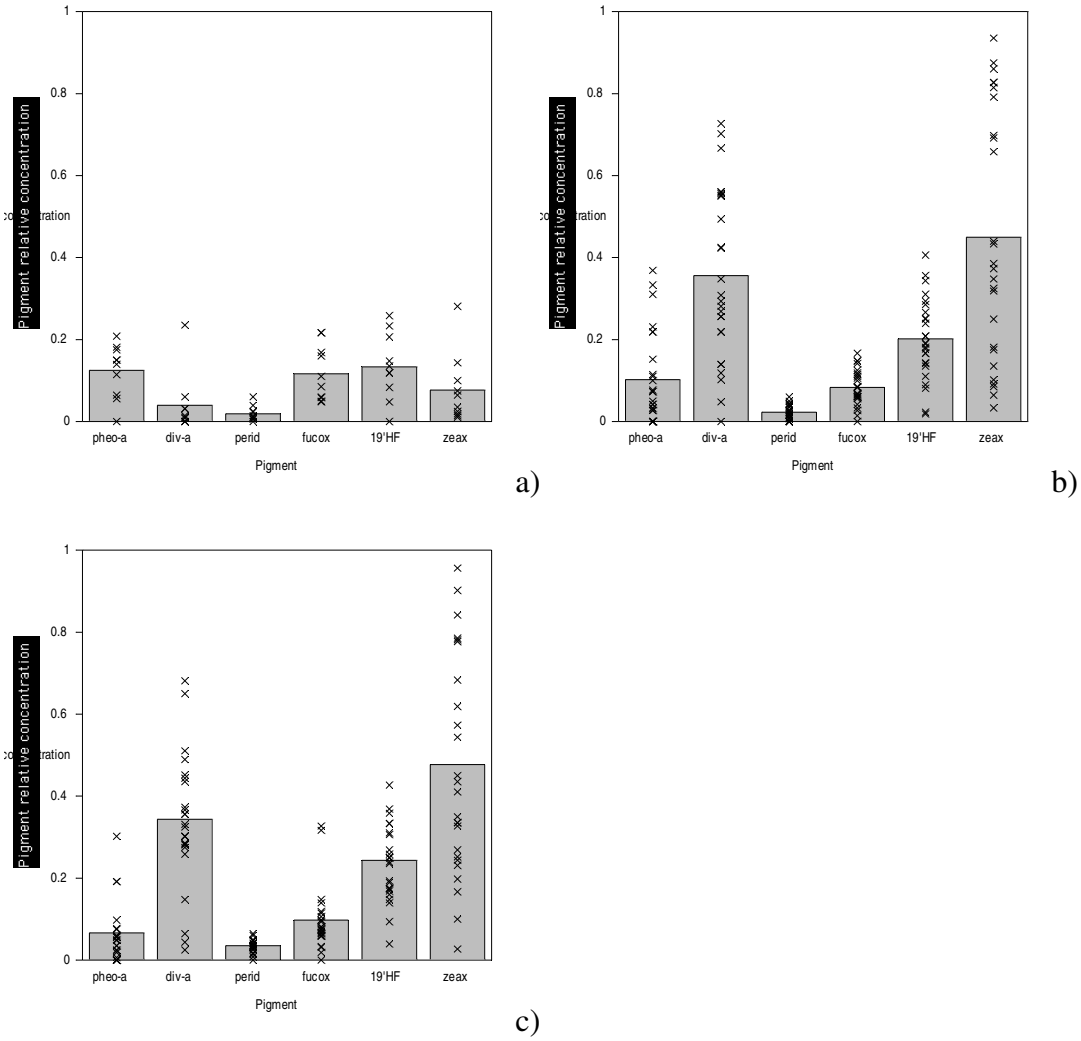


Figure 3.2.4 : *Compositions en pigments biomarqueurs relatifs, associés aux spectres de nLw* SeaWiFS coïncidents aux données GeP&CO mais non labellisés par les critères de la table 2.3.2. Les graphiques correspondent à la labellisation par PHYSAT en a) haptophytes, b) Prochlorococcus, c) cyanobactéries.*

RESUME DU CHAPIRE 3 :

Les mesures satellites co-localisées avec les mesures in-situ GeP&CO (même jour et dans un rayon de 9km maximum, soit 9 pixels par mesure GeP&CO au maximum) ont été sélectionnées. Ainsi, on dispose des luminances marines normalisées (nLw) à 412, 443, 490, 510 et 555nm, de la concentration en chlorophylle *a* et de l'épaisseur optique à 865nm pour 176 inventaires GeP&CO. Afin de garantir la qualité de ces mesures, différents critères ont été appliqués : le ciel devait être clair (épaisseur optique inférieure à 0.15) et la concentration en chlorophylle *a* doit être inférieure à 3 $mg.m^{-3}$ afin d'éliminer les eaux turbides et côtières.

L'étape suivante a consisté à étudier un éventuel signal satellite associé à chacun des 4 groupes dominants, identifiés pour 41 des 176 inventaires GeP&CO au chapitre 2. Pour cela, il était essentiel d'éliminer de la mesure satellite totale l'effet du pigment chlorophylle *a*, mesuré au premier ordre et présent dans tous les groupes de phytoplancton. Ainsi, j'ai élaboré, à partir d'un grand nombre de données SeaWiFS, une table des valeurs moyennes des nLw(λ) pour toute une gamme de valeurs de chlorophylle *a*, allant de 0.04 à 3$mg.m^{-3}$. J'ai ensuite re-normalisé les nLw(λ) en les divisant par ce signal moyen ne dépendant que de la chlorophylle *a* mesuré par le satellite. Nous disposons ainsi d'un nouveau produit, appelé nLw*(λ) qui apporte une information sur l'écart des nLw par rapport à la moyenne pour la valeur de chlorophylle *a* qui y est associée.

Le résultat essentiel de ce chapitre est que les quatre groupes identifiés comme étant dominants par les inventaires de pigments correspondent à des signaux nLw*(λ) d'amplitude et de forme différentes. Il est donc possible d'associer à un groupe dominant un signal satellite particulier, à condition d'éliminer l'effet de la chlorophylle *a* au premier ordre.

CHAPITRE 4

DEVELOPPEMENT D'UN ALGORITHME DE DETECTION DES GROUPES DE PHYTOPLANCTON DOMINANTS A L'ECHELLE GLOBALE

L'objectif de ce chapitre est de tester les résultats obtenus et présentés dans le chapitre 2, sur les données SeaWiFS globales. Dans quelle mesure retrouve-t-on à l'échelle globale les signaux identifiés comme étant associés à un groupe de phytoplancton dominant ? Quels types de données SeaWiFS faut-il utiliser ? Quels sont les autres signaux existants ? Nous allons tenter de répondre à ces questions dans ce chapitre.

4.1 La méthode PHYSAT

La méthode PHYSAT est décrite schématiquement sur la figure 4.1.1. Elle repose sur les différents critères établis dans le chapitre précédent et permet d'obtenir des cartes de groupes dominants de phytoplancton à partir de données SeaWiFS. Ainsi, les critères de validité et de caractérisation des spectres de nLw* définis au chapitre précédent ont été utilisés pour traiter les données SeaWiFS de niveau 3, pour l'année 2001 et à une résolution de 9 Km. Ces données sont disponibles facilement depuis le site web de la NASA/GSFC/DAAC (http://oceancolor.gsfc.nasa.gov) .

La première étape du traitement des données journalières consiste à écarter tous les pixels de ciel clair dont l'épaisseur optique en aérosols est supérieure à 0.15 ou dont la chlorophylle *a* est plus petite que 0.04 $mg.m^{-3}$ ou plus grande que 3 $mg.m^{-3}$. Pour chaque pixel restant, les luminances spécifiques nLw* sont calculées selon l'équation 3.1.1.

Les critères définis à la table 3.2.1 sont alors utilisés pour identifier, si possible, le groupe de phytoplancton dominant correspondant à chaque pixel. Les pixels dont le spectre de nLw* ne correspondant à aucun des groupes dominants sont considérés comme étant valides, mais sont associés à un groupe supplémentaire appelé « assemblages de phytoplancton non identifiés ».

En supposant que la variabilité des groupes de phytoplancton dominants est suffisamment faible dans le temps, les cartes journalières SeaWiFS à une résolution de 9km ont été rééchantillonées (un pixel retenu sur quatre et une ligne sur quatre) pour obtenir des cartes au quart de degré, plus facilement stockables et utilisables (15 fois moins volumineuses en termes d'espace disque, par exemple). Ces cartes peuvent également par la suite être utilisées pour réaliser des cartes mensuelles au degré. Pour cela chaque « boîte » de 1° par 1° se voit associée le groupe le plus fréquent et détecté pour au moins 50% des pixels valides, sur l'ensemble des pixels au quart de degré inclus dans la « boîte ». Lorsque aucun groupe ne domine ou que les pixels « assemblages de phytoplancton non identifiés » sont majoritaires, la « boîte » au degré est associée à aucun groupe dominant.

L'hypothèse selon laquelle un groupe de phytoplancton peut être associé à une boîte de 1° par 1°, pour une période mensuelle, n'est évidemment pas valable dans le cas de floraisons rapides ou de régions frontales très dynamiques, mais ceci reste limité à de petites zones et n'influence pas les résultats globaux. L'influence du changement de résolution, du kilomètre à un quart de degré ou au degré, a cependant été analysé plus en détail et les résultats sont disponibles en annexe.

La figure 4.1.2 montre le résultat du traitement PHYSAT pour la seule journée du 30

Décembre 2001, et les cartes de concentration en chlorophylle *a* et d'épaisseur optique associées. On observe alors qu'une proportion assez élevée de pixels (58% pour ce jour) est directement labellisée par PHYSAT en termes de groupes dominants. Dès ce premier test, on observe des structures de couleurs uniformes dans les régions où les critères de qualité des données SeaWiFS sont remplis. Cela semble indiquer que la méthode PHYSAT, élaborée à l'aide de données extraites le long du trajet GeP&CO, permet de labelliser une grande partie des régions océaniques du globe. Ce résultat a marqué le début d'une nouvelle partie de cette thèse, en rendant possible le traitement de l'ensemble des données SeaWiFS en vue d'observer les groupes phytoplanctoniques dominants.

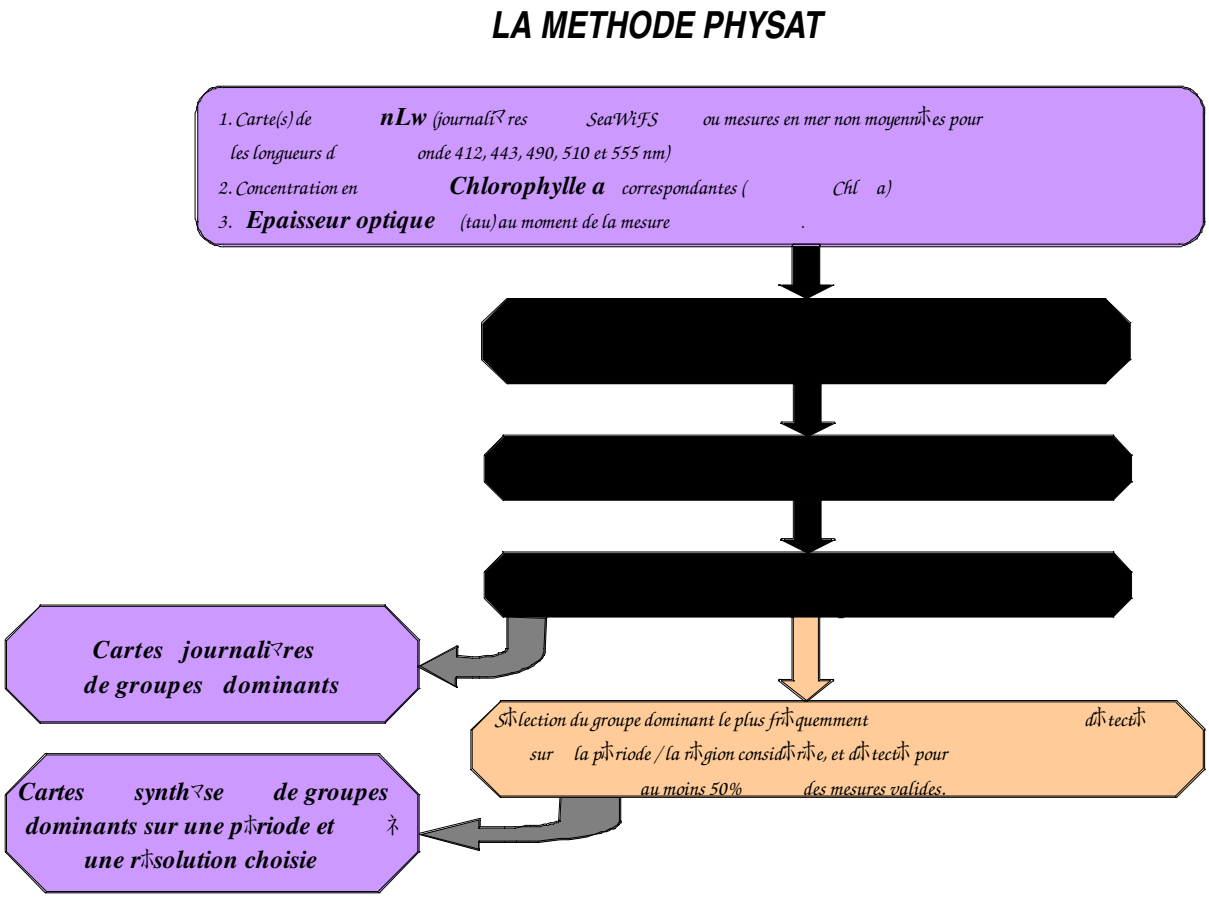


Figure 4.1.1 : *Schéma résumant les différentes étapes de la méthode PHYSAT utilisée pour détecter les groupes de phytoplancton dominants à l'échelle globale.*

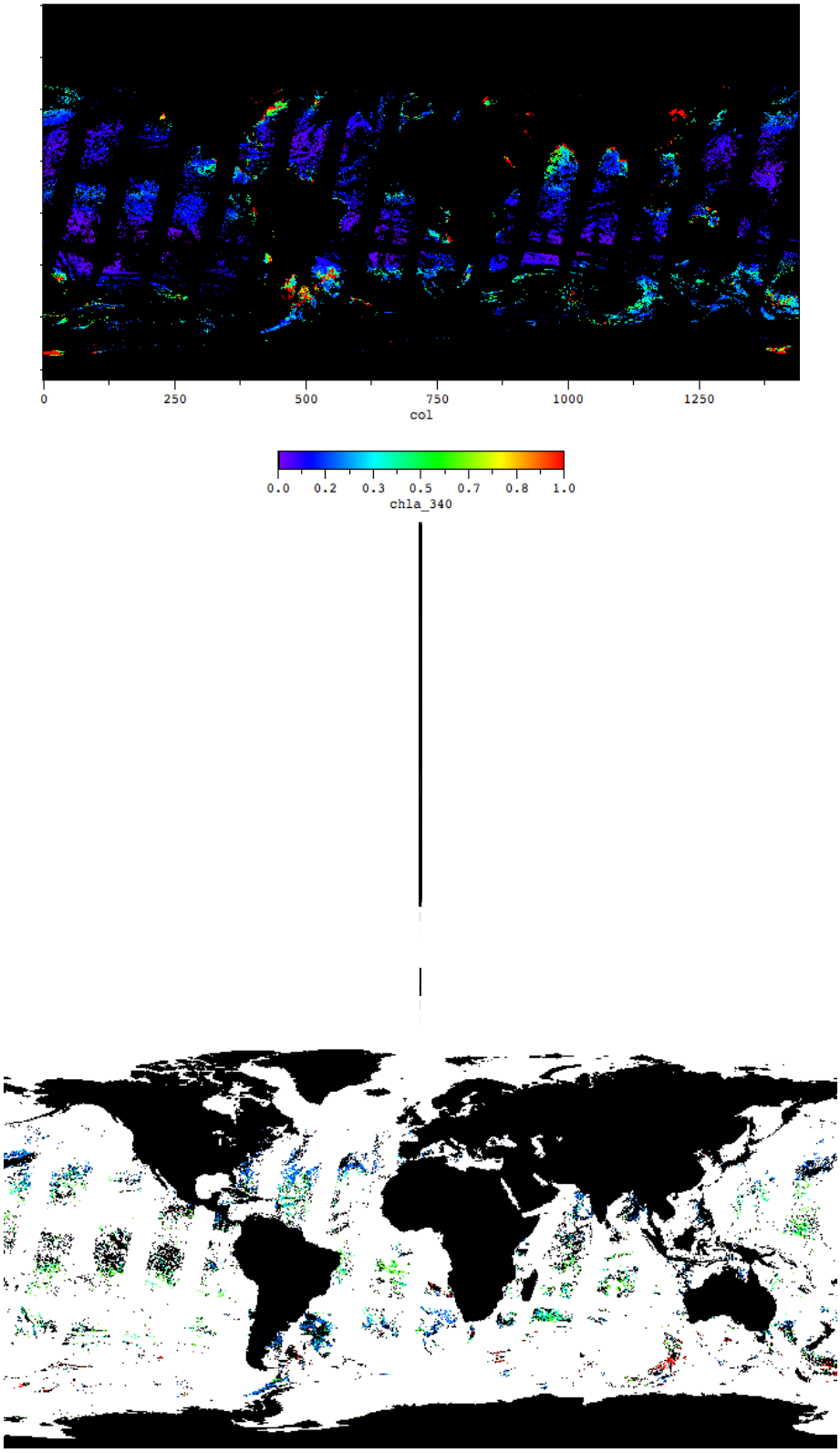


Figure 4.1.2 : *Cartes de concentration en chlorophylle a (haut) en mg.m^{-3} et d'épaisseur optique (centre) venant des produits SeaWiFS de niveau 3, ainsi que la cartes des groupes PHYSAT correspondants (bas) avec les haptophytes en bleu, les Prochlorococcus en turquoise, les cyanobactéries en vert et les diatomées en rouges, pour la journée du 5 Décembre 2001.*

4.2 Premiers résultats globaux pour l'année 2001

La figure 4.2.1 montre les cartes mensuelles de 2001, au quart de degré, des synthèses PHYSAT. Ces résultats globaux montrent de larges structures persistantes, caractérisées au premier abord par une dominance des *Prochlorococcus* et des cyanobactéries dans les eaux oligotrophes tropicales alors que les haptophytes et les diatomées sont dominants dans les eaux plus riches des hautes et moyennes latitudes.

D'une manière générale, on observe que le cycle saisonnier est nettement marqué dans les hautes latitudes où les haptophytes dominent en hiver et où de larges régions de floraisons de diatomées apparaissent en été. L'extension de ces floraisons de diatomées est particulièrement importante dans l'Océan Austral au mois de Janvier. Quelques régions, comme le nord de l'Océan Indien et l'Atlantique équatorial, sont souvent associées à des pixels non classés en raison de la présence presque permanente d'épaisseurs optiques fortes. Par contre, de larges zones de pixels « non identifiés » dans l'Océan Austral sont certainement dues à la présence de groupes dominants non échantillonnés lors des campagnes GeP&CO, comme les Phaeocystis. Cette hypothèse sera abordée plus en détail dans la suite de ce chapitre. En dehors de ces zones particulières, les pixels « non identifiés » sont assez rares à l'échelle du mois. Cela montre que les données SeaWiFS, extraites le long du trajet des campagnes GeP&CO, prennent bien en compte la majorité de la variabilité des nLw* à l'échelle mondiale.

Notons que si le résultat du 3.2.3 recommande la prudence concernant la distinction des groupes SLC et *Prochlorococcus*, on observe tout de même sur la figure 4.2.1 des structures bien définies pour chacun de ces deux groupes. Cela tend donc à montrer qu'il existe bien un signal spécifique pour chaque groupe, que l'on retrouve sous la forme de structures cohérentes. Parallèlement certains pixels peuvent, dans certains cas, être associés à un mélange de ces deux groupes, ce qui explique peut-être les quelques pixels « isolés » que l'on retrouve sur les cartes mensuelles.

Notons également que les comparaisons des résultats PHYSAT avec les cartes standard de chlorophylle *a* SeaWiFS (Figure 4.2.2) montrent que les fortes valeurs de chlorophylle *a* sont majoritairement associées à la présence de diatomées, comme attendu, ou d'haptophytes. Cependant, il n'y a pas de corrélation forte visible entre les groupes de phytoplancton dominants et les cartes de concentrations en chlorophylle *a*. Notons que les cartes PHYSAT mensuelles de la figure 4.2.2 sont présentées au degré de résolution. On observe ainsi que cette façon de présenter les observations PHYSAT donne des cartes plus homogènes visuellement.

La figure 4.2.3 confirme que de larges plages de valeurs de chlorophylle *a* peuvent être associées à chaque groupe de phytoplancton. Cela montre que la chlorophylle *a*, seule, n'est pas suffisante pour identifier les assemblages de phytoplancton même si quelques relations entre chlorophylle *a* et groupe dominant peuvent être trouvées : les diatomées sont toujours associées à des valeurs fortes de chlorophylle *a* alors que les très faibles concentrations (<0.07 mg.m-3) sont associées au *Prochlorococcus.* Par contre, pour les concentrations en chlorophylle *a* entre 0.1 et 0.4 mg.m-3, qui représentent la majorité de l'océan global (voir figure 4.2.2), chaque groupe de phytoplancton dominant peut être trouvé avec une contribution équivalente.

Étant donné que PHYSAT à été développé à partir de 15% des mesures GeP&CO, il est possible d'utiliser le reste de la base de données pour une étude plus générale de validation des cartes présentées sur la figure 4.2.1 . Cette analyse montre que la distribution des groupes de phytoplancton le long du trajet « Le Havre – New York » est en accord avec les eaux relativement riches dominées par les haptophytes en janvier et les diatomées au printemps. De même, sur le trajet entre « Panama » et « Tahiti », Dandonneau et al. 2004 montre que les *Prochlorococcus* et les cyanobactéries sont les groupes dominants tout au long de l'année ce qui est également en accord avec les cartes PHYSAT mensuelles. De façon générale, les résultats obtenus pour l'année 2001 par PHYSAT sont en accords avec les résultats de Dandonneau et al. 2004, résumés au chapitre 2 de ce manuscrit.

Les mesures effectuées lors des campagnes AMT dans l'Atlantique Méridional (Figure 4.2.4) (Gibb et al. 2000), en 1996 et 1997 sont également en bon accord avec les résultats globaux obtenus par PHYSAT. Les mesures de concentration en fuconxanthine, réalisées durant ces campagnes, montrent la présence de diatomées au nord de 40° en avril et en mai, et au sud de 40° en septembre et octobre, ce qui est en accord avec la figure 4.2.1. De la même manière la distribution de nanoflagellés (l'équivalent des haptophytes de PHYSAT) montre un maximum aux hautes latitudes lorsque les diatomées sont moins nombreuses. La zéaxanthine et la divinyl chlorophylle *a* d'AMT confirment également les résultats PHYSAT, en montrant la dominance des *Prochlorococcus* et des cyanobactéries aux faibles latitudes. Ces résultats sont également concordants avec les comptages cytométriques de synechococcus et de *Prochlorococcus* effectués lors de ces campagnes (Zubkhov et al. 1998)

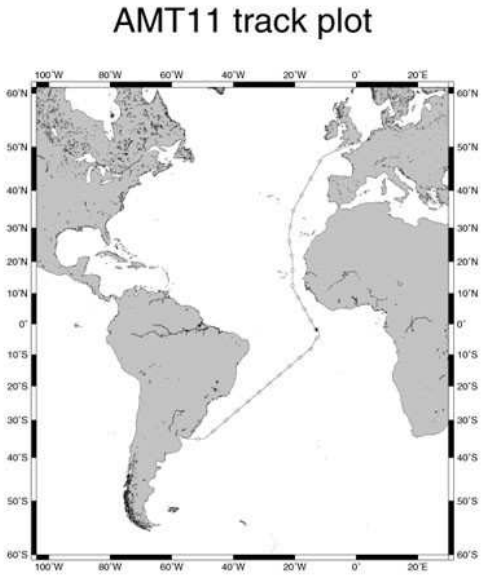
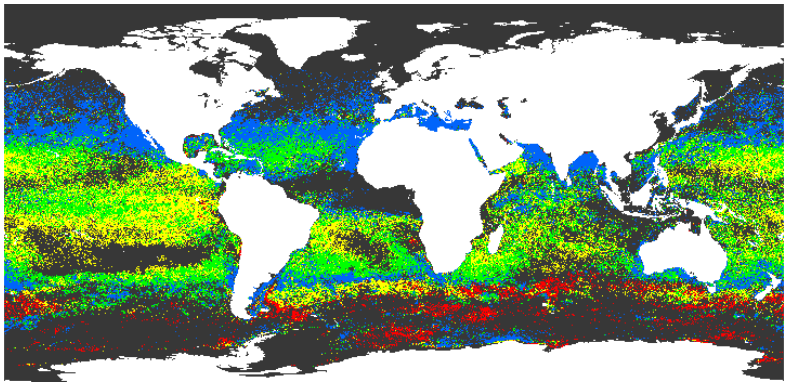


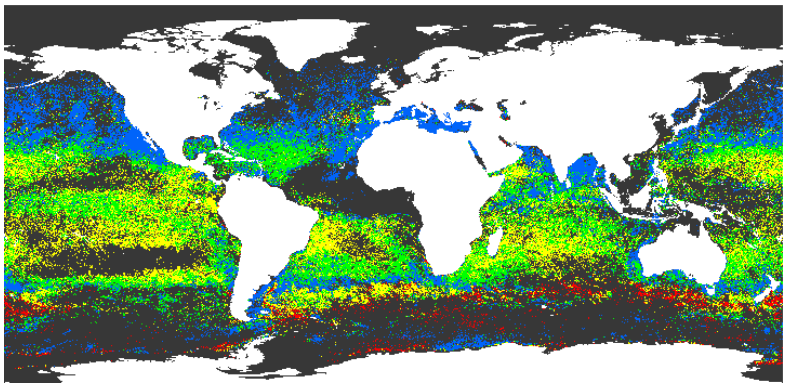
Figure 4.2.4 : *Trajet des campagnes AMT (Gibb et al. 2000).*

La figure 4.2.1 montre également que les résultats de PHYSAT sont en bon accord avec les observations à long terme effectuées à deux stations historiques : DYFAMED en Méditerranée de l'ouest et à BATS dans la Mer des Sargasses. La biomasse phytoplanctonique en Méditerranée de l'ouest est dominée toute l'année par les haptophytes (en bleu sur la figure 4.2.1), sauf pendant la période d'été stratifiée qui est caractérisée par la présence plus importante de Prochlorococcus (en vert sur la figure 4.2.1) (Marty et al. 2002).

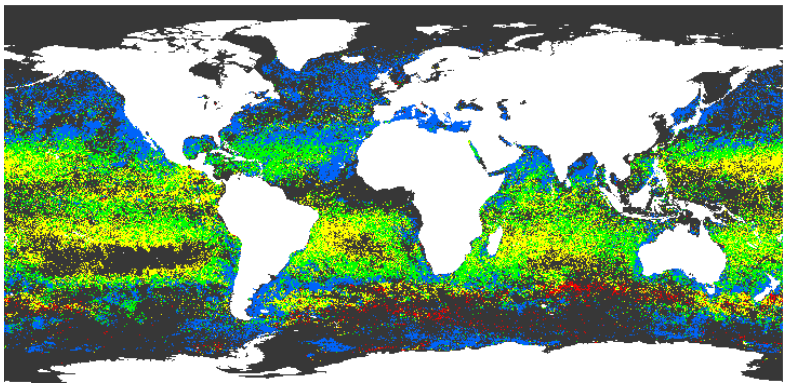
Un accord similaire est trouvé avec la dynamique de populations de phytoplanctonsobservée à la station BATS, avec une dominance des haptophytes de janvier jusqu'au début de l'été, suivie par une forte concentration en *Prochlorococcus* pendant l'été (Durand et al. 2001, Steinberg et al. 2001). Ces premières validations sont une étape essentielle avant toute utilisation de PHYSAT, mais elles ne sont bien évidemment pas suffisantes et devront être poursuivies. On pourra par exemple envisager à l'avenir d'utiliser les campagnes de mesures sur le long terme telles que celle effectuée avec le « Continuous Plankton Recorder », ou CPR, qui donne accès à une base de données complète de suivi des variations rapides mais aussi inter-annuelles de certains groupes (essentiellement le microplancton) dans l'Atlantique Nord (http://192.171.163.165/cpr_survey.htm).



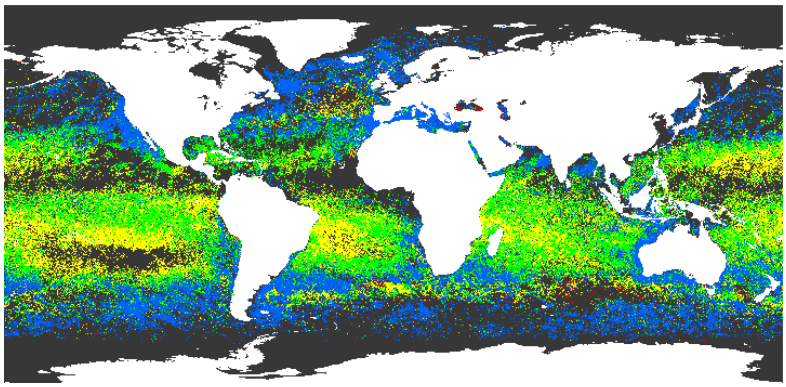
JANVIER 2001



FEVRIER 2001

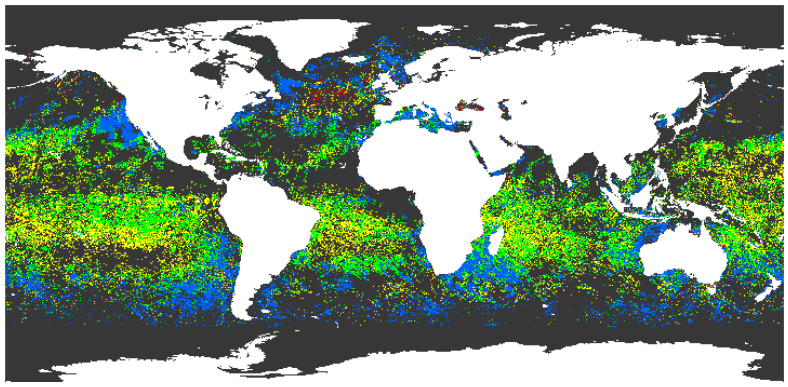


MARS 2001

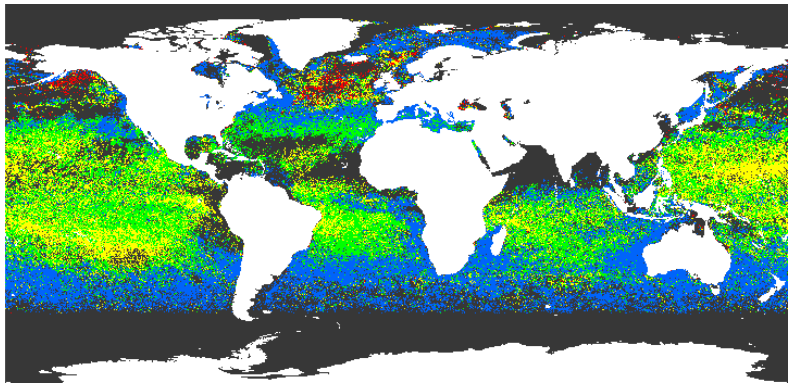


AVRIL 2001

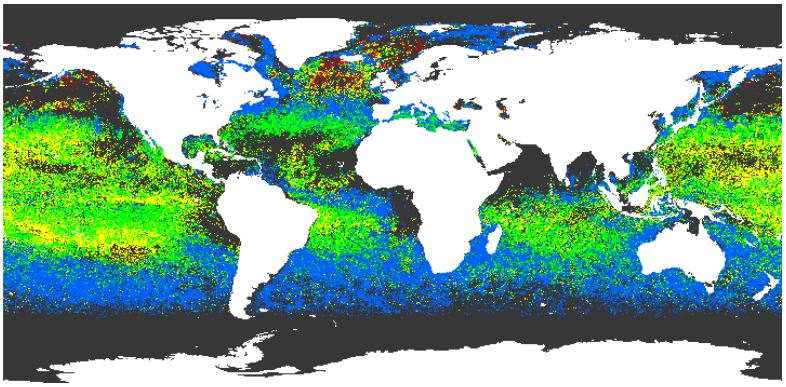
Figure 4.2.1 : *Cartes mensuelles au quart de degré pour janvier à avril 2001. En rouge les diatomées, en bleu les haptophytes, en vert les Prochlorococcus, en jaune les cyanobactéries, en gris clair et foncé respectivement, les phaeocystis et les blooms de coccolithophoridés.*



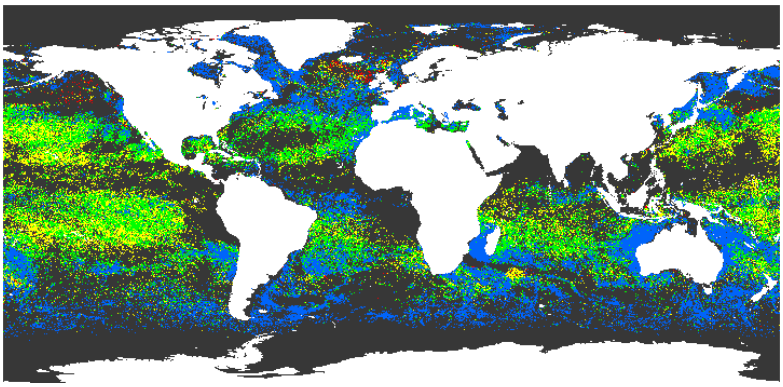
MAI 2001



JUIN2001

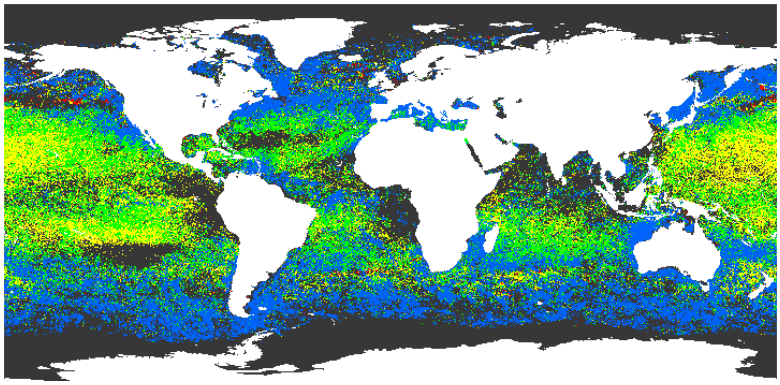


JUILLET 2001

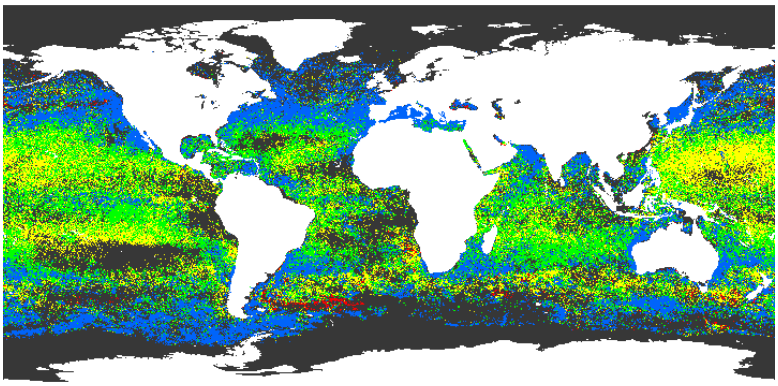


AOUT 2001

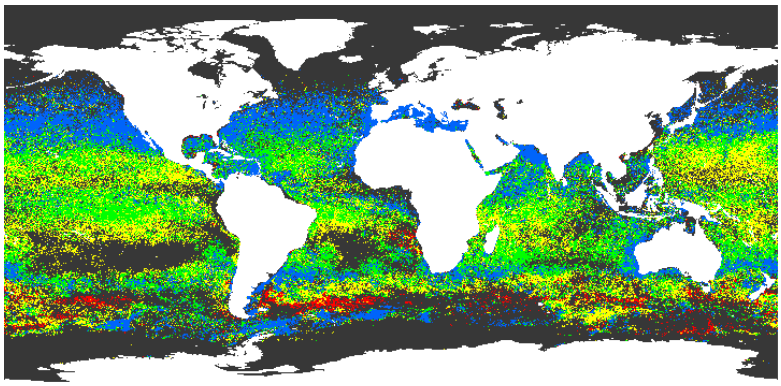
Figure 4.2.1 (suite) : *Cartes mensuelles au quart de degré pour mai à juillet 2001. En rouge les diatomées, en bleu les haptophytes, en vert les Prochlorococcus, en jaune les cyanobactéries, en gris clair et foncé respectivement, les phaeocystis et les blooms de coccolithophoridés.*



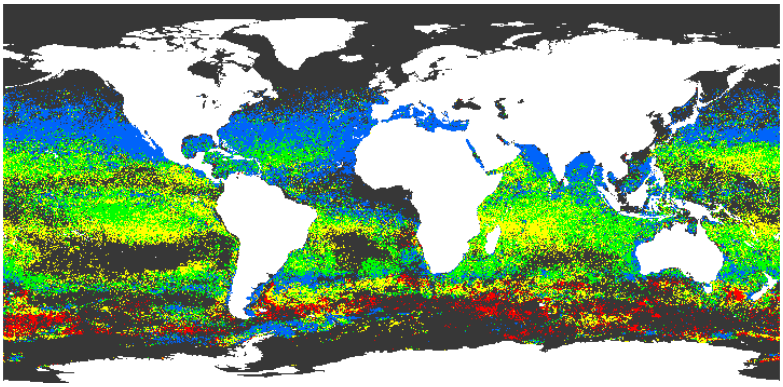
SEPTEMBRE 2001



OCTOBRE 2001



NOVEMBRE 2001



DECEMBRE 2001

Figure 4.2.1 (suite) : *Cartes mensuelles au quart de degré pour septembre à décembre 2001. En rouge les diatomées, en bleu les haptophytes, en vert les Prochlorococcus, en jaune les cyanobactéries, en gris clair et foncé respectivement, les phaeocystis et les blooms de coccolithophoridés.*

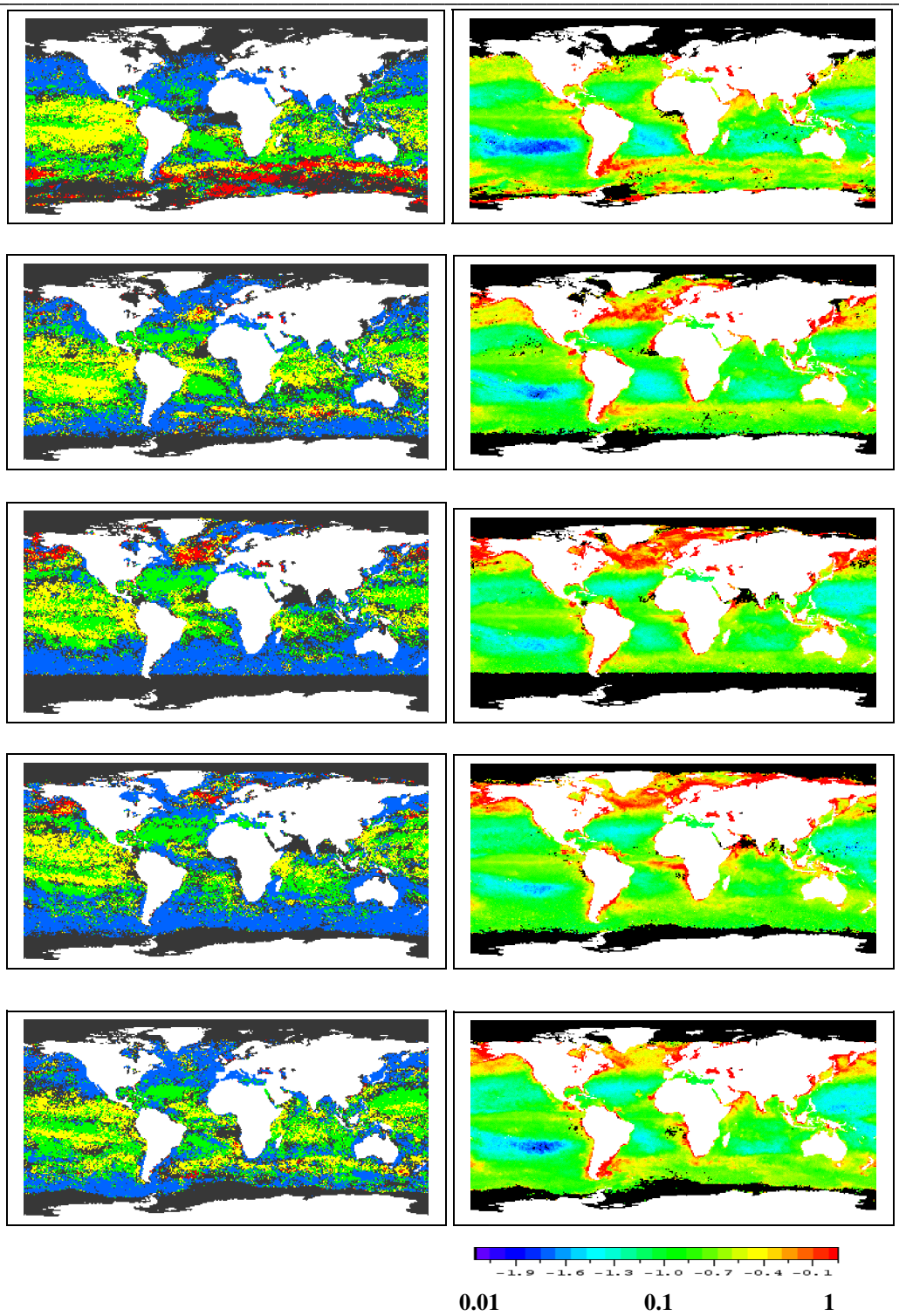


Figure 4.2.2: *Cartes mensuelles de concentrations en chlorophylle a SaWiFS (à droite en mg.m^{-3}) et les groupes dominants, obtenus par PHYSAT, associés (à gauche, avec en rouge les diatomées, en bleu les haptophytes, en vert les Prochloroccocus et en jaune les cyanobactéries) pour les mois de janvier, avril, juin, août et octobre de l'année 2001. Les pixels non identifiés ou pour lesquels il n'y a pas de données sont en noirs.*

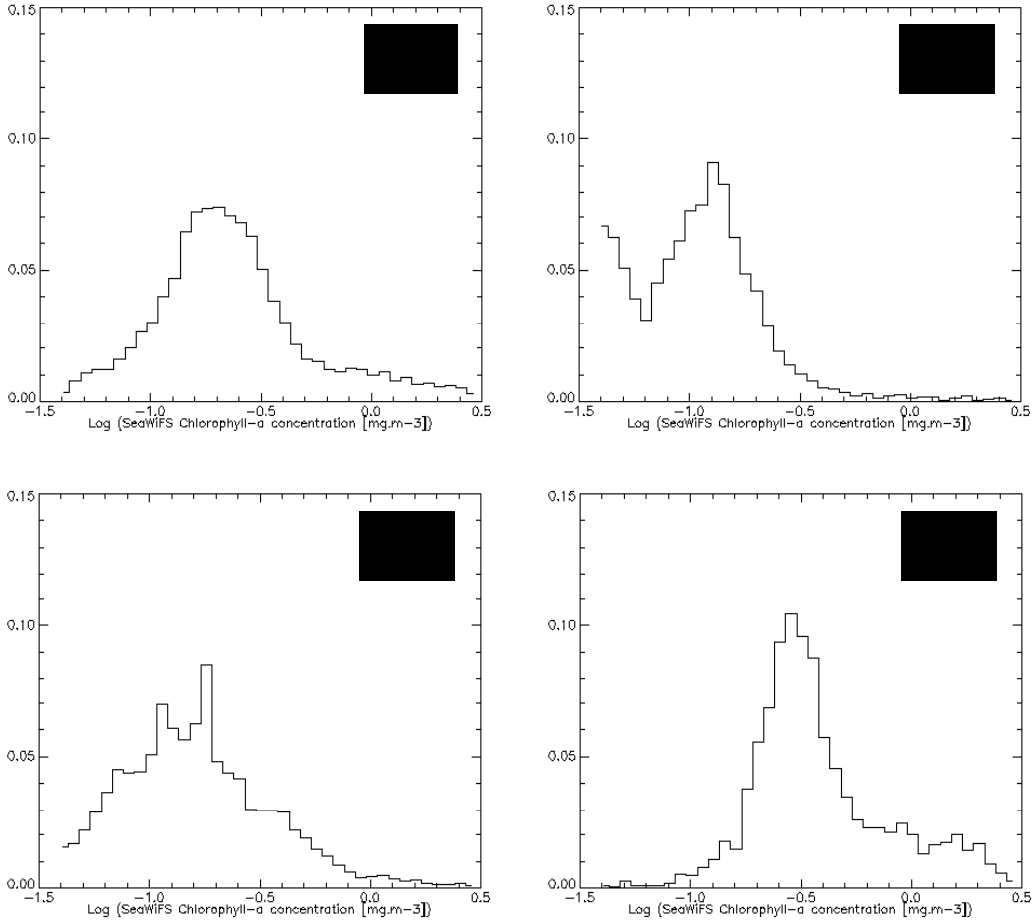


Figure 4.2.3 *: Histogramme des fréquences relatives des valeurs de Chl a SeaWiFS pour l'année 2001 et pour les quatre assemblages de phytoplancton dominés par a) haptophytes, b) Prochlorococcus, c) cyanobactéries et d) diatomées.*

4.3 Significations des régions non labellisées

La variabilité du phytoplancton marin, à l'échelle globale, ne se résume bien évidemment pas aux quatre groupes détectés par PHYSAT. Par exemple les cryptophytes, chrysophytes et chlorophytes ne sont pas considérés par la méthode PHYSAT, tout comme certains groupes connus pour leur rôle particulier dans la biochimie marine, comme les fixateurs d'azote « trichodesmium » ou de carbonate de calcium, les coccolithophoridés. Cela est en partie dû aux spécificités des campagnes GeP&CO. En effet, si ces campagnes ont échantillonné une large couverture saisonnière et une grande variété de types d'eau, elles n'ont pas rencontré de floraisons de trichodesmium ou de coccolithophoridés, ne permettant donc pas par la suite d'identifier les spectres éventuels de ces groupes.

De plus, lors de l'élaboration de la méthode PHYSAT, les pigments caroténoïdes comme l'alloxanthine et la prasinoxanthine, marqueurs des groupes chryptophytes et prasinophytes, n'ont pas pu être pris en compte car ils sont souvent présents seulement à l'état de trace ce qui augmente le risque d'erreurs dans la mesure.

Comme évoqué dans la section précèdente, PHYSAT ne parvient pas à labelliser certaines zones, en particulier dans l'Océan Austral. La forme de ces « patchs », leur persistance et leur saisonnalité laisse penser qu'ils pourraient être le lieu d'apparition de groupes aux propriétés optiques particulières, comme par exemple des floraisons de phaeocystis ou de coccolithophoridés, non rencontrés pendant les campagnes GeP&CO. Cette hypothèse doit bien sûr être validée.

PHYSAT, tel que défini jusqu'ici, à l'aide des inventaires de pigments, ne représente pas de façon exhaustive l'ensemble des groupes dominants les eaux du globe. Il est donc intéressant à ce stade de se pencher sur les zones non labellisées en partant à la recherche d'éventuels autres groupes. En l'absence de mesures in-situ systématiques, j'ai adopté une approche empirique basé sur l'étude des spectres de nLw* dans chacune de ces zones pour tenter de trouver une correspondance avec ce que l'on sait de la distribution géographique des groupes non échantillonnés pendant GeP&CO.

4.3.1: Identification des blooms de coccolithophoridés avec PHYSAT

Les coccolithophoridés sont des algues microscopiques qui possèdent la particularité d'avoir des cellules recouvertes par des écailles calcifiées, appelées « coccolithes ». Ce calcaire est puisé dans le stock de carbone de l'océan et y retourne en partie à la mort des cellules, lorsque leurs squelettes tombent au fond des océans et s'y accumulent. Elles participent ainsi à la régulation de la teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère. Lorsque ces algues se trouvent dans les conditions favorables de croissance (lumière et éléments nutritifs adaptés), elles se multiplient sur de larges zones, sous forme de floraisons intenses, que nous appellerons ici « bloom ». Ces dernières sont facilement repérables en fin d'existence en raison de leur couleur laiteuse turquoise, visible depuis l'espace. Cette coloration vient de la réflexion forte de la lumière par les cellules de carbonate de calcium qui forment les coquilles. Ces dernières flottent à la surface à la mort des cellules et sont alors très visibles depuis l'espace. Ainsi, les coccolithophoridés ont été le premier groupe détecté à partir des mesures par satellites (Holligan 1983). La figure 4.3.1 montre une climatologie des blooms de coccolithophoridés de 1978 à 1986 à partir du capteur CZCS (Brown et al, 1994) ou d'octobre 1997 à septembre 1999 à partir des données SeaWiFS (Iglessias-Rodriguez, 2002). Les algorithmes de détection utilisés sont basés sur des seuils sur les valeurs de nLw.

Cependant, à l'occasion du travail de thèse présenté ici, j'ai pu mettre en évidence un problème de taille concernant l'application des algorithmes déjà existants aux données SeaWiFS de niveau 3. Renseignement pris auprès de la NASA, via le forum de discussion associé au données SeaWiFS, un masque appelé « coccolithophorids mask » est utilisé pour éliminer les pixels qui présentent des réflectances fortes. J'ai pris contact avec Christopher Brown (NOAA), auteur des derniers algorithmes de détection basés sur le nLw, qui n'avait pas conscience de ce problème. Les cartes de la figure 4.3.1 sont donc biaisés et ne prennent en compte que les pixels qui sont passés à travers les mailles du masque « coccolithes ». Au vu des résultats obtenus par Brown et al. 1994 et Iglesias et al. 2000, il semble cependant que le masque SeaWiFS ne soit pas tout à fait efficace et laisse tout de même passer beaucoup de pixels « coccolithes ».

Il est bien sûr possible pour des études locales de refaire des niveaux 3 à partir des données de niveau 2 et d'appliquer les algorithmes SeaWiFS, via SEADAS, tout en supprimant le masque « coccolithes ». Il était cependant difficilement envisageable de retraiter ainsi l'archive complète dans le cadre de ma thèse. C. Brown va tout de même refaire l'ensemble de ses cartes « blooms de coccolithophoridés » en repartant des produits de niveau 2, sans masque, pour toute l'archive. A cette occasion, il nous a proposé de mettre les nouvelles données de niveaux 3 à notre disposition. Nous devrions donc disposer d'ici peu de nouvelles données non biaisées concernant ce groupe….

En attendant, le travail présenté ici est donc une première approche permettant de tester la méthode PHYSAT et les spectres de nLw* afin de détecter les blooms de coccolithophoridés et de comparer ces résulats avec ceux déjà existants, bien que biaisés. On suppose qu'en utilisant des synthèses sur des périodes assez longues on peut reproduire la distribution spatiale des blooms de façon assez correcte.

Dans ce but, j'ai étudié les caractéristiques des spectres de nLw* dans le cas de blooms de coccolithophoridés. Cela a été réalisé sur une zone de l'Atlantique Nord en juin 1998, dont le bloom de coccolithophoridés avait été observé avec SeaWiFS et qui présentait un signal en nLw* très particulier. Ce signal est défini par des valeurs de nLw* très fortes à toutes les longueurs d'onde SeaWiFS (entre 2.5 et 6) et avec nLw*(443) supérieur à nLw*(490). Ces anomalies de spectres de nLw* sont complètement cohérentes avec le fait que les blooms de coccolithes sont très réfléchissants à toutes les longueurs d'onde (surtout à la fin des blooms, lorsque les « coquilles » remontent à la surface).

	412	**443**	**490**	**510**	**555**	**Autres Critères**
Coccolithophoridés min.	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	

Coccolithophoridés max.	6	6	6	6	6	nLw*(443)> nLw*(490)

Table 4.3.1 : *Critères définissant les spectres de nLw* caractéristiques de Coccolithophoridés.*

Pour comparaison avec les cartes SeaWiFS, les caractéristiques des spectres de nLw* ainsi définies ont été appliquées à l'ensemble des données pour la période octobre 1997 à septembre 1999 (Figure 4.3.1, en bas). On remarque un très bon accord entre les deux méthodes, avec une répartition des blooms de l'Atlantique Nord identique. Quelques différences sont observées pour les eaux côtières pour lesquelles SeaWiFS ne détecte pas de blooms. Cela s'explique facilement par le fait que des critères additionnels, non basés sur les luminances, ont été appliqués lors du traitement par Iglesias-Rodriguez (4.3.1). Ainsi, les eaux côtières peu profondes (comme au nord de l'Australie) sont éliminées du traitement afin d'éviter la confusion avec les fonds blancs sableux ou des eaux cotières riches en sédiment, qui peuvent être détectés, par erreur, comme blooms de coccolithophoridés.

Notons que la comparaison avec les résultats obtenus avec l'ancien capteur CZCS tend à montrer que, malgré le masque SeaWiFS, on peut détecter de façon satisfaisante la localisation des blooms de coccolithophoridés (Figure 4.3.1). Cela n'est évidemment pas applicable à des études sur des petites périodes ou d'inter-annualité.

Afin de compléter cette étude, l'ensemble des années SeaWIFS disponibles au moment de l'étude ont été traitées. La climatologie des blooms de coccolithophoridés par PHYSAT, sur la période de données SeaWiFS allant d'Octobre 1997 à Décembre 2003, est également présentée en figure 4.3.2.

Ainsi, la méthode PHYSAT présentée auparavant peut être complétée par la détection des blooms de coccolithophoridés. Même si ces blooms n'ont pas été échantillonnés lors des campagnes Gep&CO, et n'ont donc pas pu être détectés dès l'étude pigmentaire, le bon accord des résultats PHYSAT avec les méthodes préexistantes nous encourage à inclure désormais cette nouvelle classe dans PHYSAT. La figure 4.3.3 montre d'ailleurs deux exemples de cartes mensuelles PHYSAT avec les blooms de coccolithophoridés inclus. On observe ainsi que l'atlantique nord (Balch et al., 1996) en juin 1998 et 2003 a été le lieu de blooms importants de coccolithophoridés.

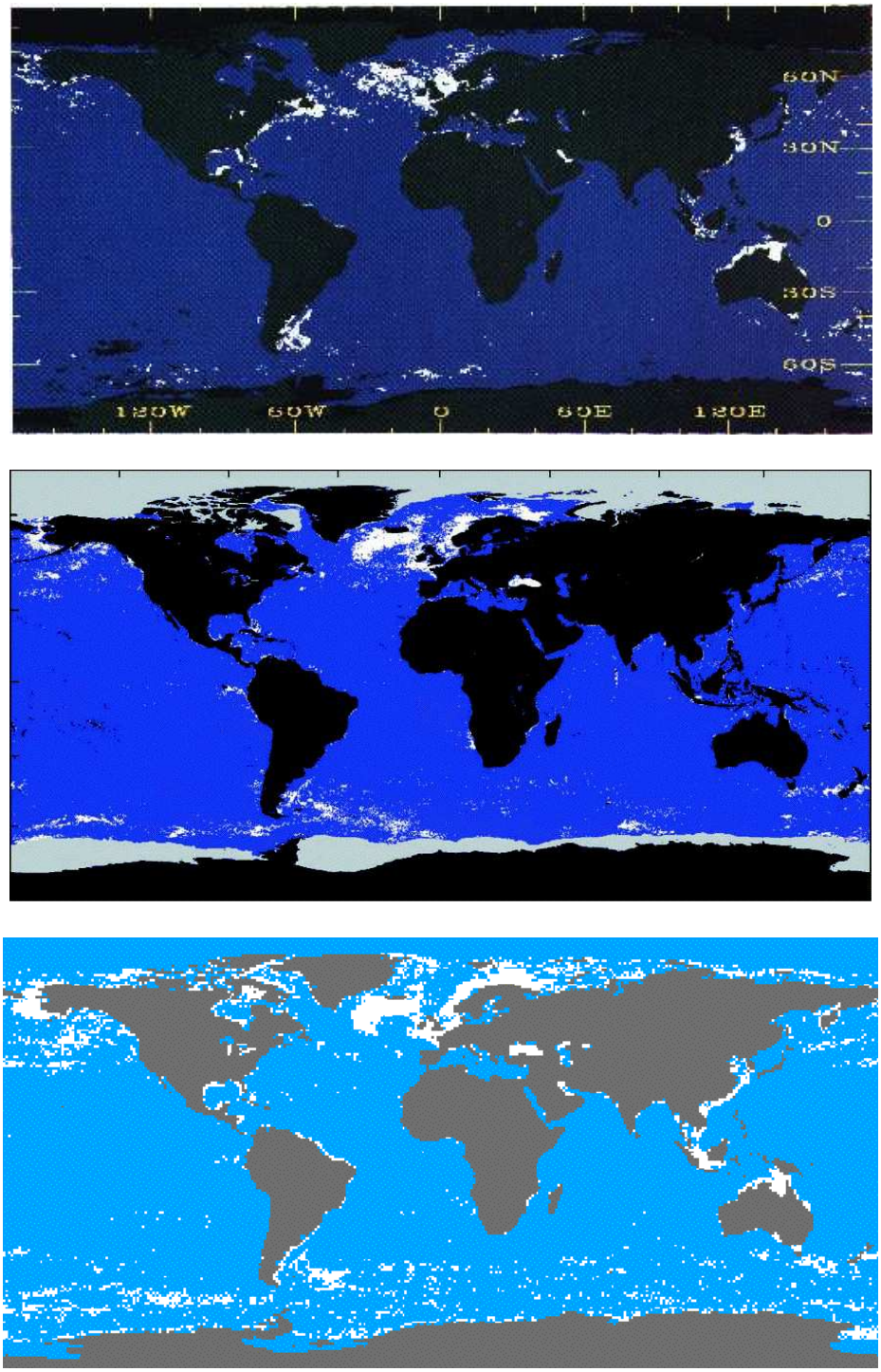


Figure 4.3.1 : *Climatologie de détection de blooms de Coccolithophoridés (en blanc) pour 1978 à 1986 avec CZCS d'après Brown et al., 1994 (en haut), pour la période 10/97 à 09/99 avec SeaWiFS d'après Iglesias-Rodriguez et al., 2002 (au centre) et la méthode PHYSAT (en bas). Ces cartes sont réalisées en considérant qu'un pixel devient blanc si un bloom de coccolithophoridés au moins y a été détecté sur la période considérée.*

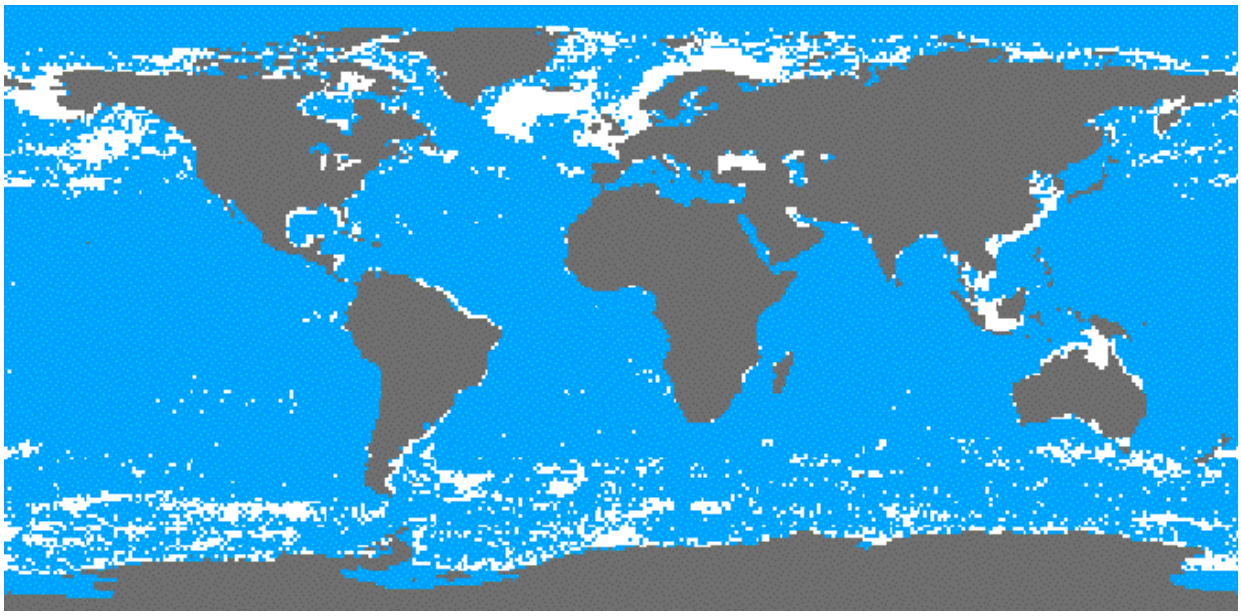


Figure 4.3.2 : *Climatologie de détection de blooms de Coccolithophoridés par la méthode PHYSAT. Synthèse sur la période SeaWiFS 1998-2003.*

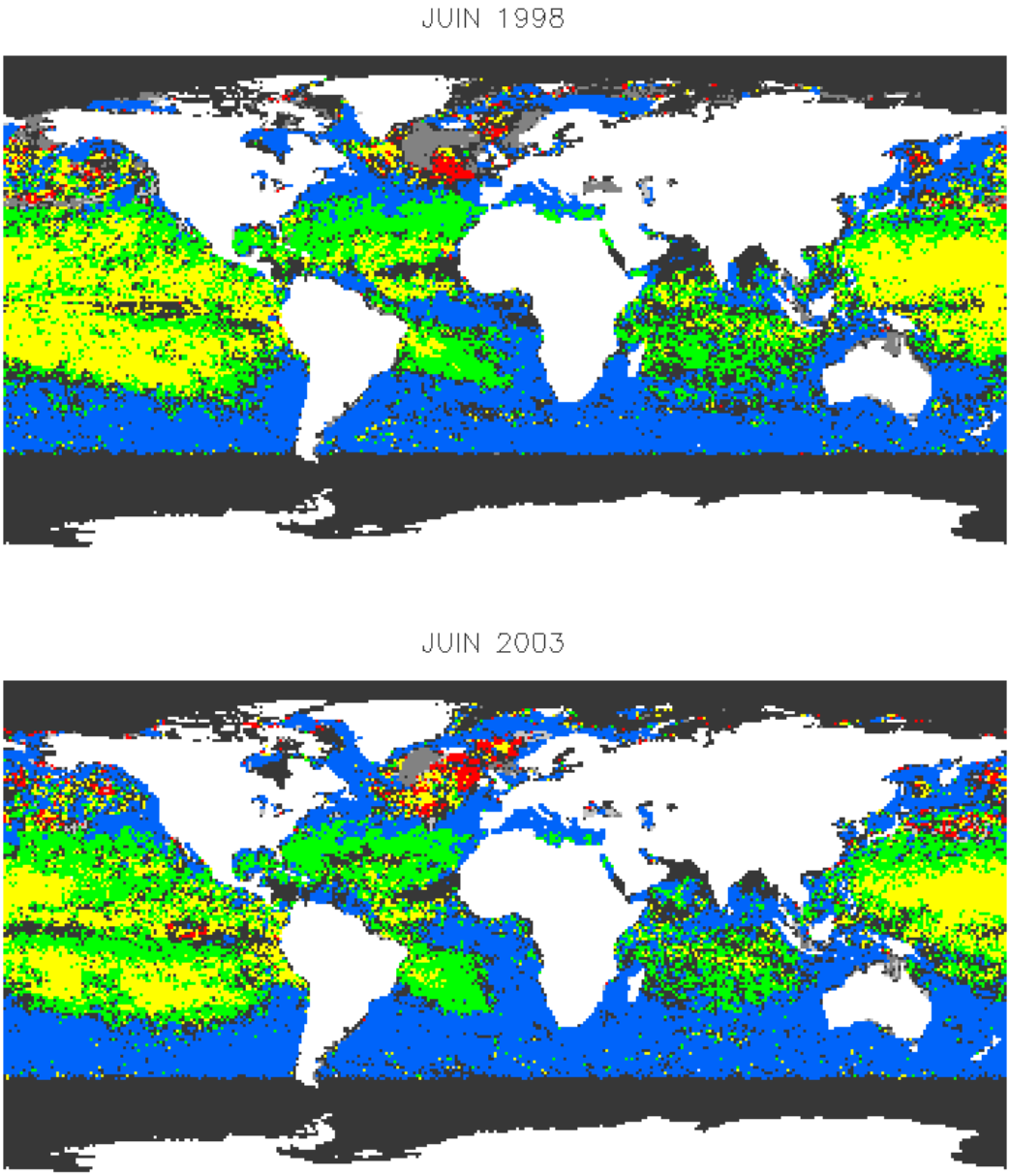


Figure 4.3.3 : *Cartes de groupes de phytoplancton dominants pour les mois de Juin 1998 et Juin 2003 réalisées avec PHYSAT complété par les Coccolithophoridés. Ces deux mois sont remarquables en raison des blooms de coccolithophoridés étendus dans l'Atlantique Nord, en gris foncé. Les autres couleurs correspondent aux autres groupes PHYSAT : diatomées en rouge, Prochlorococcus en vert, SLC en jaune et haptophytes en bleu.*

4.3.2 : Identification des Trichodesmium

Parmi les groupes de phytoplancton qui retiennent l'attention des chercheurs, les trichodesmiums tiennent une place de choix (Subramaniam et al., 2002). Ce groupe est pourtant rarement dominant à l'échelle du globe, mais il présente des particularités qui le rendent remarquable, autant par ses floraisons spectaculaires et parfois toxiques durant lesquels la mer peut prendre une coloration rouge (Figure 4.3.4), que par ses capacités à survivre dans un milieu où la plupart des autres algues microscopiques ne peuvent se développer. Ainsi, les trichodesmiums sont formés de filaments très fins (4 à 5 µm de diamètre) (Figure 4.3.5) et ont la possibilité de s'approvisionner en azote dissout (N_2), ce qui leur permet, via l'utilisation de photons supplémentaires, de se développer dans les zones appauvries en azote. Ils s'accumulent souvent dans les zones pauvres en nutriments, ensoleillées et de convergence des vents. Les trichodesmiums sont considérés comme les principaux responsables de la fixation d'azote et de production primaire dans les eaux pauvres (Capone et al,, 2005). L'évaluation de leur rôle dans la pompe du carbone océanique est donc importante pour bien quantifier le rôle de ces régions. Cela passe par une meilleure connaissance de leur répartition spatiale et temporelle. C'est pourquoi des recherches sont menées depuis quelques années pour tenter de définir un algorithme de détection des trichodesmiums à partir d'observation satellites (Subramaniam et al., 2002, Dupouy, communication personnelle).

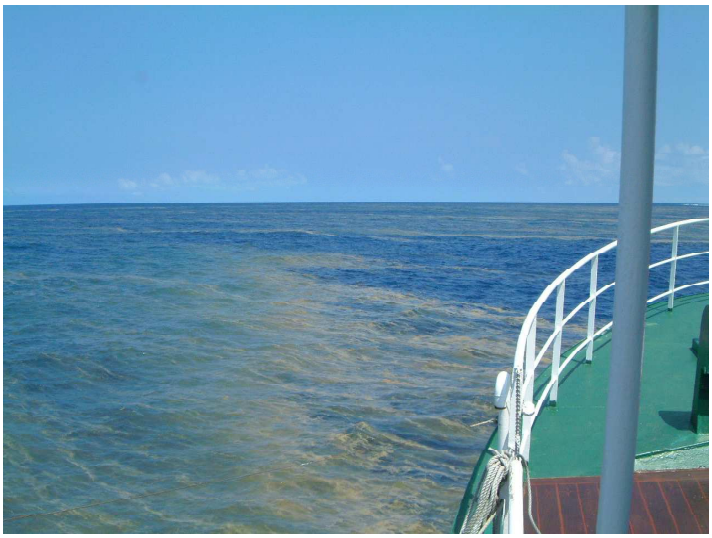


Figure 4.3.4 : *Photographie d'une floraison de Trichodesmium lors de la mission ZONECO PIl 3 en Janvier 2004. IRD Nouméa.*

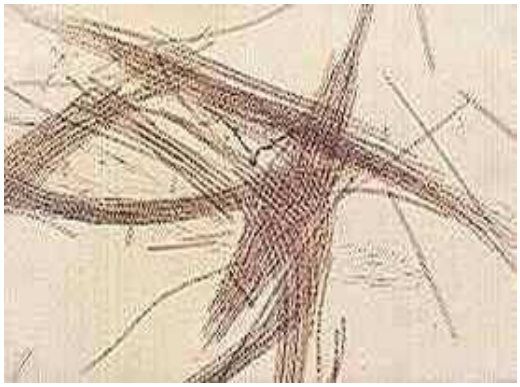


Figure 4.3.5 : *Cellules de Trichodesmiums et filaments associés (Photographie IRD).*

L'étude d'un signal « *Trichodesmium* » s'est faite par l'étude des anomalies des spectres de

nLw* dans les eaux avoisinantes de la Nouvelle-Calédonie, connues pour être propices à l'apparition de floraisons de ce groupe. Ainsi, une première étude a été réalisée sur la période de mars 1998 en raison de la présence caractéristique de fortes concentrations en chlorophylle *a* dans la région (Figure 4.3.6), pourtant connue pour sa faible teneur en nutriments. Des floraisons ont également été observées en mer à cette époque (Dupouy C., communication personnelle).

L'anomalie détectée dans cette région est caractérisée par des valeurs de nLw* fortes, généralement entre 1.1 et 3, et quelques critères complémentaires résumés dans le tableau ci-dessous, qui définissent en fait un spectre normalisé en forme de U :

	412	**443**	**490**	**510**	**555**	**Autres Critères**
Trichodesmium min.	1.6	1.1	1.1	1.1	1.3	nLw*(412) > nLw*(443) nLw*(412) > nLw*(490)
Trichodesmium max.	3.0	3	3	3	3	nLw*(490) > nLw*(510) nLw*(412) > nLw*(555) nLw*(555) > nLw*(490)

Table 4.3.2 : *Critères définissant les spectres de nLw* lors de floraisons de Trichodesmium.*

Des compositions colorées de la zone géographique concernée montrent que le signal observé est vraiment spécifique à la zone Nord-Est de la Nouvelle-Calédonie (Figure 4.3.6).

Les critères définis ci-dessus ont été appliqués aux cartes globales SeaWiFS pour les jours 49 à 58 de 1998. La synthèse des groupes dominants sur ces 10 jours est présentée en figure 4.3.7 et montre clairement que le signal « *Trichodesmium* » n'apparaît pas ailleurs de façon significative. Ceci est cohérent avec la connaissance que l'on a de la répartition des floraisons de *Trichodesmiums* et tend à montrer que les critères incorporés ne mènent pas à des identifications erronées.

Cependant, les critères définis empiriquement ici ont besoin d'être validés par des études combinées « mesures en mer – observations satellites ». Une première expérience de validation du signal identifié dans les eaux de Nouvelle Calédonie a été réalisée par Italo Masotti (LOCEAN) lors de sa thèse actuellement en cours. Cette expérience montre une certaine cohérence entre les mesures en mer et les résultats PHYSAT comme le montre la figure 4.3.8.

Ce résultat est encourageant mais il sera tout de même nécessaire de poursuivre cet exercice de validation, avec d'autres observations coïncidentes et dans d'autres régions du globe.

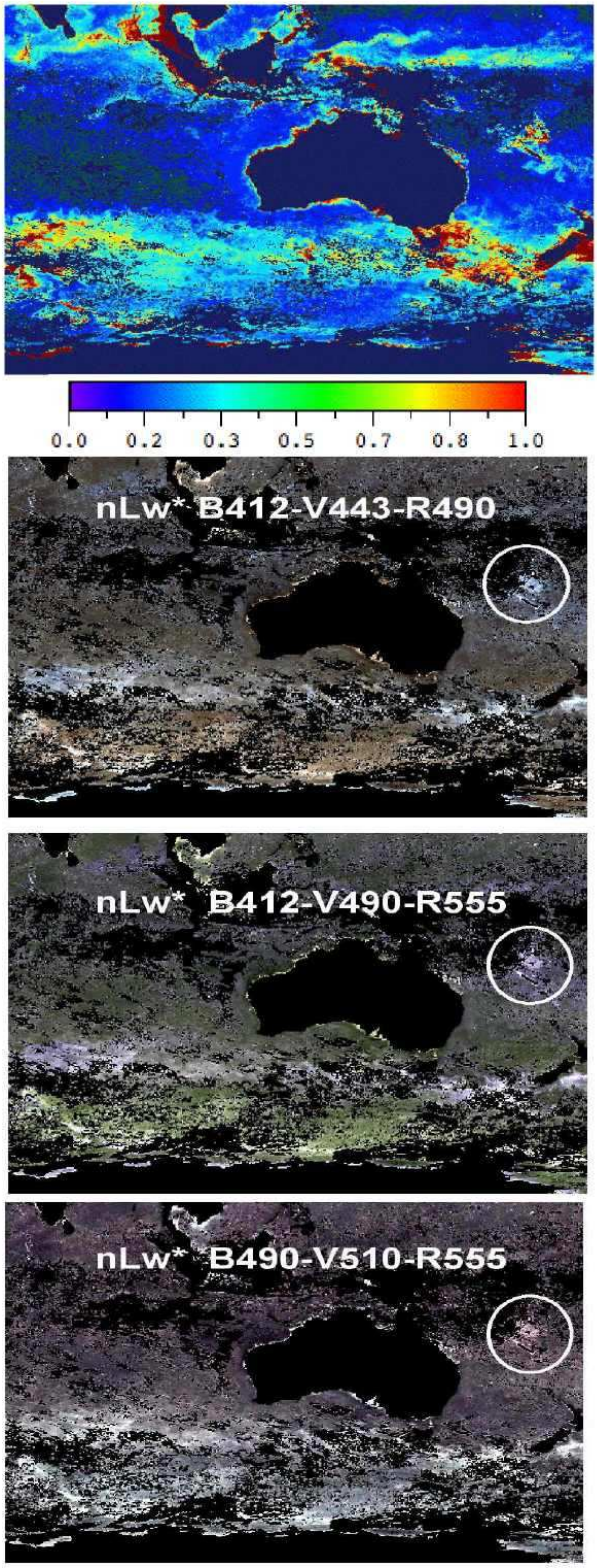


Figure 4.3.6: *Cartes de concentrations en chlorophylle a (en haut) et compositions colorées des nLw* à 412 nm (B), 443 nm (V) et 490 nm (R) en haut, à 412 nm (B), 490 nm (V) et 555 nm ® au centre et à 490 nm (B), 510 nm (V) et 555 nm (R) en bas, autour de la zone d'étude du signal Trichodesmium, au Nord Est de la Nouvelle-Calédonie, matérialisée par un cercle blanc.*

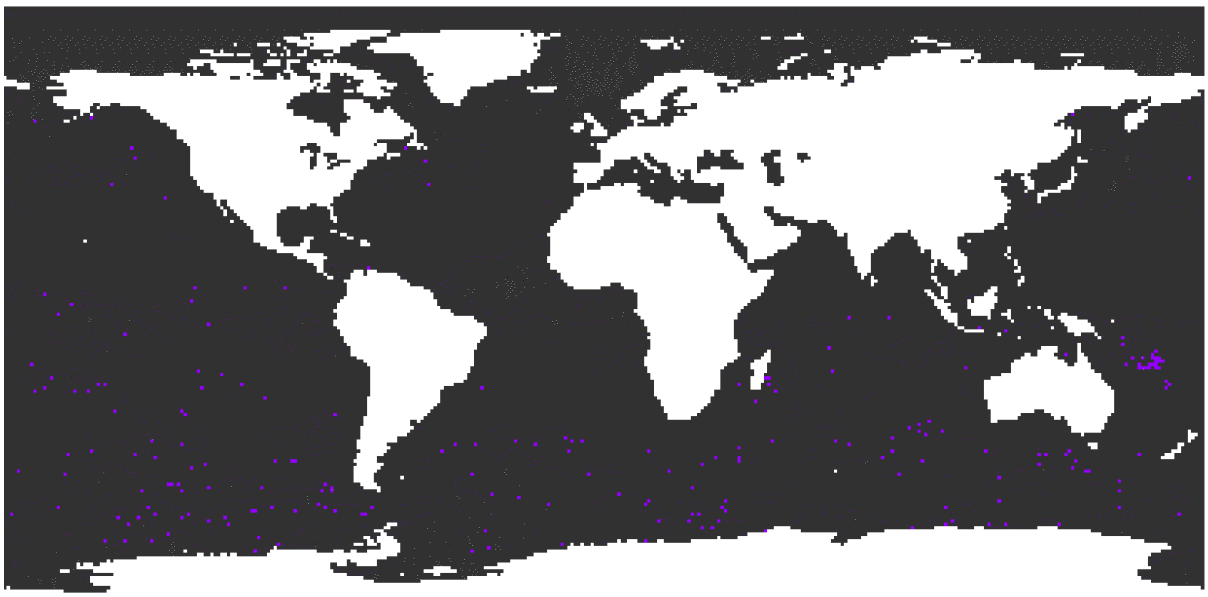


Figure 4.3.7 : *Synthèse de la détection de floraisons de Trichodesmiums dominants sur la période du jour 49 au jour 58 de l'année 1998. En dehors de quelques pixels isolés dans l'océan Austral, et plutôt caractéristiques d'un « bruit », la zone Nord-Est de la Nouvelle-Calédonie ressort nettement.*

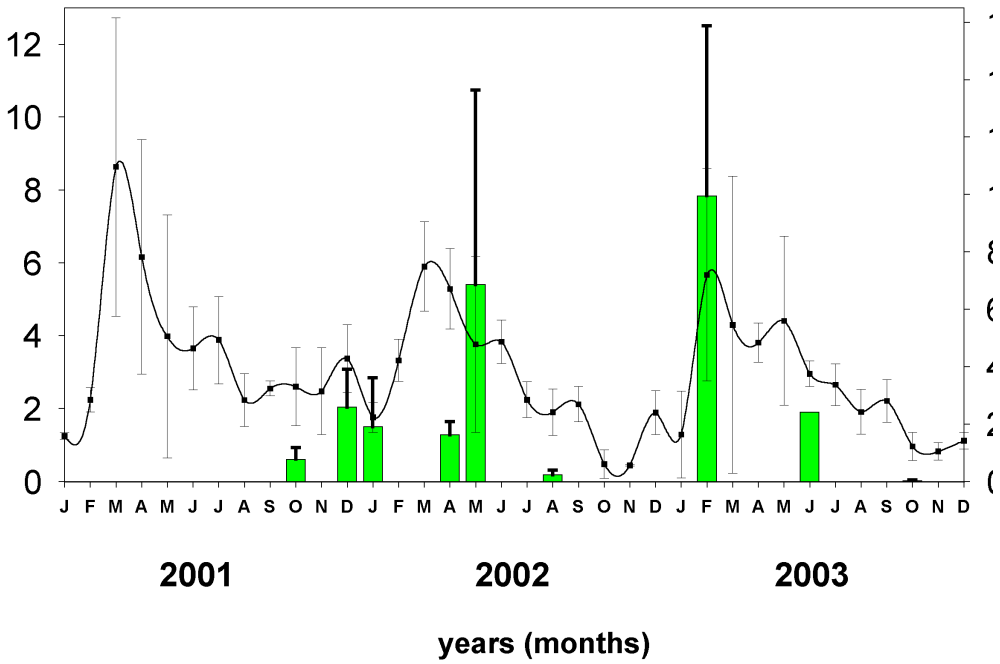


Figure 4.3.8 : *Comparaison entre le nombre relatif de pixels détectés comme étant dominés par le groupe Trichodesmium sur des synthèses PHYSAT de 10 jours (courbe) et l'abondance de ce groupe mesuré lors des campagnes en mer (comptage entre 0 et 80m pour 42 profiles effectués lors de 9 campagnes DIAPALIS dans le cadre du programme français DIAPAZON-PROOF) , dans la région de la Nouvelle Calédonie (160°E-175°E, 15°S-25°S), entre 2001 et 2003.*

4.3.3 : Un signal Particulier dans l'océan Austral : Phaeocystis ?

L'océan Austral est connu pour son rôle majeur dans les flux de carbone (atmosphère-océan) en raison, notamment, des vastes et intenses floraisons de phytoplancton qui s'y produisent chaque printemps. La production annuelle de phytoplancton est très forte dans les régions où la glace de mer fait son apparition en hiver. L'alternance de fonte et de gels à la surface entraîne des mouvements verticaux intenses des masses d'eau et des remontées de nutriments propices aux phytoplancton. Cependant l'équilibre de cette région est sensible aux variations climatiques et il est nécessaire, là aussi de se doter de moyens efficaces de surveillance de l'intensité des floraisons et de leur caractéristiques. Ainsi, les cartes de chlorophylle a sont utilisées depuis quelques années et d'autres études visent à étudier les liens entres les conditions océaniques, telles que la profondeur de la couche de mélange, et les successions de groupes de phytoplanctons (Goffart et al. 2000, Smith et al. 2003).

Jusqu'à présent, les campagnes en mer ont permis de mettre en évidence trois grands groupes de phytoplancton : les diatomées, les haptophytes et parmi ces derniers un groupe particulier et remarquable : les phaeocystis. Si les diatomées sont connues pour leur capacité à exporter le carbone vers le fond des océans, on sait également que les floraisons de Phaeocystis peuvent être très efficaces (Di Tullio et al. 2000). Ils sont également des producteurs important de DMS (Belviso et al, 2004), composé soufré jouant un rôle majeur dans la formation d'aérosols de sulfate qui influent sur le climat. Il est donc important de bien connaître la répartition spatiale et temporelle de ces groupes.

Grâce à PHYSAT, les diatomées et les haptophytes sont désormais observés en global et se succèdent avec les saisons. Les cartes PHYSAT laissent cependant apparaître de larges régions océaniques non labellisées, principalement aux mois de Janvier et Février dans l'Austral (Figure 4.2.1) qui succèdent et précèdent des eaux dominées par les Haptophytes. On peut donc se demander si ces régions ne seraient pas le siège de floraisons d'un groupe particulier, les phaeocystis. En effet, ces algues qui se développent dans des eaux riches en nitrates présentent la particularité de former des floraisons étendues et un mucus épais d'aspect blanchâtre et donc très réfléchissant. Il est donc probable qu'ils soient associés à des propriétés optiques particulières

L'étude des spectres de nLw* des zones non labellisées par PHYSAT dans l'Océan Austral a mis en évidence un signal très caractéristique, présenté dans la table 4.3.3. La forte probabilité de présence de Phaeocystis est renforcée par le fait qu'à l'échelle globale et sur une année, ce signal est présent uniquement dans l'océan Austral, souvent au sud des diatomées et plus proche de la glace de mer, en accord avec les travaux effectués en mer de Ross (Smith et al. 2003) (Figure 4.3.9). Quelques traces le long de certaines côtes sont cohérentes avec des floraisons locales, bien connus en raison de leur toxicité sur la faune marine (4.3.10). Tous ces éléments nous conduisent à penser que ces larges zones sont caractéristiques de floraisons de phaeocystis, et que les éléments dont nous disposons sont suffisants pour ajouter une nouvelle classe les concernant à PHYSAT. Il sera nécessaire, bien sur, de poursuivre la validation de cette nouvelle classe par la suite, à l'aide de données de terrain. Des contacts ont été pris en ce sens avec quelques chercheurs du CSIRO-Australie et avec Hubert LOISEL de l'ELICO/Wimereux qui disposent de données de campagnes respectivement entre Hobart et le continent Antarctique et en Mer du Nord.

	412	443	490	510	555	Autres Critères
Phaeocystis min.	1.0	1.1	1.2	1.2	1.2	nLw*(412)<nLw*(443)
Phaeocystiss max.	1.4	1.4	1.6	1.6	1.6	nLw*(443)< nLw*(490)

Table 4.3.3: *Critères définissant les spectres de nLw* caractéristiques de Phaeocystis*

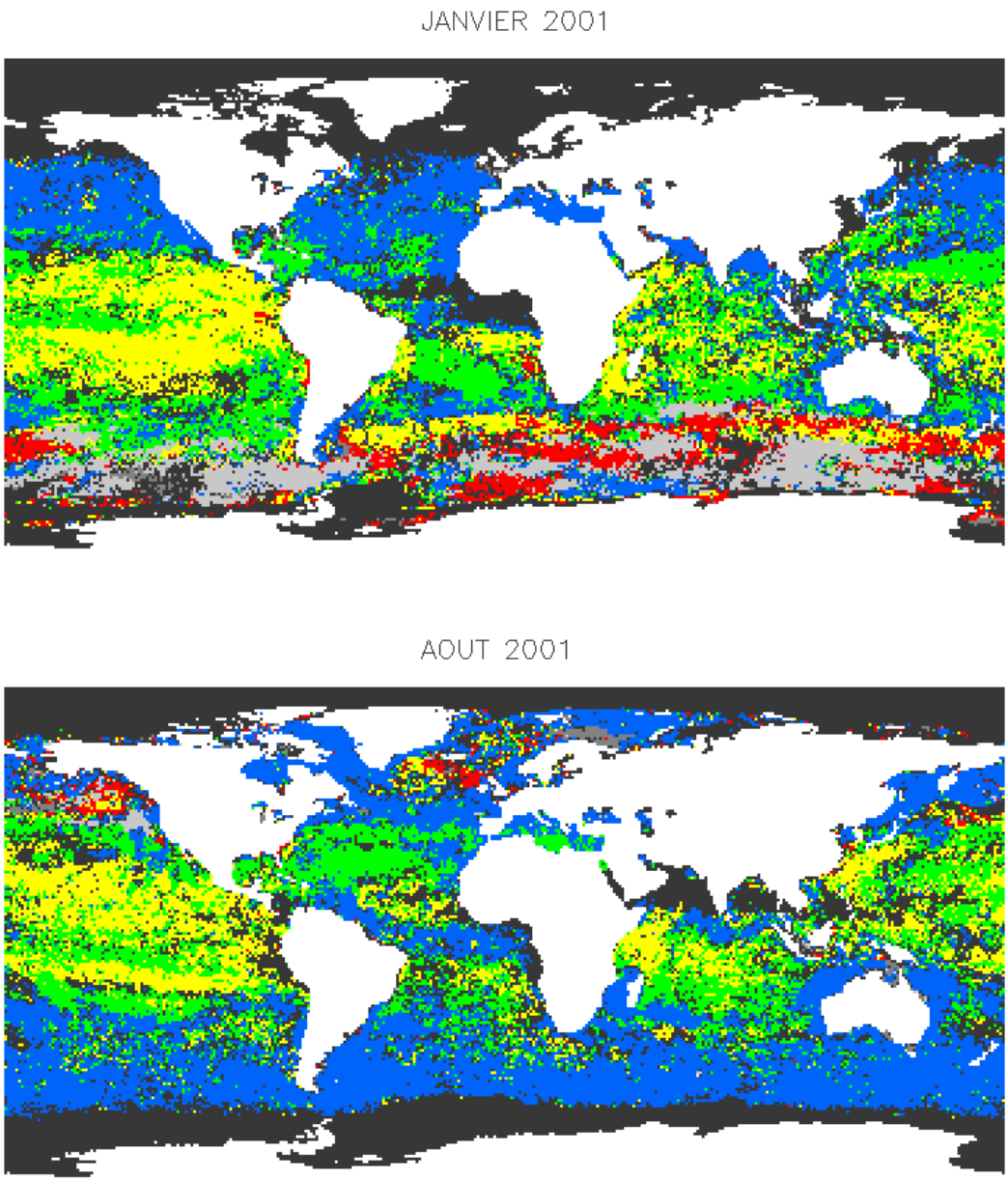


Figure 4.3.9: *Carte de groupe de phytoplancton dominants, réalisée à l'aide de PHYSAT avec les coccolithophoridés (gris foncé) et les Phaeocystis (gris clair), pour le mois de janvier et août 2001.*

Figure 4.3.10 : *Forte floraison de phaeocystis sur une plage du Pas de Calais – France. Photographie de l'IFREMER.*

RESUME DU CHAPITRE 4

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord recherché à l'échelle globale les signaux identifiés dans le chapitre 3, lors des campagnes GeP&CO, caractéristiques des quatre groupes de phytoplancton dominants (diatomées, *Prochlorococcus*, SLC et haptophytes). Les différentes étapes de sélection, de traitement et de labellisation des spectres de nLw* ont été regroupées sous le nom de méthode PHYSAT .

La méthode PHYSAT a ainsi été appliquée aux données SeaWiFS journalières de l'année 2001 et des synthèses mensuelles au degré de résolution ont été réalisées, en sélectionnant le groupe le plus fréquent et présent pour au moins 50% des pixels valides (validité établie d'après les critères développés au chapitre 3). Les résultats obtenus par PHYSAT montrent que les quatre formes de signaux identifiées dans le chapitre 3, et associées à un groupe dominant, se retrouvent à l'échelle globale sous forme d'ensembles spatialement et temporellement cohérents. On a pu ainsi réaliser, pour la première fois, des cartes de groupes de phytoplancton dominants à l échelle globale à partir uniquement d'observation par satellite.

J'ai également montré dans ce chapitre que les groupes coccolithophoridés, Trichodesmium et Phaeocystis sont associés à des spectres de nLw* spécifiques, ce qui porte à 7 le nombre de groupes dans PHYSAT. Des études complémentaires de validation de ces groupes devront cependant être réalisées par la suite.

CHAPITRE 5

REPARTITION ET SUCCESSION DES GROUPES DE PHYTOPLANCTON DOMINANTS A L'ECHELLE GLOBALE SUR LA PERIODE SEAWIFS

La méthode PHYSAT a été appliquée à l'intégralité des années SeaWiFS qui étaient disponibles au début de l'année 2005. On dispose donc des cartes journalières, mensuelles et des climatologies sur la période allant de septembre 1997 à décembre 2004 (voir les cartes en annexes). Le travail présenté dans ce chapitre porte sur l'étude des groupes de phytoplancton dominants sur cette période à l'échelle du globe, et pour quelques régions océaniques choisies : l'Atlantique Nord, l'Océan Austral et le Pacifique dans sa partie équatoriale (figure 5.1.1). Les régions de l'Océan Indien,de la Mer Méditerranée et du Pacifique Nord ont également été étudiées. Les résultats obtenus pour ces régions sont présentés en annexe afin de ne pas alourdir excessivement la lecture de ce manuscrit.

Ainsi, un bilan des répartitions des groupes en termes de surface occupée et de chlorophylle *a* associée (à partir des données SeaWiFS) est effectué. On dispose alors, pour la première fois, d'une vision d'ensemble de la variabilité des groupes sur la période SeaWiFS et à l'échelle globale. Ce bilan n'est toutefois pas définitif, surtout en ce qui concerne les tendances, et demandera à être complété, si possible, par les plus anciennes et futures données d'autres capteurs (CZCS, SeaWiFS, MODIS, MERIS etc.).

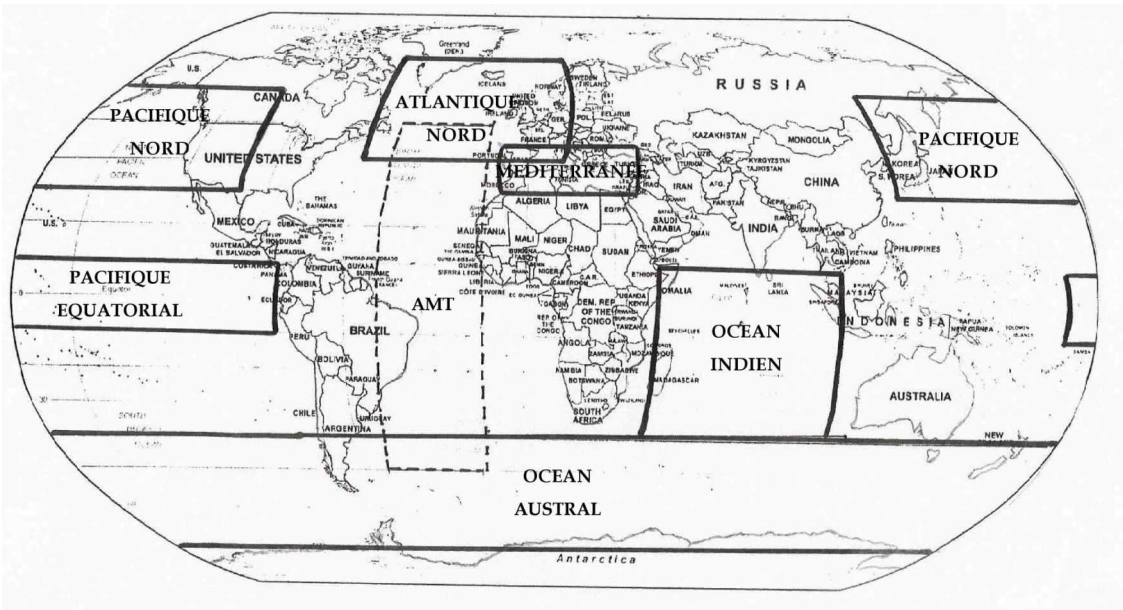


Figure 5.1.1 : *Localisations géographiques des zones étudiées dans la suite de ce chapitre.*

Dans tout ce chapitre, et sauf indication contraire, les pourcentages donnés sont des pourcentages de surface de la région considérée, couverte par un groupe donné.

L'étude globale des groupes de phytoplancton dominants à l'échelle globale est intéressante à plusieurs titres. Tout d'abord, elle permet une vue d'ensemble de la répartition spatiale et temporelle de chaque groupe et permet également d'établir une tendance générale d'évolution sur une période donnée. Un des résultats surprenants de PHYSAT est le fait que l'on retrouve les signaux des groupes dominants pour une grande partie des eaux, ce qui laisse penser que les assemblages de phytoplancton sont souvent dominés par un groupe. Un article récent concernant la biodiversité marine à l'échelle globale, en fonction de la biomasse, va également dans ce sens (Irigoien et al. 2004).

5.1 Océan Mondial

5.1.1 Groupes dominants et tendances générales

À l'échelle du globe, et pour la période 1998 à 2004, ce sont les haptophytes qui dominent en représentant, selon les saisons, de 25 à 55 % des surfaces labellisés. Les *Prochlorococcus* sont également présents pour 25 à 35 % de la surface et arrivent en deuxième position après les haptophytes en termes de chlorophylle *a*. Les SLC, avec 15 à 40% de la surface, sont aussi largement dominants et forment avec les deux premiers groupes la majeure partie des eaux du globe (figure 5.1.1). En termes de chlorophylle *a* associée, les haptophytes sont toujours en tête, suivis cette fois par les diatomées et les SLC (Figure 5.1.2). Les diatomées apparaissent saisonnièrement pour des régions bien précises et peuvent représenter, lors de périodes de floraison, jusqu'à 10% des pixels du globe et 30% de la chlorophylle *a* présente (Figure 5.1.2). Les blooms de coccolithophoridés sont très rares à cette échelle, mais sont d'une importance telle qu'ils seront également étudiés ici. Ces résultats confirment les lois générales préexistantes en montrant qu'à l'échelle globale les océans sont principalement dominés, en surface couverte, par le nano et pico plancton plutôt que par les organismes de tailles plus importantes comme les diatomées. Ces derniers compensent toutefois la faible surface occupée par leur présence en *chlorophylle a* bien supérieure.

Du point de vue de la tendance générale, sur la période étudiée, on note une progression des haptophytes ou encore un recul des *Prochlorococcus* (Figure 5.1.1 et Tableaux 5.1.1 et 5.1.2)).

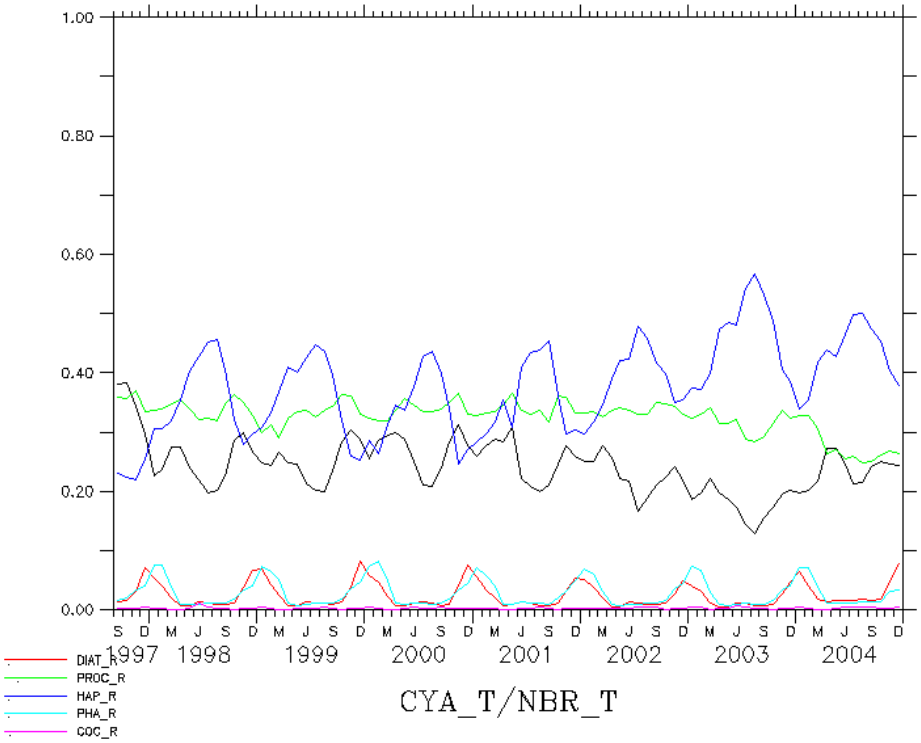


Figure 5.1.1 *: Fraction mensuelle de la surface dominée pour chaque groupe (surface dominée par le groupe / surface totale dominée par un des groupes PHYSAT), sur la période septembre 1997 – décembre 2004 pour toutes les eaux du globe.*

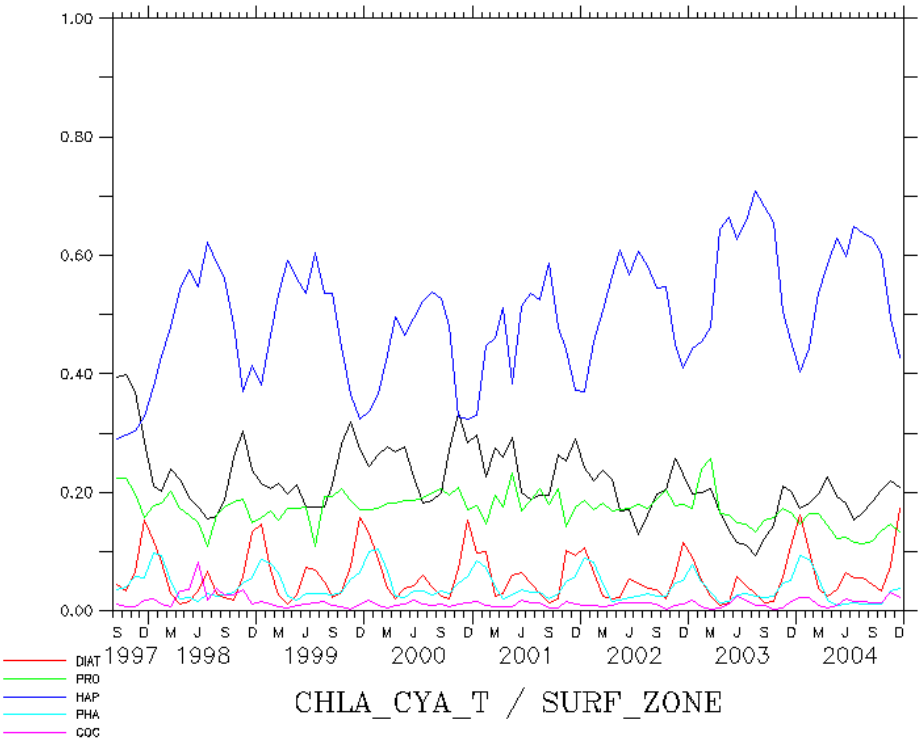


Figure 5.1.2 *: Evolution mensuelle du rapport entre la chlorophylle a associée à un groupe et la chlorophylle a, moyennée pour la période de septembre 1997 – décembre 2004 et dans l'océan mondial (80°S-80°N / 1°E – O°E). En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende de couleur en bas à gauche.*

Océan Mondial	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Haptophytes	36.2	36.5	33.2	35.7	38.8	46.2	42.7
Prochlorococcus	33.9	33	33.7	33.9	33.7	31.4	27.8
SLC	24.5	24.7	26.8	25.1	22.7	17.8	23.2
Diatomées	2.3	2.6	2.8	2.2	2.0	1.7	2.9
Phaeocystis	2.8	2.8	3.1	2.7	2.5	2.5	3
Coccolithophoridés	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3

Tableau 5.1.1 : *Pourcentages relatifs de surface labellisée pour chaque groupe dominant et pour chacune des années, sur la région considérée.*

Océan Mondial	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Haptophytes	50.3	49.1	44.4	46.9	52.1	59.3	55.4
Prochlorococcus	16.7	17.2	18.7	18.2	17.8	16.7	13.5
SLC	21	22.1	25	24.2	20.2	15.4	19
Diatomées	5	6.2	5.9	5.6	4.9	4.2	7.1
Phaeocystis	4.1	4.4	4.8	4	3.9	3.3	3.3
Coccolithophoridés	2.8	0.9	1.1	1	1	1.1	1.7

Tableau 5.1.2 : *Pourcentages relatifs de chlorophylle a pour chaque groupe dominant, et pour chacune des années sur la région considérée.*

5.1.2 Cycles saisonniers de chaque groupe

Les haptophytes

Les haptophytes couvrent jusqu'à plus de 40 % de l'ensemble des eaux du globe pour les mois de juillet et août. Ils représentent au minimum 25 à 35 % de novembre à janvier (Figure 5.1.1 et 5.1.2). On les retrouve pour les hautes latitudes, supérieures à 20° Nord et 20° Sud. Quelques patchs isolés peuvent être observés à des latitudes plus faibles, souvent associés à des zones océaniques relativement proches des côtes (figure 5.1.3). On notera par exemple des haptophytes dans le courant du bord Est de l'Amérique du Sud, également observés par Barlow et al. (2002).

Les *Prochlorococcus*

Les *Prochlorococcus* sont largement présents dans les eaux équatoriales ou celles des gyres subtropicaux, et représentent jusqu'à plus de 35 % de la surface du globe. Il existe quelques études locales de suivi des groupes qui montrent une abondance de *Prochlorococcus* dans ces régions. C'est notamment le cas d'études réalisées dans le Pacifique tropical, près d'Hawaï, par Campbell et al. (1993), dans l'Atlantique par Zubkov et al. (2000) ou Barlow et al. (2002), et dans le Pacifique équatorial par Blanchot et al. 1996 et Partensky et al. (1999). Les périodes hivernales de chaque hémisphère entraînent un recul de ce groupe vers 30° Nord et Sud. En été, ils occupent principalement les zones comprises entre 20 et 40° Nord ou Sud.

Les SLC

On trouve des eaux dominées par les SLC entre 25° Nord et 25° Sud ainsi que quelques patchs entre 40 et 50° au Nord et au Sud durant les mois d'été (Figure 5.1.3). Dans les zones sub-tropicales, ils sont observés de préférence autour et parfois au centre des régions oligotrophes, pauvres en nutriments mais avec un fort ensoleillement. On note également des floraisons de ce groupe dans les upwelling côtiers, comme celui proche de la Mauritanie. Ce phénomène a été également observé lors des campagnes AMT (Zubkov et al. 2000).

Les diatomées

A l'échelle globale, les diatomées sont présentes uniquement au printemps de chaque hémisphère, à des latitudes supérieures à 40° (Figure 5.1.3). L'Océan Austral est la région qui compte le plus grand nombre de pixels diatomées, avec des floraisons intenses entre 10° Ouest et 140° Est. Notons que la floraison de l'Atlantique Nord, bien connue et étudiée, ne représente à l'échelle globale qu'un dixième des diatomées détectées à la surface des océans mondiaux. Il semble cependant associé à des eaux relativement plus riches en chlorophylle *a* que celles de l'Océan Austral (Figure 5.1.3). Les cartes globales (voir annexe) montrent qu'on retrouve également les diatomées localement, lors d'upwelling côtiers dans le golfe du Bengale ou près du Brésil.

Phaeocystis

Les phaeocystis sont observés, pour une très grande majorité, dans la partie extrême Sud du globe, au-delà de 40°, lors des mois d'été. Ils accompagnent les, ou succèdent aux, diatomées et ont

une préférence pour les eaux situées entre 10° Ouest et 150° Est, avec quelques patchs entre 60° et 110° Ouest (Figure 5.1.3). On en observe également quelques floraisons en Manche, Mer du Nord et dans l'Adriatique, associées à des épisodes toxiques bien connus le long des côtes de ces trois régions océaniques.

Blooms de Coccolithophoridés

Les blooms de coccolithophoridés sont observés aux hautes latitudes, pendant les mois de printemps et d'été, notamment au sud du Groënland ou en Mer de Barents. Ils sont assez rares à l'échelle du globe mais peuvent localement former des blooms importants, comme c'est régulièrement le cas dans l'Atlantique Nord en juin (Figure 5.1.3). On en retrouve également près de certaines côtes, à la pointe Sud de la Patagonie, de la péninsule Antarctique, ou en Mer Noire. Les résultats obtenus avec la méthode PHYSAT sont en accord avec les travaux plus anciens de détection des blooms de coccolithophoridés par Brown et al. (1994), Smyth et al. (2003) ou Iglesias Rodrigez et al. (2002).

5.1.3 Variabilités interannuelles sur la période 1997-2004

Haptophytes

Entre le début et la fin de la période SeaWiFS, les haptophytes sont nettement en augmentation (Figure 5.1.4). Cette augmentation est bien visible sur les cartes mensuelles, avec un recul quasi général des limites entre les régions dominées par les *Prochlorococcus* ou SLC et les régions dominées par les haptophytes. Cela s'observe particulièrement dans l'Océan Indien, autour de la pointe Sud de l'Afrique et de la Patagonie, dans l'Atlantique Equatorial et le long des côtes du Maroc (voir annexe).

Prochlorococcus

La tendance générale sur les années 1998-2004 est une baisse de 8% entre la première et la seconde partie de période (Figure 5.1.4). L'année 2004 a vu chuter le nombre de pixels « *Prochlorococcus* dominants » jusqu'à 27% contre 34% en moyenne. Les *Prochlorococcus* étaient le groupe le plus fréquent en global pour les mois d'octobre à mars, de 1998 à 2001. Ce n'est plus le cas pour les années suivantes, les pixels associés à des haptophytes étant plus nombreux pour une ou des raisons qui resteront à préciser par la suite.

Les SLC

Entre les années 1998-2004, les pixels SLC ont tendance à être moins nombreux. De 1998 à 2000 le nombre de pixels labellisés SLC était plus important que celui des haptophytes pour les mois de novembre et décembre. Ce n'est plus le cas entre 2001 et 2004, les SLC et *Prochlorococcus* laissant la place aux haptophytes (Tableau 5.1.2 et 5.1.3).

Notons que la fin d'année 1997 est marquée par une plus forte surface labellisée SLC (38% contre 24%), associée à El Niño, ce qui peut éventuellement laisser supposer que les quelques années suivantes sont des années de retour à une sorte d'équilibre. Mais cela est une hypothèse qu'il faudra bien sûr approfondir par la suite et vérifier lors du prochain El Niño…

Les diatomées

On note une légère baisse de la surface occupée par les diatomées, en fin de période SeaWiFS,

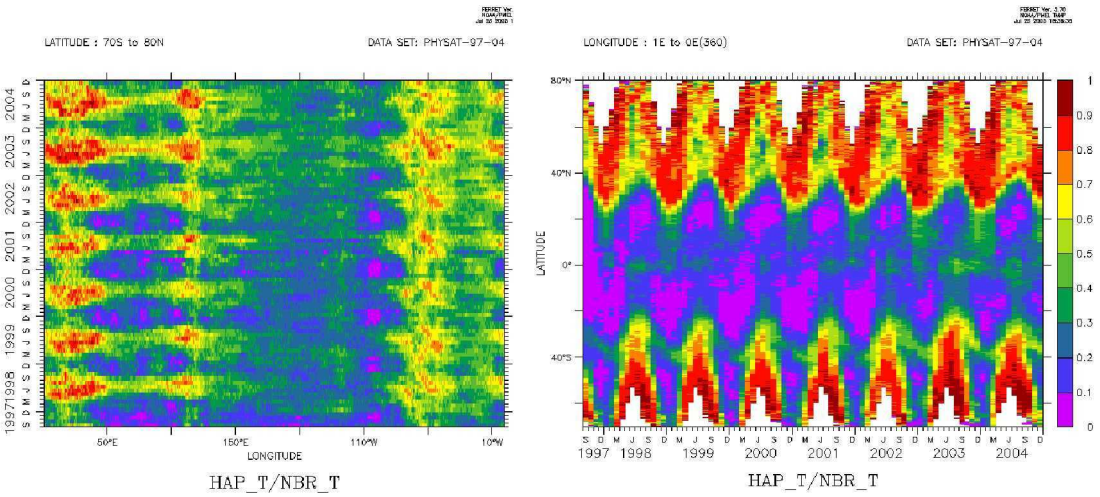
qui est principalement due aux plus faibles floraisons des années 2001 et 2002 (Figure 5.1.1). Toutefois, l'année 2004 et le début 2005 semblent compter un nombre de diatomées équivalent à celui des années 1999 à 2001.

Phaeocystis

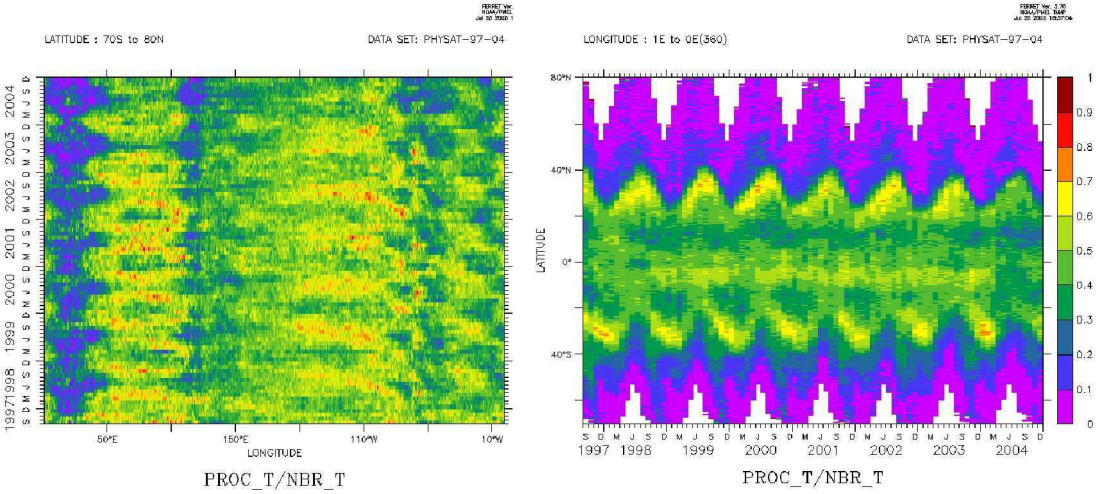
Le nombre de pixels de ce groupe semble en très légère baisse sur la période, avec l'année 2004 qui en compte particulièrement peu.

Blooms de coccolithophoridés

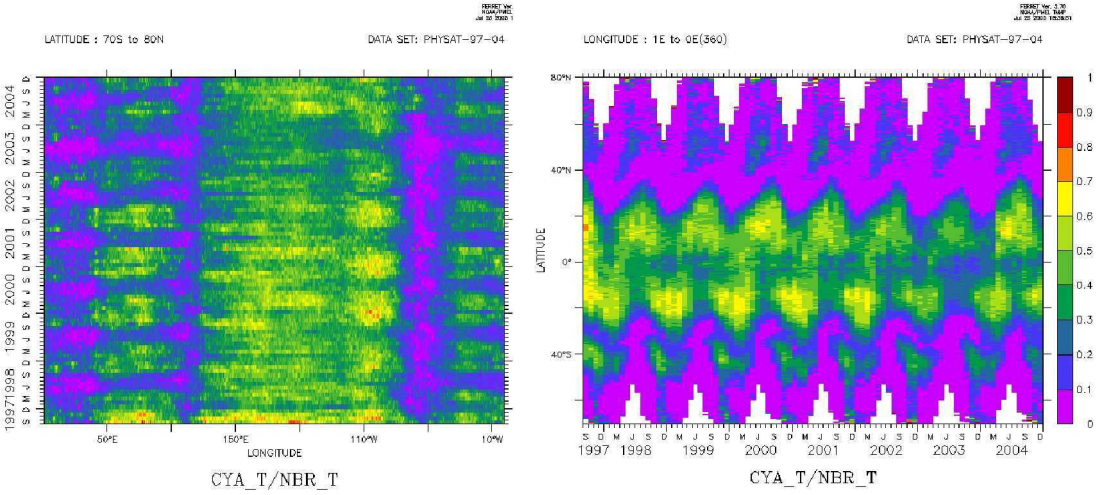
Le nombre de pixels labellisés par ce groupe tend à augmenter pour les années 2002 à 2004, mais n'oublions pas ici de formuler toute la réserve nécessaire concernant les études interannuelles à partir de données SeaWiFS de niveau 3 qui comportent déjà un masque avant le traitement PHYSAT (voir chapitre 3).



Haptophytes – Océan global

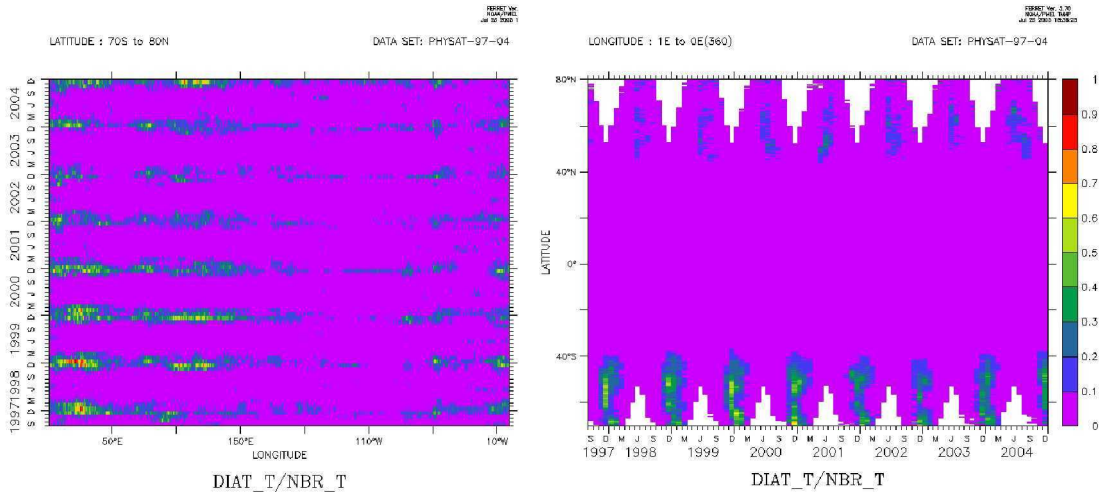


Prochlorococcus – Océan global

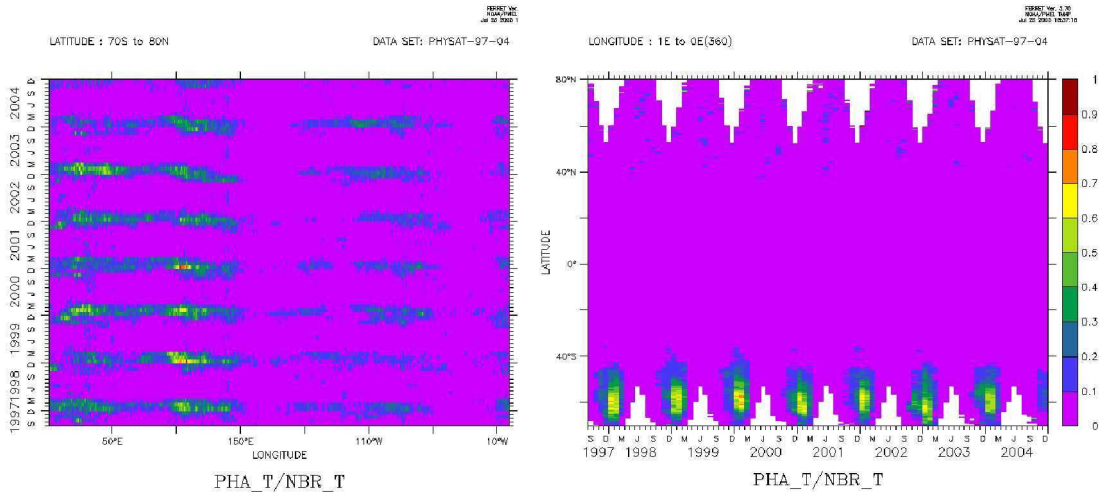


SLC – Océan global

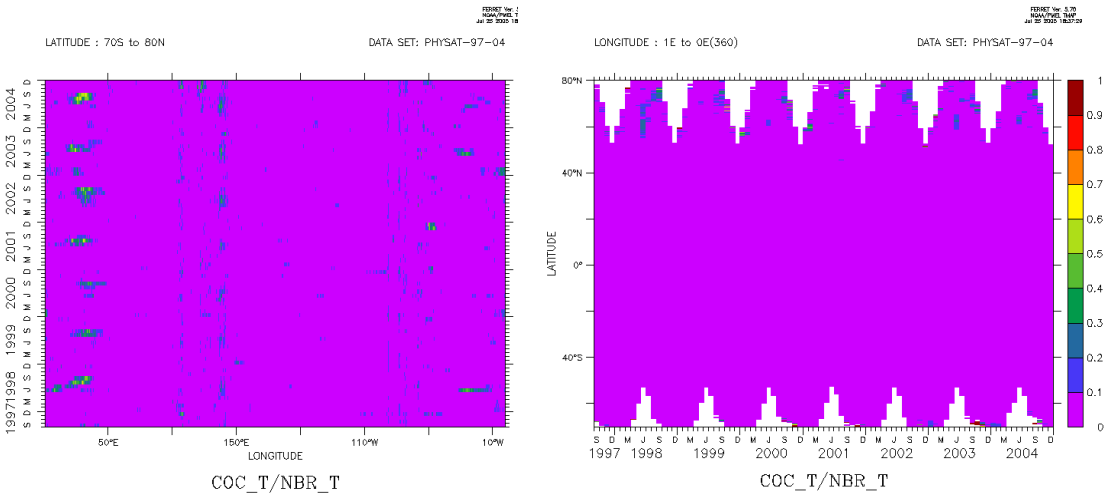
Figure 5.1.3*: Représentation de la variabilité mensuelle de la surface labellisée pour les haptophytes, Prochlorococcus et SLC,, en fonction de la longitude (à gauche) et de la latitude (à droite), de septembre 1997 à décembre 2004.*



Diatomées – Océan global

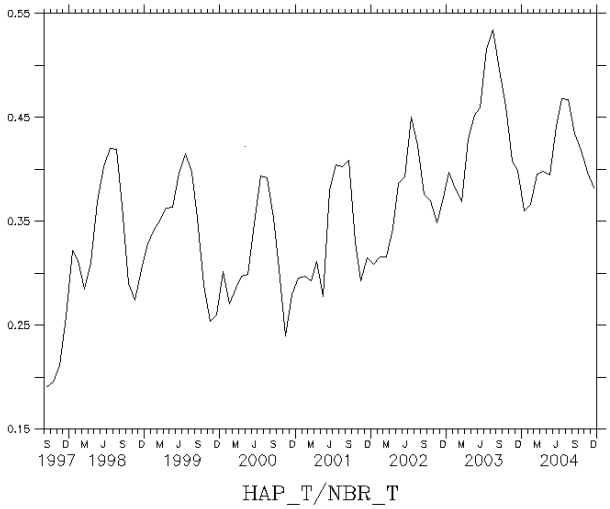


Phaeocystis – Océan global



Bloom Coccolithophoridés– Océan global

Figure 5.1.3 suite *: Représentation de la variabilité mensuelle de la surface labellisée pour les diatomées, phaeocystis et les blooms de Coccolithophoridés, en fonction de la longitude (à gauche) et de la latitude (à droite), de septembre 1997 à décembre 2004.*



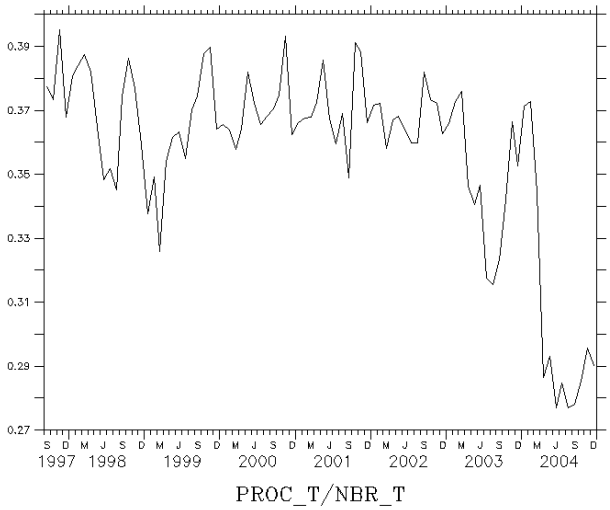


Figure 5.1.4 *: Pourcentages mensuels de surface labellisée pour les groupes haptophytes (en haut) et Prochlorococcus (en bas) sur la période de septembre 1997 à décembre 2004 l'océan mondial (80°S-80°N / 180°W – 180°E).*

5.2 Atlantique Nord

5.2.1 Groupes dominants et tendance générale

La région concernée ici est située entre 40° et 70° Nord et entre les longitudes 20° à 60° Ouest, soit la partie nord de l'Océan Atlantique. Dans cette région, le groupe dominant tout au long de l'année est celui des haptophytes. Il représente de 50 à 90% de la surface labellisée par PHYSAT, comme le montre la figure 5.2.1. Viennent ensuite, dans l'ordre décroissant, les *Prochlorococcus* (5 à 20% selon les saisons), les SLC (5 à 20%), les diatomées (0 à 10%), les blooms de coccolithophoridés (0 à 10%) et les phaeocystis (0 à 5%). On observe pour tous ces groupes une forte saisonnalité, avec des pics d'apparition bien marqués, caractéristiques des variations d'éclairement, de température et d'apports de nutriments que l'on retrouve à ces hautes latitudes. Ces résultats sont en très bon accord avec l'ensemble des conclusions tirées des campagnes GeP&CO (Dandonneau et al. 2004), ou lors des campagnes AMT (Aiken et al. 2000, Gibb et al, 2000). La figure 5.2.2 montre, comme on peut facilement s'y attendre, que la participation de chaque groupe, à la quantité globale de chlorophylle *a* de la région n'est pas forcément reliée à la surface occupée. Ainsi, l'importance des diatomées est mise en relief car elles peuvent être à l'origine de plus de 30% de la chlorophylle *a* totale, tout en n'occupant que 10% de la surface de la région. Inversement, les *Prochlorococcus,* qui occupent plus de surface que les SLC, dominent par contre dans les eaux pauvres en *chlorophylle a*. Les tendances observées dans cette région semblent indiquer un recul de la surface couverte par les *Prochlorococcus*, remplacés par les haptophytes (Tableau 5.2.1). Cependant, en termes de quantité de chorophylle *a*, les tendances sont un peu moins nettes (Tableau 5.2.2).

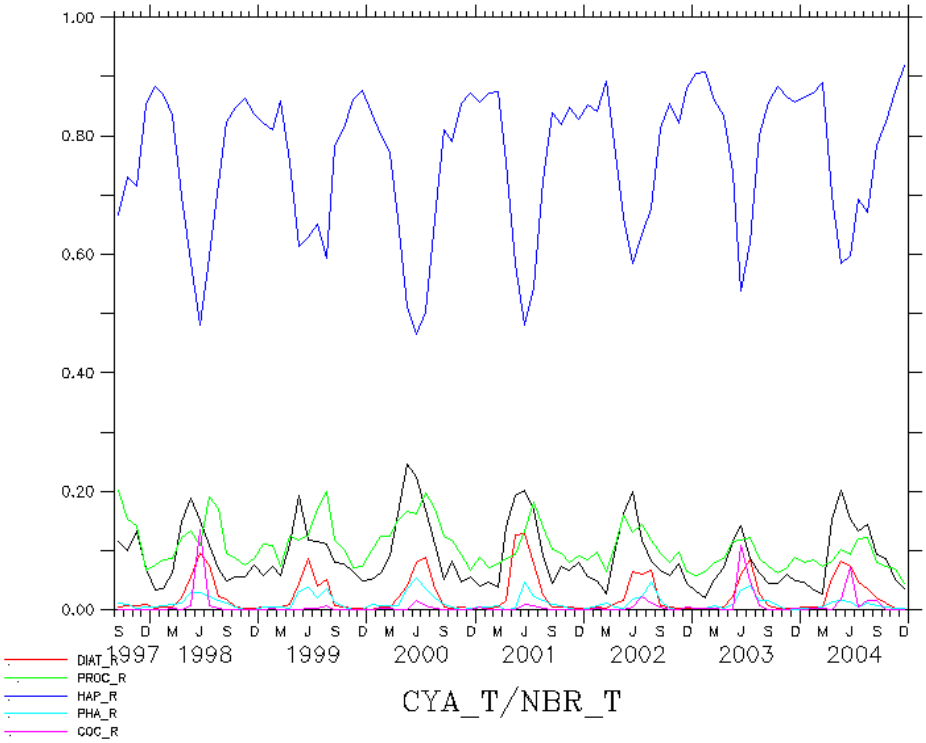


Figure 5.2.1 *: Fraction mensuelle de la surface dominée pour chaque groupe (surface dominée par le groupe / surface totale dominée par un groupe), sur la période septembre 1997 – décembre 2004 dans l'Atlantique Nord. En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende de couleur en bas à gauche.*

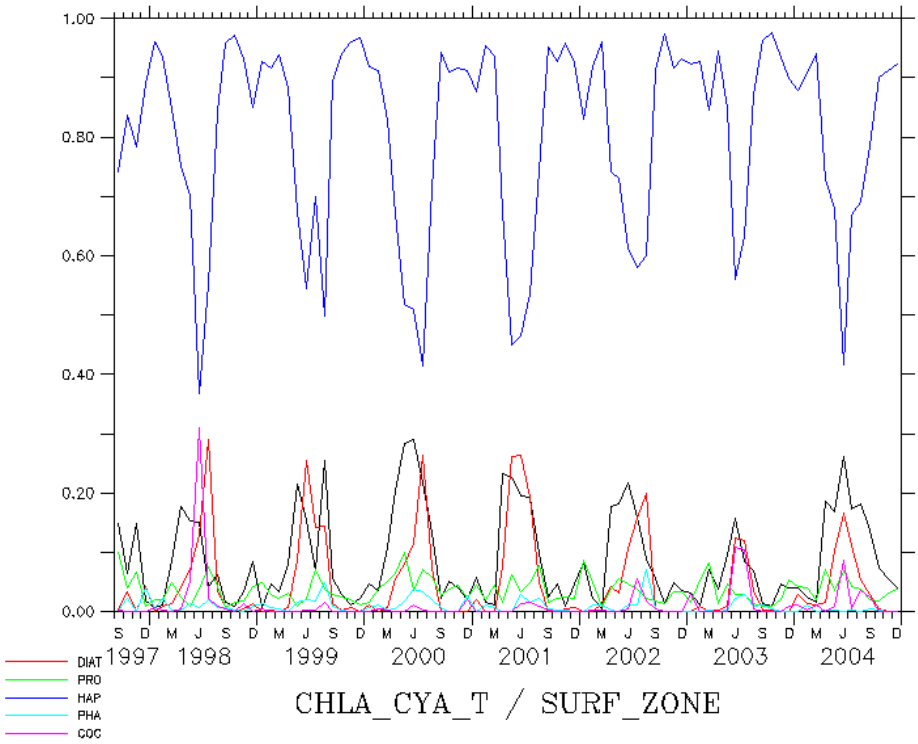


Figure 5.2.2 *: Evolution mensuelle du rapport entre la chlorophylle a associée à un groupe et la chlorophylle a, moyennée pour la période de septembre 1997 – décembre 2004 dans l'Atlantique Nord. En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende de couleur en bas à gauche.*

Atlantique Nord	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Haptophytes	71.5	72	67.4	72	74.3	77.8	74.3
Prochlorococcus	12.1	12.7	14.5	11.4	11.1	9	9.2
SLC	9.5	10.4	12.7	10.8	9.6	7.2	11
Diatomées	3.4	2.8	3.1	3.9	2.8	2.5	3.4
Phaeocystis	1.5	1.7	1.9	1.4	1.5	1.5	0.8
Coccolithophoridés	1.8	0.2	0.3	0.3	0.5	1.9	1.3

Tableau 5.2.1 : *Pourcentages relatifs moyens de surface labellisée pour chaque groupe et pour chacune des années sur la région considérée.*

Atlantique Nord	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Haptophytes	77.1	77.7	70.1	70.2	75.9	83.6	72.9
Prochlorococcus	3	2.9	5.4	3.8	3.4	2.6	4.1
SLC	8.3	10.4	15.8	13.6	11.9	6.7	14.4
Diatomées	6.5	7.3	6.8	10.9	6.6	3.5	6.3
Phaeocystis	0.8	1.4	1.6	0.9	1.3	0.9	0.2
Coccolithophoridés	4.2	0.2	0.2	0.4	0.9	2.7	2

Tableau 5.2.1 : *Pourcentages relatifs moyens de chlorophylle a pour chaque groupe et pour chacune des années sur la région considérée.*

5.2.2 Cycles saisonniers de chaque groupe

Les haptophytes

Comme nous venons de le voir, les haptophytes dominent les eaux de l'Atlantique Nord tout au long de l'année, à la fois en termes de surface et de production de *chlorophylle a*. Ils sont toutefois plus ou moins présents selon les saisons avec un maximum en hiver, de novembre à février (jusqu'à 90%) et un minimum au printemps, de mai à juillet où ils représentent alors « seulement » 50 à 60% de la surface labellisée (Figure 5.2.1 en bleu). D'un point de vue géographique, la représentation d'Hovmuller, présentée dans la figure 5.2.3, montre qu'ils peuvent être présents dans tout l'Atlantique Nord. On note cependant que la zone à l'Ouest de 50° Ouest est en permanence dominée par ce groupe, ce qui n'est pas le cas de la zone Est. C'est d'ailleurs de cette région, allant de 20° à 50° Ouest, qu'est issue la grande majorité de la variation saisonnière observée en figure 5.2.1. Notons que l'Ouest de ce bassin est lié au Gulf Stream, ce qui donne des masses d'eau « branchés » sur les tropiques, ce qui n'est pas le cas de la zone Est.

Les Prochlorococcus

D'après les figures 5.2.1 et 5.2.2, les *Prochlorococcus* sont présents pour 5 à 20 % de la surface de l'Atlantique Nord, mais ne représentent au maximum que 10% de la chlorophylle produite dans toute la zone. Ils apparaissent rapidement en mai et juin et sont pratiquement absents en novembre et décembre. Ils sont principalement localisés dans les basses latitudes de la région étudiée, sous 44° Nord et très rarement entre 44° et 60°Nord en été (Figure 5.2.3). En termes de longitude, on les retrouve en grande majorité dans l'Est et le centre du bassin, entre 35 et 45° Ouest.

Les SLC

Comme les *Prochlorococcus*, les SLC sont présents dans l'Atlantique Nord pour environ 5 à 20% de la surface labellisée et représentent jusqu'à plus de 20% de la chlorophylle *a* totale de la région (Figure 5.2.1 et 5.2.2). Leur présence est nettement marquée pendant les mois de mai à juillet, et quasiment nulle de janvier à mars. On les retrouve à toutes les latitudes inférieures à 64° Nord, avec une tendance à apparaître aux plus faibles latitudes et à « migrer » vers le Nord au fur et à mesure de la progression de leur période de floraison. Cette dernière caractéristique est nettement différente de celle des *Prochlorococcus*. En revanche, ils apparaissent principalement dans le centre et l'Est du bassin (20° Ouest à 45° Ouest) durant toute la période de mai à juillet (figure 5.2.3).

Les diatomées

Le cas des diatomées dans l'Atlantique Nord est particulièrement intéressant car la floraison de ce groupe au printemps est très étudiée actuellement. Des études sur les Diatomées ont notamment été réalisées dans le cadre de la première expérience JGOFS, en raison de leur importance dans le cycle du carbone.

D'après PHYSAT, on retrouve sur les figures 5.2.1 et 4.2.2 des variations saisonnières nettes, avec une disparition presque complète de septembre à février et des pics nets d'avril à juillet. Durant ces derniers pics, les diatomées représentent jusqu'à plus de 10% de la surface labellisée et 30% de la chlorophylle *a*. Le mois de juin est particulièrement propice à l'apparition de floraisons de ce groupe, principalement pour des latitudes allant de 44° Nord à 66° Nord et des longitudes entre 20° Ouest et 40° Ouest (figure 5.2.3). Comme pour les cyanobactéries, la zone de floraison à tendance à migrer du

Sud vers le Nord pendant la saison.

Les phaeocystis

Les phaeocystis semblent extrêmement rares dans l'Atlantique Nord. On note toutefois une apparition, pour quelques pourcents des pixels, aux mois de mai, juin et juillet. Cela correspond à des petites floraisons au Sud de l'Islande et du Groenland au printemps, et à quelques apparitions en Mer du Nord (Figure 5.2.1).

Blooms de coccolithophoridés

Les apparitions de blooms de coccolithophoridés sont assez localisées dans le temps et dans l'espace. Cela peut toutefois représenter jusqu'à plus de 10% de la zone, ce qui a été le cas pendant les blooms intenses des années 1998 et 2003 (Figure 5.2.3). Ces blooms ont lieu principalement en mai et juin et se situent toujours dans des latitudes supérieures à 52° Nord et des longitudes allant de 25° Ouest à 40° Ouest. Mis à part le problème du masque SeaWiFS déjà abordé, les résultats PHYSAT sont en très bon accord, en termes de localisation, avec ceux d'autres études de détection de floraison de coccolithophoridés (Brown and Yoder 1994, Iglesias et al., 2000).

5.2.3 Variabilités interannuelles sur la période 1997-2004

Les haptophytes

Sur la période 1998 à 2004, il semble que les haptophytes soient légèrement en hausse en termes de surface couverte mais en baisse pour ce qui concerne leur contribution à la chlorophylle *a* observée(Tableau 5.2.1 et 5.2.2). Ceci est vrai pour tous les mois de l'année et semble devoir se confirmer avec la valeur de décembre 2004 (Figure 5.2.1 et 5.2.2).

Les Prochlorococcus

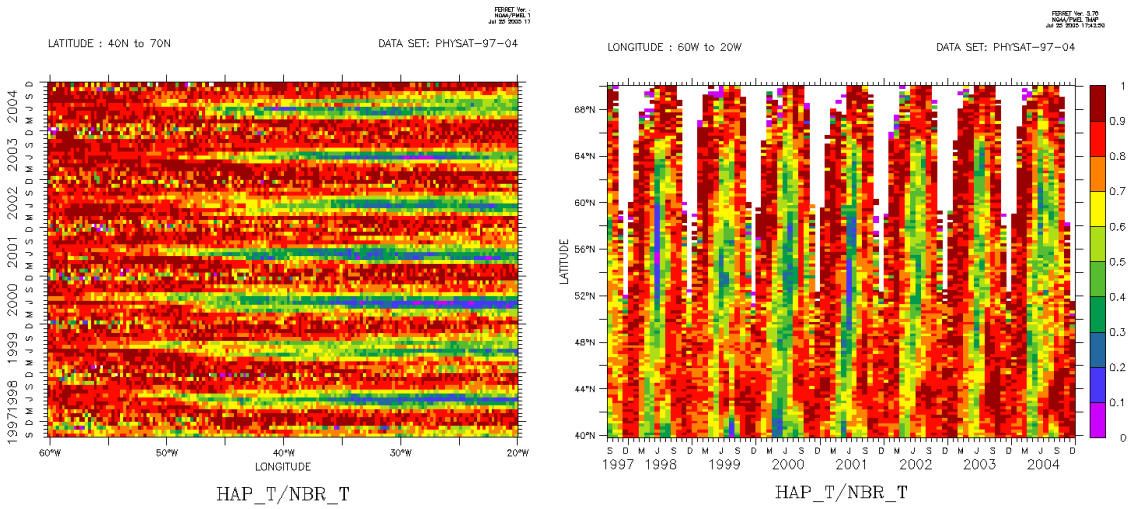
Leur tendance à la baisse, pour la surface couverte par ce groupe, sur la période 1998 – 2004 est assez nette (Tableau 5.2.1. et Figure 5.2.4), surtout pour les années 2003 et 2004 où ils semblent reculer vers le Sud, cédant la place aux haptophytes (Figure 5.2.3). La tendance en termes de chlorophylle *a* est moins nette.

Les SLC

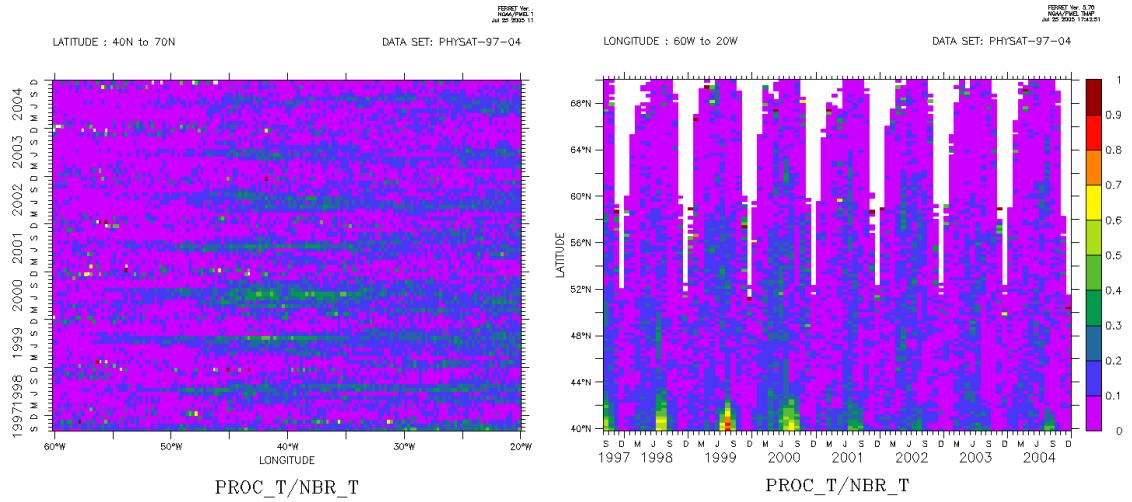
Moins nombreux en 2003 mais toujours bien présents en 2004, leur tendance n'est pas évidente sur la période. Il sera cependant intéressant d'étudier à l'avenir les liens potentiels entre la variation de la limite géographique haptophytes-*Prochlorococcus* dans cette région, et l'indice d'Oscillation Atlantique Nord (ou NAO).

Les diatomées

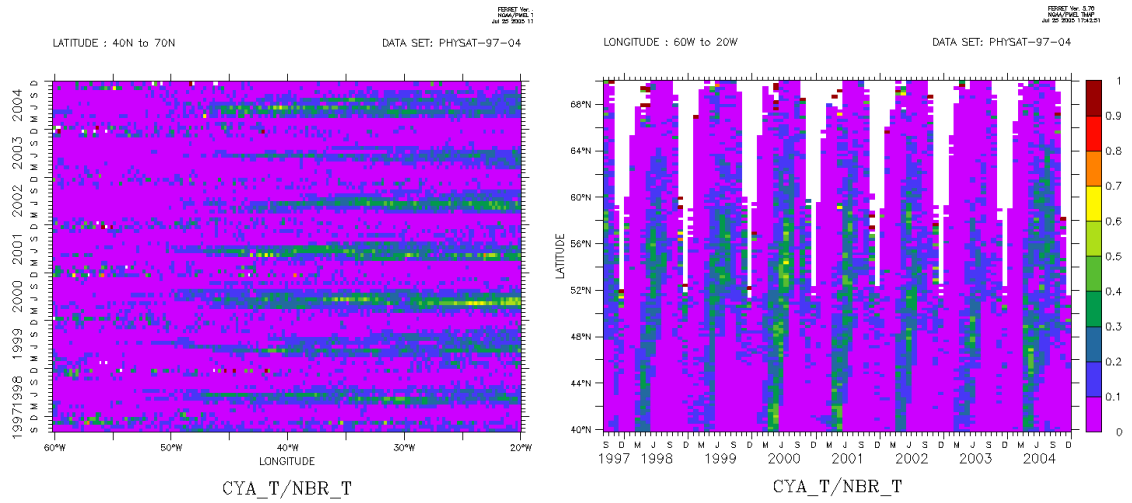
L'année 2001 se distingue par ses valeurs fortes en termes de surface couverte et de contribution à la chlorophylle *a* par les diatomées. L'année 2003 est plutôt caractérisée par des valeurs faibles de ces paramètres. En dehors de ces deux années il n'apparaît pas de tendance sur la période 1997-2004 pour ce groupe (tableau 5.2.1 et 5.2.2).



Haptophytes – Atlantique Nord

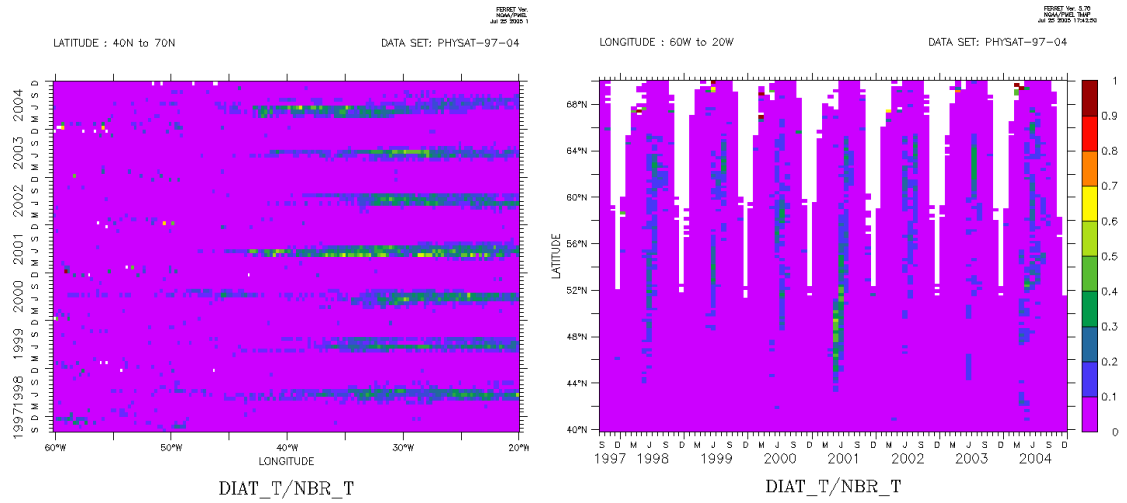


Prochlorococcus – Atlantique Nord

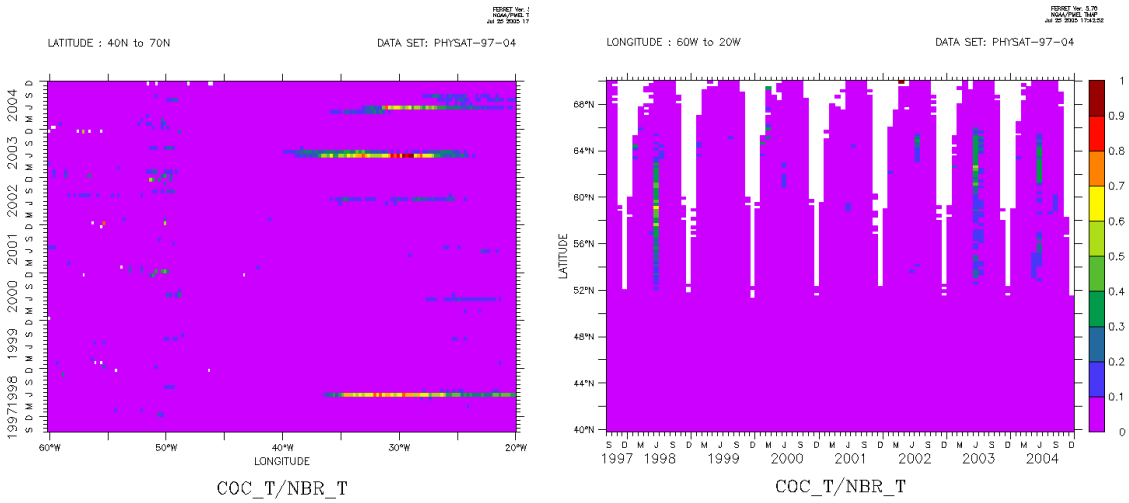


SLC – Atlantique Nord

Figure 5.2.3 *: Représentation de la variabilité mensuelle de la surface labellisée pour les haptophytes, Prochlorococcus et SLC,, en fonction de la longitude (à gauche) et de la latitude (à droite), de septembre 1997 à décembre 2004.*



Diatomées – Atlantique Nord



Bloom de Coccolithophoridés – Atlantique Nord

Figure 5.2.3 Suite *: Représentation de la variabilité mensuelle de la surface labellisée pour les diatomées et les blooms de Coccolithophoridés, en fonction de la longitude (à gauche) et de la latitude (à droite), de septembre 1997 à décembre 2004.*

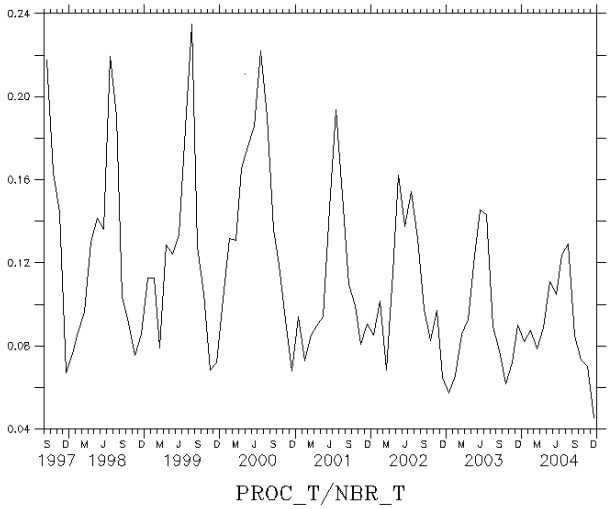


Figure 5.2.4 *: Pourcentages mensuels de surface labellisée pour le groupe Prochlorococcus sur la*

période de septembre 1997 à décembre 2004 dans l'Atlantique Nord (40°N-70°N – 60°W-20°W).

5.3 Océan Austral

5.3.1 Groupes dominants et tendance générale

On appelle Océan Austral, dans ce chapitre, la zone géographique comprise ente 40° Sud et 70° Sud et pour l'ensemble des longitudes. Cet océan est unique car aucun continent ne vient faire obstacle à la circulation autour du globe. Cette région est partiellement recouverte de glace lors des mois d'hiver austral. D'après l'ensemble des données PHYSAT, ce sont les haptophytes qui dominent cette région, parfois jusqu'à 90%. Ils laissent la place à d'autres groupes au printemps et à l'été (d'octobre à janvier). Durant cette période, les diatomées, SLC et phaeocystis se répartissent les régions en parts quasi égales (figure 5.3.1 et 5.3.2). Nous verrons cependant que la localisation géographique de ces groupes varie fortement. Enfin, on note une faible présence des blooms de coccolithophoridés en dehors de certaines régions côtières, comme l'Est de la Patagonie ou au pourtour de la Péninsule Antarctique. Ces résultats sont en bon accord avec des résultats de campagnes en mer (Arrigo et al. 1999 et 2000, Goffart et al. 2000, Verity et al 2003, Smith et al., 2003, Wulff et al, 2004).

Les tendances sur la période SeaWiFS indiquent une progression des haptophytes, compensée par une baisse des SLC et *Prochlorococcus*, autant en termes de surface occupée que de chlorophylle *a* produite (Tableau 5.3.1 et 5.3.2).

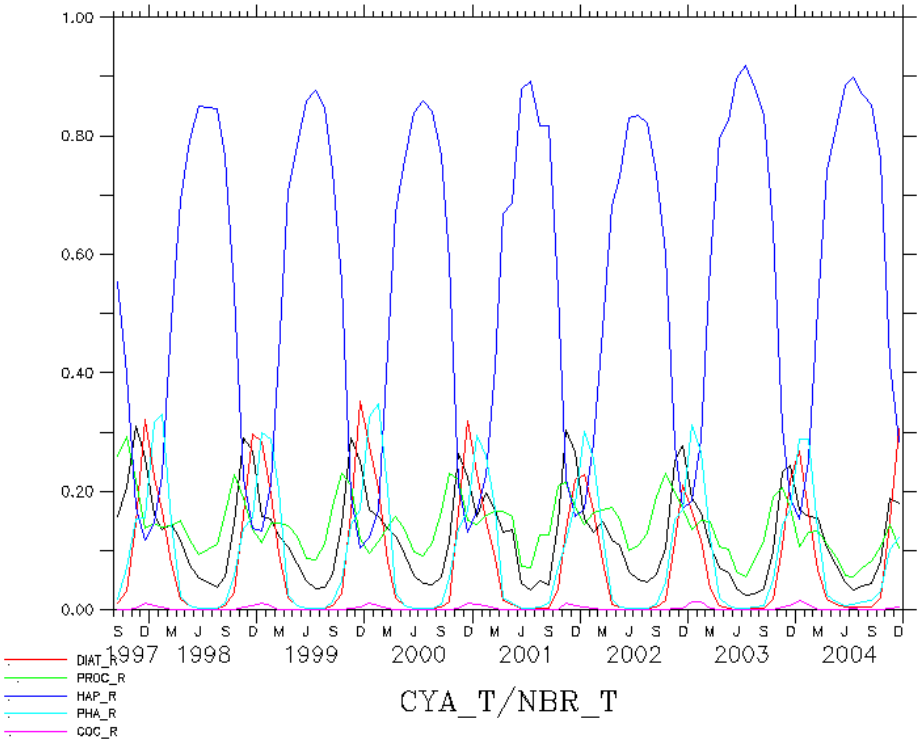


Figure 5.3.1 *: Fraction mensuelle de la surface dominée pour chaque groupe (surface dominée par le groupe / surface totale dominée par un groupe), sur la période septembre 1997 – décembre 2004 dans l'Océan Austral. En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende de couleur en bas à gauche.*

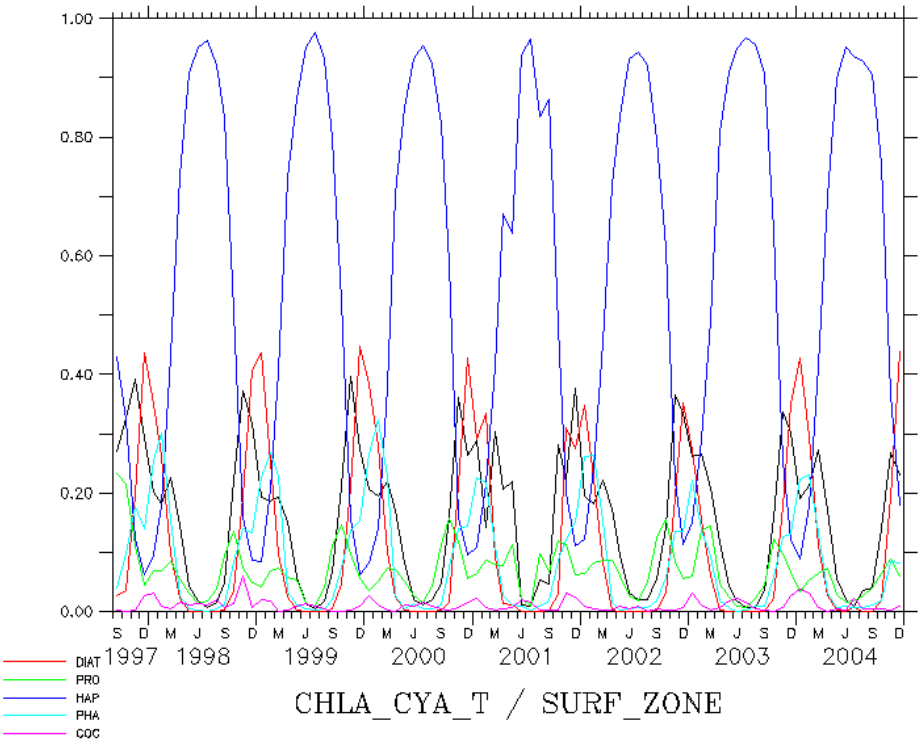


Figure 5.3.2 *: : Evolution mensuelle du rapport entre la chlorophylle a associée à un groupe et la chlorophylle a totale, moyennée pour la période de septembre 1997 – décembre 2004 dans l'Océan Austral. En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende de couleur en bas à gauche.*

Océan Austral	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Haptophytes	52	51.4	48.1	49.5	52.9	58.2	56.4
Prochlorococcus	14.6	14.5	14.5	15.6	16.5	13.5	10.5
SLC	13.1	12.8	13.7	15.1	13	11.5	11.8
Diatomées	8.8	10.1	11.6	8.6	7.5	6.1	9.8
Phaeocystis	11.1	10.7	11.9	10.9	9.8	10.3	11
Coccolithophoridés	0.2	0.2	0.3	0.4	0.2	0.4	0.4

Tableau 5.3.1 : *Pourcentages relatifs de surface labellisée pour chaque groupe et pour chacune des années sur la région considérée.*

Océan Austral	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Haptophytes	45.8	44.6	43.9	43.1	49.4	52.6	50.4
Prochlorococcus	6.5	6.9	7	8	7.5	7.3	5.1
SLC	18	17.9	17.4	20.7	17.8	18.1	16.3
Diatomées	15.7	17.5	17	16.1	13.7	12	17.5
Phaeocystis	12	12.3	13.6	10.8	11.1	8.7	9.4
Coccolithophoridés	1.8	0.8	1	1.4	0.5	1.3	1.3

Tableau 5.3.1 : *Pourcentages relatifs de chlorophylle a pour chaque groupe et pour chacune des années sur la région considérée.*

5.3.2 Cycles saisonniers de chaque groupe

Les haptophytes

D'après les résultats obtenus à l'aide de la méthode PHYSAT, les haptophytes sont globalement largement dominants dans l'Austral. Ils représentent, lors des mois de juillet et août, jusqu'à 90% de la surface labellisée dans cette région (Figure 5.3.1). Ils sont présents toute l'année, sauf pendant la période d'octobre à janvier où leur présence chute jusqu'à environ 15% (figure 5.3.1). On les retrouve à toutes les latitudes et longitudes de la région lors de leur saison de floraison (figure 5.3.3).

Les Prochlorococcus

Les *Prochlorococcus* sont présents dans la zone étudiée en grande partie pour des latitudes au nord de 54° Sud, avec seulement quelques apparitions plus au sud au mois de novembre. Ils disparaissent de la zone en période hivernale (moins de 10%) et présentent un maximum en septembre et en octobre avec plus de 20% de la surface et 10% de la chlorophylle *a*, ce qui correspond à la descente de la limite haptophytes / *Prochlorococcus* dans la partie Pacifique Sud (Figure 5.3.1 et 5.3.2). Un léger maximum est également observé en mars et correspond à une floraison dans la région Ouest de la pointe de la Patagonie (Figure 5.3.3).

Les SLC

Les « Synechococcus Like Cyanobactéria » ou SLC ont un cycle proche de celui des *Prochlorococcus*, mais décalé d'un mois. On note toutefois la présence d'une seconde floraison en mars, un peu moins marquée, voire absente, pour certaines années (Figure 5.3.1 et Figure 5.3.3). Avec un minimum en février aux alentours de 4% et un maximum en octobre et novembre pouvant atteindre 30% de la surface labellisée et de la chlorophylle *a*, les SLC suivent un cycle saisonnier bien net. On les retrouve principalement aux plus basses latitudes de l'Océan Austral (<50° sud) et rarement plus au sud. Leur localisation en termes de longitude est assez discontinue, avec une floraison particulièrement forte à l'Est de la Patagonie et jusqu'à 20° Ouest (Figure 5.3.3).

Les diatomées

Comme pour l'Atlantique Nord, les diatomées présentent une saisonnalité forte. Leur présence est détectée uniquement d'octobre à février avec un maximum en décembre et janvier allant jusqu'à plus de 30% de la surface labellisée dans l'Austral et 40% de la chlorophylle *a* (Figure 5.3.1 et 5.3.2). Le début de la floraison se situe en octobre, aux latitudes comprises entre 40 et 62° Sud, puis évolue vers les hautes latitudes jusqu'en février. On les retrouve pour la quasi-totalité des longitudes de l'Océan Austral. On note toutefois qu'ils sont très peu présents entre les latitudes 50° et 120° Ouest, qui correspond à la zone d'abondance des *Prochlorococcus*, dans le Pacifique Sud-Est (Figure 5.3.3).

Les phaeocystis

L'Océan Austral est connu pour présenter des gradients importants de biomasse, que ce soit d'Est en Ouest ou du Nord au Sud. Ces gradients sont expliqués par la présence de différents groupes lors des mois d'été, avec les diatomées, de préférence dans des eaux stratifiées et les phaeocystis, plus adaptés à des colonnes d'eau où le mélange est plus important. (Goffart et al. 2000, Arrigo et al. 1999 et 2000, Smith et al., 2003). On sait depuis peu que les phaeocystis peuvent exporter le carbone de

façon encore plus efficace que les diatomées (DiTullio et al. 2000). Ils sont également connus pour leur capacité à favoriser la formation d'aérosols, en raison de leur émission de composés soufrés ou DMS (pour Dimethilsulfide) (DiTullio et al. 1995). De nombreuses études concernant la répartition des phaeocystis et des diatomées ont été réalisées pour quelques régions de l'Océan Austral (Verity et al. 2003). Il manquait cependant une information concernant leur répartition à plus grande échelle et celle-ci est désormais disponible grâce à la méthode PHYSAT.

Les phaeocystis se partagent l'espace océanique dans l'Austral avec les diatomées lors des mois de janvier et février où ils représentent également jusqu'à plus de 30% de la surface labellisée (Figure 5.3.1 et 5.3.2). Ils atteignent leur maximum un mois après celui des diatomées, mais sont présents bien avant. Cela s'explique par le fait que les phaeocystis sont à la fois présents assez tôt dans des eaux où l'on ne retrouve jamais de diatomées et succèdent à ces derniers dans les autres régions. Les phaeocystis sont présents dans les latitudes plus élevées que les diatomées dès le départ : entre 50° et 66° Sud. Ils sont rares entre 40° et 50° Sud où les diatomées dominent. Du point de vue des longitudes, on les retrouve surtout entre 70° et 160° Ouest (Pacifique Sud) et entre 40° et 150° Est (Indien). Ils sont extrêmement rares entre 0° et 70° Ouest (Atlantique) (Figure 5.3.3).

Blooms de coccolithophoridés

Les blooms de Coccolithophoridés sont rarement détectés à l'échelle de l'Océan Austral. Cependant, ils apparaissent périodiquement aux mois de décembre et janvier dans la région de la pointe de la péninsule Antarctique et de la Patagonie.

5.3.3 Variabilités interannuelles sur la période 1997-2004

Les haptophytes

La tendance de ce groupe sur la période SeaWiFS semble plutôt à la hausse, à la fois pour les valeurs minimales en été et maximales en hiver. (Figure 5.3.4 et Tableau 5.3.1), Cette observation est valable également pour la quantité de chlorophylle *a* associée à ce groupe (Tableau 5.3.2).

Les Prochlorococcus

Le cycle saisonnier de ce groupe, bien marqué pour la plupart des années, est nettement plus faible en 2004. Les *Prochlorococcus* ont tendance à occuper moins de surface et à être associés à moins de chlorophylle *a* produite, pour les années 2002 à 2004 que de 1998 à 2000 (Figure 5.3.4 et tableau 5.3.2). Cette tendance devra être confirmée par l'étude des années suivantes dès que les données seront disponibles.

Les SLC

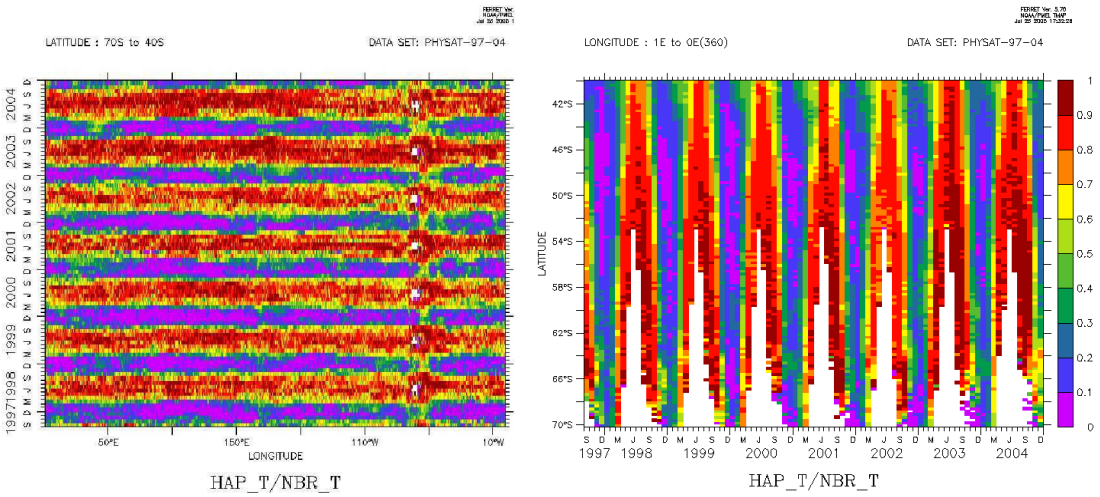
Les SLC sont moins présents en 2004 que pour les autres années et, globalement, ce groupe semble décroître légèrement sur la période étudiée (Figure 5.3.4 et Tableaux 5.3.1 et 5.3.2).

Les diatomées

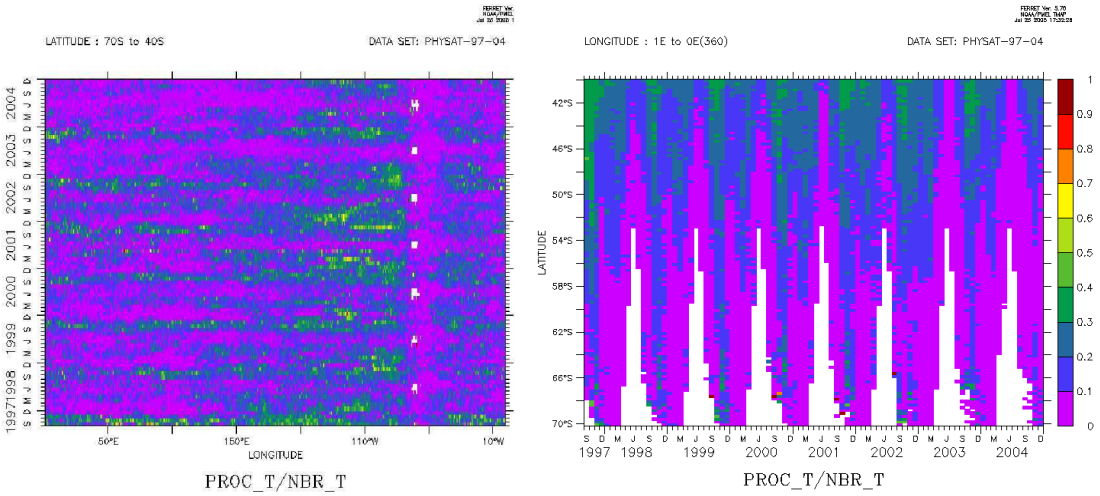
On note que les années 2001 et 2002 sont moins propices aux diatomées, avec un maximum de 20% de la surface et de 30% de la *chlorophylle a* seulement (Figure 5.3.4 et tableau 5.3.2). De manière générale, il est difficile d'observer une tendance sur les années SeaWiFS pour ce groupe.

Les phaeocystis

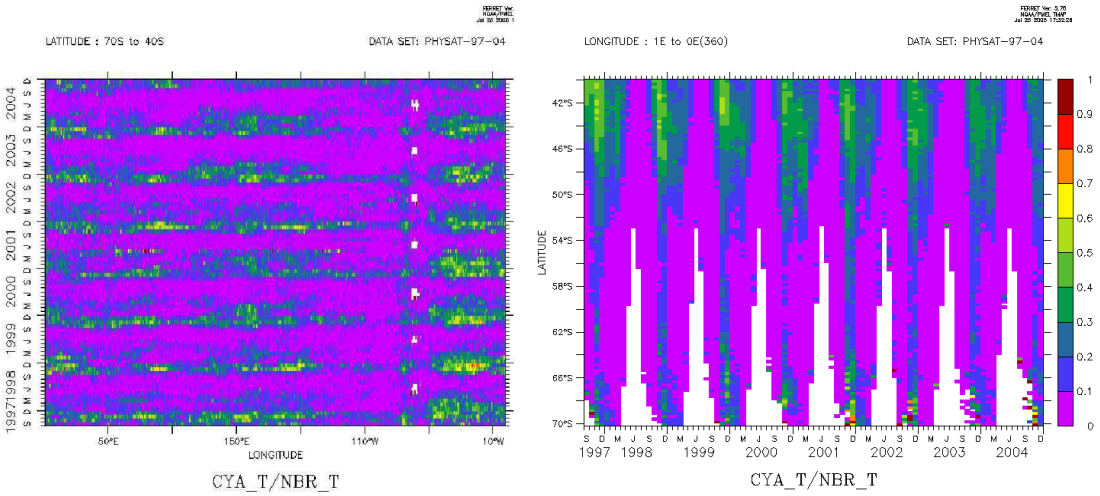
La tendance du nombre de pixels labellisés « phaeocystis » sur la période 1998-2004 est plutôt stable en termes de surface couverte. Du point de vue de la chlorophylle *a* associée à ce groupe dans l'Océan Austral, on note une très légère baisse (Tableau 5.3.2).



Haptophytes – Océan Austral

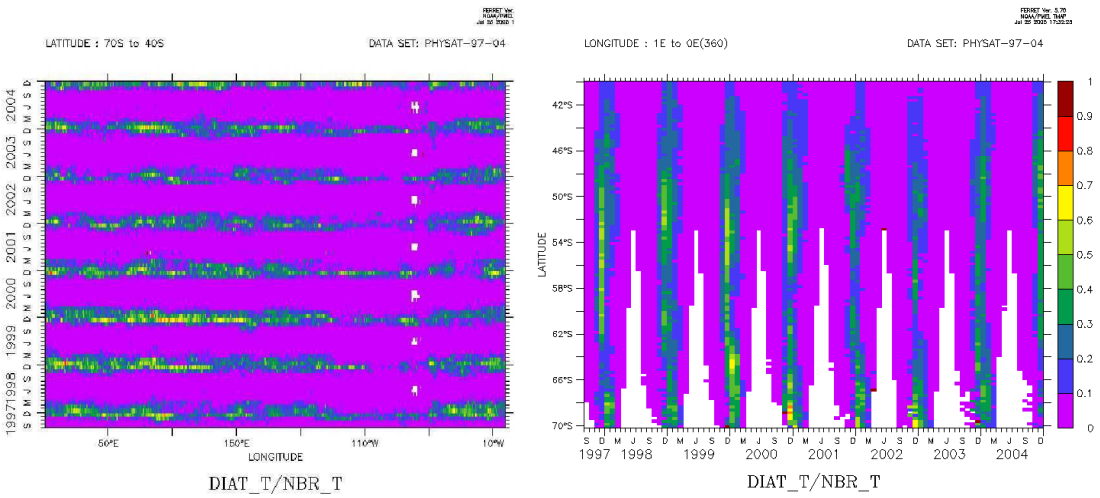


Prochlorococcus – Océan Austral

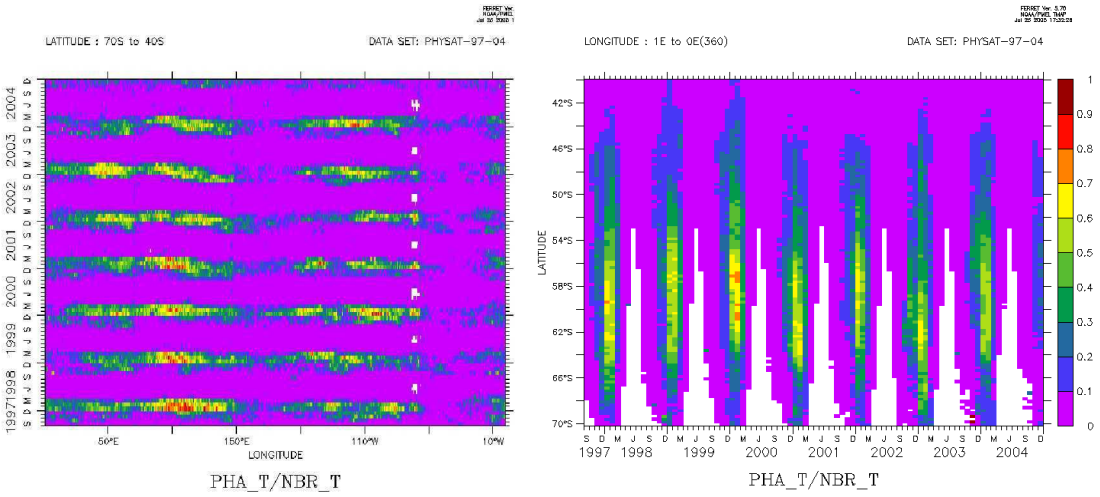


SLC – Océan Austral

Figure 5.3.3*: Représentation de la variabilité mensuelle de la surface labellisée pour les haptophytes, Prochlorococcus et SLC,, en fonction de la longitude (à gauche) et de la latitude (à droite), de septembre 1997 à décembre 2004.*



Diatomées – Océan Austral



Phaeocystis – Océan Austral

Figure 5.3.3 (suite)*: Représentation de la variabilité mensuelle de la surface labellisée pour les diatomées et les phaeocystis, en fonction de la longitude (à gauche) et de la latitude (à droite), de septembre 1997 à décembre 2004.*

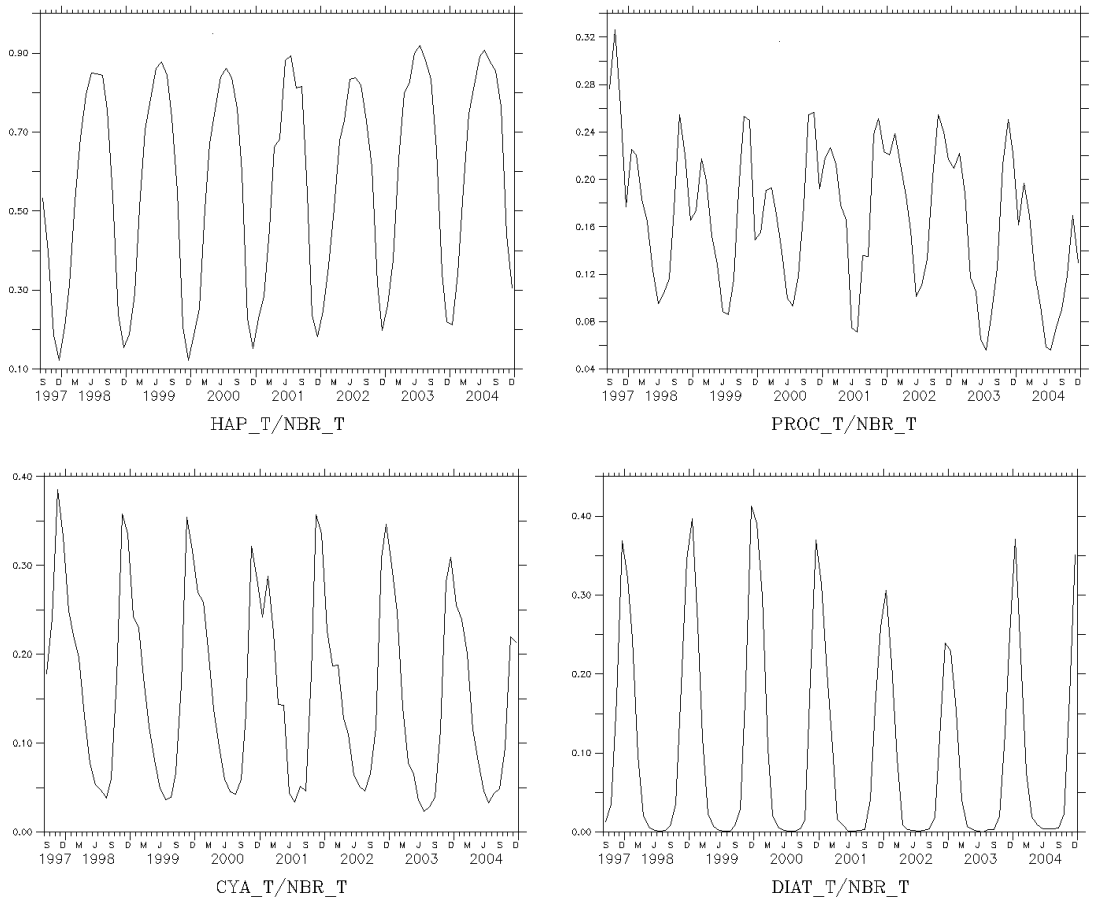


Figure 5.3.4 *: Pourcentages mensuels de surface labellisée pour les groupes haptophytes, Prochlorococcus, SLC et Diatomées, sur la période de septembre 1997 à décembre 2004 dans l'Océan Austral (70°S-40°S / 1°E – 0°E.*

5.4 Pacifique Equatorial

5.4.1 Groupes dominants et tendance générale

La zone étudiée ici s'étend de 5° Nord à 5° Sud, dans le Pacifique, c'est à dire de 80° Ouest à 170° Est. Cette région est particulièrement intéressante du point de vue des groupes phytoplanctoniques en raison de sa sensibilité aux variations climatiques telles que El Niño ou La Niña. Nous allons voir que la variabilité des groupes sur la période fin 1997 – 2004 est assez forte, avec des évènements particuliers qui font, très certainement, suite à l'année El Niño de 1997. De façon plus générale, cette région est dominée, d'après PHYSAT, par les *Prochlorococcus* et les SLC avec, de temps à autre et localement, des floraisons locales de diatomées ou d'haptophytes (Figure 5.4.1 et 5.4.1). Ce résultat est en accord avec des études basées sur des campagnes de terrain dans cette région (Everitt et al., 1990, Blanchot et al. 1996, Kobayashi et al. 2002, Mackey et al. 2002).

Pacifique Equatorial	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Haptophytes	8.1	6.8	3.9	7.8	7	17	13.5
Prochlorococcus	45.2	54.1	51	51 .7	53.8	52.1	49.1
SLC	44.4	38.9	44.5	40.5	39.1	30	34.6
Diatomées	1.8	0.2	0.3	0.3	0.1	0.5	1.3
Phaeocystis	0	0	0	0	0	0	1.1
Coccolithophoridés	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 5.4.1 : *Pourcentages relatifs de surface labellisée pour chaque groupe et pour chacune des années sur la région considérée.*

Pacifique Equatorial	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Haptophytes	2.4	1.2	0.4	1.8	0.9	7.6	6.4
Prochlorococcus	30.1	44.2	36.1	38.4	46	52.1	45.7
SLC	60.2	54	61.7	58.3	52.7	39	45.8
Diatomées	6.8	0.6	1.8	1.4	0.3	1.2	1.9
Phaeocystis	0	0	0	0	0	0	0.2
Coccolithophoridés	0.4	0	0	0	0	0	0

Tableau 5.4.2 : *Pourcentages relatifs de chlorophylle a pour chaque groupe et pour chacune des années sur la région considérée.*

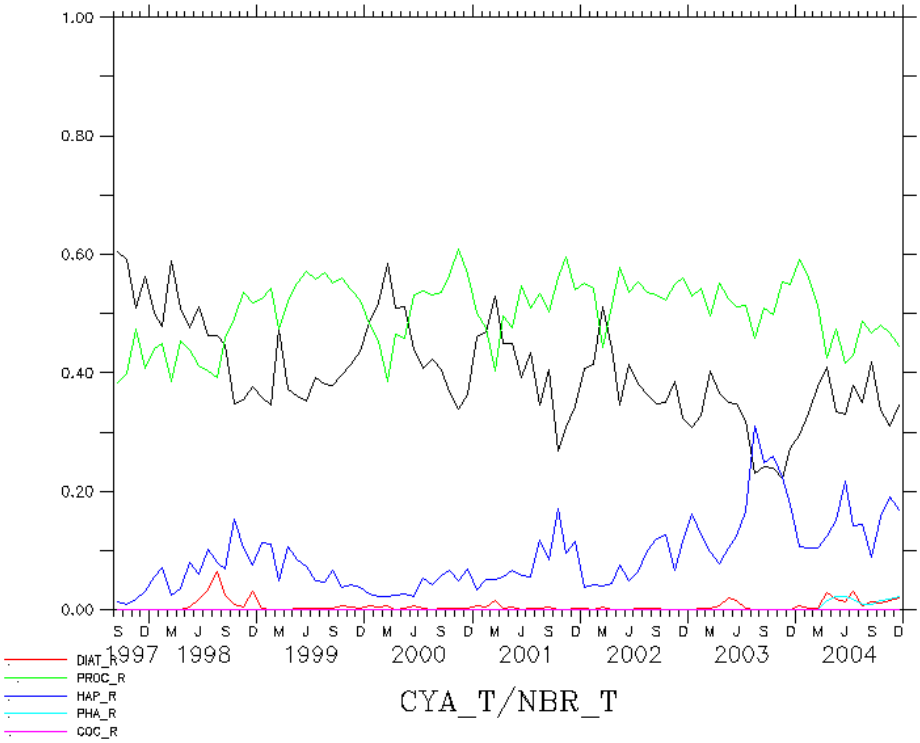


Figure 5.4.1 *: Fraction mensuelle de la surface dominée pour chaque groupe (surface dominée par le groupe / surface totale dominée par un groupe), sur la période septembre 1997 – décembre 2004 dans le Pacifique équatorial. En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende de couleur en bas à gauche.*

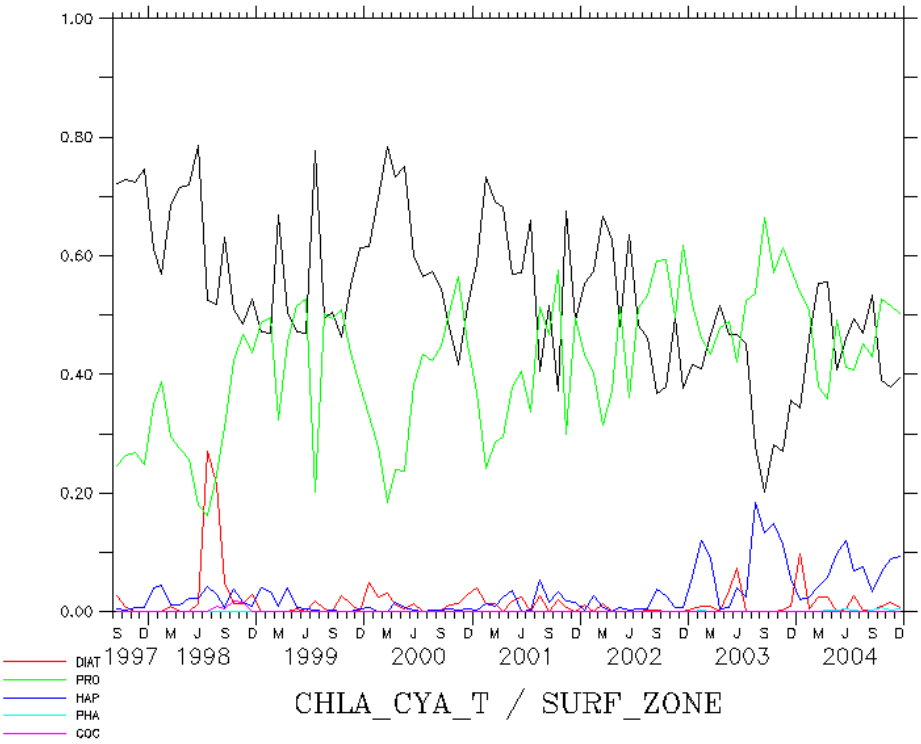


Figure 5.4.2 *: Evolution mensuelle du rapport entre la chlorophylle a associée à un groupe et la chlorophylle a, moyennée pour la période de septembre 1997 – décembre 2004 dans le Pacifique équtorial. En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende de couleur en bas à gauche.*

5.4.2 Cycles saisonniers de chaque groupe

Les haptophytes

Les haptophytes sont très rares dans la région étudiée ici sur la période SeaWiFS (Figure 5.4.1 et 5.4.2). Leur présence est toutefois plus marquée en fin d'année même si aucune saisonnalité nette n'est réellement observée. Les haptophytes dominent plus volontiers les latitudes restreintes comprises entre 2° Nord et 2° Sud et pour pratiquement toutes les longitudes (Figure 5.4.3).

Les Prochlorococcus

Les *Prochlorococcus* dominent cette région, sur presque toute la période d'étude, en termes de surface (Figure 5.4.1 et 5.4.3). Il est intéressant de noter que les *Prochlorococcus* sont essentiellement localisés dans la partie sud de la région Pacifique Equatorial, avec les plus grosses apparitions au sud de 2° Sud. En ce qui concerne les longitudes, les *Prochlorococcus* apparaissent pour toutes, mise à part la zone proche des côtes de l'Amérique du Sud entre 80° et 100° Ouest (Figure 5.4.3).

Les SLC

Les SLC sont très présents dans le Pacifique Equatorial où ils représentent de 40 à 60% des surfaces labellisées par PHYSAT et dominent en termes de chlorophylle *a* jusqu'à juin 2002 (Figure 5.4.1 et 5.4.2). Le maximum de présence des SLC est observé aux environs du mois de mars et le minimum en septembre – octobre. Au niveau géographique, les zones peuplées de SLC sont essentiellement situées dans l'Est du Pacifique Equatorial, de 80 à 110° Ouest, et pour des latitudes supérieures à 2° Sud. Cela correspond à un positionnement des SLC plus au nord que les *Prochlorococcus* (Figure 5.4.3) .

Les diatomées

Les diatomées sont absentes de cette région, sauf exceptions détaillées dans la partie interannuelle, et en dehors de quelques apparitions en bord de l'upwelling du bord est, le long des côtes du Pérou.

5.4.3 Variabilités interannuelles sur la période 1997-2004

Les haptophytes

Les haptophytes sont très rares dans la région étudiée ici de fin 1997 à fin 2002 (Figure 5.4.3). Ils sont toutefois plus présents pour les années 2003 et 2004 durant lesquelles ils semblent prendre la place des SLC, comme on l'observe sur la Figure 5.4.4.

Les Prochlorococcus

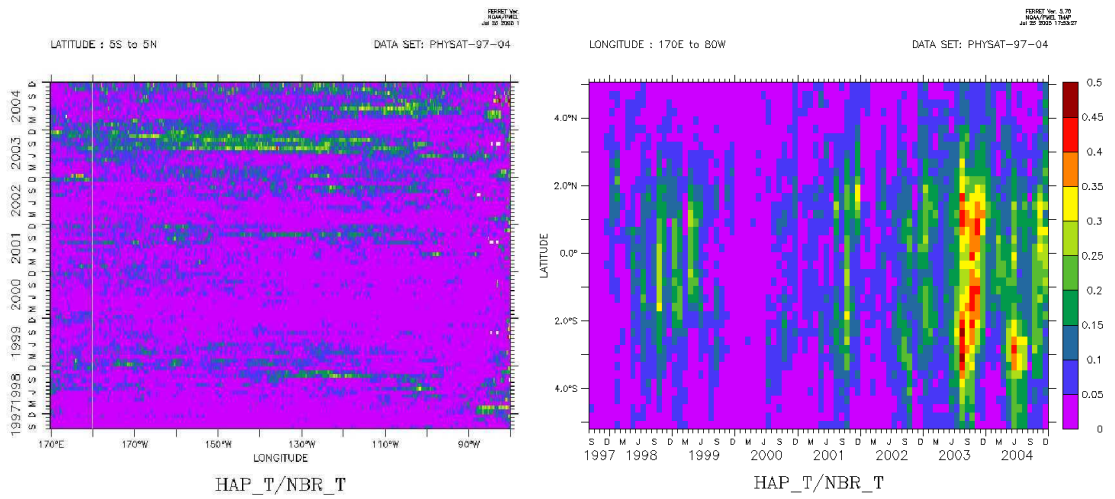
Les *Prochlorococcus* dominent cette région sur presque toute la période d'étude en termes de surface (Figure 5.4.1 et 5.4.3). Ils sont dépassés par les SLC en fin d'année 1997 et 1998 et lors du printemps 2000. Le nombre de pixels labellisés *Prochlorococcus* pour la période 1998-2004 est plutôt stable. Seules les années 1998 et 2004 ont des valeurs inférieures à 50% pour les pics maximums.

Les SLC

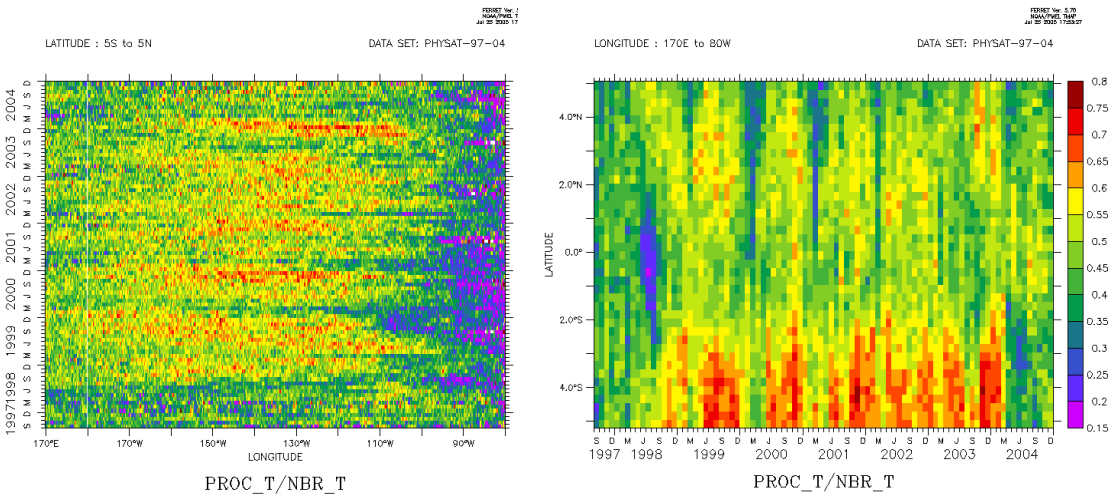
Les données disponibles permettent d'observer qu'en fin d'année 1997 et 1998 les SLC étaient largement dominants et n'ont cessé de diminuer depuis, laissant la place aux *Prochlorococcus* et aux haptophytes (Figure 5.4.4).

Les diatomées

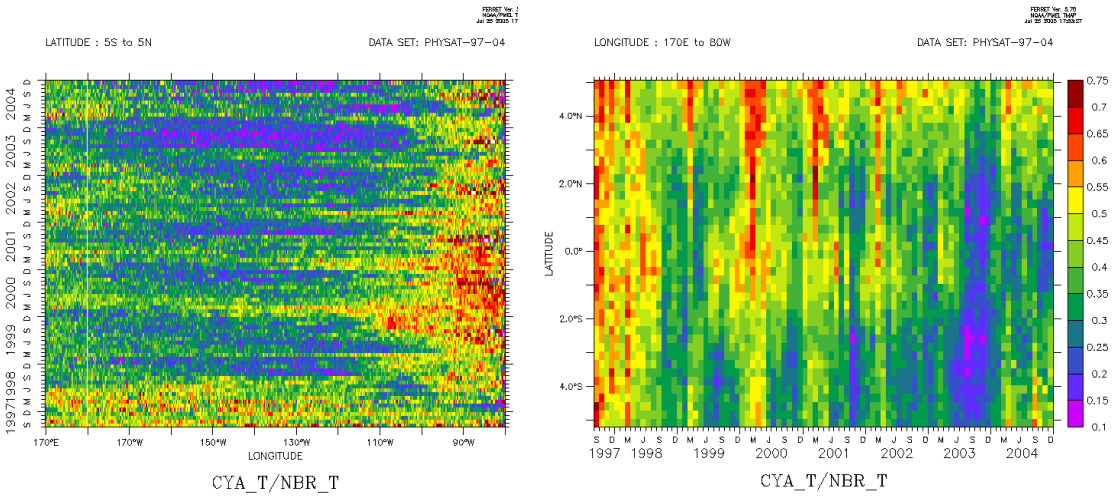
L'événement majeur concernant les diatomées dans cette région est le pic important durant les mois d'août, septembre et décembre 1998 (Figure 5.4.4). Cette floraison de diatomées qui représente plus de 6% de la zone et plus de 30% de la *chlorophylle a*, à comparer avec l'absence presque totale de diatomées en dehors, est unique et a été observé également en mer (Kaczamarska et al., 1995, Kobayashi et al. 2002). Il est intéressant de signaler que cette floraison inhabituelle est certainement lié aux suites d'El Niño et aux conditions de La Niña. La localisation de cette floraison de 1998 est entre 4° Nord et 4° Sud et de 80° Ouest à 140° Ouest. Les années 2003 et 2004 sont également associées à de légeres floraison, moins intenses mais de plus longue durée, localisés plus près des côtes en 2004 et entre 90° et 120° Ouest en 2003.



Haptophytes – Pacifique Equatorial



Prochlorococcus – Pacifique Equatorial



SLC – Pacifique Equatorial

Figure 5.4.3: *Représentation de la variabilité mensuelle de la surface labellisée pour les haptophytes, Prochlorococcus et SLC,, en fonction de la longitude (à gauche) et de la latitude (à droite), de septembre 1997 à décembre 2005.*

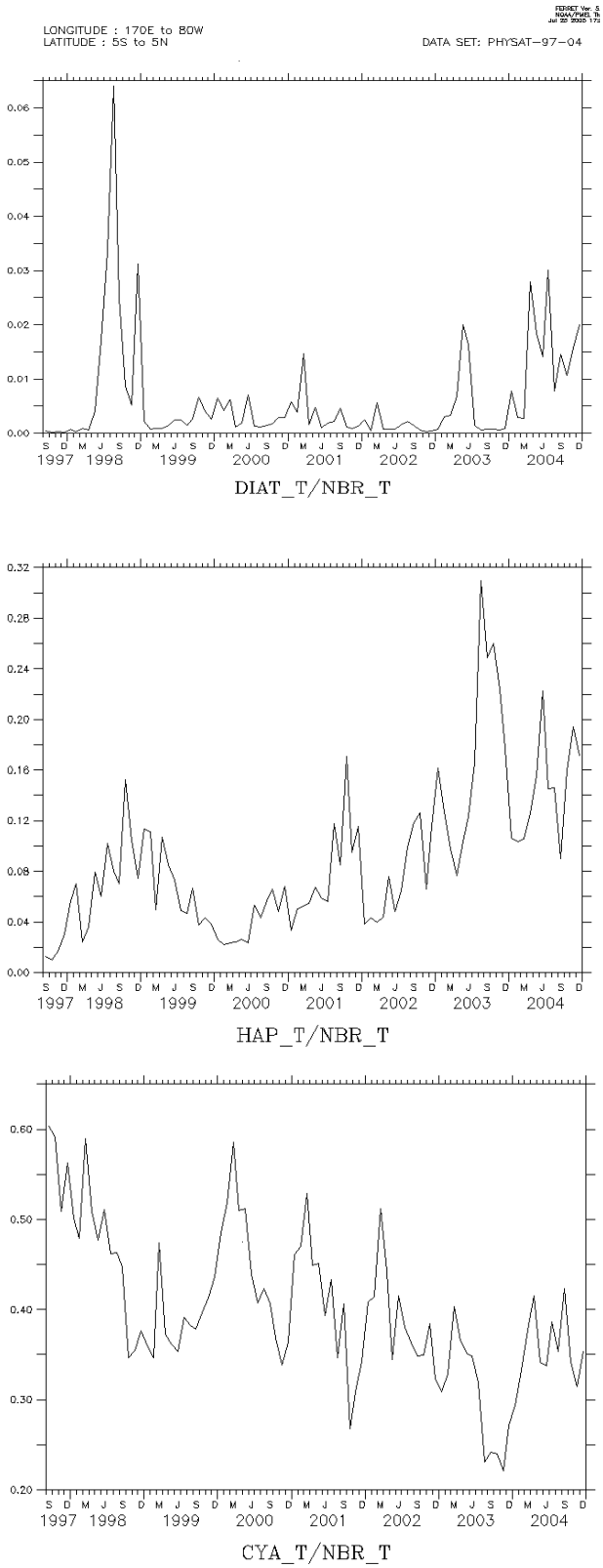


Figure 5.4.4 *: Pourcentages mensuels de surface labellisée pour les groupes diatomées, haptophytes (à gauche) et SLC (à droite), sur la période de septembre 1997 à décembre 2004 dans le Pacifique Equatorial (5°S-5°N / 170°E – 80°W).*

CONCLUSION DU CHAPITRE 5

L'étude des cycles saisonniers et interannuels des groupes de phytoplancton dominants, détectés par PHYSAT à l'échelle de bassins ou globale, s'est avérée très instructive. Ainsi, nous avons, pour la première fois, une vision d'ensemble de la répartition de ces groupes, de leurs limites et de leur saisonnalité. Ces dernières sont remarquablement nettes et régulières d'une année à l'autre.

On observe ainsi que les diatomées sont détectées saisonnièrement lors des printemps de chaque hémisphère. Notons à ce propos que l'Océan Austral est le lieu d'une floraison de ce groupe bien plus importante en termes de surface et de chlorophylle *a* associée que celui de l'Atlantique Nord. Cette information est toute nouvelle et il faudra essayer d'en tenir compte dans les études pour lesquelles ce groupe jour un rôle important (CO2, production primaire..). Les SLC et *Prochlorococcus*, quant à eux, se partagent les eaux équatoriales et sub- équatoriales. Les phaeocystis sont détectés dans l'Ocean Austral de novembre à mars pour de larges zones et cela est une information nouvelle et essentielle pour ce groupe, grand producteur de DMS. Le groupe haptophytes préfère les eaux des plus hautes latitudes et plus proches des côtes. Il est aussi très présent à l'échelle du globe. Enfin, les blooms de coccolithophoridés, bien que biaisés ici en raison d'un masque SeaWiFS, semblent apparaître localement sous forme de patchs relativement étendus. L'étude de la répartition spatiale et géographique de ce groupe devra être refaite, dans les mois qui viennent, avec des données non masquées.

S'il ne serait pas raisonnable de rechercher des tendances sur la courte période de sept années étudiées ici, on peut tout de même observer quelques différences remarquables sur l'ensemble de la période. Ainsi, les haptophytes semblent occuper de plus en plus de surface de 1997 à 2004, remplaçant progressivement les SLC ou les *Prochlorococcus* selon les régions. Notons que ces derniers sont en général très présents en tout début de période (fin 1997 et début 1998), qui correspond à la fin de El Nino et à La Nina. Peut-être assistons-nous donc sur ces quelques années à un retour à l'équilibre après cet événement climatique majeur, mais cela n'est bien sûr, qu'une hypothèse. Le fait que les haptophytes soient remplacés par les *Prochlorococcus*, contiguë en termes de spectres de nLw*, pose également la question d'une dérive éventuelle du capteur SeaWiFS. Cette hypothèse n'est toutefois pas cohérente avec le fait que ce sont parfois les SLC qui sont remplacés par les haptophytes. Il faudrait également que la dérive soit plus importante à 412 nm, de façon à « tordre » les spectres SLC et/ou *Prochlorococcus* en spectres haptophytes. De plus, les haptophytes « grignotent » les régions *Prochlorococcus* ou SLC à leurs périphéries, ce qui ne va pas dans le sens d'une dérive. Enfin, si une telle dérive du capteur était la cause des tendances observées, toutes les espèces devraient être touchées, ce qui n'est pas le cas. Je pense donc que tous ces arguments nous permettent de considérer que les tendances observées sont bien associées à des changements de groupes de phytoplancton dominants. Cependant, ces changements de groupes sur la période 1997-2004 trouvent certainement leur origine dans plusieurs phénomènes et il faudra, à l'avenir, plus de données et des études plus poussées pour parvenir à mieux en apprécier l'impact.

CHAPITRE 6

UTILISATION DE PHYSAT POUR L'AMELIORATION DU PRODUIT SEAWIFS « CONCENTRATION EN CHLOROPHYLLE *A* »

6.1 Un algorithme « couleur de l'eau » dépendant des groupes

Les résultats présentés dans ce chapitre font l'objet d'un article accepté par *Deep Sea Research I* en Décembre 2005 et disponible en annexe.

6.1.1 Etat de l'art

En attendant d'être en mesure de prendre en compte explicitement les propriétés optiques de chaque espèce, je me propose d'utiliser PHYSAT pour tenter d'améliorer, de façon empirique, la précision de la quantification de la concentration en chlorophylle *a* par les algorithmes classiques.

Comme je l'ai expliqué précédemment, la chlorophylle *a* standard est habituellement estimée à partir de modèles bio-optiques basés sur des ratios de luminance marine normalisée (nLw) dans la partie bleue et verte du spectre. Cependant, la variabilité des assemblages de phytoplancton et des conditions océaniques dans l'océan global, associées à la rareté des mesures in situ, permet uniquement l'utilisation de modèles moyens qui sont supposés être adaptés à l'échelle globale. Ainsi, l'ensemble des cartes globales SeaWiFS de chlorophylle *a* est obtenu grâce à un seul modèle moyen appelé OC4V4, supposé adapté à l'échelle globale (O'Reilly et al. 2000). Ce modèle a été réalisé à partir d'une relation moyenne issue d'un large jeu de données de chlorophylle *a* et de nLw coïncidents, mesuré in situ et acquis dans des eaux variées. Cependant, la dispersion non négligeable des données de terrain autour de la relation moyenne (O'Reilly et al. 2000) montre que cette approche ne permet pas de déterminer la chlorophylle *a* avec une précision meilleure que 30%. La dispersion observée, pour une chlorophylle *a* donnée, est habituellement attribuée à l'impact optique des substances jaunes dissoutes et/ou aux caractéristiques des différents écosystèmes. Même si OC4V4 donne un résultat très satisfaisant à l'échelle globale (McClain et al. 2004), plusieurs études régionales ont mis en relief le fait que des biais significatifs peuvent exister entre l'estimation in-situ et par satellite de la chlorophylle *a*. Ces études ont été suivies d'adaptations de OC4V4, comme celle développée pour le cas des eaux oligotrophes de Méditerranée (Bricaud et al. 2002 ; D'Ortenzio et al. 2002) ou pour les eaux productives (Arrigo et al. 1998 ; Dierssen and Smith 2000).

Plus récemment, des modèles bio-optiques ont été développés pour tenir compte des spécificités de certains groupes de phytoplancton comme les diatomées (Cota et al. 2003 ; Sathyendranath et al. 2004), les *Synechococcus* (Morel et al. 1997) ou encore les trichodesmiums (Subramaniam et al. 2002). Toutefois, ces algorithmes spécifiques ne peuvent pas être facilement appliqués à l'échelle globale du fait de la nécessité d'une information préalable sur le groupe de phytoplancton dominant.

Puisque la méthode PHYSAT apporte désormais cette connaissance, elle a été appliquée à la base de données in-situ NOMAD (Werdell and Bailey submitted) pour établir des algorithmes dépendant des groupes dominants, de types « relations OC4V4 », entre les nLw et la chl a.

6.1.2 Analyse de la base NOMAD avec PHYSAT

La base de données NOMAD a été récemment rendue disponible à la communauté scientifique, en remplacement de l'ancienne base SEABAM, afin de faciliter le développement de nouveaux algorithmes bio-optiques (http://seabass.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/nomad.cgi). Cette base est constituée de 3466 mesures in-situ et coïncidentes de nLw et de chlorophylle *a* acquises dans des types d'eau variés dans les océans du globe. Notons cependant que, contrairement à la base de données GeP&CO, NOMAD ne contient pas d'inventaires de pigments et ne peut donc pas être utilisée pour identifier les groupes fonctionnels de phytoplancton.

Avant d'appliquer la méthode PHYSAT à cette base de données, 942 mesures ont été éliminées en raison de l'absence d'au moins une des bandes spectrales nécessaires. 372 autres mesures ont également été retirées car elles ont été qualifiées d'eaux du cas 2 par les critères du traitement SeaWiFS, c'est à dire avec une nLw (670) supérieure à 0.0012 (Patt et al. 2003).

Finalement, 101 mesures d'eau du cas 1 ont été éliminées car la chlorophylle *a* correspondante était supérieure à 10 $mg.m^{-3}$, ce qui implique un signal spectral extrêmement plat qui ne peut être traité par la méthode PHYSAT. Notons que ce seuil sur la chlorophylle *a* est plus souple que celui de la méthode originale PHYSAT, qui était de 3 $mg.m^{-3}$ (Alvain et al., 2005), afin d'élargir au maximum la plage de validité du modèle bio-optique à venir.

L'application de PHYSAT aux 2051 mesures restantes de la base NOMAD a permis la labellisation dans l'un des quatre groupes pour 337 d'entre eux, comme le montre la figure 6.1.1. Notons que les spectres nLw* « NOMAD » ont été calculés en utilisant, pour la normalisation, une LUT adaptée, recalculée à partir de l'ensemble des 2051 données.

Ainsi, on observe que les mesures identifiées comme «*Prochlorococcus »* sont proches de la relation moyenne dans la figure 6.1.1, celles identifiées comme haptophytes et cyanobactéries sont plutôt situées dans la partie basse du nuage de points, tandis que les diatomées sont plutôt dans la partie haute

Pour chacun de ces 3 derniers groupes de phytoplancton, une interpolation polynomiale de type OC4V4 (O'Reilly et al. ,2000) a été appliqué :

$$\log(\text{Chl a}) = a \log4(r) + b \log3(r) + c \log2(r) + d \log(r) + e \qquad (6.1.1)$$

Le paramètre r correspond au maximum des ratios des bandes bleu sur vert défini comme :

$$r = \max(Rrs(443),Rrs(490),Rrs(510)) / Rrs(555) \quad (6.1.2)$$

Et Rrs est la réflectance à une longueur d'onde données λ :

$$Rrs(\lambda) = nLw(\lambda) / E0(\lambda) \qquad (6.1.3)$$

E0 est l'éclairement solaire au sommet de l'atmosphère. Les coefficients « a » à « e » sont donnés dans la table 6.1.1 pour chaque groupe sauf pour les *Prochlorococcus* car le résultat de l'interpolation pour ce groupe n'est pas significativement différent de OC4V4.

La figure 6.1.2 confirme que les relations établies pour les diatomées et les haptophytes sont significativement au-dessus et en-dessous du fit moyen OC4V4. Cela est en accord avec le résultat obtenu par Cota et al. (2003) dans la Mer du Labrador en présence de diatomées ou de

prymnesiophytes (l'équivalent du groupe Haptophytes de PHYSAT). La relation obtenue pour les cyanobactéries a une allure un peu différente car elle est fortement en-dessous et au-dessus, respectivement pour des chlorophylle *a* inférieures et supérieures à 0.3 mg.m-3.

Ces résultats suggèrent que la présence de différents groupes dominants, comme fournis par PHYSAT, permet d'expliquer une part significative de la dispersion du jeu de données NOMAD.

	OC4V4	Haptophytes	SLC	Diatoms
A	-1.532	-4.889	2.249	-4.303
B	0.649	5.096	-5.975	5.051
C	1.93	0.972	4.912	-0.333
D	-3.067	-3.430	-2.77	-3.235
E	0.366	0.341	0.104	0.58
Chl *a* validity range ($mg.m^{-3}$)	0.01-30	0.06-3	0.05-4	0.06-10

Table 6.1.1 : *Coefficients de l'équation 6.1.1 pour chaque groupe et plages de validité des algorithmes en termes de chlorophylle a.*

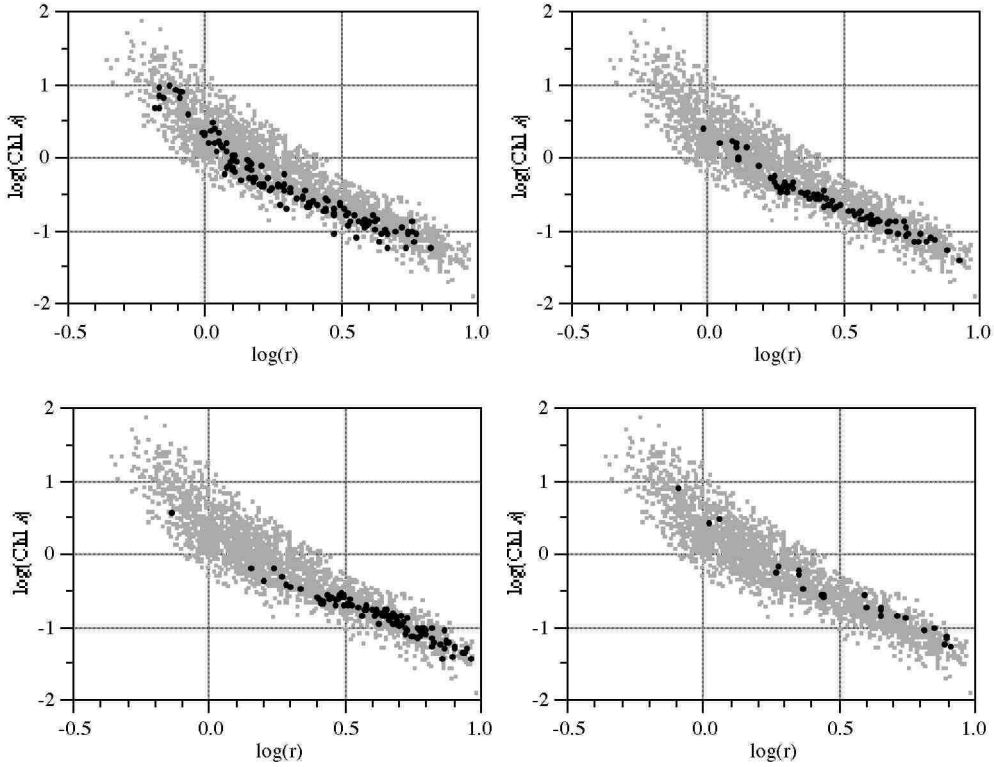


Figure 6.1.1 *Valeurs de Chl a en fonction du maximum du rapport « bleu sur vert » pour les mesures de la base de données NOMAD. Les points noirs représentent les mesures qui ont été classifiées par PHYSAT comme : haptophytes (haut gauche- 130 données), Prochloroccocus (haut droite- 83 données), cyanobactéries (bas gauche – 100 données) et diatomées (bas droite – 24 données). Les points gris des quatre graphiques montrent la totalité de la base de données NOMAD.*

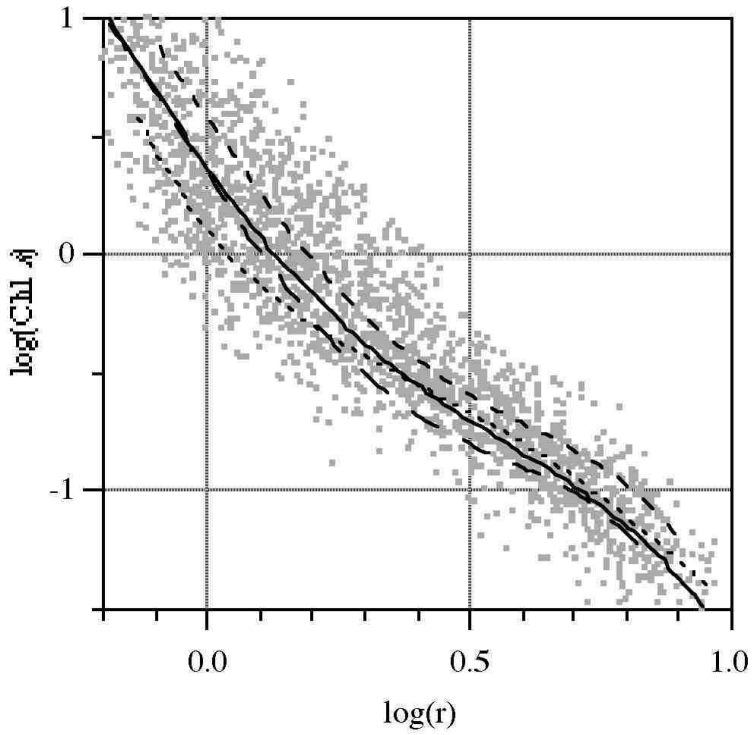


Figure 6.1.2 : *Relations de type OC4V4 pour les points labellisés comme haptophytes (ligne de tirets longs), cyanobactéries (ligne de points) et diatomées (ligne de tirets moyens).Comme pour la figure 6.1.1 les points gris représentent l'ensemble de la base NOMAD.*

6.1.3 Application à des données SeaWiFS globales

L'analyse des données NOMAD qui vient d'être présentée permet donc de définir un modèle bio-optique pour chaque groupe détecté par PHYSAT. Ce nouvel algorithme est appelé OC4-SD (pour « Species Dependent ») et se déroule comme suit :

La première étape consiste à appliquer PHYSAT aux cartes standard SeaWiFS de nLw et de chlorophylle *a* de manière à identifier les groupes de phytoplancton dominants. Si l'identification d'un groupe dominant est possible, le modèle bio-optique adapté (voir table 6.1.1) est utilisé pour recalculer une valeur de chlorophylle *a* améliorée. Dans le cas contraire, si l'identification n'est pas possible ou mène à des *Prochloroccucus*, ou encore si la chlorophylle *a* SeaWiFS originale est en dehors des plages de validité (voir Table 6.1.1), l'algorithme SeaWiFS classique est conservé.

Les données de niveau 3 SeaWiFS de l'année 2001, à une résolution de 9km, ont ainsi été traitées par OC4-SD et OC4V4 pour générer les cartes globales de moyennes de chlorophylle *a*. Notons qu'une moyenne de 50% de pixels est classée par PHYSAT dans un des 4 groupes de phytoplancton dominants, pour chaque carte journalière SeaWiFS. La figure 6.1.3 montre la chlorophylle *a* mensuelle OC4-SD et les cartes de différences avec les produits standard OC4V4, pour les points labellisés par PHYSAT.

Les différences entre les deux modèles bio-optiques sont bien organisées à l'échelle globale et sont généralement de l'ordre de ± 20% pour les hautes et moyennes latitudes. Les plus fortes différences positives (jusqu'à 60%) sont trouvées dans les régions où les diatomées sont fréquemment observées. Ce résultat est en accord avec des études plus anciennes qui montraient que les valeurs de chlorophylle *a* sont sous-estimées par les produits standards, dans le cas d'eaux dominées par les diatomées (Sathyendranath et al. 2003 and Dierssen and Smith 2000). Inversement, des valeurs de chlorophylle *a* beaucoup plus faibles que le produit standard sont observées dans des régions connues pour leur valeur de chlorophylle *a* trop forte. C'est notamment le cas de la Mer Méditerranée comme le montrent les études de Bricaud et al. (2002) et D'Ortenzio et al. (2002).

D'autre part, les valeurs de chlorophylle *a* issues de OC4-SD sont légèrement plus fortes dans la plupart des eaux oligotrophes tropicales, en raison de la présence quasi permanente de cyanobactéries. Notons que ces régions sont caractérisées par de très faibles valeurs de chlorophylle *a* et que les pourcentages de différences obtenus sont faibles (< 10%) et ne sont donc pas forcément significatifs.

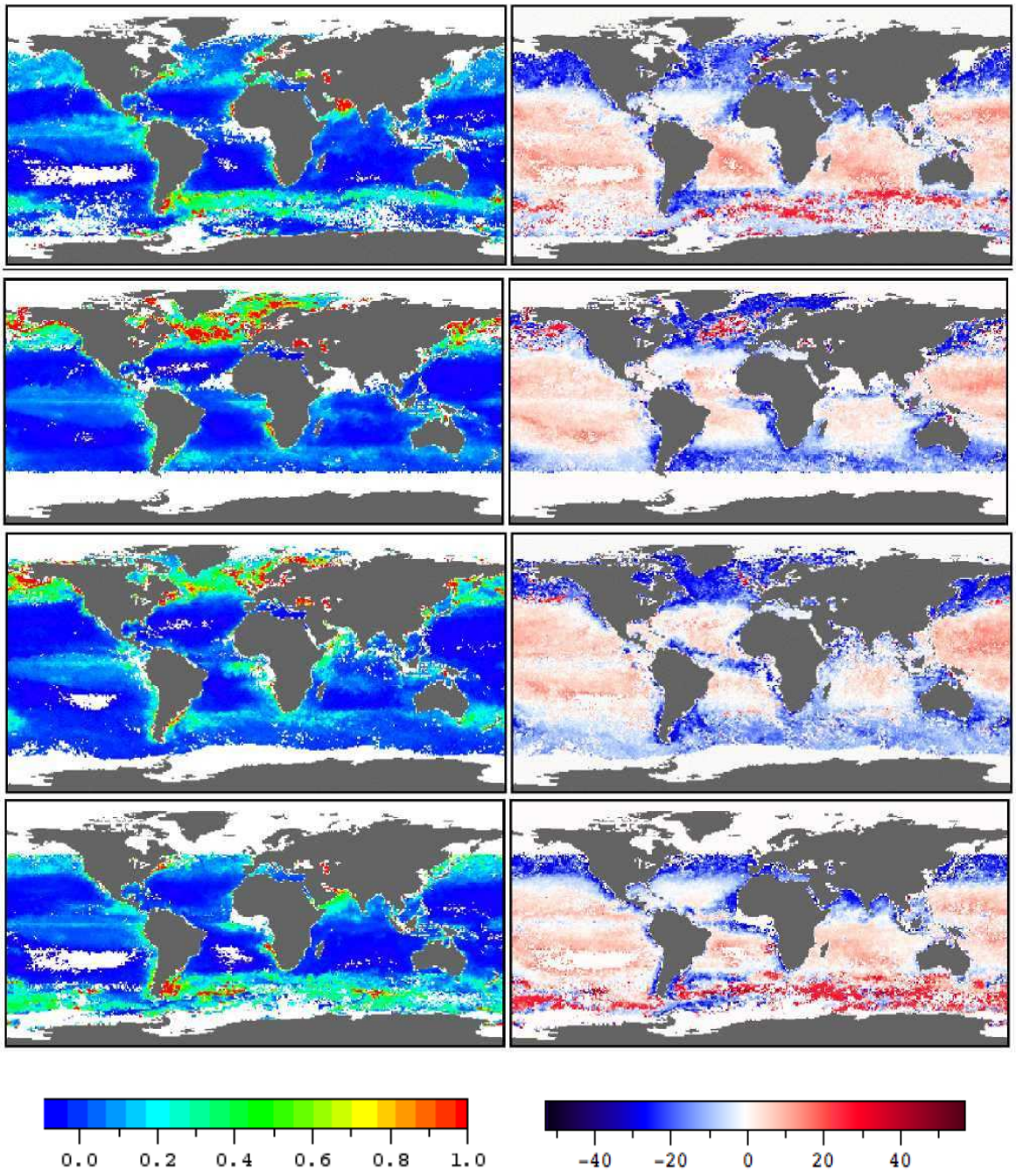


Figure 6.1.3 : *Cartes de la concentration en chlorophylle a mensuelle pour OC4-SD (à gauche en mg.m-3) et différence relative (à droite en %) entre les valeurs de OC4-SD et OC4V4 pour Mars (en haut), Juin, Septembre et Décembre (en bas) 2001.*

6.1.4 Validation de l'algorithme OC4-SD

Lors de la création d'un nouvel algorithme bio-optique, il est important d'essayer de le valider. Pour cela, j'ai assemblé un jeu de données in-situ, indépendantes et limité à des eaux du cas 1. Pour être ajoutées à cette base de données, les mesures en mer devaient être composées au minimum de la mesure en concentration en chlorophylle *a*, la date et la localisation géographique précise. Certaines campagnes sont associées également à des inventaires de pigments plus ou moins complets et à des mesures de luminances marines. Ce n'est cependant pas le cas de toutes, et seule la mesure en chlorophylle *a* est utilisée par la suite dans le cadre de la validation d'OC4-SD. Il est ainsi possible d'associer à chaque mesure in-situ de chlorophylle *a*, des valeurs de nLw, d'épaisseur optique (τ) et de chlorophylle *a* SeaWiFS coïncidentes (même jour et ± 9Km), lorsque ces dernières sont de bonne qualité et répondent aux critères fixés (τ <0.15 et chl *a* < 10mg.m^{-3}). Ainsi, le jeu de données de validation de OC4-SD a pu être réalisé en appliquant PHYSAT à une base de 475 ensembles « données SeaWiFs de qualité et mesures de chlorophylle *a* in-situ ».

Campagne	**Dates**	**Localisation Trajet**	**Données colocalisées / nombre total**	**Principal responsable**
COLIBRI	04/03-05/03	Le havre – Guyane Atlantique Nord	45/97	Y. Dandonneau
Guyaplac	05/03- 06/03	Large de la Gyuane	0/52	Y. Dandonneau
OISO 5	07/00-08/00	Madagascar - Kerguelen	7/73	N. Metzl
OISO 6	01/2001	Madagascar - Kerguelen	3/117	N. Metzl
OISO 9	08/02-09/02	Madagascar - Kerguelen	11/74	N. Metzl
Skogafoss 1	09/2002	Terre Neuve -Islande	12/39	Y. Dandonneau
Skogafoss 2	04/03-05/03	Terre Neuve -Islande	9/34	Y. Dandonneau
Toucan	08/02-09/02	Le havre –Guyane Atlantique Nord	21/91	Y. Dandonneau
Gep&CO	Cf. Chapitre 2	Le Havre - Nouméa	328/1502	Y. Dandonneau
Dyfamed	1998-2003	Méditerranée	21/51	J.C. Marty
Kiwi 6 à 9	11/97 - 12/97 01/98 - 03/98	Pacifique sud, Nouvelle Zélande	10/38	R. Barber
BATS	47 mesures de 1997 à 2001	Bermudes Atlantique Nord	8/47	-

Table 6.1.2 : *Présentation des différentes campagnes disponibles pour la validation de OC4-SD. Le nombre de données colocalisées sur le nombre total de données disponibles pour chaque campagne et également présenté dans la quatrième colonne.*

Campagne	Nombre de mesures retenues	Groupe dominant	Période	Région	Principal Responsable
Gep&Co	91	1 diatomée 55 SLC 35 haptophytes	08/00-08/02	Atlantique Nord et Pacifique sud	Y. Dandonneau
Dyfamed	4	4 haptophytes	09/99-09/00 07/02-08/02	Mediterranée	J-C. Marty
Kiwi 7	1	1 diatomée	12/97	Austral	R. Barber
Oiso 6 4	4	4 diatomées	01/01	Austral	N. Metzl
Skogafoss	1	1 haptophyte	07/02	Atlantique Nord	Y. Dandonneau
Colibri	8	8 haptophytes	04/03	Atlantique Nord	Y. Dandonneau

Table 6.1.3 : *Présentation des différentes campagnes dont des données ont été sélectionnées et labellisées par PHSYAT en vue de la validation de OC4-SD.*

Sur cet ensemble de données, PHYSAT a pu en associer 383 à un groupe dominant de phytoplancton dont 182 à des haptophytes, des diatomées ou des cyanobactéries. Un grand nombre des données identifiées par PHYSAT sont donc associées au groupe *Prochlorococcus,* et ne permettent donc pas de valider OC4-SD. Cela était prévisible car beaucoup des données in-situ ont été réalisées dans les eaux oligotrophes, principalement pendant les campagnes GeP&CO.

Les critères de plage de validité des relations présentées dans la table 6.1.1 ont également écarté quelques points du jeu de validation, limitant le nombre d'haptophytes, de diatomées et de cyanobactéries à 111. On trouvera dans la table 6.1.3 la présentation des campagnes dont on a pu sélectionner certaines mesures. Bien qu'en nombre assez réduit par rapport au nombre initial, ces 111 mesures échantillonnent toujours correctement différentes régions et saisons comme le montre la figure 6.1.4 et la table 6.1.3.

La comparaison de la chl *a* OC4V4 et OC4-SD avec les valeurs mesurées in-situ est présentée dans la figure 6.1.5. L'algorithme OC-SD donne de meilleurs résultats que OC4V4, à la fois en termes de corrélation et de pente de régression. Ces paramètres statistiques et l'analyse de la figure 6.1.5 montre que le modèle bio-optique OC4-SD présente un biais et une dispersion de la chlorophylle *a* moindre que pour le modèle standard OC4V4. Ceci est valable pour les pixels auxquels à pu être associé un groupe de phytoplancton dominant. Pour les autres pixels, OC4-SD ne dégrade pas le résultat car, dans ce cas, l'ancien modèle est conservé.

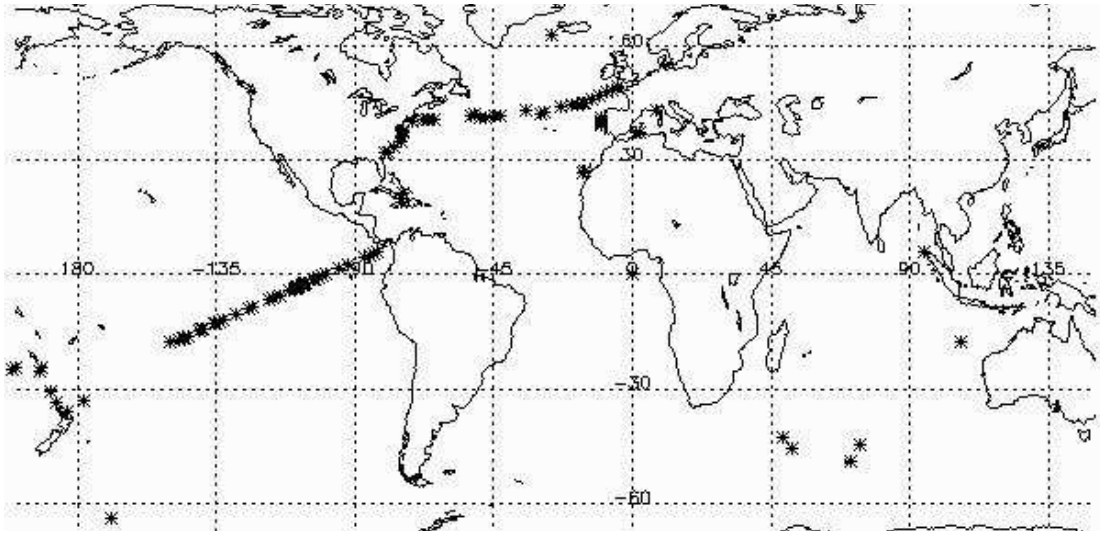


Figure 6.1.4 : *Localisation des 111 mesures in-situ utilisées pour la validation du nouvel algorithme OC4-SD. Les données sont issues des campagnes GeP&CO, OISO, Skogafoss, Toucan, Colibri, Kiwi et de la station DYFAMED (voir Table 4.2).*

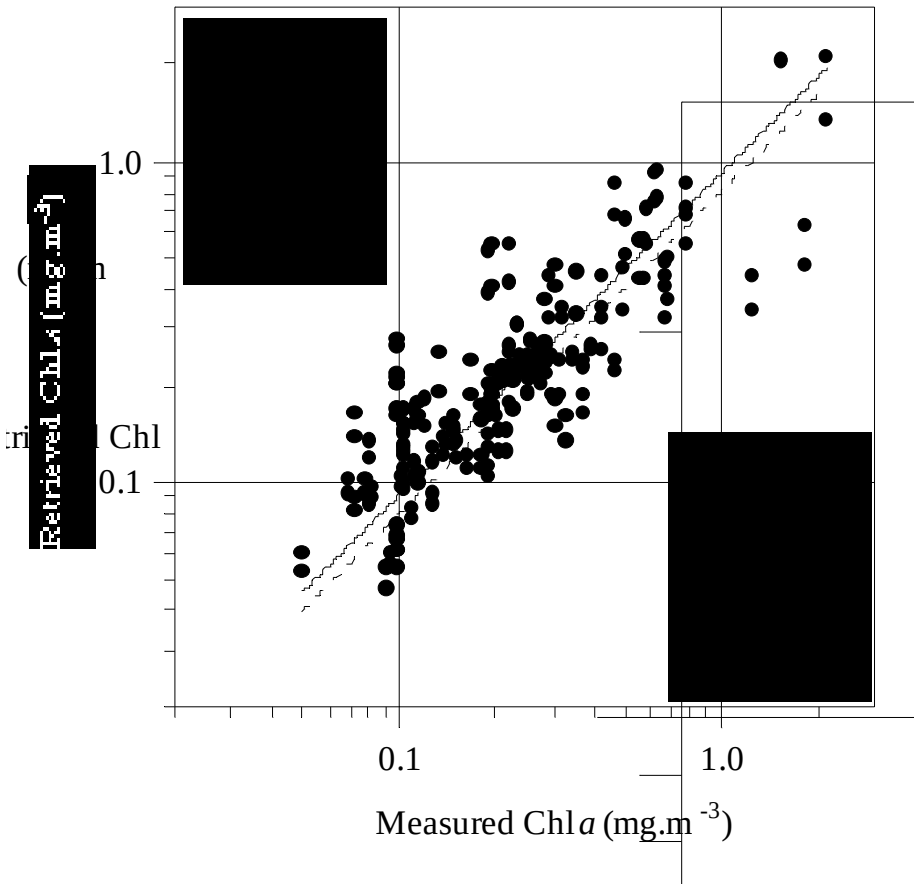


Figure 6.1.5 : *Comparaison de la* chlorophylle *a calculée à la fois par OC4V4 (cercles ouverts) et OC4-SD (cercles pleins) avec la mesure in-situ pour les 111 mesures indépendantes de la validation. Ces dernières on été classées par PHYSAT comme haptophytes (50 mesures), cyanobactéries (55 mesures) et diatomées (6 mesures). Les régressions linéaires de la forme : Chl a(calculée)=α. Chl a(mesurée) sont présentées sous forme de ligne continue pour OC4-SD et pointillée pour OC4V4. Les statistiques correspondantes sont données en marge.*

RESUME DU CHAPITRE 6

La base NOMAD est constituée de mesures in-situ de concentration en chlorophylle *a* et de luminances marines normalisées (nLw) dans des types d'eaux variés. Elle est utilisée pour améliorer les algorithmes bio-optiques de couleur de l'eau. L'utilisation de la méthode PHYSAT pour labelliser les données de cette base a permis le développement d'un nouvel algorithme dépendant du groupe de phytoplancton dominant. Une relation entre la chlorophylle *a* et les nLw, significativement différente d'OC4V4, a pu être établie pour trois des groupes PHYSAT. Cela montre qu'une partie de la dispersion des mesures in-situ autour de l'algorithme moyen (ici OC4V4) est liée à la variabilité des propriétés optiques des différents groupes de phytoplancton et des éléments qui y sont associés.

L'algorithme OC4-SD fonctionne donc de la façon suivante : lorsque les groupes haptophytes, diatomées et SLC sont détectés par PHYSAT, un algorithme spécifique à chacun d'eux (OC4-SD) a pu être est appliqué. Dans le cas contraire l'algorithme moyen classique (OC4V4) est conservé.

Une première validation a été effectuée à partir de mesures indépendantes, provenant de diverses campagnes en mer. La précision de la valeur de concentration de chlorophylle *a* mesurée est amélioré par OC4-SD. Les différences observées sont cohérentes avec des études plus anciennes, locales, qui faisaient état d'une sous-estimation particulière de la chlorophylle *a* par OC4V4 (comme en Méditerranée) ou d'une surestimation dans d'autres cas (pour les diatomées notamment).

Des recherches supplémentaires seront nécessaires pour expliquer les raisons des relations particulières observées pour les différents groupes, mais les résultats obtenus ici ouvrent une nouvelle voie pour l'amélioration des algorithmes de couleur de l'eau classique.

CHAPITRE 7

UTILISATION DE PHYSAT POUR LA VALIDATION DES MODELES DE BIOGEOCHIMIE MARINE

7.1 PHYSAT et modèles biogéochimiques: premières études et applications potentielles

La méthode PHYSAT permet désormais d'étudier à grande échelle les successions des groupes dominants de phytoplancton à partir d'observations satellitales. Elle peut également être utilisée pour étudier plus localement les réponses de l'écosystème marin aux variations de paramètres physiques, climatiques ou chimiques. Tout cela avec pour objectif, à terme, de valider et d'améliorer les modèles de biogéochimie marine.

Le groupe « diatomées » est un des rares actuellement bien représenté dans les modèles. Ainsi, le modèle biogéochimique marin PISCES (acronyme pour "Pelagic Iteraction Scheme for Carbon and Ecosystem Studies") comporte une réprésentation du phytoplancton marin en deux groupes : les diatomées et le nanoplancton (Aumont et al. 2003). Ce modèle d'écosystème marin et du cycle du carbone est développé au LOCEAN et utilisé au LSCE. Il a donc été rapidement possible de comparer les observations PHYSAT et les résultats de ce modèle pour les floraisons de diatomées. Ces premières études ont donné des résultats très encourageants, comme le montre la Figure 7.1.1, issue de Bopp et al. sous presse. Ainsi, les diatomées dans PISCES sont plutôt bien représentées en terme de fréquence d'apparition sur une année et de localisation. Il existe toutefois quelques régions de désaccord entre PISCES et PHYSAT comme, par exemple, la zone Ouest de l'Atlantique Nord, siège du Gulf Stream. On retrouve pour cette région des diatomées dans PISCES, ce qui n'est quasiment jamais le cas avec PHYSAT. On peut donc désormais rechercher les différences entre observations et modèles, et en étudier les causes de façon à améliorer ces derniers.

Des comparaisons ont également été effectuées lors du phénomène climatique El Niño de 1997, au niveau de l'équateur, et pour la floraison de diatomées observée au printemps dans l'Atlantique Nord. Pour commencer, intéressons-nous à l'équateur…

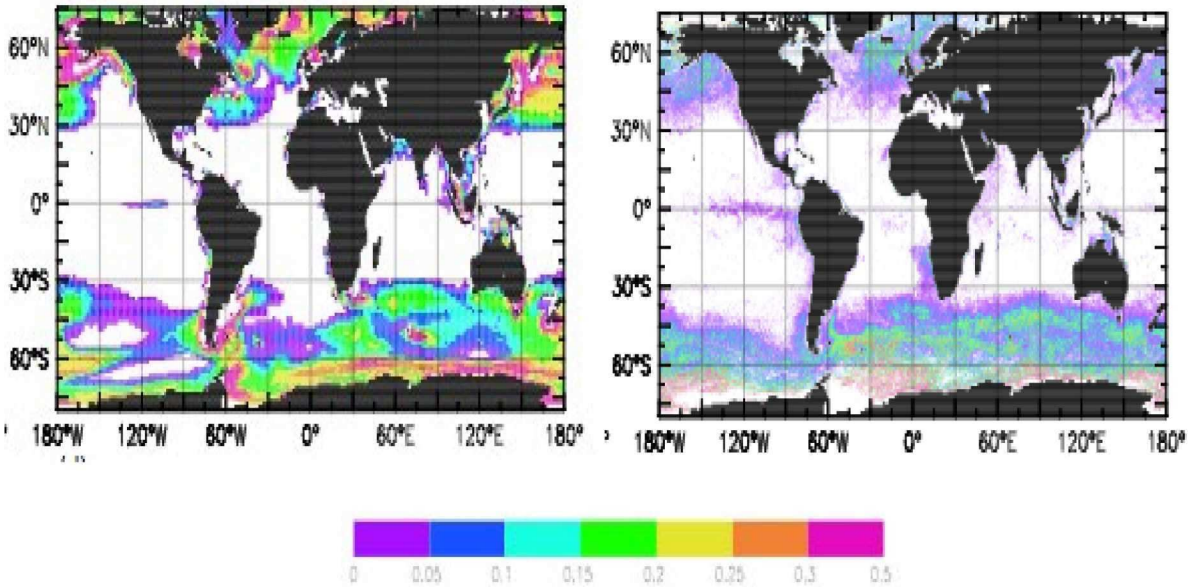


Figure 7.1.1 : *Fréquence sur une année d'apparition de diatomées dominantes dans PHYSAT (à droite) ou dans PISCES-IPSL-CM4 (à gauche). Figure extraite de l'article Bopp et al. en révision.*

7.1.1 Pacifique Equatorial : suivi de El Niño

Le terme El Niño est utilisé historiquement par les pécheurs de la côte Ouest du Pérou et de l'Equateur en référence à un courant marin chaud qui remonte le long de ces côtes, autour de la période de Noël. Ce courant d'eau plus chaude que la normale apparaît périodiquement, en réaction à un changement d'orientation des vents dans l'Ouest du bassin Pacifique . Il influence de façon souvent très négative les activités de pêche des pays limitrophes. Certaines années sont marquées par un courant particulièrement chaud, avec des effets dévastateurs sur la faune marine et également des pluies diluviennes à l'intérieur des terres. Au fil des années, le terme El Niño n'a plus été utilisé que pour ces années exceptionnelles. Ainsi, les derniers évènements El Niño remarquables datent de 1982-83 et 1997-98. Le phénomène El Niño est un événement majeur à l'échelle de la région directement touchée, mais également à l'échelle globale. Cette transmission du phénomène passe par une modification des pluies tropicales, qui affectent à leur tour les vents, étendant ainsi l'impact d' El Niño à des régions plus éloignées. Les années El Niño sont suivies d'une année dites La Niña, qui correspond notamment à un retour à une situation classique, associé à un upwelling équatorial plus intense que la normale accompagné de fortes remontées de sels nutritifs.

Les données SeaWiFS sont disponibles à partir du mois de septembre 1997. Nous pouvons donc avoir accès aux espèces dominantes à partir de la fin du phénomène El Niño de 1997 jusqu'à l'année suivante, dite La Niña, soit 1998. Si l'on observe globalement les cartes de 1997, il est frappant de constater que le nombre de *Prochlorococcus* et de SLC est particulièrement élevé par rapport à l'ensemble des mois des années suivantes (voir annexe et chapitre 4). D'un point de vue plus local, on observe une floraison inhabituelle de diatomées de juin à décembre 1998, au niveau de l'équateur (Figure 7.1.2). Des études in situ, datant du précédent El Niño ou directement de celui de 1997-98, ont également observé cette floraison inhabituelle (Chavez et al., 1999, Kobayashi et al., 2002).

PHYSAT nous fournit une information spatiale et temporelle précise de l'évolution de la floraison de diatomées à l'équateur. Il est donc possible de comparer ces résultats avec ceux qui sont obtenus par le modèle PISCES, en terme de présence de diatomées dans cette région. La figure 7.1.3 montre qu'il existe une remarquable similitude entre le déroulement de la floraison de diatomées observée par PHYSAT et celle modélisée par PISCES. On note également que le petit rebond du mois de décembre 1998 apparaît bien dans les deux représentations. Tout cela montre que les paramètres de PISCES, régissant l'apparition de diatomées, sont bien adaptés au phénomène observé ici. Cette conclusion est très encourageante et peut laisser espérer que, dans un futur proche, il sera possible de mieux comprendre les effets de ce phénomène climatique.

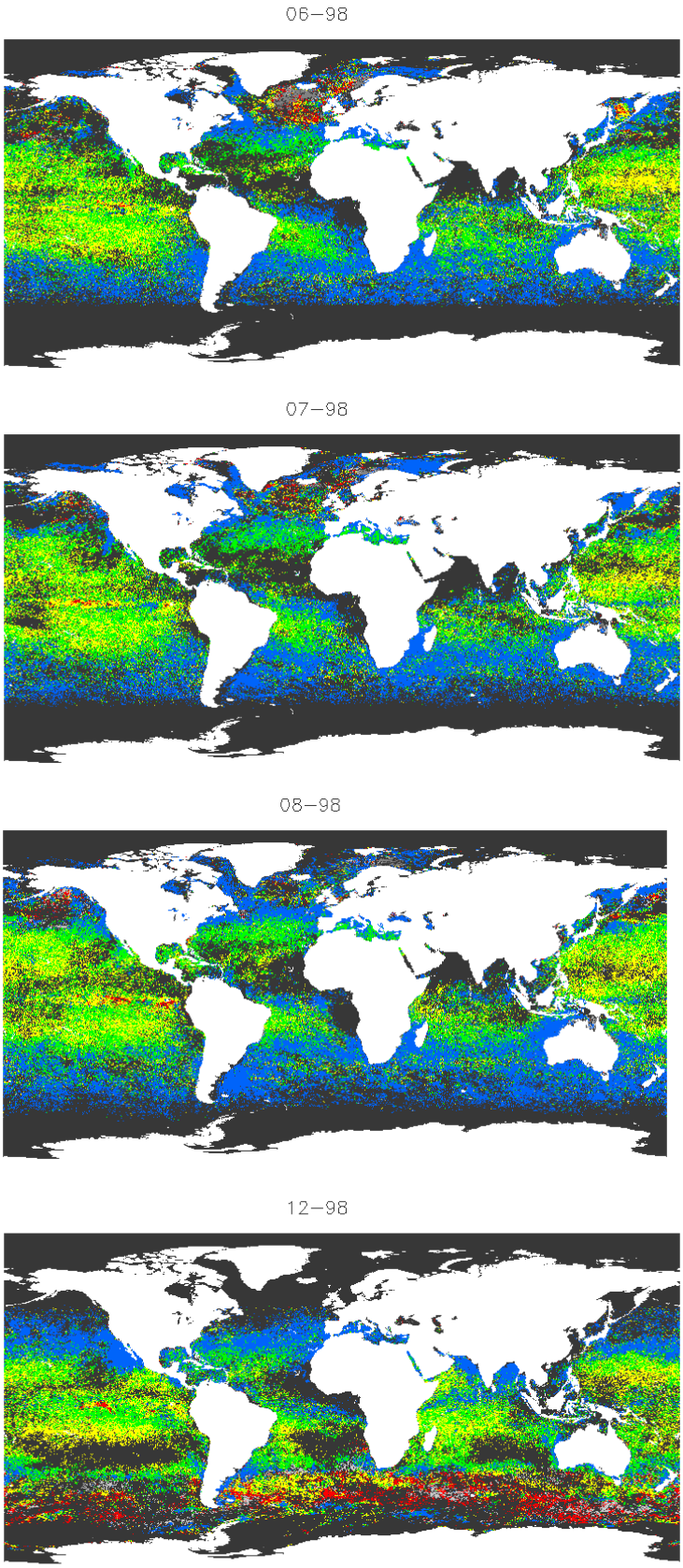


Figure 7.1.2: *Cartes mensuelles PHYSAT pour les mois de juillet à août et décembre 1998.*

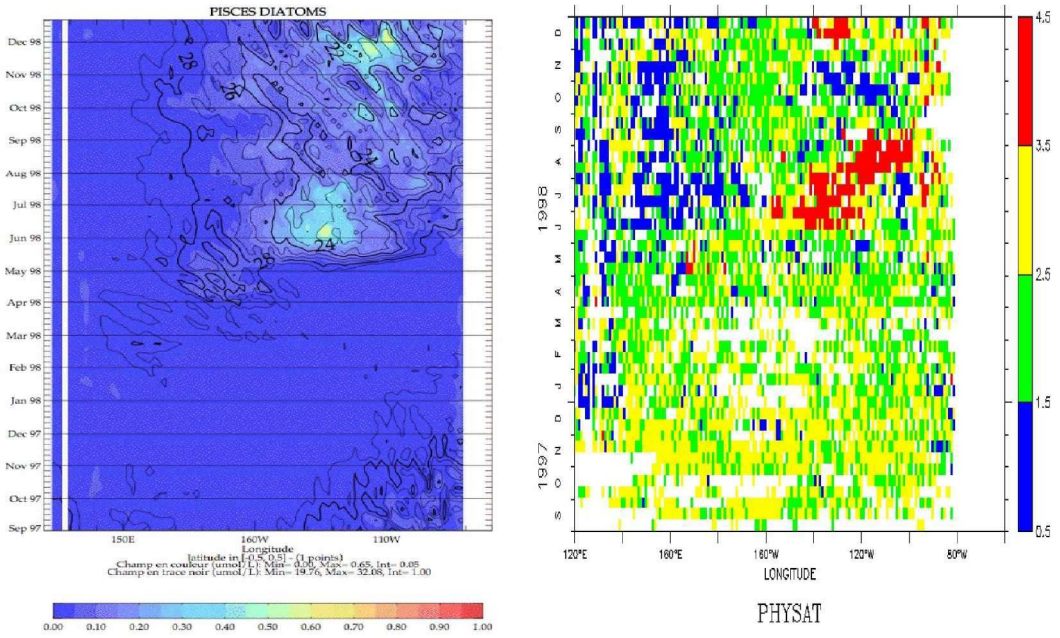


Figure 7.1.3 : *À droite, détection de la floraison de diatomées à l'équateur dans PHYSAT (groupes le plus fréquent) et à gauche, la fraction relative de la chlorophylle a des diatomées sur la concentration totale dans le modèle PISCES.*

7.1.2 La floraison printanière de l'Atlantique Nord

Une autre floraison notable de diatomées apparaît saisonnièrement dans l'Atlantique Nord au printemps. Tout comme à l'équateur, l'idée de comparer les observations PHYSAT avec les résultats de PISCES est venue tout naturellement. Ainsi, on obtient le résultat de la figure 7.1.4 qui représente le déroulement de la floraison de 1998 par séquences de 10 jours. La seule différence entre les deux séquences est un décalage temporel de 40 jours, la floraison de diatomées étant plus précoce dans le modèle. Au-delà de ce décalage temporel, et en dehors de la région du Gulf Stream, toujours surestimée en termes de diatomées dans PISCES, il est intéressant de noter que la forme, l'emplacement et le déroulement des deux séquences sont assez similaires. La floraison commence au milieu de l'Atlantique Nord, et se déplace vers le Nord pour finir au Sud Est du Groenland. Là encore, les paramètres de PISCES concernant les diatomées semblent être en relative bonne adéquation avec ce qui se produit au printemps dans cette région. Reste tout de même le décalage temporel, et la surestimation des diatomées dans la région ouest de l'Atlantique Nord en début de printemps, qui devraient pouvoir être améliorés en tenant compte des observations désormais disponibles.

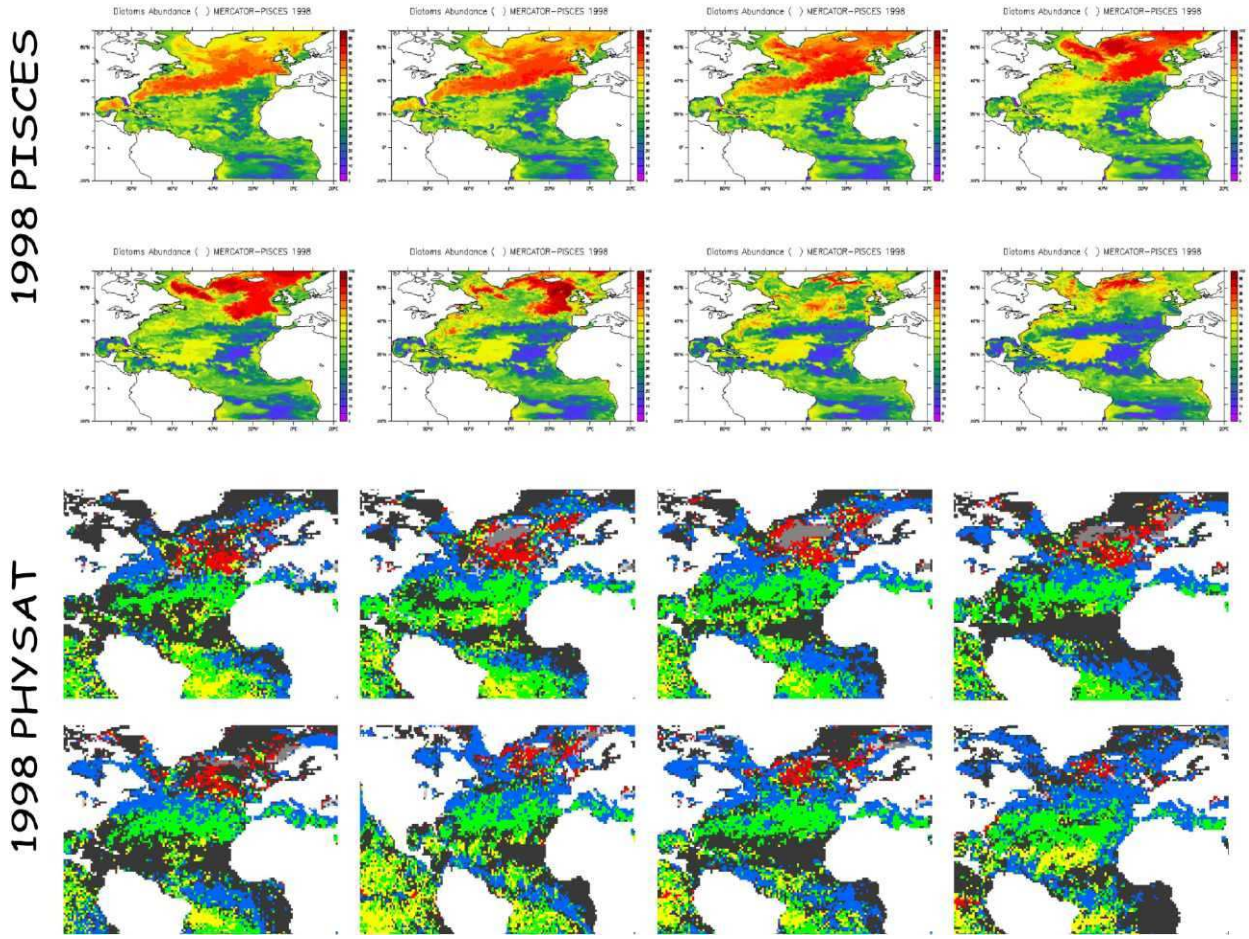


Figure 7.1.4 : *Déroulement de la floraison de diatomées dans l'Atlantique Nord au printemps 1998, observé par PHYSAT à partir du 20 Mai (en bas, en rouge : diatomées dominants), et modélisé par PISCES à partir du 10 avril (en haut, pourcentage de diatomées dans le modèle : l'équivalent PHYSAT correspond aux zones rouges (> 60%)).*

Les deux exemples précédents de comparaison « observation/modèle » montrent qu'il est aujourd'hui possible d'observer à grande échelle et de reproduire par modélisation des floraisons de

diatomées. Cela permet également de mettre en évidence des différences potentiellement utiles à l'amélioration des paramètres des modèles. Ceci est une étape essentielle à la compréhension et à l'évaluation de l'importance des changements climatiques sur la biologie marine à l'échelle du globe.

Dans les mois et années à venir, d'autres comparaisons des observations PHYSAT et des modèles pourront être réalisées globalement ou pour des évènements particuliers (North Atlantic Oscillation (NAO), moussons, floraisons saisonnières, upwelling côtiers etc.). Il sera tout particulièrement utile d'utiliser les données PHYSAT pour valider des modèles aux écosystèmes plus complexes, comme celui utilisé par Gregg et al. en 2003 ou encore le modèle « Dynamic Green Ocean Project » (Le Quéré et al, in press) qui comporte (ou va comporter) des représentations des groupes similaires à ceux détectés par PHYSAT.

7.2 Groupes de phytoplancton et paramètres marins

Comme nous l'avons déjà abordé précédemment, les groupes de phytoplancton ont des caractéristiques et des besoins spécifiques. Ainsi, chacun possède des besoins en éclairement, nutriments, température et en salinité particuliers et s'adapte plus ou moins à une région et à une saison donnée. Ces différentes limitations physiologiques sont inclues dans un modèle biogéochimique comme PISCES, mais sont très mal contraintes. Afin de mieux caractériser les besoins de chaque groupe, et donc d'améliorer les modèles, les observations satellites traitées à l'aide de la méthode PHYSAT peuvent être confrontées à des cartes de paramètres marins tels que des moyennes de température, salinité, nutriments ou encore de couche de mélange. Ainsi, les cartes du NODC disponibles par ftp ont pu être comparées à des climatologies mensuelles PHYSAT (voir les cartes en annexe). Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 7.2.1, et sont détaillés ci-après.

Température de surface (figure 7.2.1 en haut à gauche):

Les préférences en termes de température de surface sont assez nettes. Les *Prochlorococcus* et SLC apparaissent préférentiellement dans des eaux chaudes, de plus de 20° C. Cela est parfaitement cohérent avec les connaissances actuelles sur ces espèces, capables de se protéger d'un fort ensoleillement et appréciant de ce fait les eaux chaudes. Les diatomées et phaeocystis sont des espèces moins « frileuses », et sont détectées dans des eaux dont la température est inférieure à 10°C. Les haptophytes et bloom de coccolithophoridés semblent moins difficiles et sont détectés dans des eaux aux températures variées.

Profondeur de la couche de mélange (figure 7.2.1en haut à droite):

Les écarts types assez larges ne permettent pas de tirer des conclusions précises concernant les préférences des groupes en termes de profondeur de la couche de mélange. Sans doute faut-il attendre des comparaisons plus fines pour aller plus loin. On peut cependant observer que seuls les haptophytes sont détectés dans des eaux dont la couche de mélange est très profonde, ce qui est rarement le cas pour les autres groupes.

Lumière disponible pour la photosynthèse (figure 7.2.1 au milieu à gauche):

On retrouve pour ce paramètres les mêmes caractéristiques que pour la température, ce dernier paramètres étant lié, au premier ordre à l'éclairement. On note cependant une différence concernant les blooms de coccolithophoridés qui sont détectés dans des eaux plus chaudes que les diatomées et les phaeocystis mais semblent avoir besoin de moins de lumière disponible. Il y a là sans doute des recherches complémentaires à effectuer pour tenter de comprendre davantage les raisons qui génèrent des blooms de coccolithophoridés, toujours très localisés et souvent intenses.

Silice (figure 7.2.1au milieu à droite):

La silice est un élément connu pour être indispensable à la croissance de certains groupes qui

s'en servent pour construire leurs coquilles. C'est notamment le cas des diatomées et cela est en accord avec le résultat de la figure 5.1.5d. Les phaeocystis et les coccolithophoridés apparaissent également dans des eaux riches en silice, même si ce facteur est moins limitant pour elles, d'après nos connaissances actuelles. En revanche, les SLC et *Prochlorococcus* sont toujours détectées dans des eaux extrêmement pauvres en silice.

Salinité (figure 7.2.1 en bas à gauche):

La salinité est en partie liée à la température et cela se remarque ici car on retrouve des tendances identiques au niveau des répartitions des groupes. Les haptophytes et coccolithophoridés sont apparemment peu sensibles à ce paramètre, alors que les SLC et *Prochlorocccus* sont toujours dans des eaux dont la salinité est entre 34,5 et 36 et les diatomées et phaeocystis entre 33,5 et 34,5.

Phosphate (figure 7.2.1 en bas à droite):

On retrouve les mêmes préférences que pour la silice, à la différence près que cette fois ce sont les phaeocystis qui semblent être les plus demandeurs de phosphate. Les haptophytes ont visiblement moins besoin de cet élément, tout comme les SLC et *Prochlorococcus*.

Nitrate (figure 7.2.1-2 en haut):

Les préférences pour les nitrates sont sensiblement les mêmes que pour les autres nutritifs. Là aussi, les diatomées et surtout les phaeocystis sont toujours détectées dans des eaux riches. Notons également que les haptophytes se rapprochent des groupes SLC et *Prochlorococcus*, comme pour tous les nutriments.

Fer (figure 7.2.1-2 en bas):

Les données de fer du NODC ne sont disponibles que pour quelques points du globe, et ne sont pas fournies avec interpolation sur l'ensemble des océans. Il n'a de ce fait pas été possible de trouver des points colocalisés avec les observations PHYSAT pour les blooms de coccolithophoridés et le groupe phaeocystis. Quelques mesures ont tout de même pu être trouvées dans la région Atlantique Nord lors de la floraison de printemps-été de diatomées et plus globalement pour les SLC, *Prochlorococcus* et haptophytes. Le résultat obtenu est intéressant car il montre assez nettement la tendance des diatomées à former des floraisons dans les régions riches en fer. Les trois autres groupes correspondent à des eaux assez similaires au niveau de la concentration en fer, mais là aussi les écarts type sont assez importants et cela devra être affiné par la suite.

Ce travail représente une première approche, réalisée dans le cadre de la fin de thèse, et il sera important par la suite de reprendre chaque donnée NODC, ou autre (BATS, GeP&CO, Dyfamed etc…) et de comparer directement avec le résultat PHYSAT correspondant.

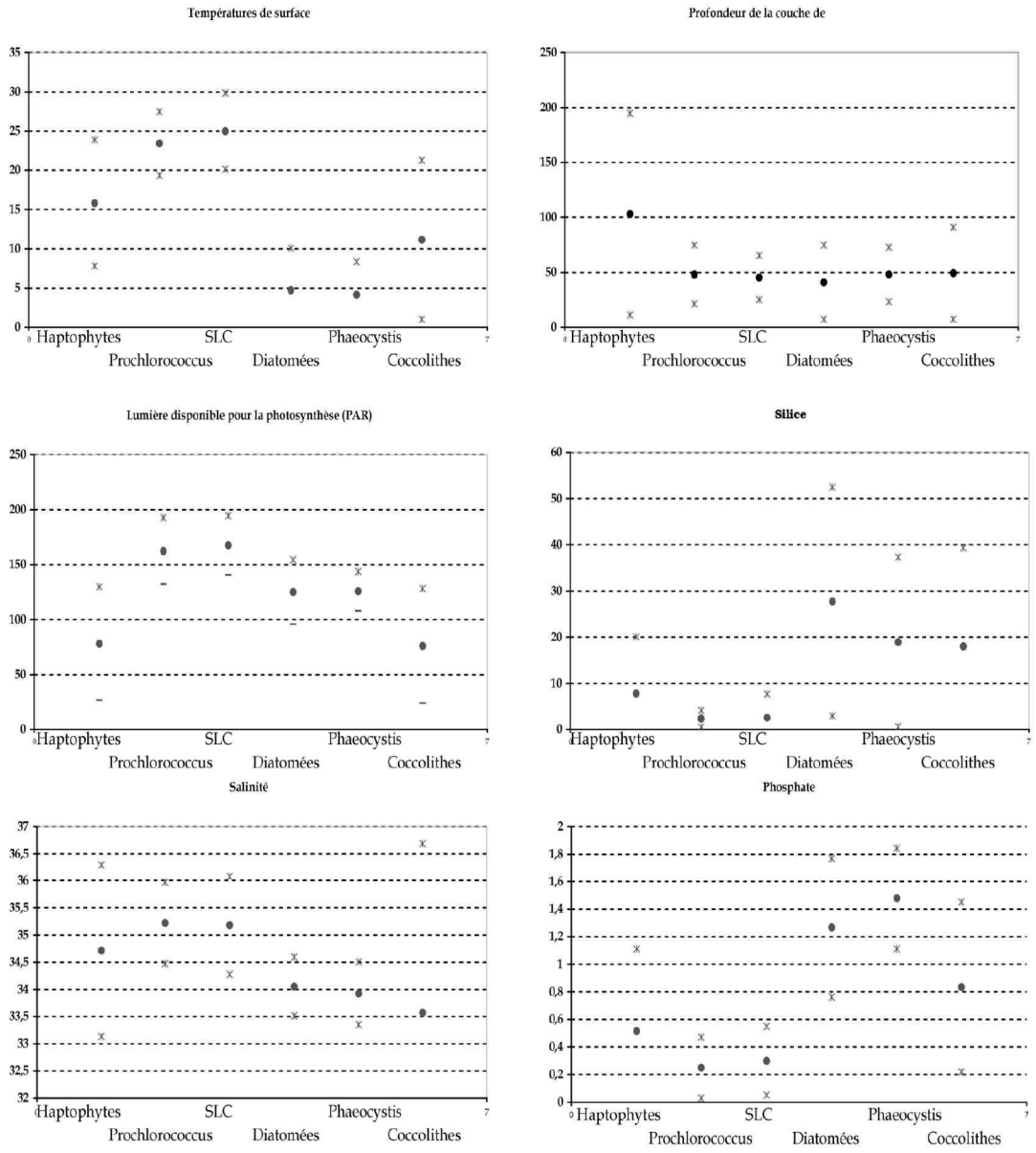


Figure 7.2.1-1: *Moyennes des paramètres marins issus des climatologies du NODC pour chaque groupe PHYSAT (points noirs, d'après une climatologie PHYSAT sur la période 1998-2003) et écarts types associés (croix grises). De bas en haut et de gauche à droite : Température de surface, profondeur de la couche de mélange, lumière disponible pour la photosynthèse, silice, salinité et phosphate.*

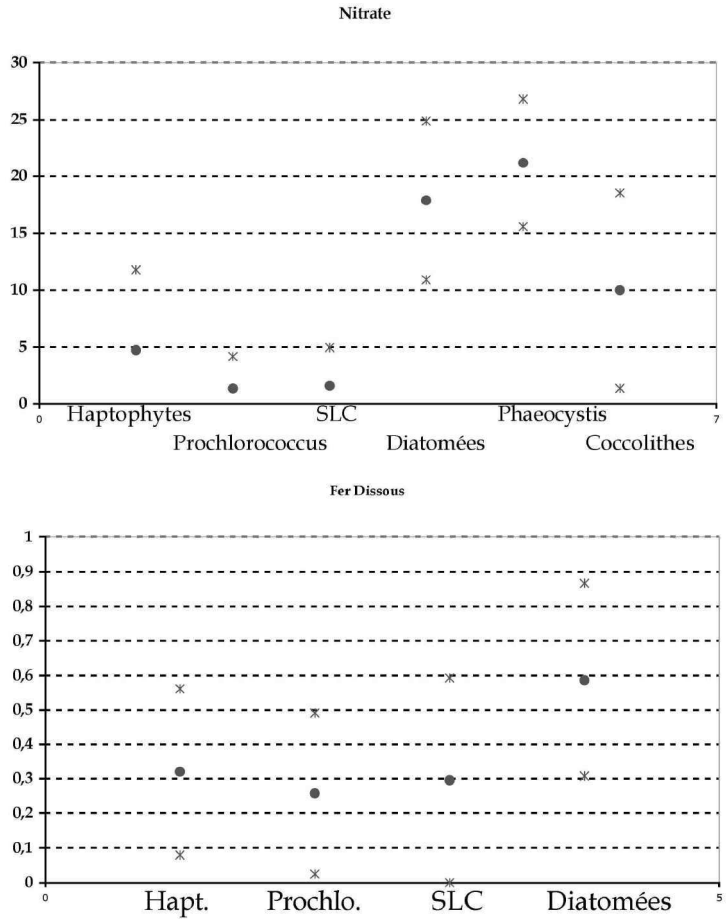


Figure 7.2.1-2: *Moyennes des paramètres marins issus des climatologies du NODC pour chaque groupe PHYSAT (points noirs, d'après une climatologie PHYSAT sur la période 1998-2003) et écarts types (croix grises). De bas en haut: nitrate et fer dissous. Notons que pour le fer dissous les deux groupes phaeocystis et blooms de coccolithophoridés n'apparaissent pas en raison du manque de mesures de ce paramètre aux lieux de floraison de ces deux groupes.*

RESUME DU CHAPITRE 7

La répartition des différents groupes de phytoplancton est liée à leurs préférences en terme de conditions environnementales, comme la température, la disponibilité en nutriments ou encore l'éclairement. Les modèles de biogéochimie marine récents tentent de prendre en compte les différents groupes de phytoplancton, afin de mieux évaluer et étudier les interactions de chaque groupe avec son environnement. Une des difficultés de ce travail concerne le manque de données globales disponibles pour valider les sorties des modèles.

Ainsi, une application essentielle de PHYSAT est son utilisation conjointe avec les modèles. Les premiers résultats présentés dans ce chapitre portent sur la comparaison des observations PHYSAT avec les sorties du modèle biogéochimique PISCES pour le groupe « diatomées ».

Deux événements ont été étudiés : une floraison inhabituelle de ce groupe à l'équateur lors de La Niña et la floraison de printemps dans l'Atlantique Nord. Les résultats obtenus sont intéressants, autant du point de vue des cohérences observées entre les deux types de données que par leurs différences. Ainsi, la floraison équatorialle est remarquablement reproduite par PISCES, en termes de localisation spatiale et temporelle. La floraison de l'Atlantique Nord en revanche diffère quelque peu dans le modèle par rapport aux observations PHYSAT : d'un point de vue temporel tout d'abord, la floraison étant plus précoce de 40 jours dans le modèle et également par la modélisation de diatomées dans l'ouest de l'Atlantique, dans la région du Gulf Stream, ce qui n'est pas observé par PHYSAT. De telles comparaisons doivent donc nous permettre de mieux évaluer les sorties des modèles et de les améliorer si besoin.

Une autre utilisation possible de PHYSAT, en vue d'améliorer les modèles, concerne la connaissance des conditions environnementales favorables à chaque groupe. Pour cela, il est possible de comparer les cartes PHYSAT à des cartes ou à des mesures locales de paramètres. Les premiers tests présentés dans ce chapitre ont été réalisés à partir des climatologies du NODC et mettent déjà en relief les préférences de chaque groupe.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Contexte et objectifs

Le gaz carbonique rejeté dans l'atmosphère du fait de l'activité humaine est la cause principale du changement climatique en cours. Étudier et comprendre les différentes composantes qui participent à la régulation du carbone est donc un enjeu majeur de la recherche actuelle. On sait aujourd'hui que l'océan joue un rôle essentiel dans la régulation de la concentration en carbone de l'atmosphère (Archer et al., 1997 ; Cox et al., 2000). Ainsi, dans les premières dizaines de mètres de l'océan, éclairés par le soleil, le phytoplancton transforme, via la photosynthèse, une partie de ce carbone en carbone organique dont une partie est exportée vers le fond sous forme de débris. L'ensemble des processus qui mènent à l'enfouissement d'une partie du carbone atmosphérique dans les profondeurs de l'océan est désigné par l'appellation « pompe biologique ».

Comme pour la végétation terrestre, il existe en mer de nombreux groupes de phytoplancton qui diffèrent par leur taille, leurs proportions de pigments ou leurs besoins en éléments nutritifs (N,P,Fe,Si essentiellement). Ainsi, certains groupes vont être très efficaces pour exporter du carbone, comme les diatomées et les coccolithes dont les lourds squelettes respectivement silicieux et calcaires accélèrent leur chute après leur mort. D'autres groupes en revanche ne font que recycler le carbone dans la couche de surface, comme les petites cellules des *Prochlorococcus.*. Les différents groupes de phytoplancton vont donc influencer différemment la pompe biologique marine.

Pour simuler correctement le cycle du carbone dans l'océan dans les modèles numériques du climat, il est donc essentiel de connaître la répartition à l'échelle globale des différents groupes de phytoplancton existants. La seule information globale disponible au début de ma thèse concernant le phytoplancton était l'estimation de la concentration en chlorophylle *a* (Chl *a*) obtenue grâce aux capteurs spatiaux dits de « couleur de l'océan ». Cette concentration fournit une bonne estimation de la biomasse car la chlorophylle *a* est le principal pigment chlorophyllien présent dans presque tous les groupes, mais ne permet pas, de ce fait, de les différencier. Plusieurs études avaient été réalisées pour tenter d'aller plus loin , mais aucune n'a abouti a un algorithme permettant d'identifier automatiquement la composition des écosystèmes à partir d'observations par satellites.

En effet, la forme spectrale du signal mesuré par un capteur de « couleur de l'océan » dépend au premier ordre de la Chl *a* , et seuls les coccolithophoridés, dont la coquille calcaire extrêmement réfléchissante est responsable d'une anomalie spectrale très particulière, avaient pu être observés par satellite (Holligan et al., 1983 ; Brown et al., 1994). Toutes les tentatives pour différencier les groupes depuis l'espace concluaient soit à l'impossibilité d'une telle identification en raison de la complexité des interactions engagées, soit restaient limitées à quelques groupes et à quelques régions (Garver et al., 1994, Bricaud et al. 1988 et 1998, Stramski et al., 2001). Un sujet de thèse portant sur l'identification des groupes de phytoplancton par satellite apparaissait donc, en 2002, comme extrêmement ambitieux, voire risqué. C'est dans ce cadre stimulant que j'ai effectué ce travail.

L'objectif principal de ma thèse était donc d'étudier la possibilité d'identifier les signatures spectrales des groupes de phytoplancton, au-delà de la quantification de la concentration en chlorophylle *a*.

Données et méthodes

Pour atteindre cet objectif, je disposais d'une base de données d'inventaires de pigments

exceptionnelle, de par sa richesse et sa couverture, réalisée lors des campagnes GeP&CO entre Le Havre et Nouméa (Dandonneau et al., 2004), et des données du capteur SeaWiFS sur la même période. Je pouvais donc envisager la possibilité d'identifier des groupes dominants en utilisant une approche empirique basée sur l'utilisation d'inventaires de pigments mesurés in-situ et des observations satellites coïncidentes. En effet, les inventaires réalisés lors des trajets GeP&CO comportaient certains pigments dits biomarqueurs, c'est-à-dire caractéristiques d'un groupe de phytoplancton. Un travail de recherche bibliographique a donc permis d'établir des seuils pour 6 pigments biomarqueurs, nous permettant ainsi d'identifier des groupes dominants pour certains échantillons d'eau des campagnes GeP&CO (Mackey et al., 1996) .

Afin d'identifier une éventuelle anomalie systématique de la forme spectrale du signal satellitaire en fonction du groupe de phytoplancton dominant, j'ai extrait les observations SeaWiFS coincidentes avec les mesures GeP&CO, pour lesquelles un groupe dominant a été mis en évidence. En raison de la couverture nuageuse et des critères de qualité stricts appliqués aux observations SeaWiFS (atmosphère claire et eaux non côtières), seulement 41 cas de coïncidence ont été retenus. Une étape importante de mon travail a été de réussir à éliminer l'influence prépondérante de la chlorophylle *a* sur la forme du spectre des luminances marines normalisées (nLw) mesurées à 412, 443, 490, 510 et 555 nm. Pour cela, j'ai établi à partir d'un grand nombre de données SeaWiFS une table du spectre moyen des nLw SeaWiFS pour de petites plages de Chl *a*, ce qui m'a permis de normaliser les spectres de nLw SeaWiFS individuels en les divisant par le spectre moyen associé à la valeur de la Chl *a* SeaWiFS. Cette définition de ce spectre de luminances marines normalisées spécifiques, nLw*, qui quantifie l'écart du spectre mesuré à son spectre moyen, s'est avérée essentielle pour la réussite de ma thèse.

Principaux résultats : La méthode PHYSAT

En étudiant les spectres spécifiques (nLw*) associés à chacun des 4 groupes identifiés par les pigments, j'ai abouti au résultat principal de cette thèse : les caractéristiques de l'écosystème marin de surface modifient la forme et l'amplitude du spectres de nLw*. J'ai ainsi pu définir les caractéristiques des spectres de nLw* pour chacun des 4 groupes dominants échantillonnés par les mesures GeP&CO. Ainsi, les haptophytes sont toujours associés à des nLw* inférieures à 1, contrairement aux diatomées dont les nLw* sont toujours très supérieures à 1. Les *Prochlorococcus* et les SLC (Synechoccocus-like Cyanobacteria) ont des spectres plus proches de 1, un peu en dessous pour l'un et au-dessus pour l'autre. La méthode PHYSAT que j'ai développée permet donc d'analyser de façon automatique tout pixel SeaWiFS de ciel clair . Une fois les critères de qualité appliqués, le spectre des nLw* est tout d'abord calculé à partir de celui des nLw et de la Chl *a* SeaWiFS, puis associé à l'un des quatre groupes de phytoplancton grâce aux critères que j'ai défini ou à la catégorie « groupe inconnu ou pas de groupe dominant » lorsqu' aucun des critères n'est vérifié.

Une des grandes limitations de cette méthode vient du fait que certains groupes de phytoplancton importants vis-à-vis du cycle du carbone n'ont pas été échantillonnés lors des campagnes GeP&CO. C'est en particulier le cas pour les floraisons de coccolithophoridés, de phaeocystis et les *Trichodesmium*. Pour définir les spectres de nLw* caractéristiques de ces trois groupes, j'ai étudié les valeurs de nLw* dans des régions où ils sont fréquemment rencontrés, c'est-à-dire au sud de l'Islande pour les coccolithophoridés, dans l'Océan Austral pour les Phaeocystis et autour de la Nouvelle-Calédonie pour les *Trichodesmiums*, et où la méthode PHYSAT n'identifie aucun des quatre groupes initiaux. Ces trois groupes supplémentaires se sont ainsi vus associer une forme et une amplitude de spectre de nLw*, complétant ainsi la méthode PHYSAT. Un travail de validation de ces trois groupes est encore en cours, mais les premiers résultats sont en accord avec les

connaissances actuelles.

J'ai ensuite tout naturellement appliqué PHYSAT à l'ensemble des cartes globales SeaWIFS journalières disponibles entre octobre 1997 et décembre 2004 (l'année 2005 n'a pas été traitée dans le cadre de cette thèse) afin d'étudier la répartition géographique des principaux groupes de phytoplancton en fonction de la saison. Pour ce faire, j'ai réalisé des synthèses temporelles sur des périodes choisies (10 jours, 1 mois etc…), en conservant pour chaque pixel le groupe le plus fréquent sur les cartes journalières de la période. J'ai aussi réalisé des changements de résolution spatiale pour limiter le volume de données informatiques à stocker (passage de 9 km à ¼°) et pour lisser les cartes des synthèses temporelles (passage de ¼° à 1°). La seconde grande étape de ma thèse a donc été d'analyser ces résultats globaux afin de présenter un « atlas » descriptif des groupes de phytoplancton dans l'océan mondial (voir chapitre 5).

Applications et perspectives

On dispose ainsi, et pour la première fois, de cartes globales de groupes de phytoplancton dominants. La méthode PHYSAT ouvre, en plus du travail de validation qui sera encore long, de nombreuses voies de recherche en nous donnant accès à une information qualitative sur la répartition des groupes dominants à l'échelle du globe. Ce résultat amène de nombreuses questions et débats, notamment sur les raisons du signal observé et sur les liens directs ou non avec la présence d'un groupe de phytoplancton dominant. En effet, la complexité des interactions entre la lumière et les particules en présence dans l'eau au moment de la mesure (cellules de phytoplancton, mais aussi déchets organiques associés, matières dissoutes…) ne permet pas d'apporter d'explications simples aux variations des spectres de nLw* observées (Bricaud et al., 1988 et 2004, Loisel et al., 2001, Siegel et al., 2001, Stramski et al., 2001 et 2004). Toutefois, un premier test de sensibilité a montré que PHYSAT est peu sensible aux variations de l'absorption par la matière dissoute, ce qui est encourageant car cela limite les erreurs de labellisation (voir annexe 3). En revanche, PHYSAT s'est avéré être très sensible aux variations du coefficient de rétro diffusion, ce qui tend à montrer que la taille des cellules de phytoplancton des différents groupes expliquerait en partie les relations obtenues. Il faudra cependant encore de nombreuses études, soit théoriques à partir d'un code de transfert radiatif du type Hydrolight, soit expérimentales à partir de mesures optiques combinées à des analyses pigmentaires effectuées sur des écosystèmes variés, avant de vraiment comprendre les raisons des variations des spectres de nLw* avec la présence de groupes dominants.

Dans le cadre de ma thèse, j'ai également amorcé quelques études qui devront pour la plupart être approfondies par la suite, en fonction des données disponibles et des objectifs scientifiques de chacun.

Ainsi, différents tests concernant la sensibilité de PHYSAT à la résolution spatiale ou temporelle ont été réalisés (voir Annexes 3). Tous ont donné des résultats très encourageants et montrent que PHYSAT peut être utilisé pour de nombreuses applications en adaptant la résolution aux besoins. Il est ainsi possible d'envisager des études allant de l'échelle locale en appliquant PHYSAT à des mesures SeaWiFS à une résolution de 1km jusqu'à l'échelle globale en 1° de résolution, en passant par l'étude de provinces océaniques particulières. J'ai ainsi mis en évidence des événements particuliers, comme une intense et inhabituelle floraison de diatomées à l'équateur en 1998 pendant La Niña ; Cet événement avait été observé ponctuellement par des mesures en mer (Chavez et al., 1999 ; Kobayashi et al., 2002) mais son extension et sa durée étaient jusque là inconnues. Un autre résultat intéressant de cette étude est que sur la période 1997-2004, les haptophytes ont tendance à être de plus en plus présents au détriment du picoplancton (*Prochlorococcus* et/ou SLC). Ce genre de tendance doit toutefois être confirmée sur une période plus longue, lorsque plus de données seront disponibles.

Une autre application importante de mes résultats est leur utilisation conjointe avec des modèles. En effet, la répartition des groupes de phytoplancton est significativement corrélée aux conditions environnementales, comme la température, la présence de nutriments, ou la profondeur de la couche de mélange. Les modèles de biogéochimie marine récents essayent de prendre en compte ces paramètres pour reproduire la répartition des principaux groupes. Il est donc intéressant de comparer les observations PHYSAT avec les sorties de modèles. Quelques exemples basés sur le modèle PISCES ont été présentés dans ce manuscrit, comme la bonne représentation de la floraison de diatomées dans le Pacifique équatorial en 1998, mais il est évident que beaucoup reste à faire dans ce domaine. Il est également possible d'envisager de mieux caractériser les conditions océaniques favorables à chaque groupe en utilisant, comme présenté dans ce manuscrit, les climatologies NODC ou d'autres données in-situ ponctuelles.

PHYSAT peut donc être envisagé comme un élément utile à l'amélioration et à la validation des modèles de biogéochimie marine. C'est d'ailleurs dans ce sens que je pense poursuivre mes travaux après ma thèse, en comparant les observations PHYSAT aux sorties du modèle « Dynamic Green Ocean Model » (Le Quéré et al., sous presse). Ce dernier prend déjà en compte plusieurs groupes détectés par PHYSAT et cela ouvre des perspectives très riches.

On peut aussi envisager d'étudier les observations PHYSAT et les simulations des modèles pour étudier l'effet de certaines variations climatiques ou du réchauffement en cours sur la répartition des groupes de phytoplancton.

Au cours de ma thèse, j'ai pu également montrer que PHYSAT permet d'expliquer une part de la dispersion des mesures en mer autour des algorithmes classiques de quantification de la chlorophylle *a*. PHYSAT a pour cela été appliqué à la base de données NOMAD, classiquement utilisée pour améliorer les algorithmes SeaWIFS. Il a alors été clairement mis en évidence que les points NOMAD labellisés haptophytes ou SLC correspondaient tous à des valeurs de chlorophylle *a* sur estimées par l'algorithme classique utilisé pour traiter les donner SeaWiFS (OC4-V4), alors que les points « diatomées » étaient associés à des valeurs sous estimées par OC4-V4. Un nouvel algorithme dépendant du groupe dominant établi, par des fits de type OC4-V4, a été créé (OC4-SD). OC4-SD consiste à rechercher les groupes dominants avec PHYSAT et à appliquer l'algorithme correspondant au groupe détecté. Si aucun groupe n'est détecté ou si c'est celui des *Prochlorococcus*, c'est la valeur d'OC4-V4 qui est conservée. Les résultats ainsi obtenus sont en accord avec des études antérieures et un jeu de données de validation indépendant nous a permis de valider le nouvel algorithme OC4-SD et de montrer les améliorations qu'il permet.

Ce nouvel algorithme bio-optique peut être appliqué à tous les instruments disposant des mesures dans les longueurs d'onde équivalentes à celles de SeaWIFS. Si cela est par la suite appliqué avec succès aux plus anciens capteurs (CZCS, POLDER) il sera potentiellement intéressant d'étudier les variations à long terme de la chlorophylle *a*, et de participer ainsi à une meilleure compréhension des tendances générales observées (Gregg et al., 2002 ; Antoine et al., 2005). Peut-être pourrait-on alors expliquer en partie ces tendances en montrant que certaines sont, pourquoi pas, associées à des changements de groupe...

BIBLIOGRAPHIE

1. Ahn Y.H., Propriétés optiques des particules biologiques et minérales présentes dans l'océan ; Aplication : Inversion de la réflectance, Thèse, 1990.

2. Aiken J., N. Rees ; S. Hooker et al., The Atlantic Meridional Transect : overview and synthesis of data, *Progress in Oceanography* 45, 2000

3. Antoine D., A. Morel, H. Gordon, V.F. Banzon and R.H. Evans, Bridging ocean color observations of the 1980's and 2000's in search of long-term trends. *Journal of Geophysical Research,* Vol. 110, 2005.

4. Archer D., H. Kheshgi, and E. Maier-Reimer, Multiple timescales for the neutralization of fossil fuel CO2, *Geophysical Research Letters*, 24, 405-408, 1997.

5. Arrigo K.R. et al. Phytoplankton community structure and the drawdown of nutrients and CO2 in the Southern Ocean. *Science, Vol. 283,* 1999.

6. Aumont O., E. Maier-Reimer, S. Blain and P. Monfray, An ecosystem model of the global ocean including Fe, Si, P colimitations, *Glob. Biogeoch. Cycles, VOL17, N°2*, 2003.

7. Aumont, O. PISCES biogeochemical model, *document descriptif et technique*, 2005.

8. Balch W.M., K.A. Kilpatrick, C.C. Trees, The 1991 coccolithophore blomm in the central North Atlantic. 1. Optical properties and factors affecting their distribution, *Limnol. Oceanogr, 41(8),* 1996.

9. Barlow, R. G., J. Aiken, P. M. Holligan, D. G. Cummings, S. Maritorena, S., and S. Hooker, Phytoplankton pigment and absorption characteristics along meridional transects in the Atlantic Ocean*, Deep-Sea Res. I, 47, 637-660*, 2002.

10. Belviso S., C. Moulin, L. Bopp and J. Stefels, Assessment of a global climatology of oceanic dimethylsulfide 5DMS) concentrations based on SeaWiFS imagery (1998-2001), Can. J. Fish. Aquat. Sci. 61 : 804-816, 2004.

11. Bender M.L. and M.J. McPhaden, Anomalous nutrient distribution in the equatorial Pacific in April 1988 : evidence for rapid biological uptake ?. *Deep Sea Research, 37, 1075-1084,* 1990.

12. Blanchot J. and Rodier M., Picophytoplankton abundance and biomass in the western tropical Pacific Ocean during the 1992 El Nino year : results from flow cytometry. *Deep Sea Research I, 43, 877-895*, 1996.

13. Bolin, B. and E. Eriksson, Changes in the carbon dioxide content of the atmosphere and sea due to fossil fuel combustion, Rossby Memorial Volume, Rockfeller Inst ., NY, 130-142, 1959.

14. Bopp L., P. Monfray, O. Aumont, J.L. Dufresnes ; H. Le Treut, G. Madec, L. Terray and J.

Orr, Potentiel impatc of climate change on marine export production. Global biogeochemical Cycles, Vol. 15, N°1, 81-99, 2001a.

15. Bopp L., Aumont O., Alvain S., Cadule P., Gehlen M., How diatoms respond to climate change ? A global model study, *Geophys. Res. Letters*, In press.

16. Bosc E., A. Bricaud and D. Antoine, Seasonal and interannual variability in algal biomass and primary production in the Mediterranean Sea, as derived from four years of SeaWiFS observations, *Global Biogeochemical Cycles*, 18, GB1005, 2004.

17. Bouman, H. A., Platt, T., Sathyendranath, S., Li, W. K. W., Stuart, V., Fuentes-Yaco, C., Maass, H., Horne, E. P. W., Ulloa, O., Lutz, V., and Kyewalyanga. Temperature as indicator of optical properties and community structure of marine phytoplankton: implications for remote sensing. Mar. Ecol. Prog. Ser. 258: 19-30, 2003.

18. Bricaud A., A. Morel and L. prieur, Optical efficiency factors of some phytoplankters, *Limnol. Oceanogr.,* 28(5), 1983.

19. Bricaud A. and A. Morel, Light attenuation and scattering by phytoplanktonic cells : a theoretical modeling*, Appl. Opt., vol 25*, 571, 1986.

20. Bricaud A., A-L. Bédhomme and A. Morel, Optical properties of diverse phytoplanktonic species : experimental results and theoretical interpretation*, J. of. Plankton, Res., Vol. 10, N° 5*, 1988.

21. Bricaud, A., M. Babin, A. Morel, and H. Claustre, Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization, *J. Geophys. Res*., 100, 13321-13332, 1995.

22. Bricaud A., Morel A., Babin M., Allali K., and Claustre H., Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentrations in oceanic ‘case 1) waters : analysis and implications for bio-optical models*, J. Geophys. Res*., 1998.

23. Bricaud A., E. Bosc and D. Antoine, Algal biomass and sea surface temperature in the Mediterranean basin intercomparaison of data from various satellite sensors, and implications for primary production estimates*. RSE 81*, 2002.

24. Bricaud A., Claustre H., Ras J. and Oubdelkhier K, Natural variability of phytoplanktonic absorption in oceanic waters : influence of the size structure of algal populations, *J. Geophys. Res.,* Vol. 109, 2004.

25. Broecker, W.S., and T.Takahashi, Neutralisation of fossil ful CO2 by marine calcium carbonate, The fate of fossil fuel CO2 in the oceans, Plenum Press, 213-241, 1977.

26. Brown, C. W. and J. A. Yoder, Coccolithophorid blooms in the global ocean. *J. Geophys. Res., 99, 7467-7482*, 1994.

27. Campbell L. and Vaulot D., Photosynthetic picoplankton community structure in the subtropical North Pacific Ocean near Hawaï (station ALOHA), *Deep Sea Research, 40, 2043-*

2060, 1993.

28. Capone D.G., J.A. burns, J.P. Montoya, A. Subramaniam ; C. Mahaffey, T. Gunderson, A.F. Michaels ans E.J. Carpenter, Nitrogen fixation by *Trichodesmium* spp : an important source of new nitrogen to the tropical and subtropical North Atlantic ocean. *Global Biogeochemical cycles*, VOL. 19, 2005.

29. Chavez F.P., P.G.Strutton, G.E. Friedrich, R.A. Feely, G.C. Feldman, D.G. Foley and M.J. McPhaden, Biological and chemical response of the equatorial Pcific ocean to the 1997-98 El Nino, *Science, Vol. 286*, 1999.

30. Chisholm, S.W. and F.M.M. Morel, (Eds.), What controls phytoplankton production in nutrient-rich areas of the open sea? Limnol. Oceanogr. (Special Issue), 36(8), 1991.

31. Claustre, H. Phytoplankton pigment signatures of the trophic status in various oceanic regimes. Limnology and Oceanography, 39, 1207-1211, 1994.

32. Claustre H., Babin M., Merien D., Ras J. Prieur L ans Dallot S., Toward a taxon –specific parameterization of bio-optical models of primary production : a case study in the North Atlantic, *J. of Geophys. Res*., Vol 110, 2005

33. Cota G.F., W.G. Harrison, T. Platt, S. Sathyendranath and V. Stuart, Bio-optical properties of the Labrador Sea, *JGR, vol. 108, N°C7*,2003.

34. Cox, P.M., Richard A. Betts, Chris D. Jones, Steven A. Spall, Ian J. Totterdell et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model, Nature, 408, 184-187, 2000.

35. Dandonneau Y., P.-Y. Deschamps, J.-M. Nicolas, H. Loisel, J. Blanchot, Y. Montel, F. Thieuleux, and G. Bécu, Seasonal and interannual variability of ocean color and composition of phytoplankton communities in the North Atlantic, Equatorial Pacific and South Pacific, Deep-Sea Res. II, 51,303-318, 2004.

36. Dandonneau Y., Montel Y., Blanchot J., Giraudeau J. and Neveux J., Variability in phytoplankton pigments, picoplankton, and coccolithophores along a 3-year long survey from the North Atlantic to the Southwestern tropical Pacific : the GeP&CO experiment ; *submitted,* 2005.

37. De Young B., M. Heath, F. Werner, F. Chai, B. Megrey and P. Monfray, Challenges of modeling ocean basin ecosystems. Science, VOL 304, June 2004.

38. Dierssen H.M. and R.C. Smith, Bio-optical properties and remote sensing ocean color algorithms for Antarctic Peninsula waters, *JGR, VOL105, N°C11, 2000*.

39 . DiTullio G.R. and W.O. Smith Jr, Relationship between dimethylsulfide and phytoplankton pigment concentrations in the Ross Sea, Antarctica. *DSR I, 42 :873-892*, 1995.

40. DiTullio G.R. et al., Rapid and early export of Phaeocystis antarctica blooms in the Ross Sea, Antarctica. *Nature, Vol. 404*, 2000.

41. D'Ortenzio F., S. Marullo, M. Ragni, M.R. d'Alcala and R. Santoleri, Validation of empirical SeaWiFS algoritms for chlorophyll-a retrieval in the Mediterranean sea. A case study for oligotrophic seas. *RSE 5694*, 2002.

42. DuRand M.D., Olson R.J. and Chisholm S.W., Phytoplankton population dynamics at the Bermuda Atlantic Time-series station in the Sargasso Sea. *Deep Sea Research II, 48, 1983-2003,* 2001.

43. Everitt, D.A et al. Phytoplankton community compositions in the western equatoril Pacific determined from chlorophyll and carotenoid pigment distributions. *Deep Sea Research 37, 975-997*, 1990.

44. Falkowski, PG, R.T. Barber and V. Smetacek, Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. Science 281: 200-206, 1998.

45. Friedlingstein, P., J.L. Dufresne, P.M. Cox, and P. Rayner, How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle ? Tellus B, 55(2), 692-700, 2001.

46. Garver S.A., D.A. Siegel and B.G. Mitchell, Variability in near-surface particulate absorption spectra : What can a satellite ocean color imager see ?, *Limnol. Oceanogr., 39(6), 1349-1367,* 1994.

47. Gibb S.W. et al., Surface phytoplankton pigment distributions in the Atlantic Ocean : an assessment of basin scale variability between 50°N and 50°S, *Progress in Oceanography 45, 339-368,* 2000.

48. Goericke R. and D. Repeta, The main Prochlorophytes « *Prochlorococcus* » contributes significantly to phytoplankton biomass and primary production in the Sargasso Sea. Deep Sea Research 40 : 2283-2294, 1993.

49. Goffart A., G.Catalano and J.H.Hecq, Factors controlling the distribution of diatoms and Phaeocystis in the Ross Sea, *J. of Mar. Sys. 27, 161-175*, 2000.

50. Gordon H. R., O. B. Brown, R. H. Evans et al., A semianalytic radiance model of ocean coloc, *JGR, vol. 93,N°D9,* 1988.

51. Gordon H. R., Atmospheric correction of ocean color imagery in the Earth Observing System era. *JGR, vol.102, N°D14,* 1997.

52. Gordon H. R., T. Du and T. Zhang, Remote sensing of ocean color and aerosol properties : resolving the issue of aerosol absorption. *Applied Optics, Vol. 36 N°33*, 1997.

53. Gordon H. R., O.B. Brown, R. H. Evans, J. W. Brown, R.C. Smith, K.S.Baker and D. K. Clark, A semianalytic Radiance Model of Ocean Color, *JGR Vol.93 N° D9*, 1988.

54. Gordon H.R., G.C. Boynton, W. M. Balch, S.B. Groom, D.S. Harbour and T.J. Smyth, Retrieval of Coccolithophore Calcite Concentration from SeaWiFS Imagery, *GRL Vol. 28 N°8,* 2001.

55. Gregg W.W., A coupled ocean general circulation, biogeochemical and radiative model of the global oceans : seasonal distributions of ocean chlorophyll and nutrients, *Nasa/TM-2000-209965*, 2000.

56. Gregg W.W., M.E. Conkright, Decadal changes in global ocean chlorophyll*, GRL, Vol.29, N°16,* 2002

57. Gregg W.W., P. Ginoux, P.S. Schopf and N.W. Casey, Phytoplankton and iron : validation of a global three-dimensional ocean biogeochemical model, *Deep-Sea Reserch II, 50, 3143-3169*, 2003

58. Gregg W.W., N.W. Casey and C.R. McClain, Recent trends in global ocean chlorophyll, *GRL, Vol.32,* 2005.

59. Holligan P.M., M. Viollier, D.S. Harbour, P. Camus and M. Champagne-Philippe, Satellite and ship studies of coccolithophore production along a continental shelf edge*, Nature Vol. 304 N°5924,* 1983.

60. Iglesias-Rodriguez et al., Representing key phytoplankton functional groups in ocean cycle models : Coccolithophorids. *Global Giogeochemical Cycles*, 16, 2000.

61. Irigoien X., J. Huisman and R.P. Harris, Global biodiversity patterns of marine phytoplankton and zooplankton, *Nature, VOL 429*, 2004.

62. IPCC, Changements climatiques 2001 : Rapport de synthèse, résumé à l'intention des décideurs, *Troisième rapport d'évaluation du GIEC*, 2001.

63. Jeffrey, S. W., R. F. C. Mantoura and S. W. Wright, Phytoplankton pigments in oceanography, UNESCO, 661 pp., 1997.

64. Kaczamarska I. and G.A. Fryxell, Micro-phytoplankton of the equatorial Pacific : 140°W meridional transect during the 1992 El Nino, *DSR II, Vol42, Issues 2-3,* 1995.

65. Kobayashi F. and K. Takahashi, Distribution along the equatorial transect in the western and central Pacific during the 1999 La Nina conditions*. DSR II, 49 :2810-2821*, 2002.

66. Lampert, L., Dynamique saisonnière et variabilité pigmentaire des populations phytoplanctoniques dans l'Atlantique Nord (golfe de Gascogne*), Ph.D. Thesis, Univ. Bretagne Occidentale*, 294 pp., 2001.

67. Lee Z., Carder K.L., Hawes S.K., Steward R.G., Peacock T.G. and Davis C.O., Method to derive ocean absorption coefficients from remote sensing reflectance, *Appl. Opt*. 35: 453-462, 1996.

68. Le Quéré C., O. Aumont, P. Monfray and J. Orr, Propagation of climatic events on ocean stratification, marine biology and CO2 : Case studies over the 1979-1999 period. *JGR, VOL 108*, 2003.

69. Le Quéré C. and Metzl N., Natural Processes regulating the ocean uptake of CO2, *Scope*

62-II, p 243-254, 2003.

70. Le Quéré C. et al., Two decades of ocean CO2 sink and variability, *Tellus,* 55B, 649-656, 2003.

71. Le Quéré C. et al, Ecosystem dynamics based on plankton functional types for global ocean biogeochemistry models. In press.

72. Liu H., Suzuki K. and Saito H., Community structure and dynamics of phytoplankton in the western Subartic Pacific ocean: A synthesis. *J. of Oceanography, Vol. 60, 119-137*, 2004.

73. Loisel H. and D. Stramski, Estimation of the inherent optical properties of natural waters from the irradiance attenuation coefficient and reflectance in the presence of Raman scattering, *Applied optics Vol.39 N°18*, 2000.

74. Loisel H., D. Stramski, B. Greg Mitchell, F. Fell, V.-S. Sicre, B. Lemasle and M. Babin, Comparison of the ocean inherent optical properties obtained from measurements and inverse modeling, *Applied Optics Vol. 40 N°15*, 2001.

75. Loisel, H., J.-M. Nicolas, and P.-Y. Deschamps and R. Frouin, Seasonal and inter-annual variability of particulate organic matter in the global ocean, *Geophys. Res. Lett*., *29, 49-52*, 2002.

76. Longhurst, A.R.Role of the marine biosphere in the global carbon cycle.Limnol. Oceanogr.36, 1057-1526, 1991.

77. Mackey M.D., H.W. Higgins, D.J. Mackey and S.W. Wright, CHEMTAX user's manual : a program for estimating class abundances from chemical markers-application to HPLC measurements of phytoplankton pigments, 1997.

78. Mackey D.J., J. Blanchot, H.W. Higgins and J. Neveux, Phytoplankton abundances and community structure in the equatorial Pacific. *DSR II, 49 :2561-2582*, 2002.

79. Maier-Reimer, E., U. Mikolajewicz, and A. Winguth, Future ocean uptake of CO2: interaction between ocean circulation and biology, Climate Dynamics, 12, 711 – 721, 1996.

80. Martin-Traykovski, L. and H. M. Sosik, Optical Classification of Water Types based on Remotely-Sensed Ocean Colour , In Proc. of Ocean Optics XIV Conf., 10-13 Nov., Kailua-Kona, Hawaii, 1998.

81. Marty J.C. and Chiavérini J., Seasonal and interannual variations in phytoplankton production at DYFAMED time-series station, northwestern Mediterranean Sea, *Deep Sea Research* II, Vol 49, 2002.

82. Marty, J.-C.,Chiavérini J., Pizay, M.-D. and Avril B., Seasonal and interannual dynamics of nutrients and phytoplankton pigments in the western Mediterranean Sea at the DYFAMED time-series station (1991-1999) ; *Deep-Sea research II, 49, 1965-1985*, 2002.

83. Morel, A. and H.R. Gordon (1980). Report of the working group on water color,

BoundaryLayer Meteorology, 18, 343-355.

84. Morel A., Télédétection dans le domaine visible, couleur de l'océan et son interprétation, *'l'océan'*, 1982.

85. Morel A. and A. Bricaud, Inherent optical properties of algal cells including picoplankton : theoretical and experimental results, Canadian Bulletin of fisheries and aquatic *sciences, N°214, 1986*.

86. Morel A., Optical Modeling of the Upper Oceanin Relation to Its Biogenous Matter Content (Case 1 Waters), *JGR* Vol. 93 N°C9, 1988.

87. Morel A. and D. Antoine, Heating Rate within the Upper Ocean in Relation to Its Bio-Optical State, *Journal of Physical Oceanography, Vol. 24*, 1994.

88. Morel, A., and B. Gentili (1996). Diffuse reflectance of oceanic waters. 3. Implication of bidirectionality for the remote-sensing problem. Applied Optics, 35, 4850-4862.

89. Morel, A., Consequences of a Synechococcus bloom upon the optical properties of oceanic Case 1 waters, *Limnol. Oceanogr., 42, 1746-1754*, 1997.

90. Morel, A. and H. Loisel (1998). Apparent optical properties of oceanic water: Dependence on the molecular scattering contribution. Applied Optics, 37, 4765-4774.

91. Morel A. and S.Maritorena, Bio-Optical properties of oceanic waters. A reappaisal. *JGR Vol. 106,* 2001

92. Neveux J, Lantoine F, Vaulot D, et al. Phycoerythrins in the southern tropical and equatorial Pacific Ocean: Evidence for new cyanobacterial types J. G. R.-OCEANS 104 (C2): 3311-3321 FEB 15 1999

93. Moore, T. S., J. W. Campbell, M. D. Dowell, Linking algal functional groups with bio-optical provinces on a global scale, In Proc. of Ocean Optics XVI Conf., 18-22 Nov., Santa Fe, New Mexico, 2002.

94. Obayashi Y. et al., Spatial and temporal variabilities of phytoplankton community structure in the northern North Pacific as determined by phytoplankton pigments, *DSR I, 48, 439-469*, 2001.

95. Orr, J. C., E. Maier-Reimer, U. Mikolajewicz, P. Monfray, J. L. Sarmiento, J. R. Toggweiler, N. K. Taylor, J. Palmer, N. Gruber, C. L. Sabine, C. Le Quéré, R. M. Key, and J. Boutin, Estimates of anthropogenic carbon uptake from four three-dimensional global ocean models, Global Biogeochem. Cycles, 15, No. 1, 43-60, 2001.

96. O'Reilly J., S. Maritonera, B. G.Mitchell, D. A. Siegel, K.L Carder, S.A. Garver, M. Kahru and C. McClain, Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS, *JGR Vol. 103 N° C11,* 1998

97. Oubelkheir, K., Claustre, H., Babin, M., Sciandra, A. (2005). The comparative bio-optical

and biogeochemical properties of contrasted trophic regimes. Limnology and Oceanography, 2005.

98. Partensky, F., W. R. Hess and D. Vaulot, Prochlorococcus, a marine photosynthetic Procaryote of global significance, *Microbiol. Mol. Biol. Rev., 63, 106-127*, 1999.

99. Patt, F. S. et al., Algorithm Updates for the fourth SEAWIFS data reprocessing, Seawifs Postlaunch tech. Report, Vol. 22, NASA Tech. Memo. 206892, 2003.

100. Pope R. ans E. Fry, Absorption spectrum (380-700nm) of pure water. Integrating cavity measurements, Appli. Opt. 36, 8710-8723, 1997.

101. Prentice I.C., C. Le Quéré, E.T. Buitenhuis, J.I. House, C. Klaas and W. Knorr, Biosphere dynamics : challenges for earth system models, submitted.

102. Sarmiento and T.M.C. Hughes, Anthropogenic CO2 Uptake in a Warming Ocean Tellus, 51B: 560-561, 1999.

103. Sarmiento J.L. et al, Response of ocean ecosystems to climate warning, *Glob. Biogeoch. Cycles, VOL 18*, 2004.

104. Sathyendranath, S., G. Cota, V. Stuart, H. Maass, T. Platt, Remote sensing of phytoplankton pigments: a comparison of empirical and theoretical approaches*, Int. J. Remote Sens*., 22, 249-273, 2001.

105. Sathyendranath S., L. Watts, E. Devred, T. Platt, C. Caverhill and H. Maass, Discrimination of diatoms from other phytoplankton using ocean-colour data. *Mar. Ecol. Prog. Ser., VOL272*, 2004.

106. Siegel D.A., S. Maritonera, Global distribution and dynamics of colored dissolved and detrital organic materials, *JGR*, 2001.

107. Smith W.O. Jr et al. The temporal dynamics of the flagellated and colomial stages of Phaeocystis antarctica in the Ross Sea*, DSR II, 50, 605-617,* 2003.

108. ,Smyth T.J., T.Tyrrell and B. Tarrant, Time series of coccolithophore activity in the Barents Sea, from twenty years of satellite imagery, GRL, Vol. 31*, 2004.*

109. Steinberg D.K. et al., Overvew of the US JGOFS Bermuda Atlantic Time-series Study (BATS) : a decade-scale look at ocean biology and biogeochemistry. *Deep Sea Research II, 48, 1405-1447*, 2001.

110. Stramska M., D. Stramski, Effects of nonuniform vertical profile of chlorophyll concentration on remote-sensing reflectance of the ocean, Applied Optics, 44, 1735-1747, 2005.

111. Stramski D. and A. Morel, Optical properties of photosynthetic picoplankton in different physiological states as affected by growth irradiance*, Deep Sea Res., Vol. 37, N°2,* 1990.

112. Stramski D., A. Bricaud and A. Morel, Modeling the inherent optical properties of the

ocean based on the detailed composition of the planktonic community*, Applied Optics Vol. 40 N°18*, 2001.

113. Stramski D., E. Boss, D. Bogucki and K.J. Voss, The role of seawater constituents in light backscattering in the ocean, *Progress in Oceanography, 61*, 2004.

114. Subramaniam, A., C. W. Brown, R. R. Hood, E. J. Carpenter and D. G. Capone, Detecting Trichodesmium blooms in SeaWiFS imagery, Deep Sea Res. II, 49, 107-121, 2002.

115. Traykovski L.V.M and H.M. Sosok, Optical classification of water types based on remotely-sensed ocean colour. 2000.

116. Vaillancourt R.D ., C.W. Brown, R.L. Guillard and W.M. Balch, Light backscattering properties of marine phytoplankton : relationships to cell size, chemical composition and taxonomy. *J. Plankton Res., VOL 26, N°2*, 2004.

117. Vruty P.G. and L.K. Medlin, Observations on colony formation by the cosmopolitain phytoplankton genus Phaeocystis*, J. of Mar. Res. Vol. 43, Issues 3-4,* 2003.

118. Vidussi, F., H. Claustre, B. B. Manca, A. Luchette and J.-C. Marty, Phytoplankton pigment distribution in relation to upper thermocline circulation in the eastern Mediterranean Sea during winter, J. *Geophys. Res., 106, 19939-19956*, 2001.

119. Werdell, P.J. and S.W. Bailey, An improved in situ data set for bio-optical algorithm development and ocean color satellite validation. *Remote Sensing of Environment, Vol 98*, 122-140, 2005.

120. Wulff A. and Wängberg S.-A., Spatial and vertical distribution of phytoplankton pigments in the eastern Atlantic sector of the Southern Ocean, *Deep Sea Research II, 51, 2701-2713*, 2004.

121. Yentsch C. S., Measurements of visible light absorption by particulate matter in the ocean. *Limnol. Oceanogr*. 7 : 207-217, 1962.

122. Zubkov M.V. , et al, Picoplankton community structure on the Atlantic Meridional Transect : a comparison between seasons, *Prog. In Oceanog. 45, 369-386*, 2000.

ANNEXE 1

Remote sensing of phytoplankton groups in case 1 waters from global SeaWiFS imagery, S. ALVAIN, C. MOULIN, Y. DANDONNEAU and F.M. BREON, Deep Sea Research I 52 (2005), 1989-2004.

Soumis le 12 Juillet 2004, accepté le 6 Juin 2005, disponible en septembre 2005.

ANNEXE 2

A SPECIES-DEPENDENT BIO-OPTICAL MODEL OF CASE I WATERS FOR GLOBAL OCEAN COLOR PROCESSING

S. Alvain[1], C. Moulin*[1], Y. Dandonneau[2], H. Loisel[3], F.-M. Bréon[1]

Accepté par « Deep Sea Research I » le 22 Décembre 2005

Abstract. The PHYSAT method, which enables identification of four different phytoplankton groups from their impact on the normalized water-leaving radiance (nLw) spectra, is applied to coincident *in situ* measurements of both chlorophyll *a* concentration (Chl *a*) and nLw. Observations show that measurements acquired in waters dominated by haptophytes, diatoms and *Synechococcus*-like cyanobacteria have optical properties that deviate significantly from the mean OC4V4 bio-optical model, which is currently used as the standard for global ocean color processing. A specific OC4v4-like relationship, i.e., Chl *a* as a 4th-order polynomial of the "maximum band ratio", was fitted for each dominant phytoplankton group identified by PHYSAT. The resulting OC4-SD bio-optical model thus starts from a classification of the dominant phytoplankton group, followed by a species-dependent estimate of Chl *a*. It has been applied to global daily SEAWIFS data of the year 2001. Monthly mean maps of Chl *a* derived from OC4-SD or OC4v4 show large regional differences that can reach 50% at high latitudes.The new algorithm leads to lower concentrations in regions where the standard model retrievals are known to be too high, such as the Mediterranean Sea. Conversely, higher concentrations are retrieved in regions dominated by diatom blooms, such as the northern North Atlantic in summer, where previous studies have demonstrated a low bias in standard SEAWIFS Chl *a*.

Keywords: Ocean color, Remote sensing, Oceanic Primary Production

1. Introduction

For about 10 years, satellite missions dedicated to ocean color (OCTS, POLDER, SEAWIFS, MODIS) have been changing our understanding of the biological ocean by providing a quasi-global daily monitoring of the chlorophyll *a* concentration (Chl *a*, in $mg.m^{-3}$) in surface waters. These satellite data enable us to address a wide range of scientific issues, from the study of local marine biological processes to the estimate of the global ocean productivity (see McClain *et al.*, 2004). The standard ocean color products are normalized water-leaving radiances (nLw; in $mW\ cm^{-2}\ \mu m^{-1}\ sr^{-1}$) at different wavelengths in the blue and green parts of the solar spectrum (e.g., at 412, 443, 490, 510 and 555 nm for SEAWIFS), and Chl *a*, which is estimated from nLw values and a bio-optical model.

The large variety of phytoplankton assemblages and of oceanographic conditions encountered in the global ocean coupled to the paucity of *in situ* data oblige us to define mean empirical relationships that are assumed to be valid at regional to global scales. A single bio-optical model (OC4V4; O'Reilly *et al.*, 2000) is for instance currently used to generate global maps of Chl *a* from both SEAWIFS and MODIS imagery. This model was derived by fitting a mean relationship from a large dataset of coincident nLw and Chl *a in situ* measurements acquired in various waters. However, the large dispersion of *in situ* data around this mean relationship (O'Reilly *et al.*, 2000) shows that this approach is unlikely to retrieve Chl *a* with an accuracy better than 30%. The observed dispersion in water optical properties for a given Chl *a* is usually attributed to the optical impact of yellow substances or of ecosystem characteristics.

Even though OC4V4 performs satisfactorily at the global scale (McClain *et al.*, 2004), several regional studies have emphasized significant biases between satellite and *in situ* Chl *a* estimates. These studies led to various adaptations of OC4V4, such as those developed for the oligotrophic Mediterranean waters (Bricaud *et al.*, 2002; D'Ortenzio *et al.*, 2002) or for the productive Antarctic waters (Arrigo *et al.*, 1998; Dierssen and Smith, 2000). Such regional approaches are, however, difficult to conciliate with global satellite data processing. Besides, they do not provide any biological or physical interpretation of the observed variability in water optical properties. More recently, bio-optical models were developed to account for the specific optical properties of species like diatoms (Cota *et al.*, 2003; Sathyendranath *et al.*, 2004), *Synechococcus* (Morel *et al.*, 1997) and *Trichodesmium* (Subramaniam *et al.*, 2002). However, these species-dependent bio-optical models cannot be used for the processing of global satellite data, as they require some prior information on the dominant phytoplankton group.

The PHYSAT method was developed to identify the dominant phytoplankton species from ocean color measurements (Alvain *et al.*, 2005). This classification relies on the difference between the shape of the measured nLw spectrum between 412 and 555 nm and that of a standard. The analysis of coincident nLw spectra and *in situ* pigment inventories performed by Alvain et al. (2005) has shown that four phytoplankton groups (*i.e.*, *Prochloroccocus*, *Synechococcus*-like cyanobacteria (SLC), haptophytes and diatoms) can be identified. Here we applied PHYSAT to the NOMAD in situ dataset (Werdell and Bailey, 2005) to derive species-dependent OC4V4-like relationships between normalized water-leaving radiances and Chl *a*. An independent in situ dataset was used to demonstrate the improvement in terms of Chl *a* accuracy. These relationships were finally applied to global SEAWIFS data for the year 2001.

2. Analysis of in situ measurements

The NOMAD dataset has recently been made available to the scientific community, in place of the former SEABAM dataset, to develop new bio-optical models. It includes 3466 *in situ* coincident nLw and Chl *a* measurements acquired in various waters around the globe. Before application of the PHYSAT method to this dataset, 942 measurements were discarded because at least one of the required spectral bands was missing. 372 measurements identified as Case 2 waters by the criterion of the SEAWIFS standard processing (i.e., if nLw > 0.059 mW cm^{-2} μm^{-1} sr^{-1}; Patt *et al.*, 2003) were also removed from the database. Finally, 101 Case 1 measurements were discarded because they have a Chl *a* value lower than 0.04 mg m^{-3} or larger than 10 mg m^{-3}. Note that this latter threshold is higher than that of the original PHYSAT method (3 mg.m^{-3}; Alvain *et al.*, 2005) to maximize the range of validity of our bio-optical model. The application of PHYSAT to the remaining 2051 *in situ* measurements led to a successful classification in one of the four groups for 337 of them, as shown in Figure 1. Whereas measurements identified as *Prochlorococcus* and SLC seem to be located approximately in the center of the dataset in Figure 1, those identified as haptophytes and diatoms seem to be respectively in the lower and higher part of the dataset. Figure 2 shows the geographical distribution of the NOMAD measurements successfully classified with PHYSAT. As already emphasized by Werdell and Bailey (2005), most of the measurements performed at high latitudes (above 30°) were performed in coastal waters of North America.

An OC4V4-like polynomial fit (O'Reilly *et al.*, 2000) was applied to the data belonging to the four phytoplankton groups:

$$\log(\text{Chl } a) = a \log^4(r) + b \log^3(r) + c \log^2(r) + d \log(r) + e \qquad (1)$$

The r parameter corresponds to the "maximum band" blue-to-green ratio, defined as:

$$r = \max(Rrs(443),Rrs(490),Rrs(510)) / Rrs(555) \qquad (2)$$

Rrs is the remote sensing reflectance at a given wavelength λ, defined as:

$$Rrs(\lambda) = nLw(\lambda) / E_0(\lambda) \qquad (3)$$

E_0 is the top-of-atmosphere solar irradiance. Coefficients a to e are given in Table 1 for each group, except for *Prochlorococcus*, because the result of the fitting for this species is not significantly different from OC4V4. Figure 3 confirms that the relationships fitted for diatoms and haptophytes are significantly above and below, respectively, OC4V4. This is in good agreement with the results obtained by Cota *et al.* (2003) in the Labrador Sea for both diatoms and *Prymnesiophytes* (a species that belongs to our haptophytes group). The relationship obtained for SLC data has a different behavior since it yields strongly lower (resp. slightly larger) Chl *a* values for Chl *a* above (resp. below) 0.3 mg m^{-3}. These results suggest that the presence of different phytoplankton species, as identified by PHYSAT, explains a significant part of the overall variability of the NOMAD dataset.

3. Application to global SEAWIFS data

From the results obtained from the analysis of the NOMAD dataset, we defined a species-dependent bio-optical model, OC4-SD, as a two-step algorithm. First PHYSAT is applied to the standard SEAWIFS Chl *a* and nLw spectrum to attempt the identification of a

phytoplankton group. If the identification is successful, the suitable bio-optical model (see Table 1) is used to compute an improved Chl *a* value. Otherwise, if the identification is unsuccessful or leads to Prochlorococcus, or if the first guess Chl *a* is outside the validity range (see Table 1), the standard SEAWIFS Chl *a* value is kept.

SeaWiFS daily level-3 binned products at a resolution of 1/12° were processed for the year 2001 with OC4-SD to generate global mean monthly maps of Chl *a.* As described in Alvain *et al.* (2005), the first step of the processing rejects pixels with an aerosol optical thickness greater than 0.15 or with a Chl *a* outside the 0.04-3 $mg.m^{-3}$ range. PHYSAT is then applied to all valid pixels of the daily level-3 products, with an average of about 50% of successfully classified pixels. Both OC4v4 and OC4-SD were finally applied to every classified pixel of daily level-3 products, which were then used to generate monthly mean global maps of Chl *a*.

Figure 4 compares maps of Chl *a* from both bio-optical models for four months in 2001. The differences are well organized at the global scale and are generally greater than ±20% at mid and high latitudes. Higher Chl *a* values (up to 60%) are found in regions where diatoms are frequently observed. This result is consistent with previous studies that demonstrate the underestimation of the standard SEAWIFS Chl *a* in diatom-dominated waters (Sathyendranath *et al.*, 2003; Dierssen and Smith, 2000). Conversely, lower Chl *a* are found in some specific areas known for their too high OC4V4 Chl *a*, such as the Mediterranean Sea (Bricaud *et al.*, 2002; D'Ortenzio *et al.*, 2002). OC4-SD Chl a values are slightly larger in most oligotrophic tropical waters because of the quasi-permanent presence of *Synechococcus*-like cyanobacteria.

4. Validation of the OC4-SD Chl *a*

We tentatively validate the OC4-SD bio-optical model by using independent datasets of *in situ* Chl *a* measurements acquired in case 1 waters and for which clear-sky SEAWIFS pixels of the same day are available within ±9 km. The validation is based on a set of 1045 nearly coincident SEAWIFS nLw and *in situ* Chl *a* measurements, acquired during several cruises presented in Table 2. PHYSAT successfully classified 391 measurements in one of the four phytoplankton groups, out of which only 182 as haptophytes, diatoms or SLC. The large number of data identified as *Prochlorococcus* was expected since a lot of *in situ* measurements were performed in oligotrophic waters, mainly during the GeP&Co cruises, where this species dominates.

The validity range criteria of Table 1 lead to further rejection, limiting the dataset of haptophytes, diatoms or SLC observations to 111 cases. Although very reduced from the original validation database, these 111 cases sample several regions and seasons, as shown in Figure 5 and Table 2. Contrary to the NOMAD dataset (see Figure 2), this validation dataset includes mostly remote open-ocean measurements, both in the North Atlantic and in the southern Pacific. The comparison of both OC4V4 and OC4-SD SEAWIFS Chl *a* with *in situ* Chl *a* is shown in Figure 6. The species-dependent algorithm described above leads to both a higher correlation coefficient and a regression slope closer to 1 than the original OC4V4 algorithm. These statistical parameters and the analysis of Figure 6 demonstrate that the OC4-SD bio-optical model yields significantly less biased and dispersed Chl *a* values than OC4V4 for pixels successfully classified, and obviously does not degrade the results for other pixels for which the OC4V4 Chl *a* is kept.

5. Discussion

We have seen in sections 2 and 3 that the percentage of successful PHYSAT identification of a dominant phytoplankton group differs markedly according to the dataset: it is of 16% for the NOMAD dataset (see section 2), of 37% for the validation dataset presented in section 3, and reaches about 50% of the SEAWIFS pixels at the global scale. Table 3 shows that this discrepancy is mostly due to differences between the various datasets themselves and not to a bias introduced by PHYSAT. As already shown in Figures 2 and 5, the valid measurements in the NOMAD dataset include many more measurements (35%) performed at high latitudes and high Chl *a*, i.e. in highly dynamical and productive coastal (but not case 2) waters, than in our validation dataset (16%) or in global SEAWIFS data (4%). In general, the repartition of valid measurements shown in Table 3 clearly demonstrates that our validation dataset, and even more the GeP&CO dataset, is much more representative of the global ocean as observed by SEAWIFS than the NOMAD dataset. Note that the GeP&CO experiment was designed to sample the maximum of water types at different seasons.

Table 3 also shows that the percentage of successful PHYSAT classification is always lower in regions of high Chl a. This suggests that these rich waters, which were poorly sampled during the GeP&CO cruises used to develop PHYSAT, may contain phytoplankton groups that are not identified with our method. It is, however, noteworthy that for all water types, there are significantly fewer successfully classified measurements in the NOMAD dataset, which relies on in situ optical measurements, than in the two other datasets, which both rely on SEAWIFS remote-sensing measurements. It is possible that some slight intrinsic biases exist between the two kinds of optical measurements, for example because of the atmospheric correction of SEAWIFS data. However it is also likely that once again the geographical distributions and the sampled biological conditions from one dataset to the other control the percentage of successful classification.

6. Conclusion

Identification of the dominant phytoplankton group from remote sensing measurement is sometimes possible based on the spectral shape of the reflectance spectrum, as demonstrated in Alvain *et al.* (2005). The information on the phytoplankton group can then be used for a better estimate of Chl a concentration. We have used an in-situ dataset of Chl a concentration and water leaving radiance spectra (NOMAD; Werdell and Bailey, 2005) to derive a species-dependent bio-optical model, OC4-SD, suitable for the processing of global ocean color satellite data. The differences between the mean bio-optical relationships for the various species, up to 50%, explain part of the variability found in the whole dataset. When haptophytes, diatoms or SLC are recognized from the remote sensing data provided by ocean color satellites, a specific bio-optical relationship shall be applied instead of the standard OC4V4 model.

The processing of SEAWIFS data results in monthly mean chlorophyll *a* concentrations that have the same general patterns as with the standard algorithm, but with large-scale differences. In particular, the monthly mean Chl *a* is decreased by 20 to 30% in regions

dominated by haptophytes while it is increased by 50 to 60% in regions of diatom blooms. Most of these changes are consistent with known deficiencies of the SEAWIFS standard product, i.e. too high Chl *a* in regions such as the Mediterranean Sea, and an underestimate of Chl *a* for diatom blooms. The validation of OC4-SD based on 111 independent data values confirms the general improvement in Chl *a* retrievals compared to OC4V4. This new bio-optical algorithm can be applied as is to other recent sensors that provide measurements in spectral bands similar to those of SEAWIFS. Providing that it is also applicable to the CZCS dataset, OC4-SD would facilitate the interpretation of observed long-term trends in global chlorophyll *a* concentrations (Antoine *et al.*, 2005; Gregg *et al.*, 2005) by showing whether these trends are related to changes in ecosystem structure or in primary productivity.

7. Acknowledgements

The authors would like to thank all participants in the NASA SIMBIOS program as well as all voluntary contributors for collecting data that have been assembled in the NOMAD dataset (http://seabass.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/nomad.cgi). The authors also would like to thank the NASA SeaWiFS Project and the NASA/GSFC/DAAC for the production and distribution of SEAWIFS data, respectively (http://daac.gsfc.nasa.gov/data/dataset/SEAWIFS). We are also grateful to all organizers and observers of Gep&CO, OISO, Skogafoss, Toucan , Colibri, Kiwi and Dyfamed ocean sampling campaigns used for the validation of OC-SD, supported by CNES - TAOB/GeP&SIMBAD, PNEC, INSU/CNRS and IRD.

8. References

Alvain. S., Moulin C., Dandonneau Y. and Bréon F.M. ,Remote sensing of phytoplankton groups in case 1 waters from global SeaWiFS imagery, *Deep Sea Res. I*, **52**, 1989-2004, 2005.

Antoine, D., Morel, A., Gordon, H. R., Banzon, V. F., and Evans, R. H., Bridging ocean color observations of the 1980s and 2000s in search of long-term trends, *J. Geophys. Res.*, **110**, C06009, doi:10.1029/2004JC002620, 2005.

Arrigo, K. R., Robinson D. H., Worthen D. L., Schieber B. and Lizotte M. P., Bio-optical properties of the southwestern Ross Sea, 1998. , J. Geophys. Res., **103**, 21683-21695, 1998.

Bricaud, A., Bosc E. and Antoine D., Algal biomass and sea surface temperature in the Mediterranean Basin. Intercomparison of data from various satellite sensors, and implications for primary production estimates. *Remote Sens. Environ.*, **81**, 163-178, 2002.

Cota, G. F., Harrison W. G., Platt T., Sathyendranath S., and Stuart V., Bio-optical properties of the Labrador Sea, *J. Geophys. Res.*, **108**(C7), 3228, 2003.

Dandonneau, Y., Deschamps P.-Y., Nicolas J.-M., Loisel H., Blanchot J., Montel Y., Thieuleux F., and Bécu G., Seasonal and interannual variability of ocean color and composition of phytoplankton communities in the North Atlantic, Equatorial Pacific and South Pacific, *Deep-Sea Res. II*, **51**, 303-318, 2004.

Dierssen, H. M. and Smith R.C., Bio-optical properties and remote sensing ocean color algorithms for Antarctic Peninsula waters, *J. Geophys. Res.*, **105**, 26301-26312, 2000.

D'Ortenzio, F., Marullo S., Ragni M., Ribera d'Alcala M., Santoleri R.. Validation of empirical SeaWiFS algorithms for chlorophyll-a retrieval in the Mediterranean Sea. A case study for oligotrophic seas, *Remote Sens. Environ.*, **82**, 79-94, 2002.

Gregg W. W., Casey, N. W., and McClain C. R., Recent trends in global ocean chlorophyll, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L03606, doi:10.1029/2004GL021808, 2005.

McClain, C. R., Feldman G. C., and Hooker S. B., An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series, Deep Sea Res. II, **51**, 5-42, 2004.

Morel, A., Consequences of a Synechococcus bloom upon the optical properties of oceanic Case 1 waters, *Limnol. Oceanogr.,* **42**, 1746-1754, 1997.

O'Reilly, J. E. and 21 co-authors, Ocean color chlorophyll *a* algorithms for SeaWiFS, OC2 and OC4: Version 4, in SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses (Part 3), NASA Tech. Memo. 2000-206892, 10, S.B. Hooker and E.R. Firestone Eds, NASA GSFC, pp 57, 2000.

Patt, F. S. *et al.*, Algorithm Updates for the fourth SEAWIFS data reprocessing, Seawifs Postlaunch tech. Report, Vol. 22, NASA Tech. Memo. 206892, 2003.

Sathyendranath, S., Cota G., Stuart V., Maass H., T. Platt, Remote sensing of phytoplankton pigments: a comparison of empirical and theoretical approaches, Int. J. Remote Sens., 22, 249-273, 2001.

Satyendranath, S., Watts L., Devred E., Platt T., Caverhill C. and Maass H., Discrimination of diatoms from other phytoplankton using ocean-colour data, *Marine ecology progress series*, **272**, 59-68, 2004.

Stuart, V., Sathyendranath S., Platt T., Maass H. and Irwin B. D., Pigments and species composition of natural phytoplankton populations: effect on the absorption spectra, *J. Plankton Res.*, **20**, 187-217, 1998.

Subramaniam, A., Brown C. W., Hood R. R., Carpenter E. J. and Capone D. G., Detecting Trichodesmium blooms in SeaWiFS imagery, *Deep Sea Res. II*, **49**, 107-121, 2002.

Werdell, P.J. and Bailey, S.W., An improved bio-optical data set for ocean color algorithm development and satellite data product validation, *Remote Sens. Env.*, **98**, 122-140, 2005.

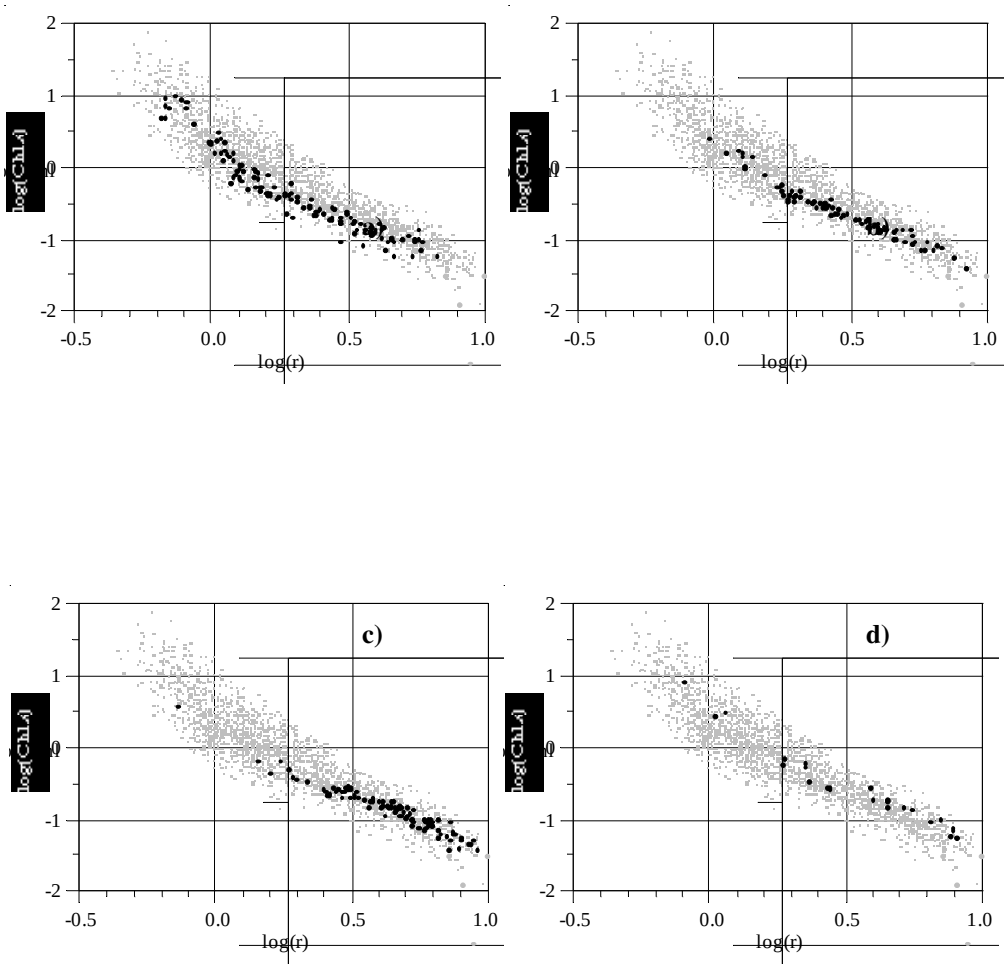


Figure 1. Chl *a* as a function of the "maximum band" blue-to-green ratio r (see Equation 2) for NOMAD measurements. Black dots represent measurements that have been classified by PHYSAT as: a) haptophytes (n = 130), b) *Prochlorococcus* (n = 83), c) cyanobacteria (n = 100), and d) diatoms (n = 24). Light grey dots in the four graphs show the whole NOMAD dataset.

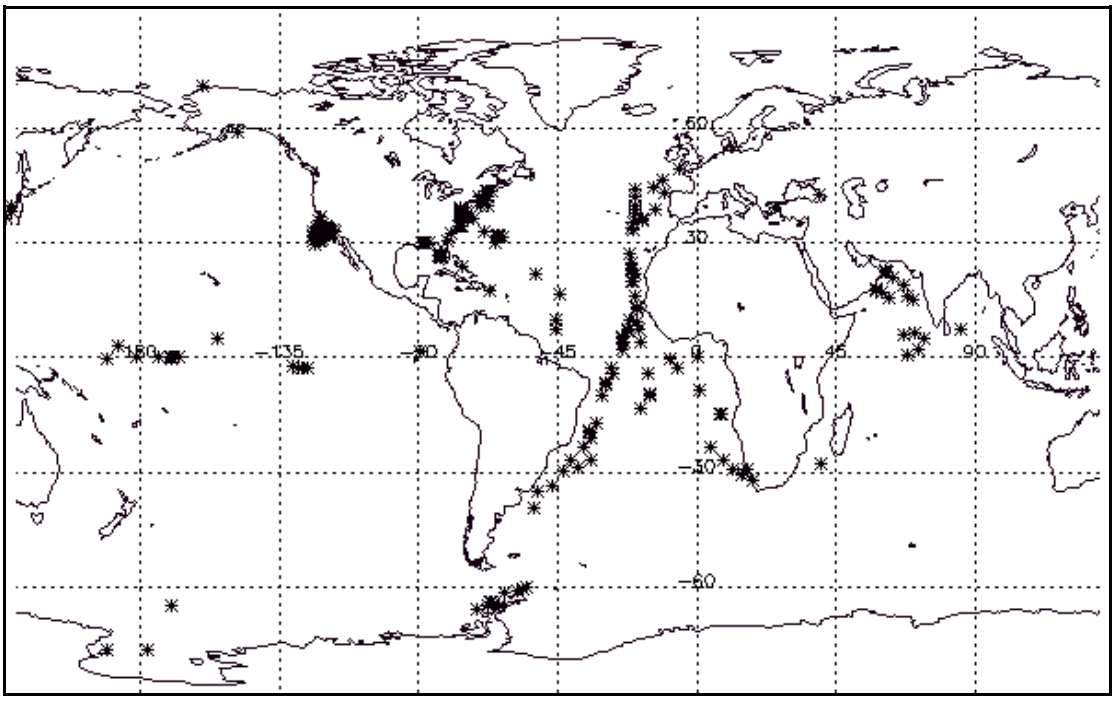


Figure 2. Geographical distribution of NOMAD measurements (Werdell and Bailey, 2005) successfully classified with PHYSAT.

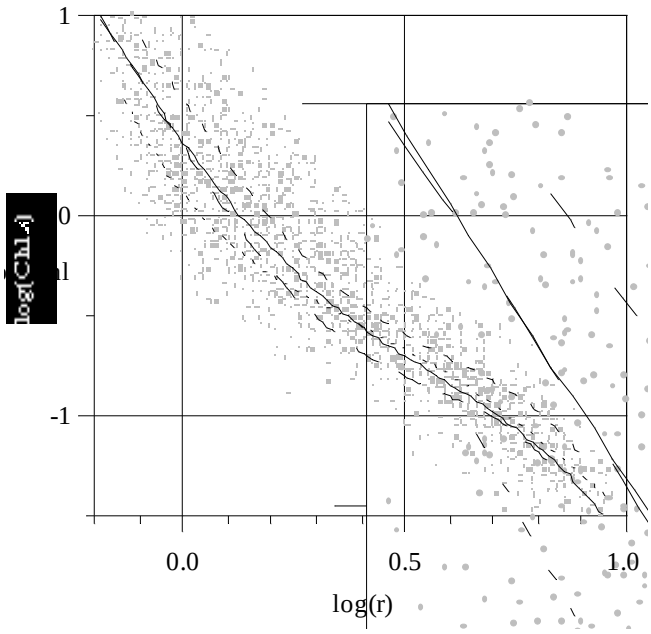


Figure 3. OC4V4-like relationships (see Equation 1 and Table 1) for haptophytes (long-dashed line), cyanobacteria (short-dashed line), and diatoms (medium-dashed line). The solid line shows the standard OC4V4 relationship. As in Figure 1, light grey dots show the whole NOMAD dataset.

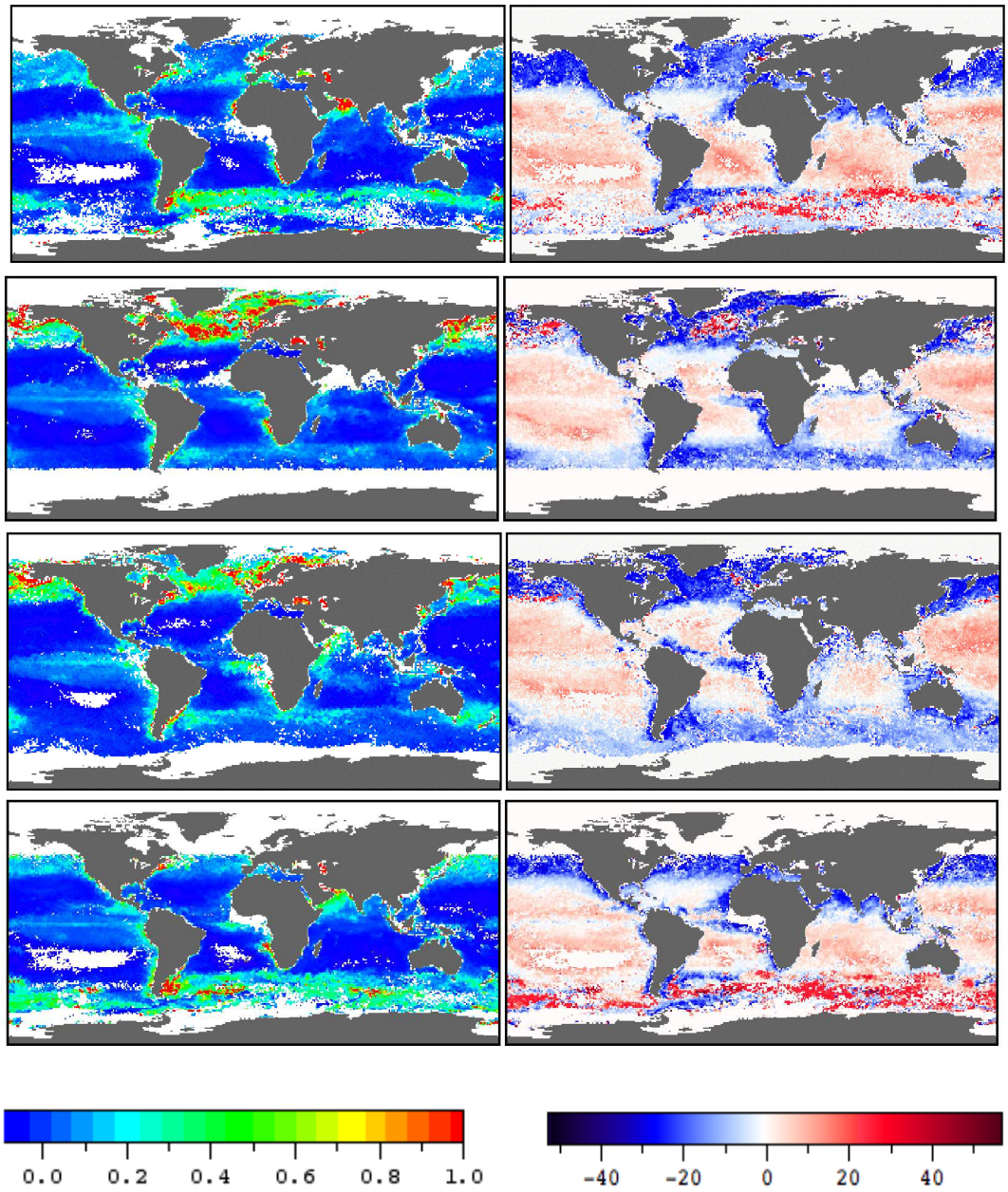


Figure 4. Maps of the monthly mean OC-SD Chl a (left; in mg.m^{-3}), and of the relative difference (right; in %) between OC4-SD and OC4v4 monthly mean Chl a for March (top), June, September, and December (bottom) 2001.

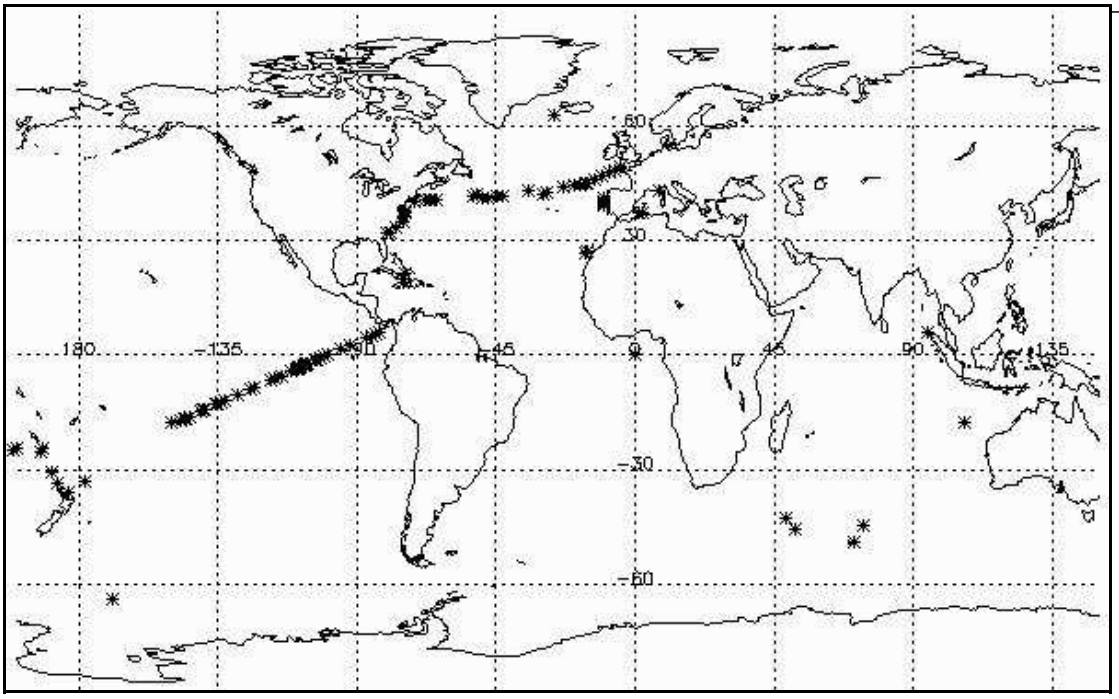


Figure 5. Locations of the 111 *in situ* Chl a values used for the validation of the OC4-SD model. Data are from Gep&Co, OISO, Skogafoss, Toucan, Colibri, and Kiwi cruises and Dyfamed station (see Table 2).

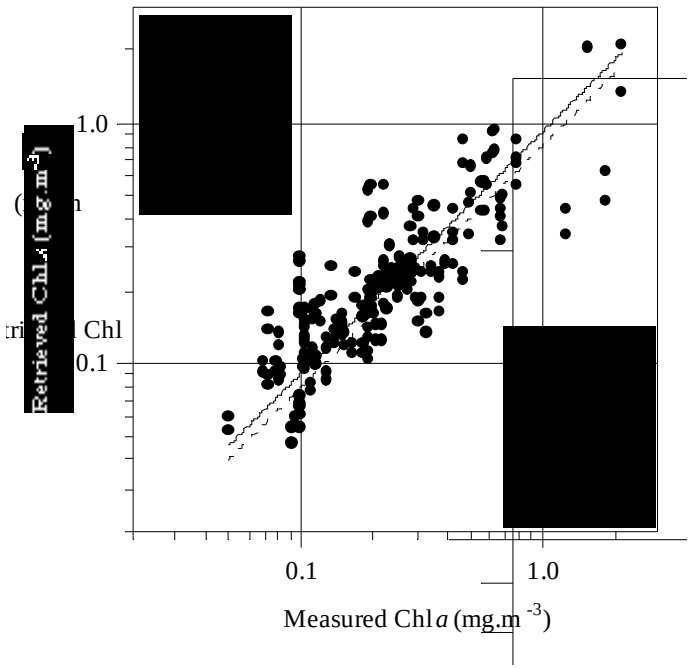


Figure 6. Comparison of Chl *a* calculated using both OC4v4 (open circles) and OC4-SD (filled circles) with *in situ* Chl *a* for the 111 independent measurements classified by PHYSAT as Haptophytes (n = 50), SLC (n = 55) or Diatoms (n = 6). Linear regressions of the form Chl *a*(retrieved) = α.Chl *a*(measured) are shown as dashed (OC4V4) and solid (OC4-SD) lines, and the corresponding statistics are given in the Figure.

Table 1. Coefficients of the various bio-optical models presented in this work (see Equation 1) and range of validity in term of Chl a of these models.

	OC4V4	Haptophytes	SLC	Diatoms
a	-1.532	-4.889	2.249	-4.303
b	0.649	5.096	-5.975	5.051
c	1.93	0.972	4.912	-0.333
d	-3.067	-3.430	-2.77	-3.235
e	0.366	0.341	0.104	0.58
Chl *a* validity range ($mg.m^{-3}$)	0.01-30	0.06-3	0.05-4	0.06-10

Table 2. Description of the different datasets used to validate the OC4-SD bio-optical model.

Campaign	Number of data values used	Dominant Group	Period	Region	Principal Investigator
Gep&Co	91	1 diatom 55 SLC 35 haptophytes	08/00-08/02	North Atlantic - South Pacific	Y. Dandonneau
Dyfamed	4	4 haptophytes	09/99-09/00 07/02-08/02	Mediterranean	J-C. Marty
Kiwi 7	1	1 diatom	12/97	Austral ocean	R. Barber
Oiso 6 4	4	4 diatoms	01/01	Austral Ocean	N. Metzl
Skogafoss	1	1 haptophyte	07/02	North Atlantic	Y. Dandonneau
Colibri	8	8 haptophytes	04/03	North Atlantic	Y. Dandonneau

Table 3. Compared characteristics of the three datasets used in this study, with particular emphasis on their geographical and biological coverage. The SEAWIFS dataset presented in this table is composed of 20 days (from 9 to 18 June and from 6 to 15 December 2001) of global daily L3-binned data. The valid measurements are those that fulfilled the criteria defined in section 2. Only a fraction of these valid measurements are successfully classified in one of the four PHYSAT phytoplankton groups (Alvain *et al.* 2005).

		SEAWIFS	NOMAD	Validation Dataset	
				GeP&CO only	All
Number of valid measurements		49478	2051	623	1045
Number of classified measurements		31202	328	333	391
Percentage of valid measurements and percentage of successful classification, both in %	Lat > 30° and Chl *a* < 0.5 mg.m^{-3}	38 (69)	30 (22)	28 (55)	44 (30)
	Lat > 30° and Chl *a* > 0.5 mg.m^{-3}	3 (51)	35 (7)	17 (32)	16 (12)
	Lat < 30° and Chl *a* < 0.5 mg.m^{-3}	58 (58)	28 (23)	54 (60)	38 (58)
	Lat < 30° and Chl *a* > 0.5 mg.m^{-3}	1 (38)	7 (7)	1 (43)	2 (32)

ANNEXE 3

PHYSAT : ETUDES COMPLEMENTAIRES

Influence de la résolution sur la détection des groupes

1. Choix de la résolution pour les cartes PHYSAT

Résolution spatiale

Les observations PHYSAT présentées dans ce manuscrit le sont essentiellement sous forme de cartes mensuelles au ¼ de degré, réalisées à partir de cartes journalières obtenues par échantillonnage (1 pixel sur 4) des cartes à 9 Km de résolution SeaWIFS. Une autre façon de présenter ces cartes a également été testé. Elle consiste à réaliser des synthèses au degré à partir des synthèses au ¼ de degré en conservant uniquement les groupes les plus fréquentes par degré et présentent au moins pour 50% des pixels valides (pour le degré considéré et sur la période de la synthèse). Le choix de présenter les cartes de cette façon s'explique par le fait qu'il est visuellement plus facile d'étudier des cartes pleines. On peut cependant se demander quel est l'influence de cette méthode sur le résultat final.

Pour tester cela, plusieurs tests sont présentés ici. Tout d'abord, la figure 1.1 montre les synthèses pour le mois de Décembre 1998 au ¼ de degré et au degré. On voit alors nettement que les cartes au ¼ de degré ont plus de pixels noirs, non labellisés, ou pour lesquelles les données n'étaient pas disponibles ou de « mauvaise qualité ». Cependant, les grandes structures sont bien visibles, comme la floraison de diatomées dans l'Austral et à l'équateur, les haptophytes dans les moyennes latitudes nord et l'alternance de *Prochlorococcus* et de cyanobactéries à l'Equateur. Ces deux derniers groupes sont assez difficiles à départager pour certaines régions des cartes au ¼ de degré, qui sont un peu plus bruitées que celles au degré. Notons que les SLC et *Prochlorococcus* sont deux groupes assez proches, en tant que groupe picoplanctonique des milieux oligotrophes et en termes de signal de spectre de nLw*. Cependant, les cartes au degré montre que l'instabilité apparente de PHYSAT entre ces deux groupes cache tout de même des structures bien définies (Figure 1.1 en bas).

Sachant qu'un pixel est labellisé par un groupe si celui-ci est détecté pour au moins la moitié des pixels valides disponibles, on peut considérer que l'étude des grandes structures à l'échelle globale peut se faire à partir de cartes au ¼ ou au degré de résolution.

Résolution temporelle

Un deuxième aspect du lissage vient de la période sur laquelle est effectuée la synthèse. Les cartes présentées jusqu'à présent sont des synthèses mensuelles. Pourquoi ce choix ?

Nous avons fait ce choix pour des raisons pratiques de stockage et par convention, mais surtout en raison d'un problème commun à tous les produits « couleur de l'eau » : la présence des nuages. En effet la couverture nuageuse à l'échelle du globe peut représenter plus de 50% de la surface, ce qui fait autant de régions pour lesquelles on ne peut disposer de mesures. Il faut donc réaliser des compositions sur une période donnée de façon à profiter des mouvements des masses nuageuses pour acquérir des données sur toute la surface des océans. Les caractéristiques du capteur SeaWiFS lui permettent de balayer, en moyenne, la totalité de la surface terrestre en une semaine environ. Des synthèses sur 10 jours sont donc présentées en figure 1.1 pour le mois de décembre 1998. On note qu'en dehors de zones nuageuses ou de fortes concentrations en aérosols (ouest de l'Afrique centrale), et des régions très oligotrophes, les synthèses sur 8 jours, au degré, donnent des résultats dont la couverture laisse apparaître la plupart des grandes structures observées dans la synthèse mensuelle (Figure 1.2). Ces cartes sont également intéressantes pour étudier des phénomènes de plus faible superficie comme le déplacement de petits blooms tels que celui de diatomées dans le Pacifique Equatorial.

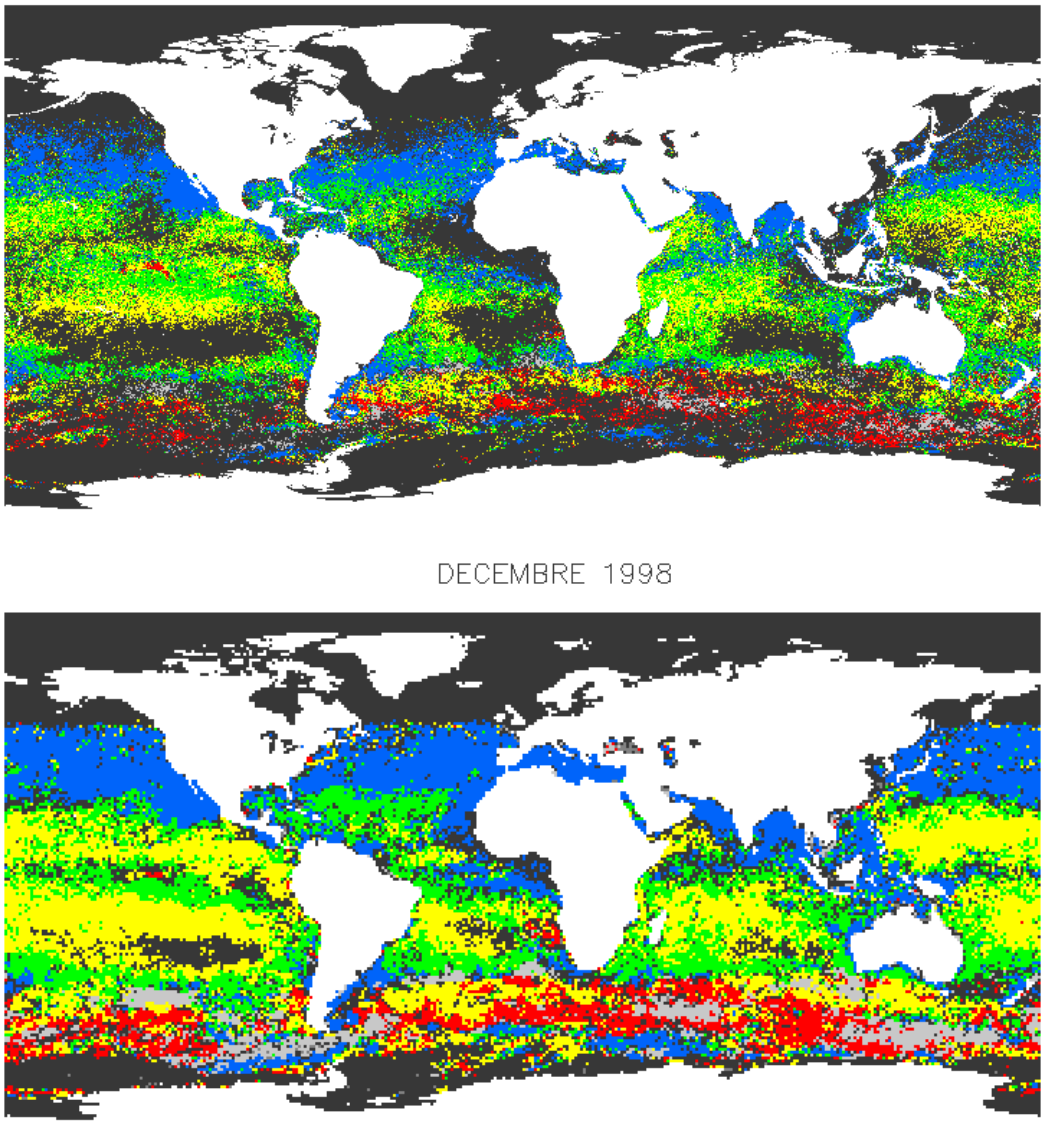


Figure 1.1 : *Synthèses mensuelles au ¼ de degré et au degré du groupe dominant le plus fréquent, obtenues à partir de cartes journalières à 9 km de résolution, par échantillonnage (passage de 9km à 1/4°), puis par groupe le plus fréquent (passage de ¼° à 1°), pour le mois de décembre 1998.*

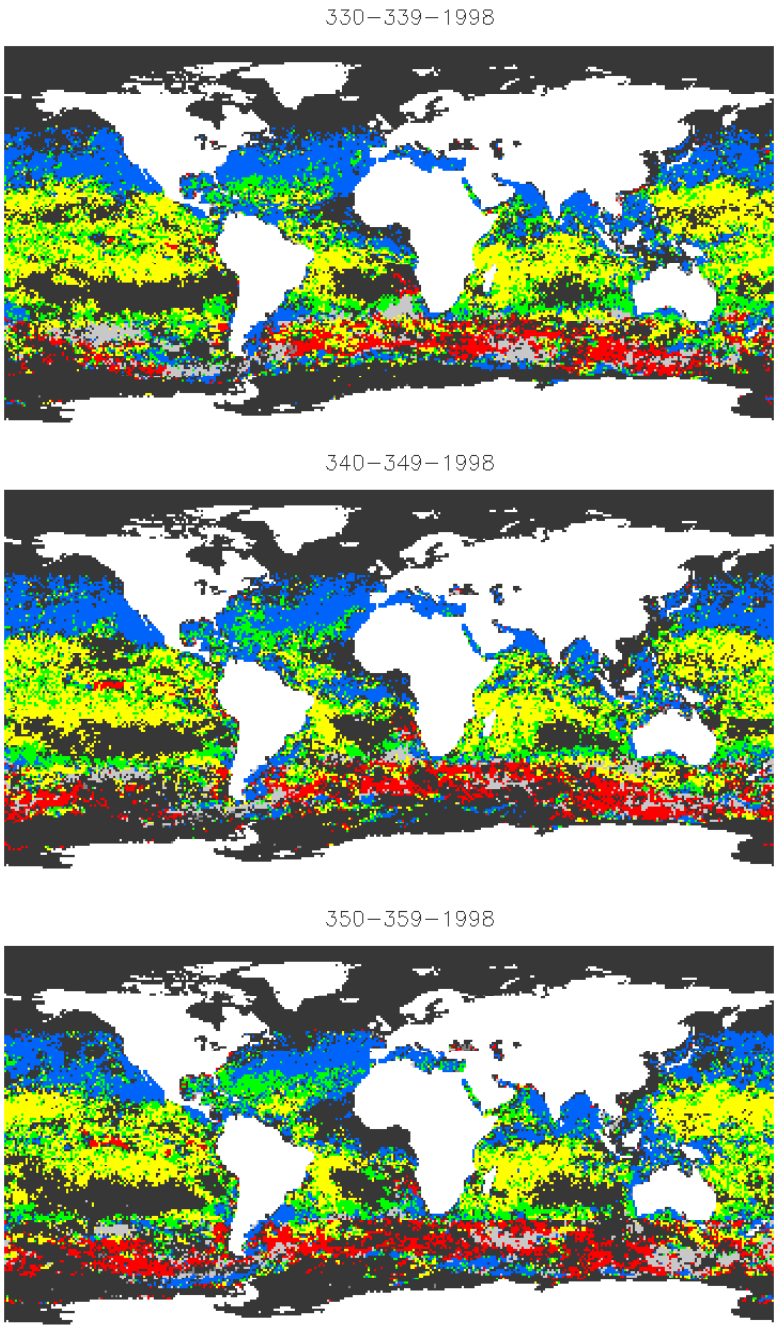


Figure 1.2 *: Synthèses décadaires des données PHYSAT, pour le mois de Décembre 1998. Malgré la présence plus nombreuse de régions non labellisées, notamment en raison de la présence nuageuse, les grandes structures de la synthèse mensuelle (Figure 1.1) sont déjà bien visibles.*

2. Utilisation de PHYSAT à haute résolution

Parmi les données SeaWiFS disponibles, il existe des données de niveau 2 à une résolution haute de 1 ou 4 Km. Ces données sont conservées suite à des commandes particulières d'utilisateurs et sont accessibles sur le site web de la NASA/GSFC/DAAC. Après une étude des régions disponibles, deux d'entre elles ont été choisies pour tester PHYSAT à 1km et 4km. Il s'agit de l'Est de la Méditerranée et de la région est de la Patagonie en Amérique du Sud, qui présentent l'avantage de ne pas avoir été trop nuageuses lors du passage de SeaWiFS. Le but étant de comparer les résultats de PHYSAT à plusieurs résolutions, les cartes sont présentées à 1km et /ou 4km, puis 9km, ¼ de degré et au degré de résolution.

Pour la Méditerranée (Figure 2.1), on observe les mêmes structures à toutes les résolutions. La Mer Noire est dominée par les coccolithophoridés avec quelques floraisons de diatomées au Nord et au Sud Ouest. L'Est de Méditerranée est dominé par des *Prochlorococcus* et des haptophytes au nord et le long des côtes. On note que les cartes au degré et au quart de degré ne permettent pas de visualiser certaines zones en raison du lissage. C'est notamment le cas des diatomées à la sortie du Nil, qui profitent certainement de l'apport en nutriments du fleuve.

Cette première étude tend à montrer que PHYSAT n'est pas négativement influencé par la résolution, en dehors du lissage des petites structures. L'utilisation des données à ¼ de degré, issues de la moyenne des données à 4 km et d'un échantillonnage ensuite, ne pose pas de problème de mauvaises labellisations. La seule différence est, comme pour tout changement de résolution, la perte d'information concernant la forme de certaines petites structures.

Le choix de la résolution à laquelle PHYSAT est appliqué doit donc être fait en fonction des applications souhaitées et de la finesse des structures de la région. Les régions connues pour être « mouvementées » au niveau des masses d'eau et des remontées de nutriments peuvent être avantageusement étudiées à haute résolution. Ainsi, l'utilisation de PHYSAT dans la région Est de la Patagonie, connue pour ses courants intenses et ses remontées d'eaux profondes et donc de nutriments, donne un résultat intéressant. La figure 2.2 montre des structures de différents groupes de phytoplancton qui se partagent cette région. Il apparaît à 1km, et pour la journée du 29/11/01, une structure de bloom de coccolithophoridés en forme de S que l'on retrouve également sur la carte en vraie couleur avec cette teinte turquoise particulière. Autour de cette structure on voit s'organiser, de façon nette et très peu bruitée, une structure de diatomées puis, plus au sud, de phaeocystis. Au nord, les haptophytes et les cyanobactéries sont également présents. On peut faire l'hypothèse que les différents groupes observés dans cette région apparaissent successivement, en fonction des nutriments restants et des conditions environnementales. Il est assez remarquable que les structures à 1km soient très peu bruitées, mettant en relief ici la bonne qualité des mesures SeaWiFS et du traitement PHYSAT.

Ces études montrent que PHYSAT peut s'appliquer à des données régionales très résolues spatialement ou à des cartes de résolution plus faible. On note que les cartes à 1 ou 4 Km peuvent être utilisées pour l'étude de structures fines ou pour des études de processus locaux. Le choix de la résolution, comme de la période ou de la moyenne spatiale doit donc se faire en fonction des besoins et des applications.

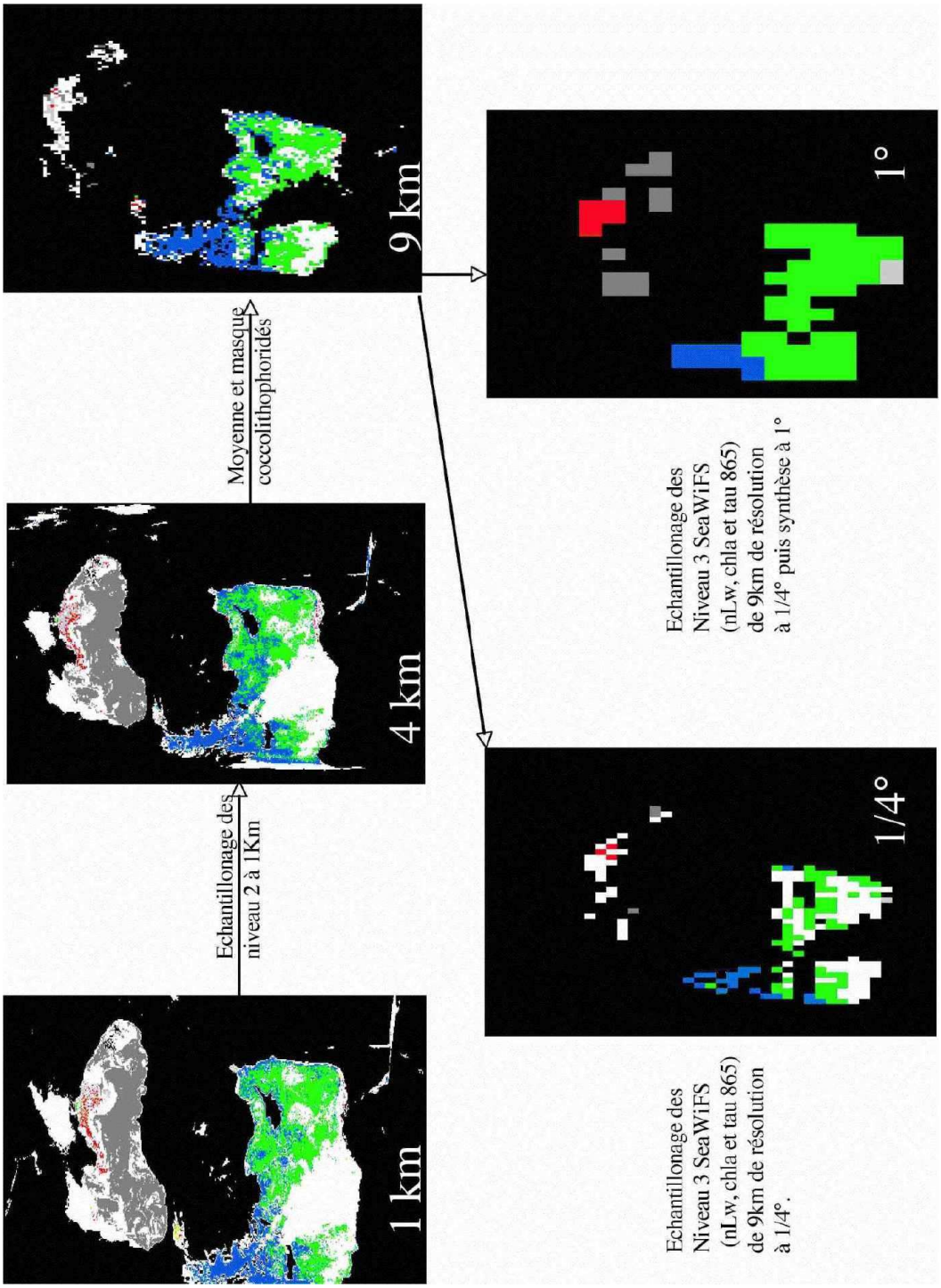


Figure 2.1: *Comparaisons des résultats de PHYSAT pour des résolutions de 1km, 4km et 9km (en haut), et ¼° et 1° (en bas) dans l'Est de la Méditerranée et sur la Mer Noire pour le 13/06/2000. Entre chaque image, les traitements et modifications appliquées aux données utilisées dans PHYSAT (nLw, chl a et tau 865),pour obtenir le résultat présenté, sont indiqués.*
Le code de couleur des groupes dominants et celui de PHYSAT : haptophytes en bleu, Prochlorococcus en vert, diatomées en rouge, coccolithes en gris foncé et phaeocystis en gris clair. Notons que le plus faible nombre de pixels labellisés « coccolithophoridés » en Mer Noire à ¼ de ° s'explique par le fait qu'il existe pour les niveaux 3 (9km et rééchantillonage au ¼°) un masque SeaWiFS non appliqué au niveau 2 (1 et 4Km), se reporter à la partie correspondante pour plus d'informations.

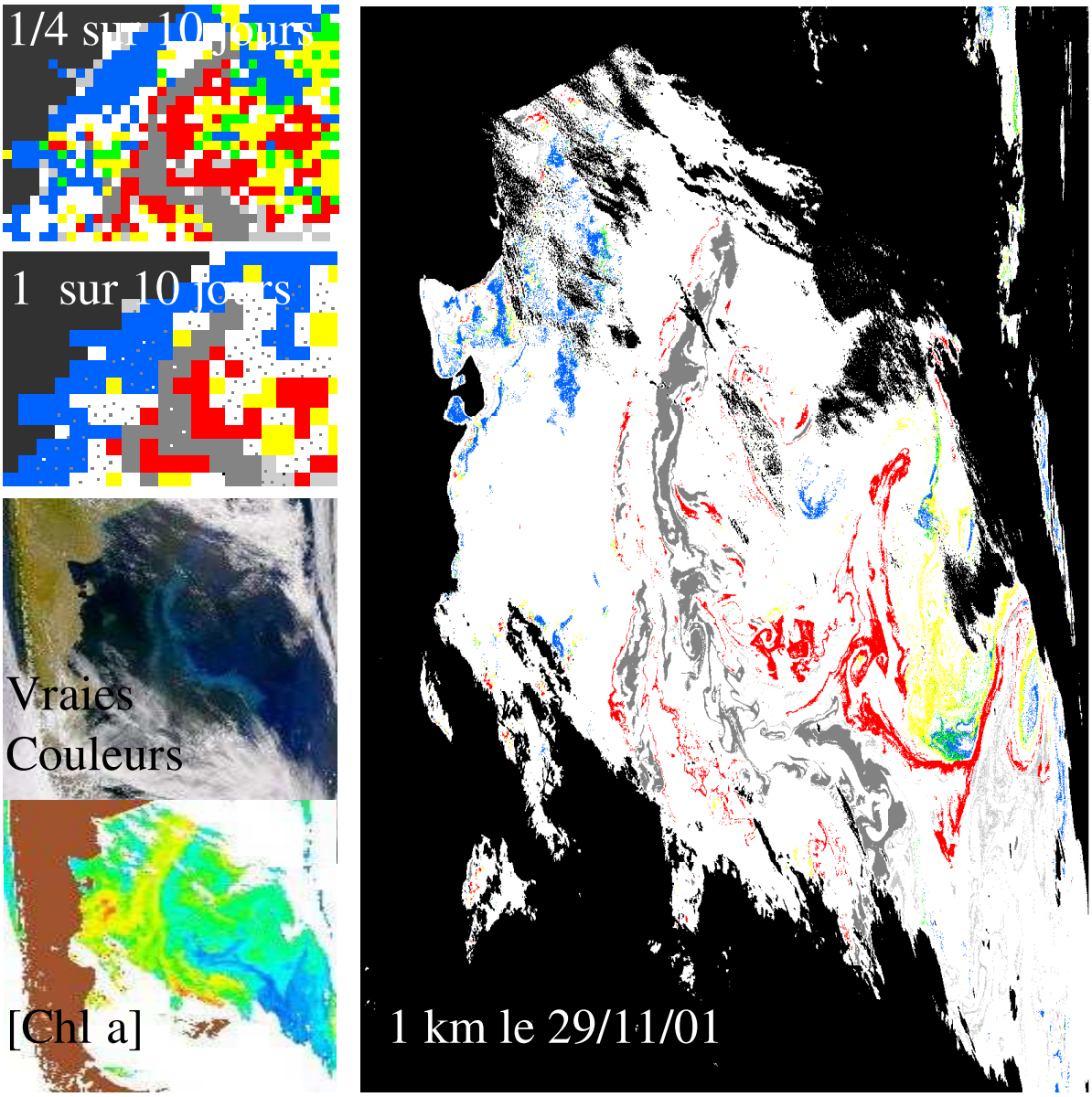


Figure 2.2 : *Exemple d'application de PHYSAT à la région Est de la Patagonie le 29/11/01, à partir de niveau 2 à 1 Km de résolution. En rouge les diatomées dominant, en bleu les haptophytes, en gris foncé les blooms de coccolithophoridés, en gris clair les phaeocystis et en jaune les cyanobactéries. Le noir représente les zones sans mesures et le blanc les régions non labellisées par PHYSAT tl que définit dans cette thèse.*
Sont également présents pour comparaison les résultats à ¼° et à 1° sur une synthèse de 10 jours (5 jours avant et 4 jours après le 29/11/01). En bas à gauche, la composition colorée du 29/11 qui indique déjà la présence de bloom de coccolithophoridés, et la carte de concentration en chlorophylle a de la région.
On observe des structures fines et bien délimitées à 1 Km de résolution dans cette région mouvementée. Les synthèses à plus faibles résolutions sur une période plus étendues permettent de retrouver les structures de façon correctes.

PHYSAT et IOPs

Ce qui a été mis en évidence lors de ma thèse, c'est un lien entre un signal spécifique de nLw* et la présence dans l'eau d'un groupe particulier. Cependant, nous ne savons pas à ce stade si les différences de spectres de nLw* s'expliquent par les interactions de la lumière avec les cellules de phytoplancton, ou/et avec les autres éléments de l'environnement qui y sont associés. Il est vrai qu'au sein même d'un groupe de phytoplancton, comme les diatomés par exemple, il existe une grande variété de formes, de couleurs, et même de composition pigmentaire. La taille des cellules et certains pigments spécifiques sont malgré tout les deux paramètres qui restent caractéristiques d'un groupe. Certaines études récentes ont d'ailleurs réussi à obtenir des résultats très intéressants à partir d'une démarche basé sur la taille des cellules (Uitz J. Thèse en cours). D'autres encore relient, pour le moment localement, les valeurs et variations de la chlorophylle *a* à un groupe donné (Moore et al. 2002, Aiken et al., 2000).

J'ai cependant montré dans ma thèse que la chlorophylle *a* ne permet pas de distinguer les différents groupes et que l'organisation des spectres de nLw en taille ne semble pas suivre une logique simple (haptophytes : nano, *Prochlorococcus* et SLC : pico, et diatomées micro phytoplancton). Comment donc expliquer ces signaux spécifiques ? Il existe tout un ensemble d'interactions possibles de la lumière avec l'eau et les particules qui s'y trouvent dont on ne connaît pas encore bien les effets. Il sera sûrement essentiel dans les années qui viennent de tenter de comprendre ce que PHYSAT nous indique par des études optiques plus poussées. Une autre voie possible est de poursuivre des études du type de celles effectuées depuis plusieurs années et qui visent à comprendre l'importance de la taille, de l'absorption ou de la rétro diffusion des différents groupes ou particules sur la lumière (Stramski et al, 1990, 2001 et 2004, Bricaud et al, 1983 ,1988, et 2004).

Expliquer ce qui est observé dans PHYSAT demandera certainement des années d'étude. Nous ne prétendons donc pas ici apporter une réponse exhaustive, nous présentons cependant quelques pistes ou début de réponses à ce qui entre en jeu dans les variations de nLw*.

1. PHYSAT et les propriétés optiques inhérentes (IOPs)

Une classification permettant d'organiser les propriétés optiques des milieux naturels comme l'océan a été développée par Preisendorfer au début des années 60. Elle comporte deux grandes catégories : les propriétés inhérentes (IOPs) qui vont nous intéresser par la suite, et les propriétés apparentes (AOPs). Les AOPs dépendent des constituants du milieu et de leur structure (taille, forme) mais aussi de l'éclairement imposé. Ainsi, lors de son interaction avec la matière, le flux de photons, qui constitue la lumière incidente, peut être absorbé ou dispersé par diffusion. Les études de cette annexe portent sur deux IOPs qui dépendent de la nature du milieu : il s'agit du coefficient d'absorption $a(\lambda)$ en m^{-1} et du coefficient total de rétrodiffusion $b_b(\lambda)$ en m^{-1} qui intègrent la diffusion dans les directions opposées à celle de la lumière incidente. Le principe d'additivité s'applique pour ces deux IOPs. Cela permet de décomposer chaque coefficient en la somme des coefficients d'absorption ou de diffusion des constituants du milieu.

`

Ainsi, $a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_p(\lambda) + \mathbf{a_{cdom}(\lambda)} + a_m(\lambda)$ et $b_b(\lambda)=b_{bw}(\lambda)+\mathbf{b_{bp}(\lambda)} + b_{bm}(\lambda)$ **(1.1)**

Avec les indices w, p, cdom et m qui font référence respectivement à l'eau de mer pure, au matériel particulaire (le phytoplancton et les particules associés dans l'océan ouvert), aux matières organiques dissoutes et au matériel minéral.

Il existe depuis plusieurs décennies (Yentsch 1962) des mesures d'absorption particulaire dans

l'eau de mer. Certaines de ces mesures ont montré que les organismes phytoplanctoniques pouvaient représenter jusqu'à 25% de l'absorption du milieu dans les longueurs d'ondes proches de 440nm (Ahn et al., 1990). On sait également que l'absorption du phytoplancton dépend du contenu en chlorophylle *a* mais aucunes relations nettes n'a encore pu être établies à ce jour entre les deux paramètres (Bricaud et al. 1998). Des études récentes tendent plutôt à montrer qu'en plus du contenu en chlorophylle *a,* la taille et la structure des communautés du phytoplancton jouent un rôle non négligeable dans les variations observées (Bricaud et al. L986, l990 et 2004).
Ainsi la question des liens entre les IOPs, les organismes phytoplanctoniques et les éléments associés n'est actuellement pas encore résolue. Toutes nouvelles informations dans ce domaine sont essentielles et c'est pourquoi nous allons tenter, dans la suite de ce chapitre, de mettre en évidence des liens empiriques entre groupes de phytoplancton et coefficient d'absorption et de rétrodiffusion.

2. Absorption, retrodiffusion et groupes dominants

Je n'ai pas eu le temps pendant ma thèse de réaliser une étude très poussé des relations entre absorption, retrodiffusion et groupes dominants. J'ai cependant réalisé une première étude, plus rapide, consistant à calculer les valeurs du coefficient d'absorption du phytoplancton, a_p, et de rétrodiffusion , b_b, d'après la méthode de Loisel et al, (2000) pour chaque spectre de luminance SeaWiFS colocalisé à un inventaire GeP&CO. J'ai donc utilisé les équations 2.1 et 2.2 présentée ci-après.

$$a_p(\lambda)= ((mu_w*K(\lambda))/(1 + h_{mu}*Ref(\lambda)/(1-Ref(\lambda)))^0.5) - a_w \quad \textbf{(2.1)}$$
$$b_{bp}(\lambda)=K(\lambda)* 10^\delta* Ref(\lambda)^\delta - b_{bw} \quad \textbf{(2.2)}$$

Avec : mu_w = cos (asin(sin(45)/1.34))
K(490)= 0.022 + 0.1*(nLw(443)/nLw(555))^(-1.29966)
K(412)= 1.7591*K(490)-0.0194
K(443)= 1.5169*K(490)-0.0162
K(510)= 0.8970*K(490)+0.011
K(555)= 0.6290*K(490)+0.046
h_{mu} = h_{mu}= 2.54-6.54*mu_w + 19.89*mu_w^2
Ref(λ) = nLw(λ)*180/(0.54*Fobar(λ))
a_w= [0.00473, 0.00775, 0.0150, 0.0325, 0.0592] pour les longueurs d'onde 412,443,490,510 et 555 nm
b_{bw}=[0.00340, 0.00235, 0.00155, 0.00130, 0.000925] pour les longueurs d'onde 412,443,490,510 et 555 nm
Fobar = [170.79, 189.45, 193.66, 188.35, 185.33] pour les longueurs d'onde 412,443,490,510 et 555 nm
α=(-0.83+5.34*ε-12.26*ε^2)+mu_w*(1.013-4.124*ε+8.088*ε^2)
δ=0.871+0.40*ε-1.83*ε^2
ε= 0.05

Pour éliminer la variabilité de ces paramètres due à la chlorophylle *a*, nous avons utilisé pour les études qui suivent des valeurs relatives de a_p et de b_{bp} définies par

$$a_p *= a_p /[chl\ a]$$
$$\text{et} \quad b_{bp} *= b_{bp} /[chl\ a] \quad \textbf{(2.3)}$$

Notons que, dans la suite de cette étude, les notations $a_p(\lambda)*$ et $b_{bp}(\lambda)*$ seront simplifiées en a_{p*} et b_{bp*} pour plus de facilité de lecture.

Les valeurs de a_{p*} en fonction des différents groupes PHYSAT sont présentées dans la figure 2.1 et pour b_{bp*} dans la figure 2.2. On ne retrouve pas de signal spécifique facilement identifiable pour les différents groupes de phytoplancton. On peut seulement noter que les haptophytes et les diatomées ont

tendance à être associées à des eaux de plus fortes valeurs d'absorption que les *Prochlorococcus* et les SLC. Cela s'explique peut-être par le fait que les haptophytes et diatomées sont des groupes d'eaux plus riches, donc avec plus de matières dissoutes qui influencent fortement les valeurs d'absorption, surtout aux longueurs d'onde plus courtes (Morel et al, 1988, Loisel et al. 2002, Stramski et al, 2004).

En revanche, les valeurs de rétrodiffusion gardent un caractère spécifique pour chaque groupe. Les diatomées sont les plus rétro-diffusantes. Viennent ensuite, les cyanobactéries et les *Prochlorococcus* en parallèle avec les haptophytes. Ces derniers sont également associés à une pente spécifique entre 412 et 443. Cela tend donc à confirmer l'hypothèse qu'une partie de la variabilité des spectres de nLw* s'explique par les variations des valeurs de rétrodiffusion.

Il n'existe pas actuellement de mesures de laboratoire des valeurs de retrodifusion et/ou d'absorption pour différents groupes suffisamment étoffées et correspondant à nos besoins. Il n'est donc pas possible, pour le moment, de valider ces résultats, mais cela sera bien sûr nécessaire dès que possible

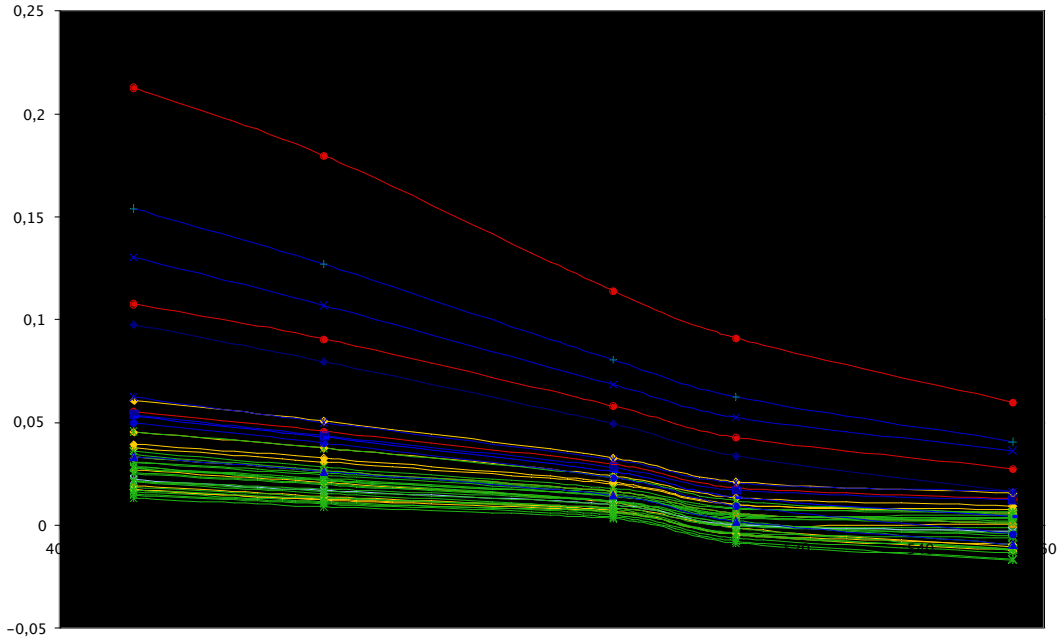


Figure 2.1: *Valeurs d'absorption spécifique (en ordonnées) pour la plage de longueurs d'onde SeaWiFS en fonction des groupes PHYSAT. Les courbes rouges correspondent aux points labellisés diatomées, en bleu les haptophytes, en vert Prochlorococcus et en jaune les cyanobactéries.*

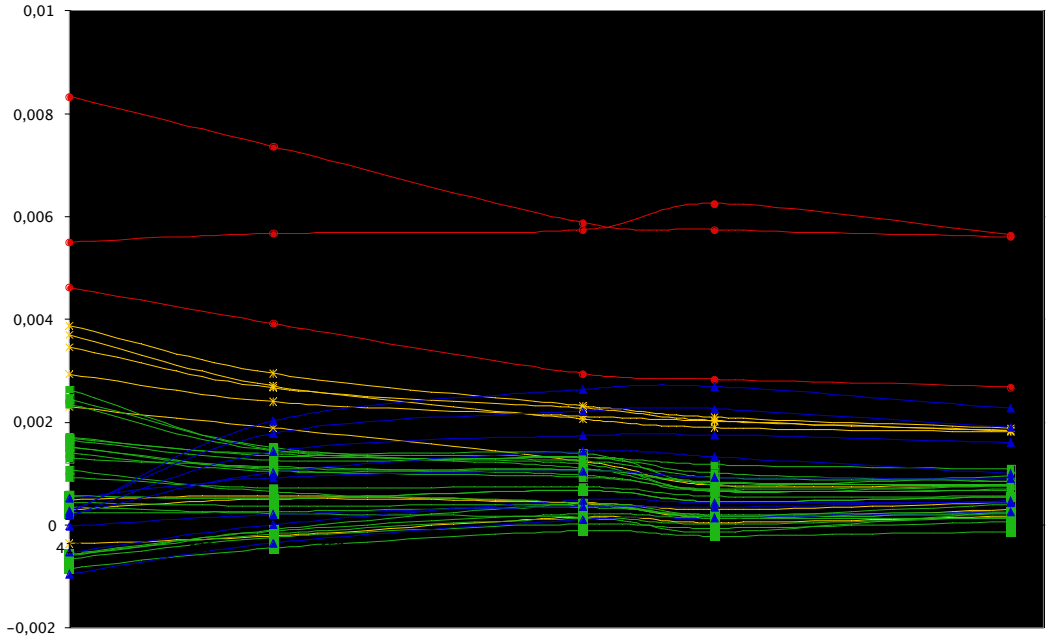


Figure 2.2 : *Valeurs de rétrodiffusion spécifiques (en ordonnées) pour la plage de longueurs d'onde SeaWiFS en fonction des groupes PHYSAT. Les courbes rouges correspondent aux points labellisés diatomées, en bleu les haptophytes, en vert Prochlorococcus et en jaune les cyanobactéries.*

3. Premières études de sensibilité

Pour simplifier les équations (1.1) et réaliser les premiers tests présentés ci-après, les IOPs sont supposés être liés uniquement à l'eau de mer pure et à l'ensemble des éléments particulaires et dissous associés aux groupes phytoplanctoniques. On suppose également que les particules minérales dans l'océan ouvert sont négligeables.

L'objectif de cette étude de sensibilité est d'étudier l'influence des variations de a_{cdom} et de b_{bp} sur les spectres de luminances normalisées de PHYSAT. Ces deux paramètres sont en effet connus pour influencer fortement l'observation par satellite (Morel et al., 1988 ; Siegel et al. 2001, Vaillencourt et al., 2004), et peuvent donc être potentiellement un facteur d'erreur pour la méthode PHYSAT. Quels sont les influences de ces variations sur la classification des groupes phytoplanctoniques dominants ? Est-il possible de passer d'une classe à l'autre en changeant uniquement les valeurs de a_{cdom} ou de b_{bp} ?

Pour répondre à cette question, une étude de sensibilité à été effectuée à partir de la relation suivante :

Pour une concentration en chlorophylle *a* donnée et à toutes les longueurs d'onde, on a :

$$nLw^* = (nLw / nLw_{moy}) \approx bb_{tot}/(a_w + a_{phy} + a_{cdom}) \quad (3.1)$$
$$\approx (bb_w + bb_p) / a_{tot} \quad (3.2)$$

L'étude des variations de nLw* dans (3.1) et de (3.2), aux variations respectives de a_{cdom} et de bb_p, en fixant d'après la littérature les autres paramètres, doit donc nous permettre d'évaluer la sensibilité de PHYSAT.

Les différentes variables de (3.1) et (3.2), pour des [chla] de 0.3 mg.m-3 et 2mg.m-3, sont obtenues à partir de diverses bases de données et références résumées dans le tableau 3.1.

	412	**443**	**490**	**510**	**555**	**Réf.**
nLw_{moy} 0.3	2.85	2.27	1.32	0.65	0.25	LUT Physat
nLw_{moy} 2.0	0.33	0.48	0.66	0.67	0.618	LUT Physat
Bb_{tot} 0.3	$5.5.10^{-3}$	$4.3.10^{-3}$	$3.2.10^{-3}$	$2.8.10^{-3}$	$2.3.10^{-3}$	Lee et al. 96
Bb_{tot} 2.0	$2.5.10^{-2}$	$2.3.10^{-2}$	$2.2.10^{-2}$	$2.1.10^{-2}$	2.10^{-2}	Lee et al. 96
a_w	$4.6.10^{-3}$	$7.1.10^{-3}$	$1.5.10^{-2}$	$3.3.10^{-2}$	6.10^{-2}	Pope & Fry 97
a_{phy} 0.3	$4.1.10^{-3}$	$5.5.10^{-3}$	$3.8.10^{-3}$	$1.9.10^{-3}$	$0.5.10^{-3}$	Lee et al.96
a_{phy} 2.0	$6.7.10^{-2}$	$7.3.10^{-2}$	$5.3.10^{-2}$	4.10^{-2}	2.10^{-2}	Lee et al.96
a_{cdom} 0.3	0.03	0.019	0.01	0.008	0.004	Bricaud et al. 81
a_{cdom} 2.0	0.078	0.05	0.026	0.0198	0.01	Bricaud et al. 81
a_{tot} 0.3	$1.5.10^{-2}$	$1.7.10^{-2}$	$2.1.10^{-2}$	$3.6.10^{-2}$	6.10^{-2}	Lee et al.96
a_{tot} 2.0	0.43	0.31	0.17	0.15	0.12	Lee et al.96
bb_w	$3.2.10^{-3}$	$2.3.10^{-3}$	$1.5.10^{-3}$	$1.3.10^{-3}$	$0.92.10^{-3}$	Pope & Fry 97
bb_p 0.02	0.022	0.022	0.022	0.022	0.022	Morel 2001
bb_p 0.01	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	Morel 2001
bb_p 0.005	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	Morel 2001

Tableau 3.1: *Valeurs des paramètres utilisés pour l'étude de sensibilité, pour les différentes longueurs d'onde SeaWiFS. Les chiffres de la colonne de gauche correspondent aux valeurs de chl a correspondantes. Les références utilisées sont présentées dans la colonne de droite.*

On note que la référence Bricaud et al., 1981 du tableau 3.1 correspond à l'utilisation de la formule :

$$a_{cdom}(\lambda)=a_{cdom}(412)\ e^{-0.014(\lambda-412)}.\ (3.3)$$

Avec $a_{cdom}(412)$ qui vaut 10% de la valeur de [chl-a] à 0.3 mg.m^{-3} et 4% à 2 mg.m^{-3} d'après Bricaud et al., 1998.

De même, la référence « Morel, 2001 » dans le tableau correspond à l'utilisation de la formule :

$$bbp(\lambda)= [0.002+0.01(0.5-0.25Log[chla]\ldots]\ (3.4)$$
$$\approx [0.002+ (0.02 \text{ OU } 0.01 \text{ OU } 0.005)].$$

3.1. Sensibilité des spectres de nLw à l'absorption par les matières organiques dissoutes*

L'étude de sensibilité des spectres de nLw* aux variations de a_{cdom} a été effectuée à partir de l'équation 3.1, pour deux valeurs de concentration en chlorophylle *a* : 0.3 mg.m-3 et 2 mg.m-3, et pour des coefficients multiplicatifs de la valeur initiale de a_{cdom} (voir table 2.1) allant de 0.2 à 3.

Les résultats obtenus pour 0.3 mg.m^{-3} sont présentés dans la figure 3.1. On note que les spectres de nLw* sont nettement plus sensibles à une variation de a_{cdom} aux courtes longueurs d'ondes qu'aux plus grandes, et cela quelque soit le coefficient appliqué à la valeur de a_{cdom} initiale. Le même test a été réalisé pour une chlorophylle *a* de 2mg.m-3. Il nous donne les résultats présentés dans la figure 3.1, similaires à ceux obtenus pour 0.3 mg.m^{-3}.

	0.2	**0.5**	**0.8**	**1**	**1.5**	**2**	**3**
412	76	37	13	0	-21	-34	-51
443	33	28	4	0	-24	-29	-49
490	28	16	7	0	-12	-22	-35
510	23	14	3	0	-9	-16	-30
555	8	5	3	0	-5	-9	-18

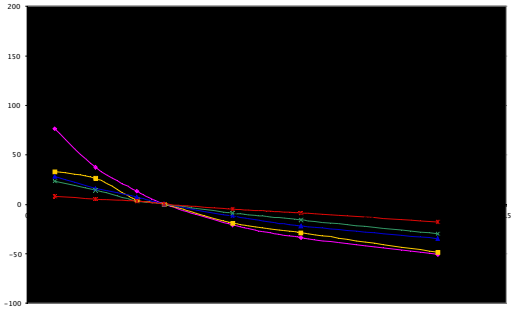


Figure 3.1*: Pourcentages des variations de nLw* aux différentes longueurs d'onde et pour différents coefficients multiplicatifs appliqués à a_{cdom}. Calculs effectués pour [chla]=2.0 mg.m^{-3} et $a_{cdom}(412)$=0.03.*

Il est très net que la sensibilité des spectres de nLw* est bien plus élevée aux faibles longueurs d'ondes. L'objectif suivant et donc d'étudier l'influence de la sensibilité de nLw* aux variations de a_{cdom} sur le résultat de la méthode PHYSAT. Pour cela on peut, par exemple, quantifier l'augmentation ou la diminution de a_{cdom} nécessaire pour faire passer un spectre moyen d'une de chaque classe de phytoplancton PHYSAT à la classe voisine supérieure, ceci étant fait pour chaque longueur d'onde.

Les tests suivants sont réalisés pour une [chla] = 0.3 mg.m-3.

Ainsi, pour passer du spectre nLw* moyen définissant les Haptophytes au spectre minimum des *Prochlorococcus* (sans tenir compte au premier ordre des critères de pente) il faut diminuer le a_{cdom} d'un facteur compris entre 1.5 et 2. En dehors de ces valeurs, le spectre reste haptophytes ou devient non classé.

Si on ne diminue pas assez a_{cdom}, le spectre aux grandes longueurs d'onde ne passe pas le seuil minimum des *Prochlorococcus*. Au-delà, en revanche, c'est à 412 que le problème se pose avec un dépassement de la valeur maximale du spectre des *Prochlorococcus* (le spectre se tord).

Pour passer du spectre moyen *Prochlorococcus* au spectre minimum des cyanobactéries, il faut diminuer a_{cdom} d'un facteur compris entre 3 et 5. Comme précédemment, en dehors de ces limites, on ne change pas de classe ou le signal se tord de façon trop importante.

Le passage du spectre moyen cyanobactéries au spectre diatomées minimum n'est pas possible car on ne peut pas changer de classe à 510 et 555 en diminuant le a_{cdom}.

Les tests suivants sont réalisés pour une [chla] = 2 mg.m-3

Les mêmes tests effectués pour une valeur de chlorophylle *a* plus élevée donnent des résultats identiques. Seules les plages de variations du coefficient multiplicatif de a_{cdom} changent. Ainsi, pour passer du spectre moyen haptophytes à un spectre *Prochlorococcus,* il faut diviser a_{cdom} par une valeur comprise ente 1.7 et 2. Pour le spectre moyen *Prochlorococcus* vers un spectre SLC, il faut diviser a_{cdom} par une valeur entre 1.2 et 2. Pour passer du spectre moyen cyanobactéries à un spectre diatomées les variations de a_{cdom} ne sont pas suffisantes

Il est donc possible de passer du spectre d'un groupe à un autre en changeant la valeur de a_{cdom}. Cependant cela concerne un faible intervalle de coefficient de diminution de a_{cdom}. Cela est en grande partie dû à la plus forte sensibilité des faibles longueurs d'onde aux variations de a_{cdom}.

3.2 Sensibilité des nLw aux variations du coefficient de rétrodiffusion*

On considère maintenant les formules (3.2.) et (3.4) grâce auxquelles les trois tests de sensibilité présentés ci-après ont été réalisés :

$$nLw^*=(nLw / nLw_{moy}) \approx (bb_w+bb_p) / a_{tot} \qquad (3.2)$$

avec : $bbp(\lambda)= [0.002+0.01(0.5-0.25Log[chla]\ldots]$

soit pour notre étude, les trois possibilités suivantes :

$$bbp(\lambda) \approx [0.002+ (0.01 \text{ ou } 0.02 \text{ (x2) ou } 0.005 \text{ (/2)})].$$

En calculant les nLw* pour chaque longueur d'onde, et dans les trois cas ci-dessus, on peut quantifier les pourcentages de variation des spectres de nLw* lors du passage de bbp de 0.01 à 0.02 et de 0.01 à 0.005. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous:

Δ bbp	**412**	**443**	**490**	**510**	**555**
0.01->0.02 [chla]=2mg.m^{-3}	40	42	41	42	43
0.01->0.02 [chla]=0.3mg.m^{-3}	46	42	41	42	42

0.01->0.005 [chla]=2mg.m^{-3}	-34	-36	-37	-38	-38
0.01->0.005 [chla]=0.3mg.m^{-3}	-33	-35	-37	-38	-39

Table 4.1 *: Pourcentages des variations des nLw*, aux différentes longueurs d'onde, lors d'un doublement ou d'une réduction de moitié de la valeur du coefficient bbp, pour des concentrations en chlorophylle a de 2 ou 0.3 mg.m^{-3}.*

On note que, contrairement à l'effet de la variation de a_{cdom}, les variations de b_{bp} engendrent des variations de spectres de nLw* spectralement plates. On ne verra donc pas apparaître de distorsion de spectre de nLw* lors des variations de b_{bp}, mais seulement un changement d'amplitude. Ceci favorise le passage d'une classe à l'autre, mais le b_{bp} étant en grande partie lié à la forme et à la taille des cellules et donc au groupe de phytoplancton présent dans l'eau au moment de la mesure, cela paraît positif. Il est donc raisonnable de penser que les variations de b_{bp} sont prises en compte dans la méthode PHYSAT, un changement de b_{bp} étant potentiellement lié à un changement de groupe. Les variations des spectres de nLw* seraient donc plus particulièrement liées à la forme et à la taille des cellules présentes dans l'eau au moment de la mesure. On peut penser que les déchets associés à un groupe de phytoplancton sont du même ordre de grandeur que lui. D'autres études dans ce sens seront nécessaires pour quantifier et expliquer plus finement le rôle des cellules et des éléments associés sur les variations de $b_{bp.}$

Applications de PHYSAT à d'autres capteurs : premiers tests

Plusieurs satellites dédiés à l'étude de la couleur de l'eau ont été lancés dans le but de compléter et de poursuivre les observations SeaWiFS. On dispose ainsi actuellement des observations provenant du capteur MODIS. Ce dernier et en fait composé de deux capteurs distincts, dont l'un prend des mesures le matin (Terra) et l'autre l'après-midi (Aqua). Les données ainsi acquises ont une résolution de 1 Km et sont disponibles par ftp à tous les utilisateurs enregistrés. J'ai donc téléchargé au LSCE quelques-unes de ces données pour effectuer une première comparaison avec SeaWiFS. Lors de la réalisation de ce travail, les données SeaWiFS étaient disponibles jusqu'au 31/12/2004 car la NASA ne devait plus fournir ces données au-delà. Même s'il est aujourd'hui question de mettre de nouveau à disposition ces données, les résultats présentés ici sont des comparaisons entre les années 2004 de SeaWiFS et 2005 de MODIS ou de décembre 2004 pour les deux capteurs.

La première étape de ce travail a consisté à recalculer une table de valeurs moyennes de luminances, pour chaque petit intervalle de chlorophylle *a*, adaptée à MODIS. Dans le cadre de ce test, la table à été réalisée avec relativement peu de données par rapport à celle utilisée pour SeaWiFS. En effet, seuls les jours téléchargés pour le test ont été utilisés, soit 5 jours en décembre 2004 et 25 en Février 2005. Cette table a ensuite été utilisée pour normaliser les luminances MODIS, la méthode PHYSAT étant appliquée telle que définie dans le chapitre 4 par ailleurs. Notons que cette étape devra être réalisée pour toute utilisation future de PHYSAT, à chaque changement de capteur, de façon à obtenir une normalisation cohérente avec les données. Rappelons que nous travaillons ici sur les liens entre les « écarts » des luminances par rapport à un signal moyen qu'il convient de redéfinir pour chaque instrument.

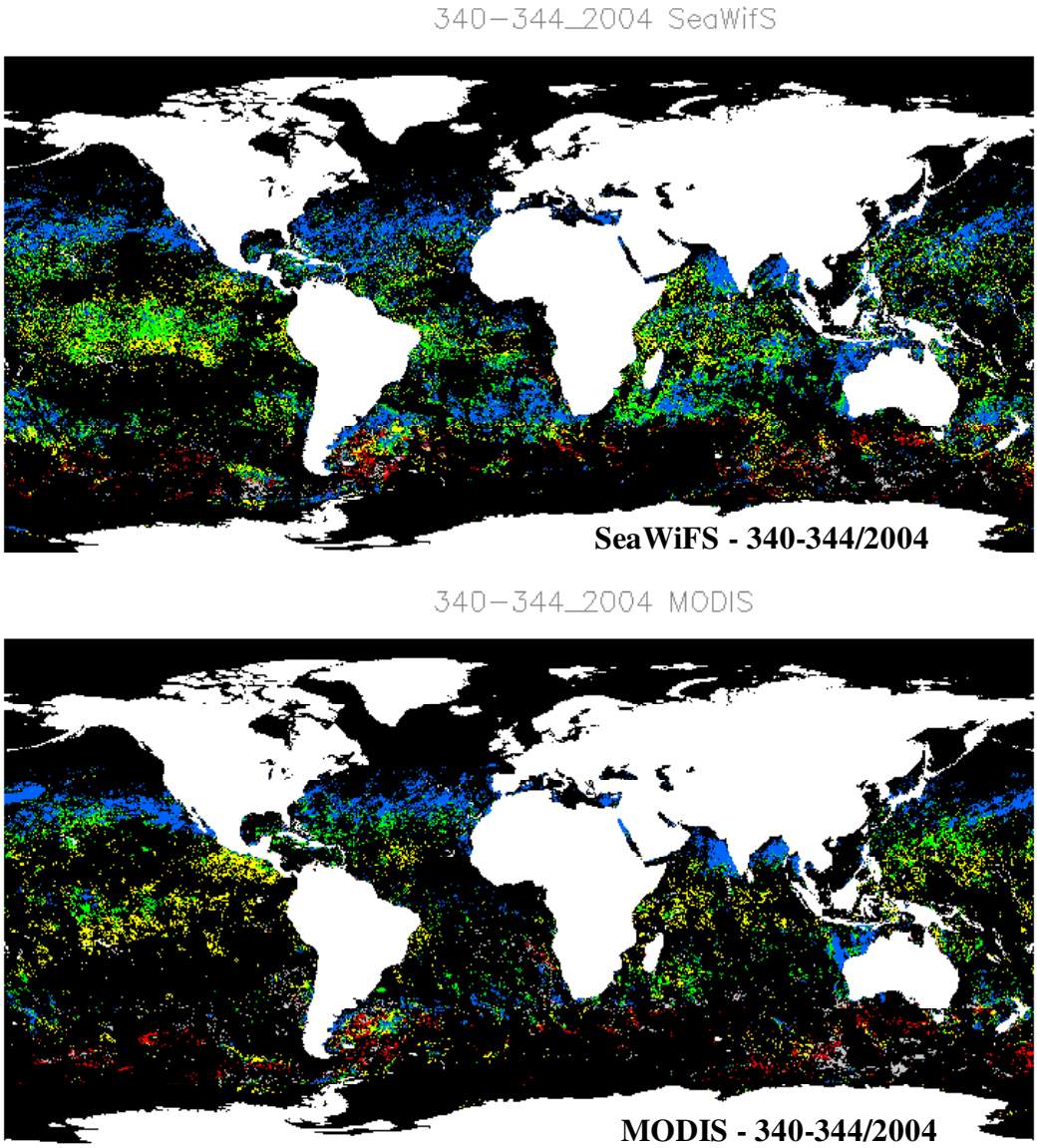
La première comparaison effectuée porte sur une synthèse des groupes de phytoplancton dominants sur 5 jours, en décembre 2004. Le résultat obtenu est présenté en figure 1. On observe une nette modification du nombre de pixels labellisés pour la synthèse réalisée à partir de MODIS par rapport à celle réalisée à partir des données SeaWiFS. Une étude rapide a permis de mettre en évidence des valeurs d'épaisseurs optiques, mesurées par MODIS, plus fortes. Ceci engendre une augmentation du nombre de pixels écartés par les seuils fixés dans la méthode PHYSAT. Il faudra peut-être baisser le seuil sur les épaisseurs optiques par la suite, après avoir vérifié que cela ne crée pas d'erreurs de classification supplémentaires. En dehors de cette différence, on observe un bon accord des résultats obtenus par PHYSAT à partir des mesures des deux capteurs. Les haptophytes (en bleu) sont toujours présents aux moyennes latitudes, les diatomées (rouge) dans l'Océan Austral sont également détectées, accompagnées des phaeocystis. On retrouve les structures des *Prochlorococcus* et SLC (en jaune et vert) aux basses latitudes. Tout cela est très encourageant même s'il sera nécessaire, à terme, de recalculer une LUT avec bien plus de données que celles utilisées ici, de façon à prendre en compte l'ensemble des signaux observés sur une année à l'échelle globale.

Un autre test à été réalisé pour le mois de février 2005, dans le cadre d'une étude comparative avec les données de terrain de la campagne en mer KEOPS dans la région de Kerguelen. Cette étude est toujours en cours, mais les données PHYSAT, appliquées aux données du mois de février 2005 de MODIS, peuvent d'or et déjà être utilisées pour comparaison avec les mois de février SeaWiFS des années précédentes. La figure 2 montre un très bon accord entre les observations PHYSAT de février, appliquées à MODIS en 2005 et à SeaWifS en 2004. Les structures de groupes sont bien conservées et ce résultat montre que la méthode PHYSAT peut certainement être appliquée à d'autres capteurs. On pense notamment à POLDER-1 qui nous donnerait accès au début de la période El Niño de 1997 (de novembre 96 à juin 1997). Malgré quelques limitations dues à un jeu de bandes spectrales différent (pas de 412 nm ni de 510 nm), il est également possible d'envisager l'application de PHYSAT au capteur CZCS (Coastal Zone Color Scanner) qui a couvert la période 1979-1986. En effet, quelques tests d'utilisation de PHYSAT sans la bande à 412nm ont donné des résultats très encourageants.

Tout cela peut être envisagé moyennant le calcul d'une table de nLw moyennes adaptée à chaque capteur, accompagnée chaque fois que c'est possible, d'études comparatives lorsque des périodes de recouvrement entre capteurs sont disponibles.

Cela ouvre la voie à de nombreuses applications, notamment en ce qui concerne l'explication de la variabilité de la quantification de la concentration en chlorophylle *a* sur les dernières décennies, potentiellement liée à des changements d'écosystèmes (Antoine et al. 2005 , Gregg et al, 2005). Ainsi, PHYSAT permettra peut-être, d'améliorer notre compréhension de la variabilité des groupes de phytoplancton en réponse au changement climatique, et de mieux en cerner l'impact.

Figure 1 : *Synthèses PHYSAT de 5 jours en décembre 2004, réalisées à partir de données SeaWiFS (en haut) et MODIS (en bas).*



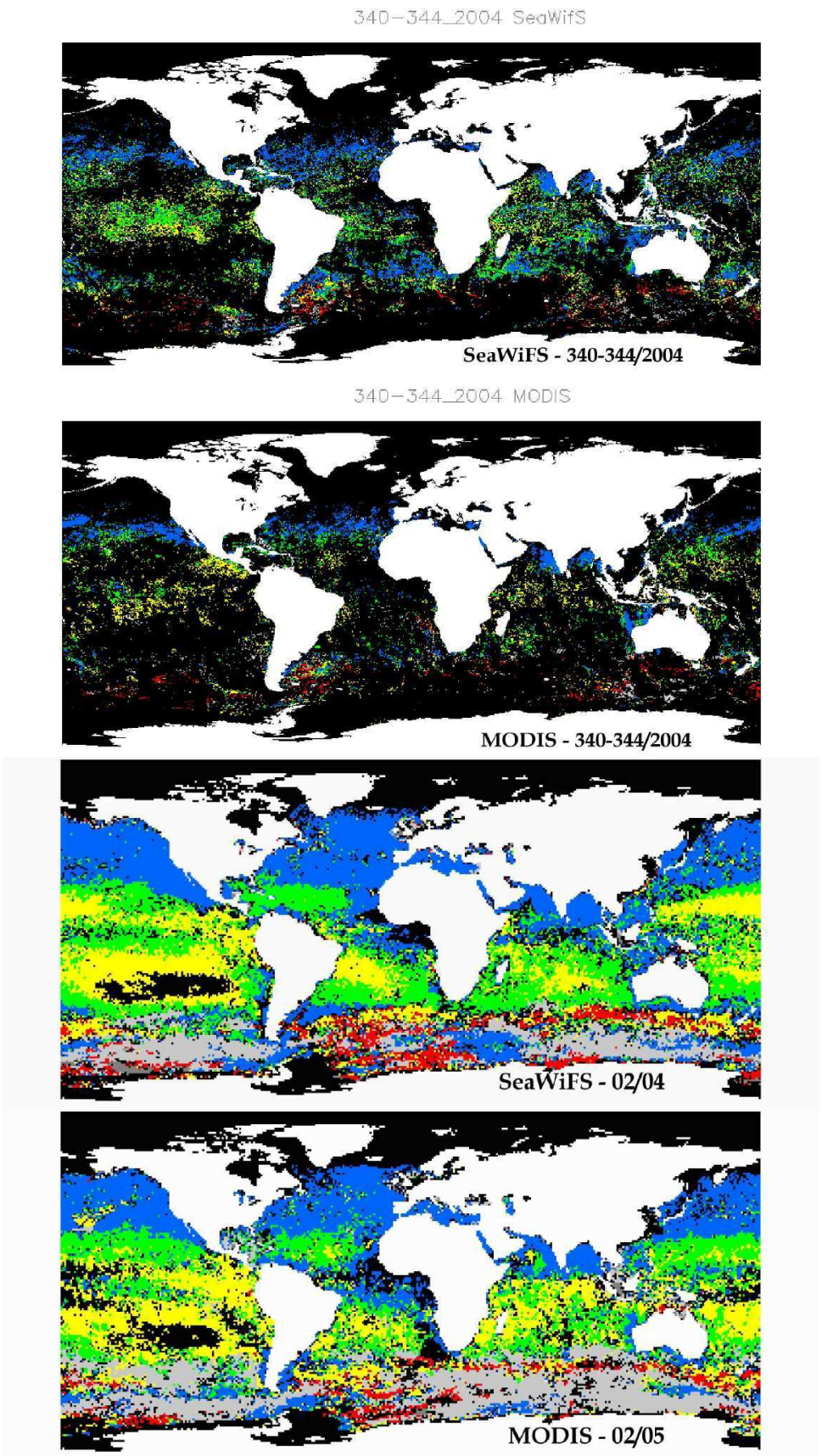


Figure 2 : *Cartes d'espèces dominantes, au quart de degré ou au degré, réalisées par la méthode PHYSAT à partir de données SeaWiFS et MODIS pour les mois de février 2005 et 2004 respectivement.*

ANNEXE 4

VALEURS DE LA TABLE UTILISEE POUR NORMALISER LES SPECTRES DE LUMINANCES SeaWIFS

Valeurs de $nLw_{ref}(\lambda, \text{Chl a})$ dans :

$$nLw^*(\lambda) = nLw(\lambda) / nLw_{ref}(\lambda, \text{Chl a})$$

Valeurs de [chl a]	$nLw_{ref}\lambda$ 412	$nLw_{ref}\lambda$ 443	$nLw_{ref}\lambda$ 490	$nLw_{ref}\lambda$ 510	$nLw_{ref}\lambda$ 555
0,01	3,68	2,76	1,37	0,60	0,20
0,02	3,52	2,66	1,39	0,65	0,23
0,03	3,43	2,61	1,43	0,69	0,27
0,04	3,28	2,53	1,44	0,72	0,29
0,05	3,00	2,37	1,43	0,74	0,31
0,06	2,41	2,03	1,30	0,69	0,29
0,07	2,20	1,89	1,27	0,69	0,30
0,09	2,01	1,77	1,25	0,71	0,31
0,10	1,82	1,62	1,20	0,70	0,32
0,12	1,71	1,52	1,17	0,71	0,33
0,14	1,62	1,45	1,16	0,73	0,35
0,16	1,48	1,36	1,12	0,73	0,36
0,18	1,35	1,27	1,07	0,72	0,37
0,20	1,24	1,18	1,03	0,71	0,37
0,22	1,13	1,10	0,98	0,69	0,37
0,24	1,07	1,04	0,95	0,68	0,37
0,26	1,02	1,02	0,94	0,68	0,38
0,28	0,95	0,95	0,90	0,66	0,38
0,30	0,80	0,86	0,85	0,65	0,39
0,50	0,69	0,77	0,83	0,68	0,45
0,70	0,59	0,70	0,78	0,67	0,48
0,80	0,47	0,58	0,69	0,61	0,45
0,90	0,53	0,63	0,75	0,68	0,52
1,00	0,42	0,54	0,68	0,63	0,51
1,50	0,40	0,52	0,67	0,65	0,57
2,00	0,33	0,48	0,66	0,67	0,62
2,50	0,33	0,49	0,70	0,73	0,72
3,00	0,36	0,56	0,85	0,92	0,97
3,50	0,29	0,50	0,83	0,90	0,99
4,00	0,28	0,42	0,69	0,78	0,96

ANNEXE 5 : « Répartition et succession des groupes de phytoplancton dominants » d'après PHYSAT pour le Pacifique Nord, l'Océan Indien, la Méditerranée et « l'Atlantique AMT »

ANNEXE 5 - Complément du chapitre 5

Pacifique Nord

Le Pacifique Nord est dominé, en termes de surface couverte, et selon les saisons, par les haptophytes (40 à 85%), puis les *Prochlorococcus* (10 à 35%) les cyanobactéries (5 à 20%) et d'une façon moindre, par les diatomées (0 à 10%), les phaeocystis (0 à 5 %) et les coccolithophoridés (quelques %)(Figure A.1). L'importance des diatomées et des SLC est mise en relief lorsqu'on considère leurs contributions à la chlorophyll*e a* (Figure A.2), au détriment des *Prochlorococcus*. Ce résultat obtenu par la méthode PHYSAT est en accord avec les études in-situ locales (Campbell et al., 1994, Obayashi et al. 2001, Liu et al., 2004). Comme pour la majorité des régions étudiées, les haptophytes ont tendance à être de plus en plus présents sur la zone et les *Prochloroccus* et SLC sont en baisse (Tableaux A.1 et A.2). On note cependant que cette région est une des rares que nous avons étudiée ou étudierons par la suite pour laquelle les diatomées sont en légère hausse en termes de surface dominée.

Pacifique Nord	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Haptophytes	58.2	60.9	58.6	60.6	62.1	68.7	65.1
Prochlorococcus	25.4	23.7	24.4	23.4	23.3	19.6	17.6
SLC	11.7	10.5	12.2	11.1	10.2	7.4	12.3
Diatomées	2.2	2.5	2.5	2.	2.3	2.2	2.9
Phaeocystis	2.3	1.9	2.1	2.2	1.8	1.9	2.1
Coccolithophoridés	0.1	0.2	0.4	0.2	0.3	0.2	0.2

Tableau A.1 : *Pourcentages relatifs de surface labellisée pour chaque groupe et pour chacune des années sur la région considérée.*

Pacifique Nord	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Haptophytes	77.3	76.9	72.2	75.6	77	80	78
Prochlorococcus	8.3	7.3	9.2	8.2	8.2	6.6	5.6
SLC	6.5	7.3	8.9	8.1	7.6	6	9.9
Diatomées	3	5.7	5.5	3.9	4.5	4.7	4.7
Phaeocystis	2.9	2.3	3	3.7	2.3	2.4	1.4
Coccolithophoridés	1.9	0.5	1.2	0.5	0.4	0.2	0.4

Tableau A.2 : *Pourcentages relatifs de chlorophylle a pour chaque groupe et pour chacune des années sur la région considérée.*

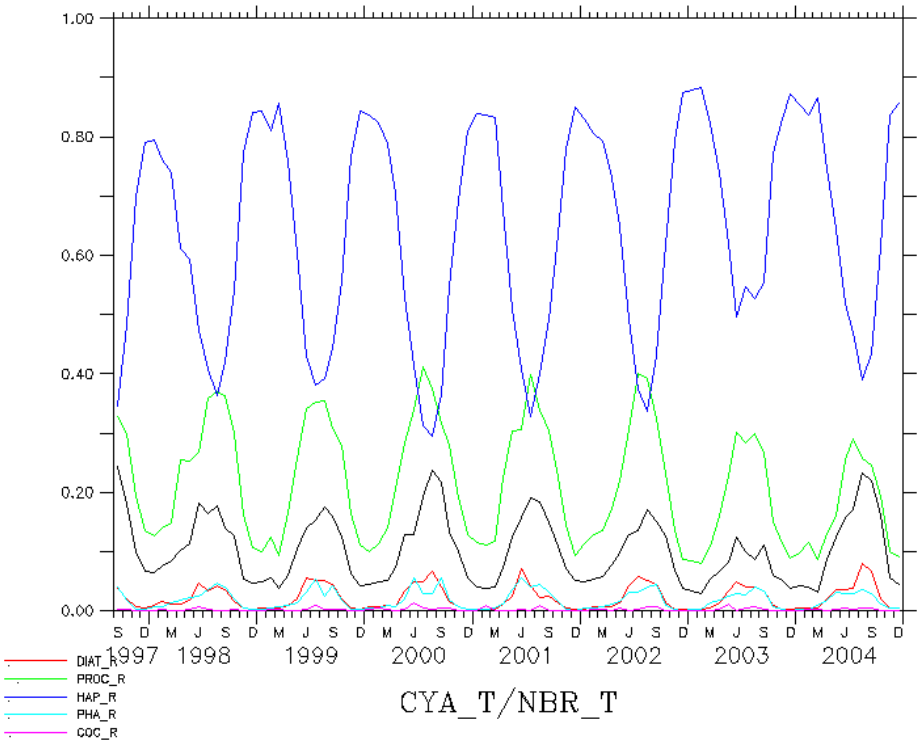


Figure A.1 *: Fraction mensuelle de la surface dominée pour chaque groupe (surface dominée par le groupe / surface totale dominée par un groupe), sur la période septembre 1997 – décembre 2004 dans le Pacifique Nord. En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende de couleur en bas à gauche.*

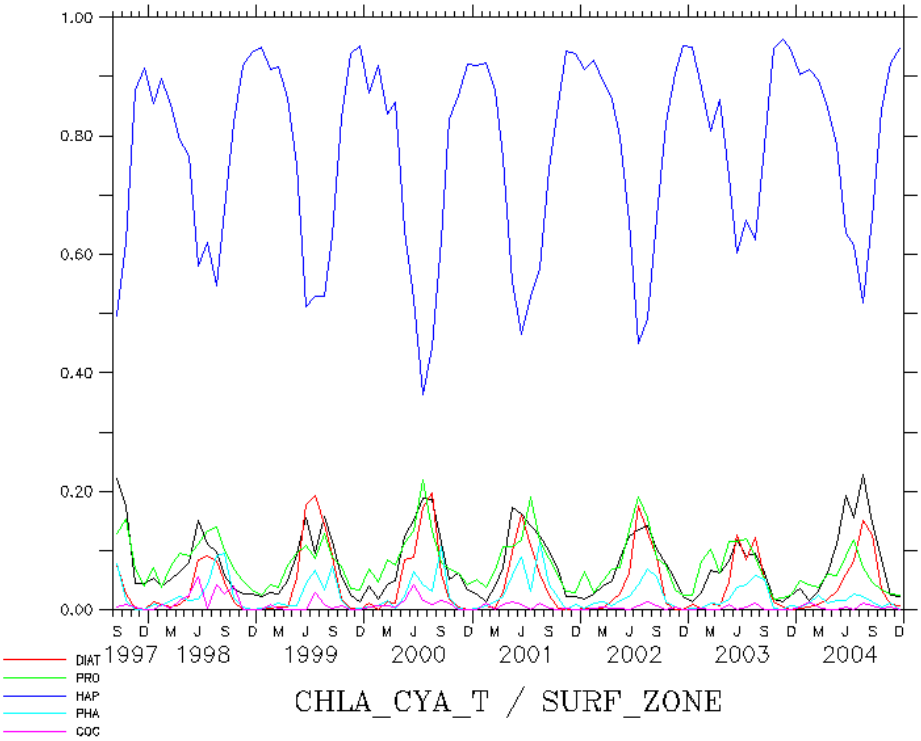
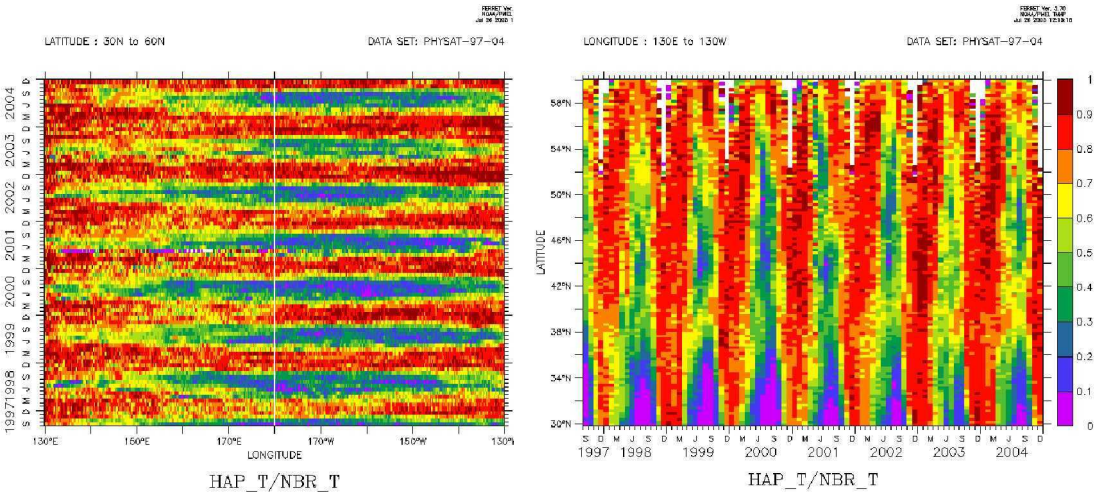
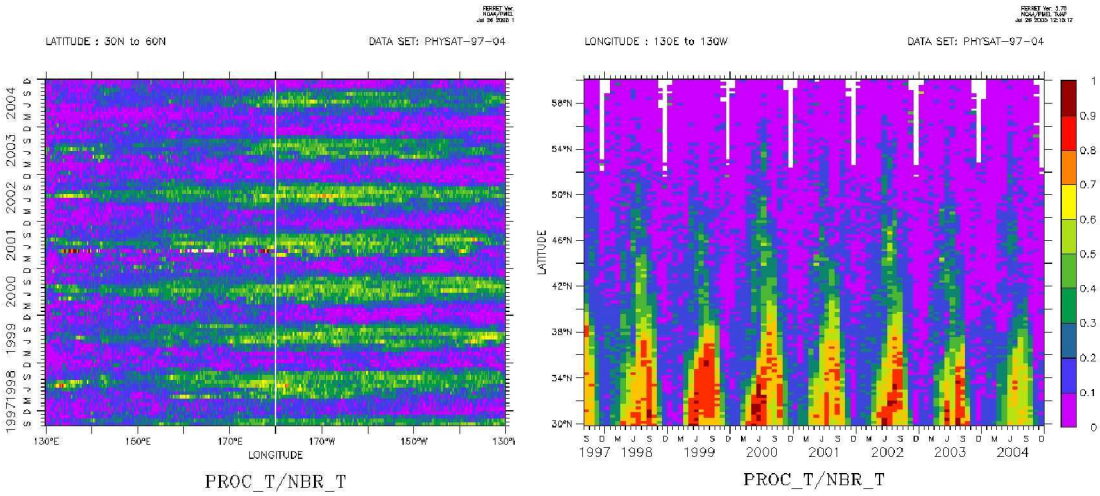


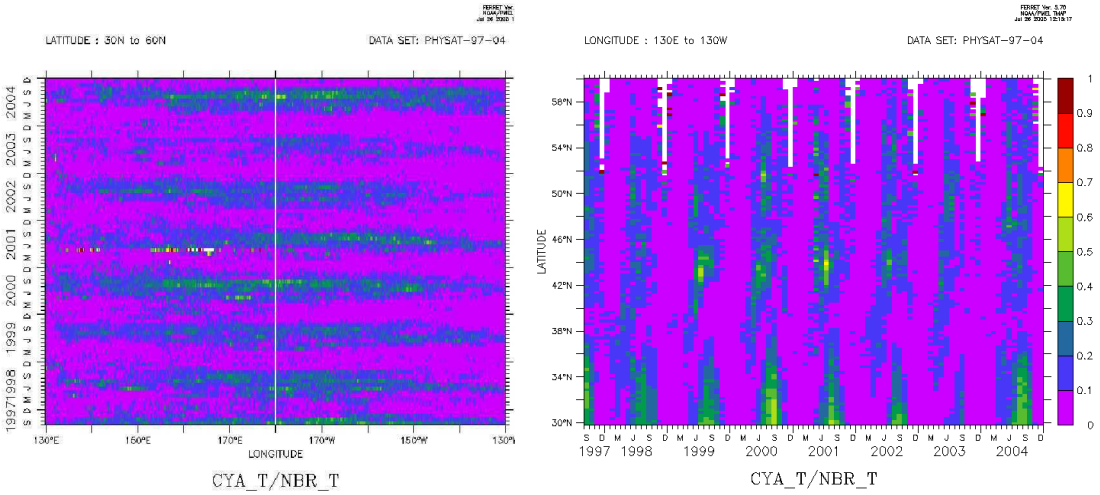
Figure A.2 *: Evolution mensuelle du rapport entre la chlorophylle a associée à un groupe et la chlorophylle a, moyennée pour la période de septembre 1997 – décembre 2004 dans le Pacifique Nord. En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende de couleur en bas à gauche.*



Haptophytes – Pacifique Nord



Prochlorococcus – Pacifique Nord



SLC – Pacifique Nord

Figure A.3 *: Représentation de la variabilité mensuelle de la surface labellisée pour les haptophytes, Prochlorococcus et SLC,, en fonction de la longitude (à gauche) et de la latitude (à droite), de septembre 1997 à décembre 2004.*

Océan Indien

L'Océan Indien est globalement dominé par les *Prochlorococcus* (40 à 50% toute l'année) en termes de surface mais par les SLC en termes de chlorophylle *a*. Les haptophytes (10 à 50% selon les saisons) occupent également une bonne surface dans la zone et peuvent parfois dominer, surtout à la fin de la période étudiée ici (Figure A.4 et A.5). Les autres groupes sont rarement détectés par PHYSAT dans cette région, avec au maximum 5% de diatomées et de phaeocystis et jamais de bloom de coccolithophoridés. On observe une nette tendance à l'augmentation des haptophytes pour les 3 dernières années de la période de données SeaWiFS traitées ici. Cette augmentation vient compenser en grande partie une chute du nombre de pixels détectés comme SLC et *Prochlorococcus* (Tableau A.3 et A.4). Notons ici que l'Océan Indien fait partie des régions directement influencées par les événements El Niño, comme celui de 1997.

Océan Indien	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Haptophytes	25.6	26.6	20.4	21.7	26.7	39.4	32.5
Prochlorococcus	47.3	44.3	47.6	47.4	46.5	43.3	41.2
SLC	25.8	27.2	30	29.1	25.4	15.9	23.5
Diatomées	0.8	0.9	0.8	0.7	0.6	0.7	1.2
Phaeocystis	0.5	1	1.2	1.1	0.8	0.5	1.5
Coccolithophoridés	0	0	0	0	0	0	0

Tableau A.3 : *Pourcentages relatifs de surface labellisée pour chaque groupe et pour chacune des années sur la région considérée.*

Océan Indien	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Haptophytes	25.5	26.7	19.2	20.3	26.7	44.3	41.3
Prochlorococcus	36.4	35.6	40.5	37.1	38.9	34.9	31.4
SLC	34.3	34.2	36.7	39.2	31.8	18.3	23.2
Diatomées	1.7	1.5	1.3	1.2	0.8	0.9	2
Phaeocystis	1.2	1.7	2	1.9	1.5	1.2	1.5
Coccolithophoridés	0.9	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4	0.5

Tableau A.4 : *Pourcentages relatifs chlorophylle a pour chaque groupe et pour chacune des années sur la région considérée.*

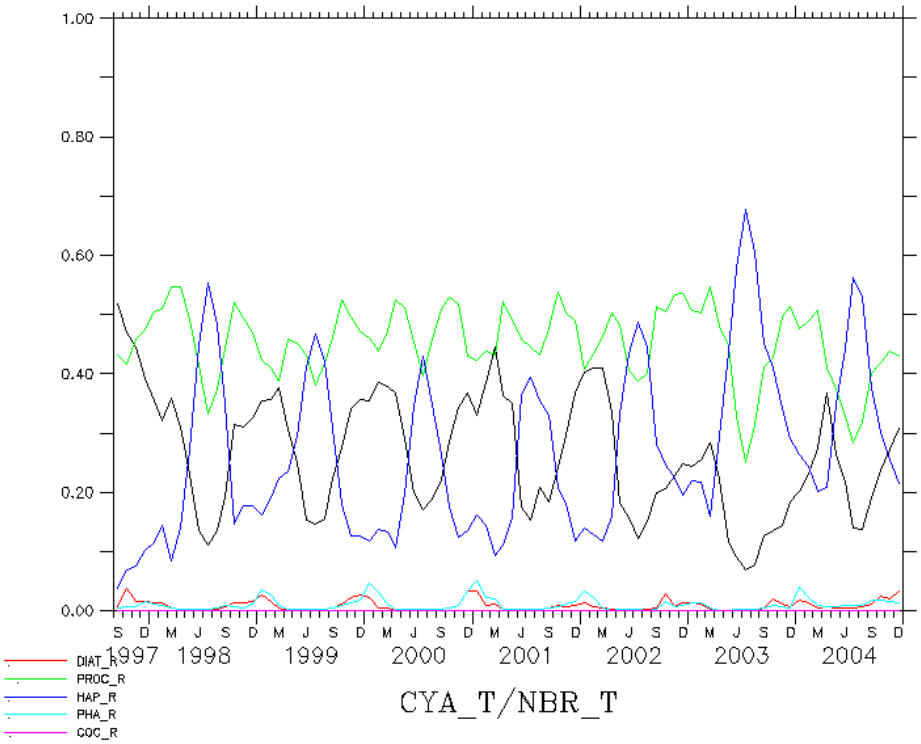


Figure A 4: *Fraction mensuelle de la surface dominée pour chaque groupe (surface dominée par le groupe / surface totale dominée par un groupe), sur la période septembre 1997 – décembre 2004 dans l'Océan Indien. En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende de couleur en bas à gauche.*

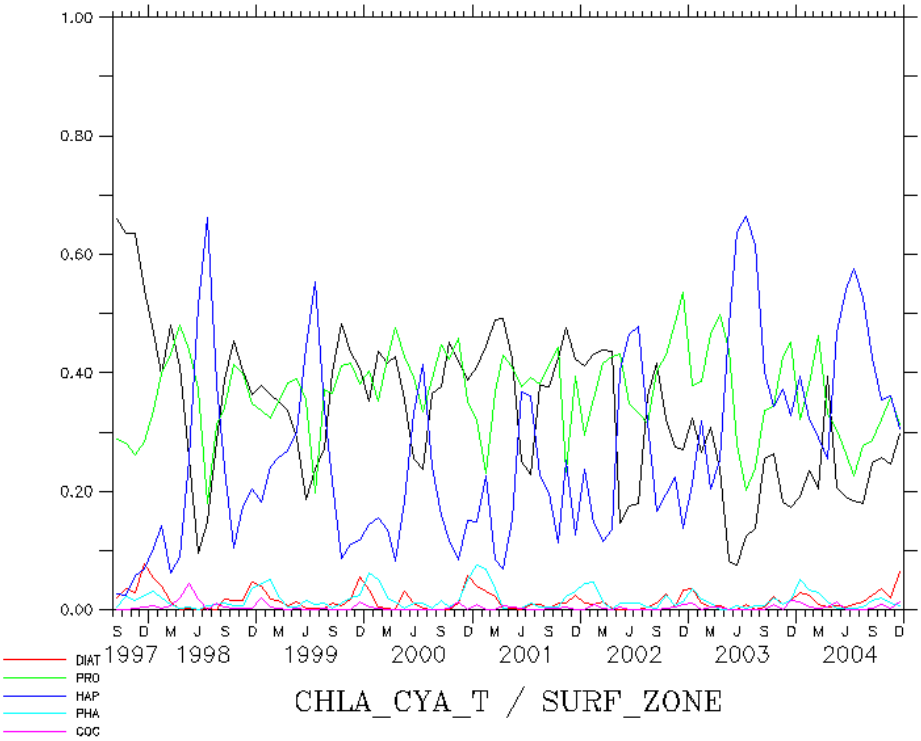
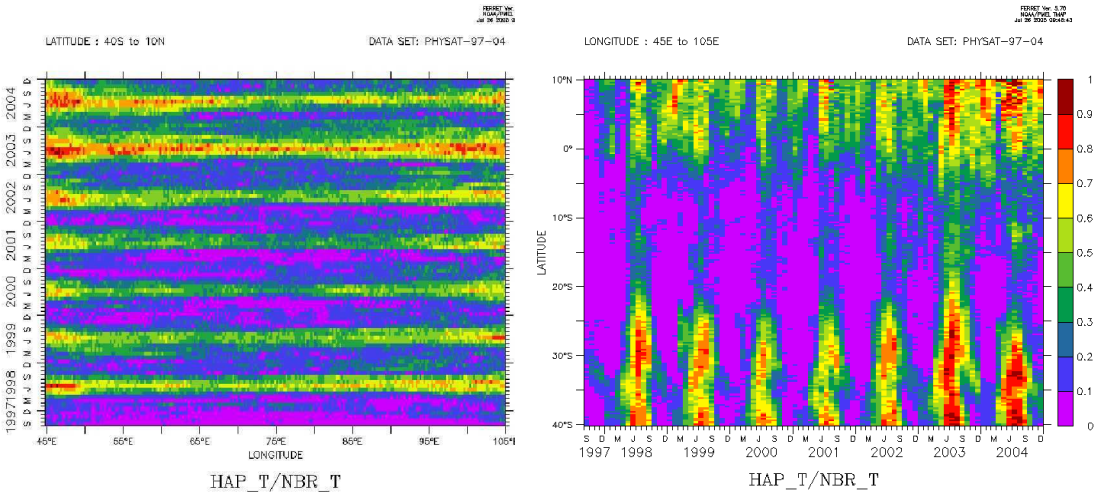
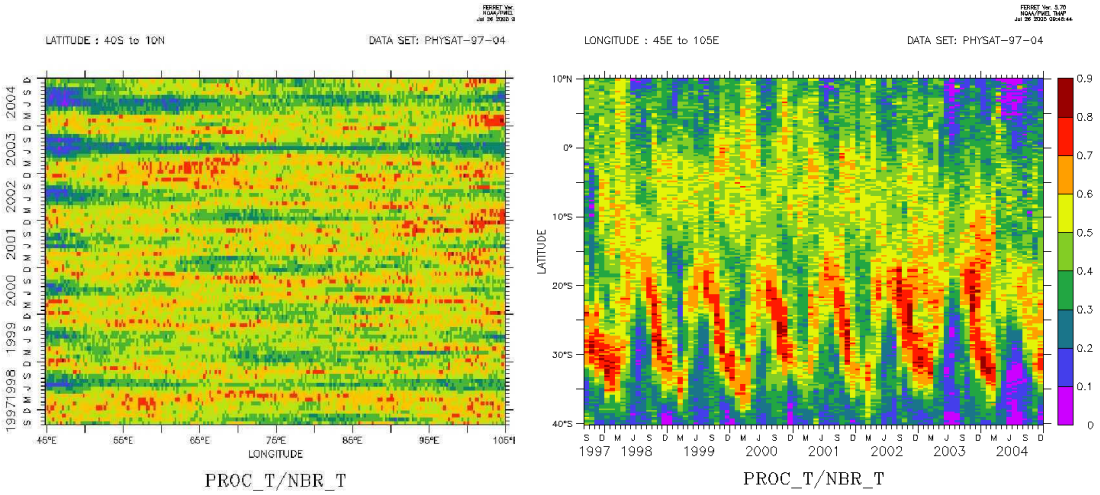


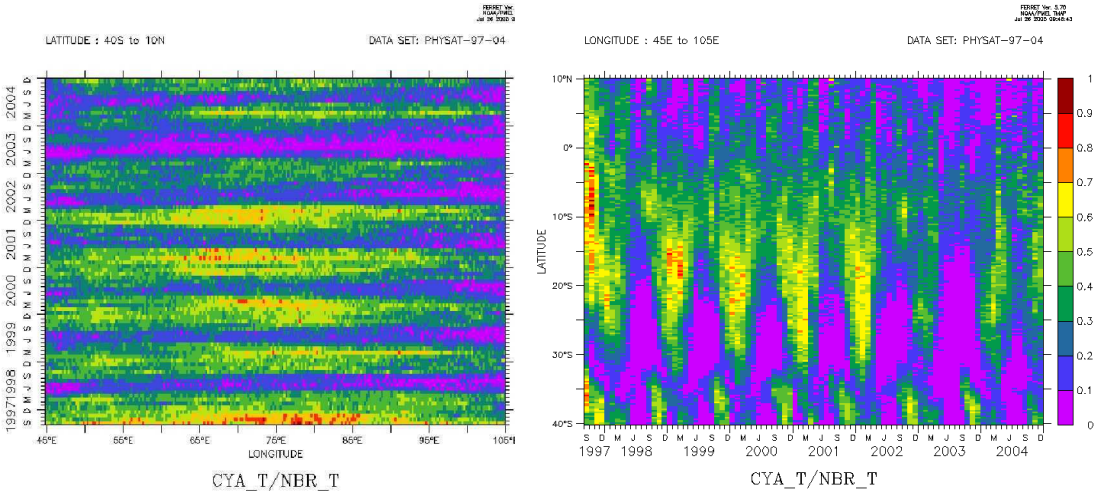
Figure A. 5: *Evolution mensuelle du rapport entre la chlorophylle a associée à un groupe et la chlorophylle a totale, moyennée pour la période de septembre 1997 – décembre 2004 dans l'Océan indien. En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende de couleur en bas à gauche.*



Haptophytes – Océan Indien



Prochlorococcus – Océan Indien



SLC – Océan Indien

Figure A.6 *: Représentation de la variabilité mensuelle de la surface labellisée pour les haptophytes, Prochlorococcus et SLC,, en fonction de la longitude (à gauche) et de la latitude (à droite), de septembre 1997 à décembre 2004.*

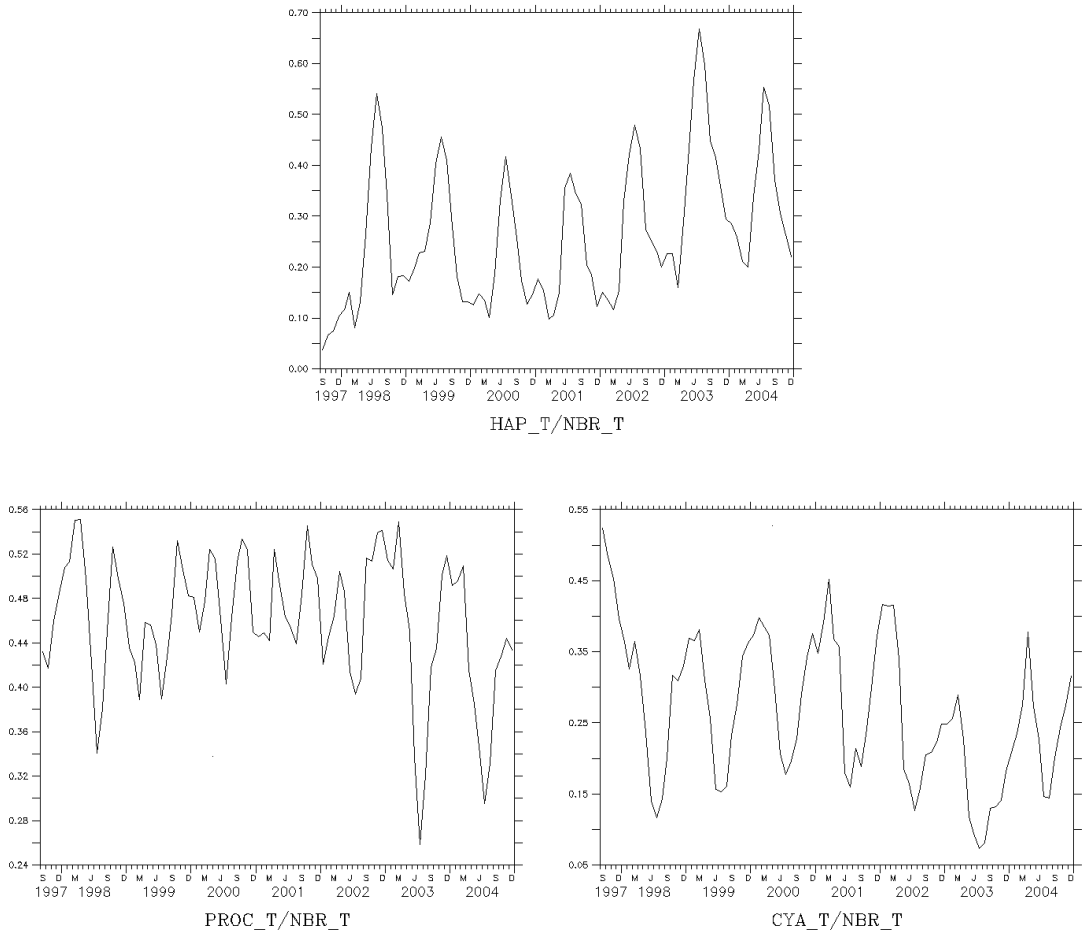


Figure A.7*: Pourcentages mensuels de surface labellisée pour les groupes Haptophytes (en haut) et Prochlorococcus et SLC (en bas), sur la période de septembre 1997 à décembre 2004 dans l'Océan Indien (40°S-10°N / 45°E –105°E).*

La Mer Méditerranée

La Mer Méditerranée est largement dominée par les haptophytes avec de 50 à 95% des pixels selon les saisons.). Ils sont détectés en grande majorité durant les mois de septembre à mars et au minimum de mai à août. On les retrouve en continu pour toute la période sous 31° Nord, et plus ou moins selon les saisons à toutes les autres latitudes et longitudes, avec une préférence pour la zone Nord-Ouest en hiver (Figure A.10). Ces résultats sont en accord avec ceux qui ont été obtenus lors de suivis sur une longue période des groupes en Méditerranée du Nord-Ouest. En effet, Marty et al. 2002 montre une dominance de la région par les haptophytes, excepté pour les périodes d'été durant lesquelles l'eau est plus stratifiée et ou les *Prochlorococcus* dominent (voir également les cartes PHYSAT en annexe 6).

Viennent ensuite les *Prochlorococcus*, de quelques pourcents à 50%. Leur contribution en termes de surface couverte peut atteindre 50%, mais la chlorophylle *a* associée ne dépasse jamais 30% (Figure A.8 et A.9). Ils sont principalement détectés sous 40° Nord, avec un maximum de surfaces détectées sous la latitude de 36° (Figure A.10).

Enfin, on observe de façon plus anecdotique, les phaeocystis, diatomées et Coccolithophoridés, de quelques pourcents à 5% (Figure A.8 et A.9) (Bosc et al. 2004 , Bricaud et al. 2002). Notons que la région étudiée ici intègre une partie de la Mer Noire pour les graphiques d'Hovmuller uniquement. La Mer Noire ayant des propriétés optiques très particulières, les bilans globaux présentés sont les résultats de la Mer Méditerranée uniquement. La tendance globale sur la région est une légère augmentation de la surface dominée par les haptophytes, accompagnée d'une légère diminution de celle des *Prochlorococcus*.

Méditerranée	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Haptophytes	79.6	77.4	76.3	80.5	82.6	88.1	83.6
Prochlorococcus	14.4	16.5	17.2	13.8	12.4	8.5	11
SLC	0.9	1	1	1.3	0.7	2.1	1
Diatomées	0.9	0.8	0.6	1.2	0.7	0.3	0.7
Phaeocystis	3.7	3.8	4.3	3	2.7	2.3	2.2
Coccolithophoridés	0.5	0.4	0.6	0.2	0.8	0.2	0.3

Tableau A.5 : *Pourcentages relatifs de surface labellisée pour chaque groupe et pour chacune des années sur la région considérée.*

Méditerranée	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Haptophytes	80.1	78.4	76.1	81.2	84	88.7	83.9
Prochlorococcus	14.9	17	19	14.2	12.7	8.7	11.5
SLC	0.8	1	1	1.1	0.6	0.6	1.9
Diatomées	0.6	0.6	0.43	0.8	0.4	0.2	0.7
Phaeocystis	3.3	2.8	3.2	2.2	1.7	1.6	1.7
Coccolithophoridés	0.2	0.1	0.3	0.1	0.4	0.1	0.2

Tableau A.6 : *Pourcentages relatifs de chlorophylle a pour chaque groupe et pour chacune des années sur la région considérée.*

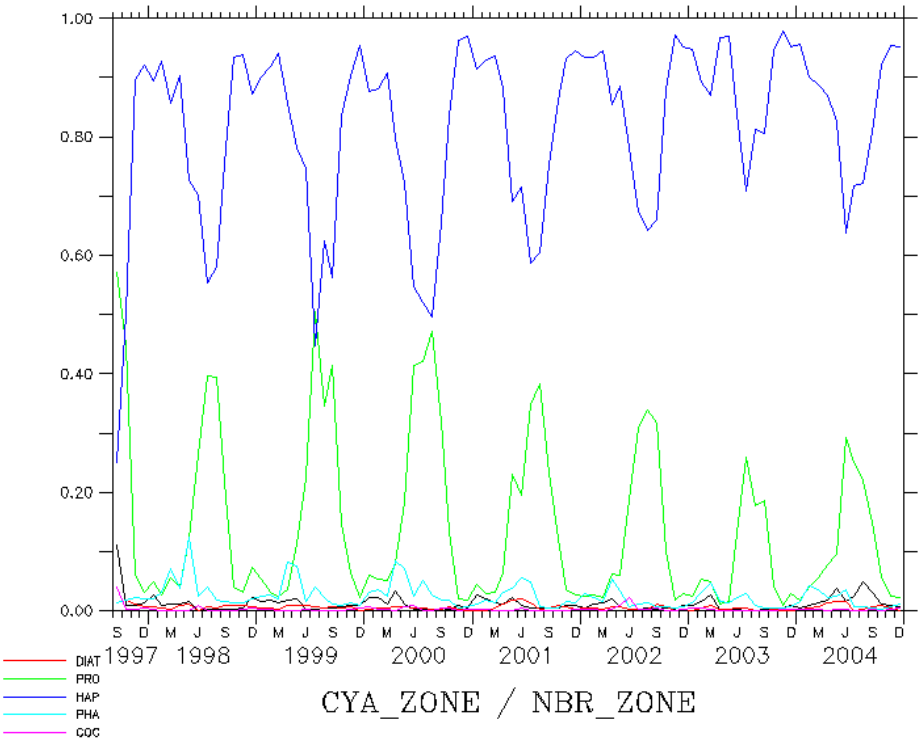


Figure A.8 *: Fraction mensuelle de la surface dominée pour chaque groupe (surface dominée par le groupe / surface totale dominée par un groupe), sur la période septembre 1997 – décembre 2004 en Mer Méditerranée. En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende de couleur en bas à gauche.*

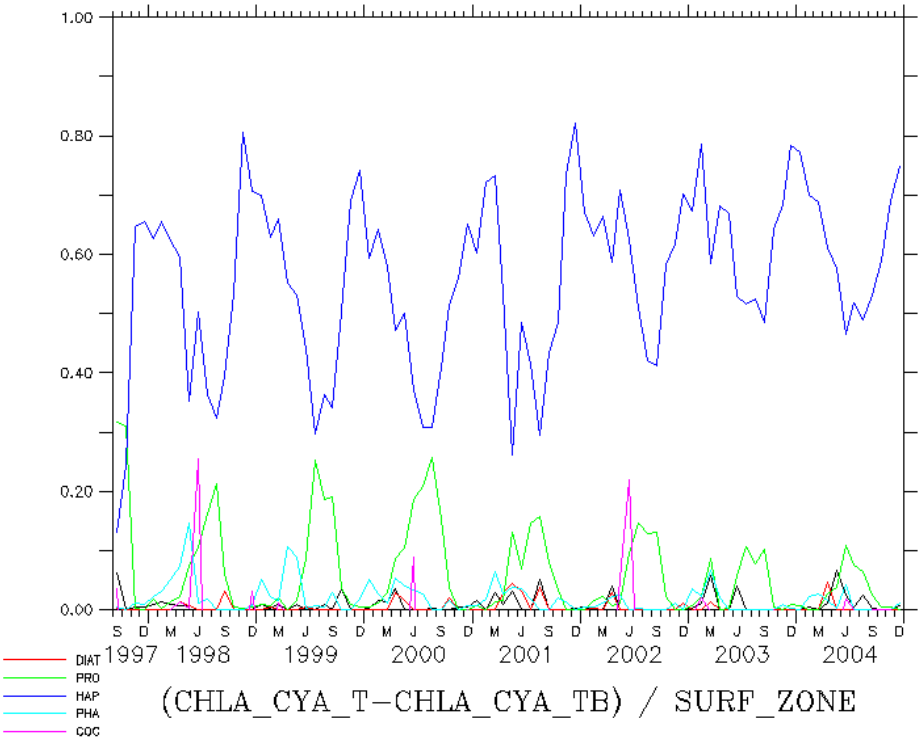
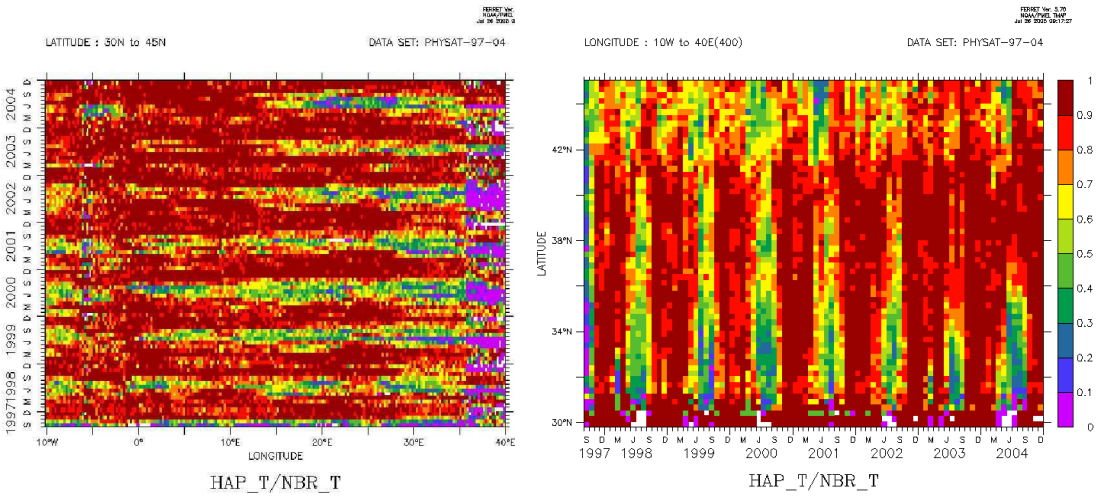
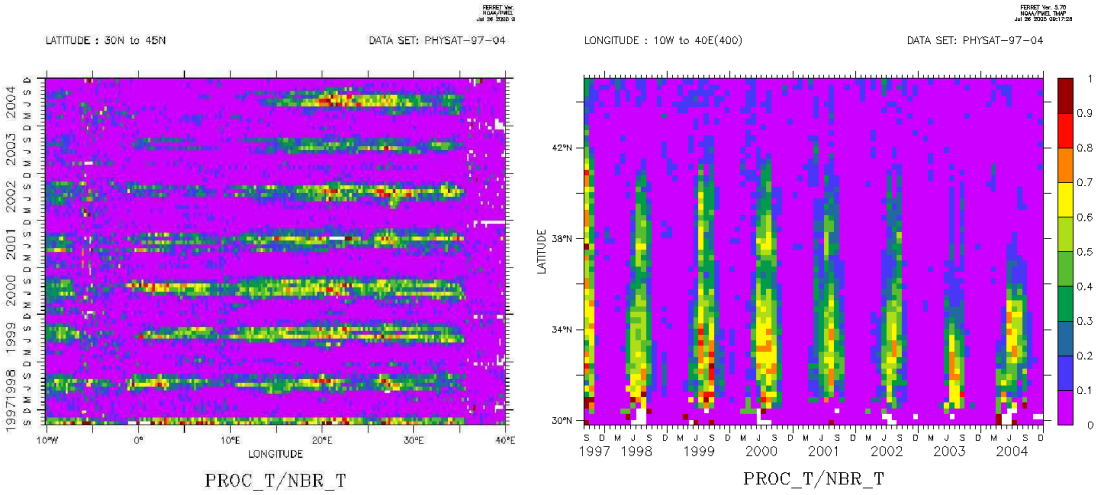


Figure A.9 *: Evolution mensuelle du rapport entre la chlorophylle a associée à un groupe et la chlorophylle a, moyennée pour la période de septembre 1997 – décembre 2004 en Mer Méditerranée. En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende de couleur en bas à gauche.*



Haptophytes – Mer Méditerranée



Prochlorococcus – Mer Méditerranée

Figure A.10 a) à c) *: Représentation de la variabilité mensuelle de la surface labellisée pour les haptophytes,et les Prochlorococcus, en fonction de la longitude (à gauche) et de la latitude (à droite), de septembre 1997 à décembre 2005.*

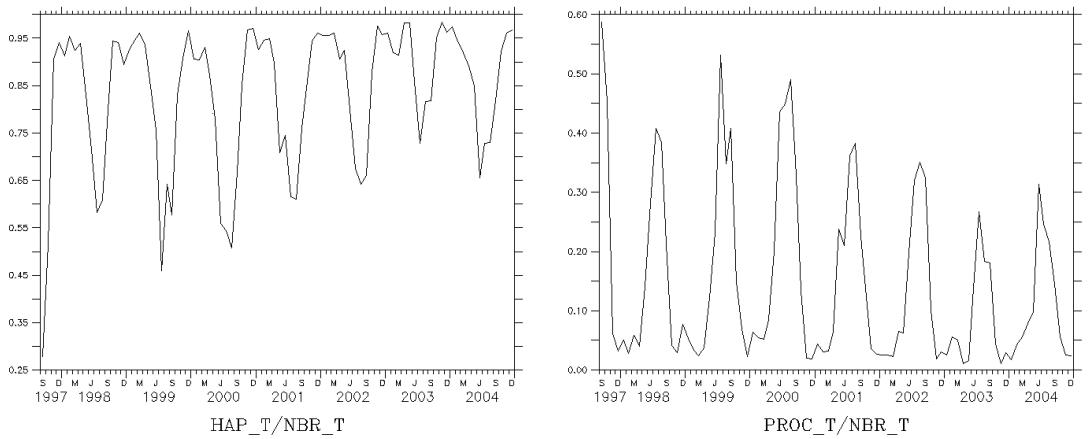


Figure A.11 *: Pourcentages mensuels de surface labellisée pour les groupes haptophytes (à gauche) et Prochlorococcus (à droite), sur la période de septembre 1997 à décembre en Mer Méditerranée (30°N-45°N / 10°W – 40°W moins la mer noire).*

L'Océan Atlantique des campagnes AMT

La région étudiée ici correspond à celle des campagnes AMT (Aiken et al. 2000). Ces dernières ont été réalisées depuis plusieurs années le long d'un trajet à travers l'Atlantique, reliant l'Angleterre à la pointe sud de l'Amérique du Sud. Différents paramètres ont été mesurés à chaque campagne, comme la concentration en chlorophylle *a*, divers pigments et des paramètres de caractérisation des masses d'eau (température, salinité etc.). Tout cela permet de valider les observations PHYSAT le long de ce trajet, même s'il est toujours délicat de comparer directement des données locales en mer à des observations satellites. On peut tout de même tenter de comparer les résultats obtenus avec ceux des campagnes AMT dont les résultats en termes de groupes dominants sont disponibles dans Zubkov et al, de 1998 et de 2000.

Dans l'ensemble et d'après PHYSAT, l'Atlantique des campagnes AMT est dominé par les haptophytes et les *Prochlorococcus* à part égale (environ 40% de la surface), et également par les SLC. En termes de contribution à la chlorophylle *a* ce sont les haptophytes qui sont largement dominants, suivi par les *Prochlorococcus,* les SLC de manière équivalente et par les diatomées (Figure A.13).

Les autres groupes ne sont qu'exceptionnellement rencontrés le long de ce trajet. Une tendance nettement à la hausse est observée pour les haptophytes sur la période 2001 à 2004, associée à une diminution des *Prochlorococcus*. Cette tendance correspond à ce qui est observé en règle générale sur les autres régions étudiées.

Les campagnes AMT permettent de valider ce résultat en montrant des nanoflagellés, équivalants des haptophytes PHYSAT, aux hautes latitudes en dehors des floraisons de diatomées au printemps et en été (Gibb et al., 2000). On notera également qu'un accord similaire est obtenu avec les données de la station permanente BATS (aux Bermudes), avec des prymnesiophytes (qui appartiennent aux groupes des haptophytes) de janvier jusqu'au début du printemps suivi par les *Prochlorococcus* comme le montre la figure A.13 (Durand et al., 2001 et Steinberg et al., 2001).

L'article de Zubkhov et al. 2000 traite des résultats des campagnes AMT 3 et 4 en septembre et octobre 1996 et en avril et mai 1997. Grâce à AMT3, on sait que les *Prochlorococcus* sont dominants entre 20° et 40° Nord et de 0° à 30° Sud, ce qui est en accord avec les observations PHYSAT (voir cartes en annexe également). AMT4 a permis d'observer des SLC rarement dominants et des *Prochlorococcus* entre 20 et 40° Nord et 10 à 30° Sud. Ces résultats de campagnes en mer sont globalement en accord avec les observations PHYSAT, même si ces dernières ne sont pas disponibles pour 1996 et 1997, et le long d'un trajet qui ne peut prendre en compte la variabilité longitudinale observée par PHYSAT.

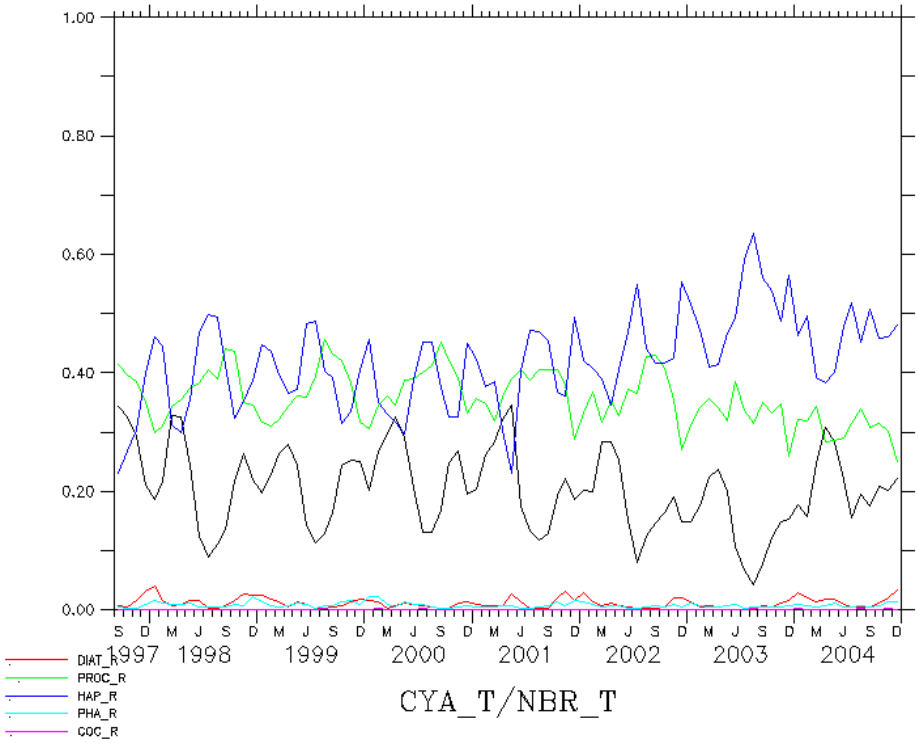


Figure A.12 *: Fraction mensuelle de la surface dominée pour chaque groupe (surface dominée par le groupe / surface totale dominée par un groupe), sur la période septembre 1997 – décembre 2004 autour des trajets AMT. En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende de couleur en bas à gauche*

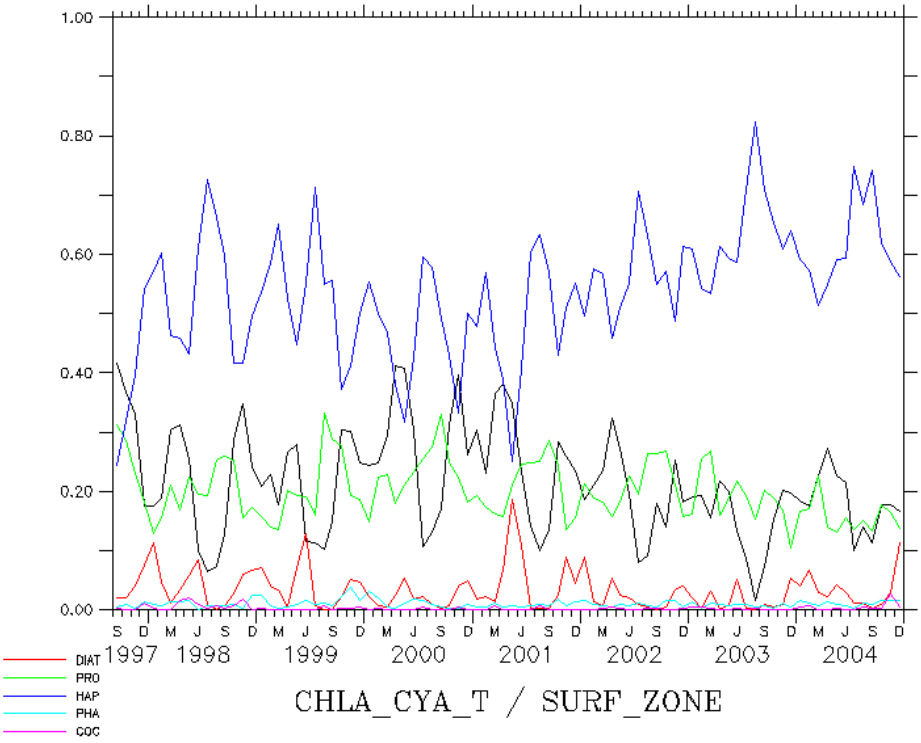
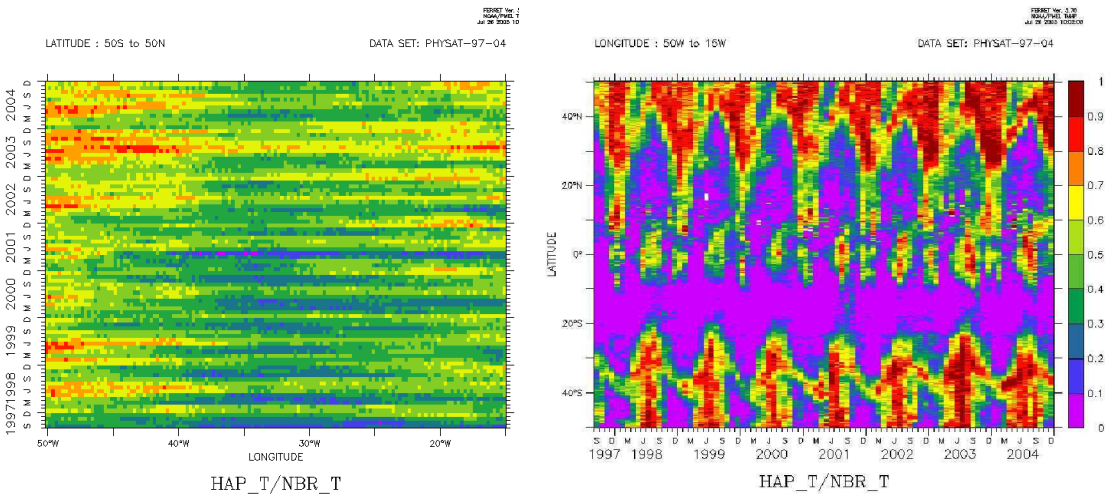
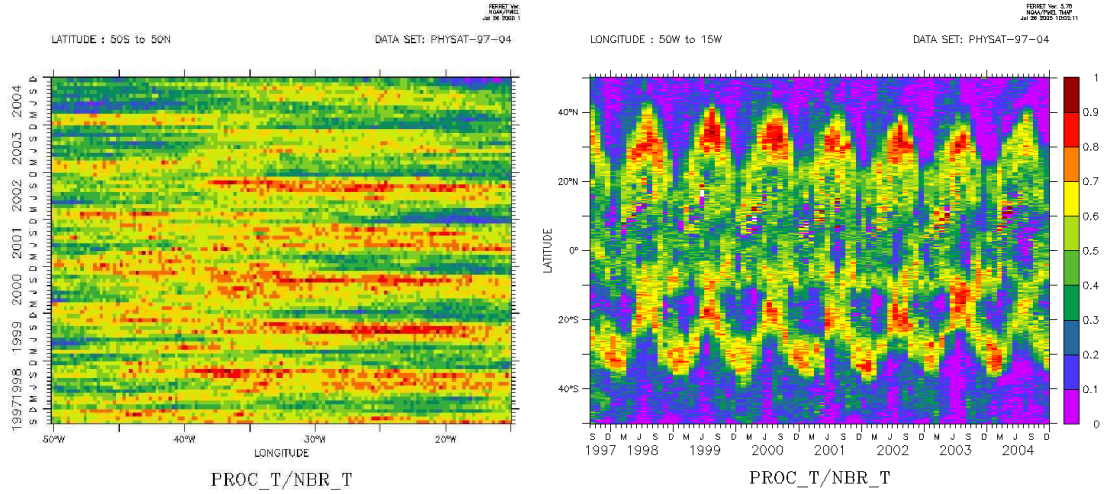


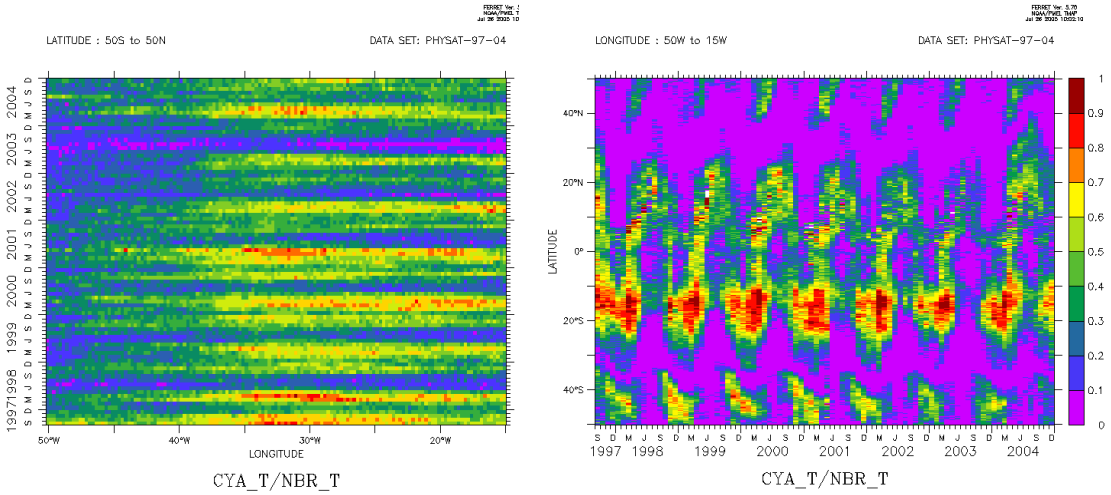
Figure A.13 *: : Evolution mensuelle du rapport entre la chlorophylle a associée à un groupe et la chlorophylle a, moyennée pour la période de septembre 1997 – décembre 2004 autour des trajets AMT. En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende de couleur en bas à gauche.*



Haptophytes – AMT



Prochlorococcus – AMT



SLC – AMT

Figure A.14 *: Représentation de la variabilité mensuelle de la surface labellisée pour les haptophytes, Prochlorococcus et SLC,, en fonction de la longitude (à gauche) et de la latitude (à droite), de septembre 1997 à décembre 2004.*

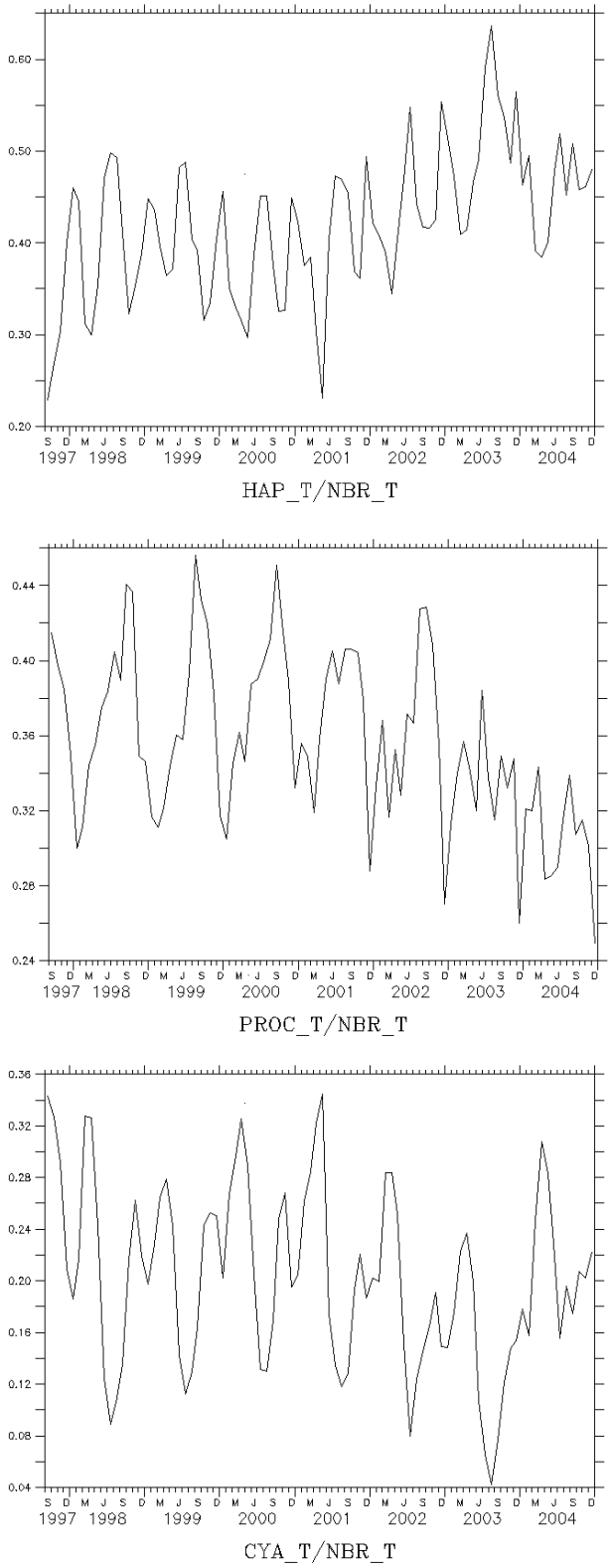


Figure A.15 : *Pourcentages mensuels de surface labellisée pour les groupes haptophytes, Prochlorococcus (en haut) et SLC (en bas) sur la période de septembre 1997 à décembre 2004, dans l'Atlantique des campagnes AMT.*

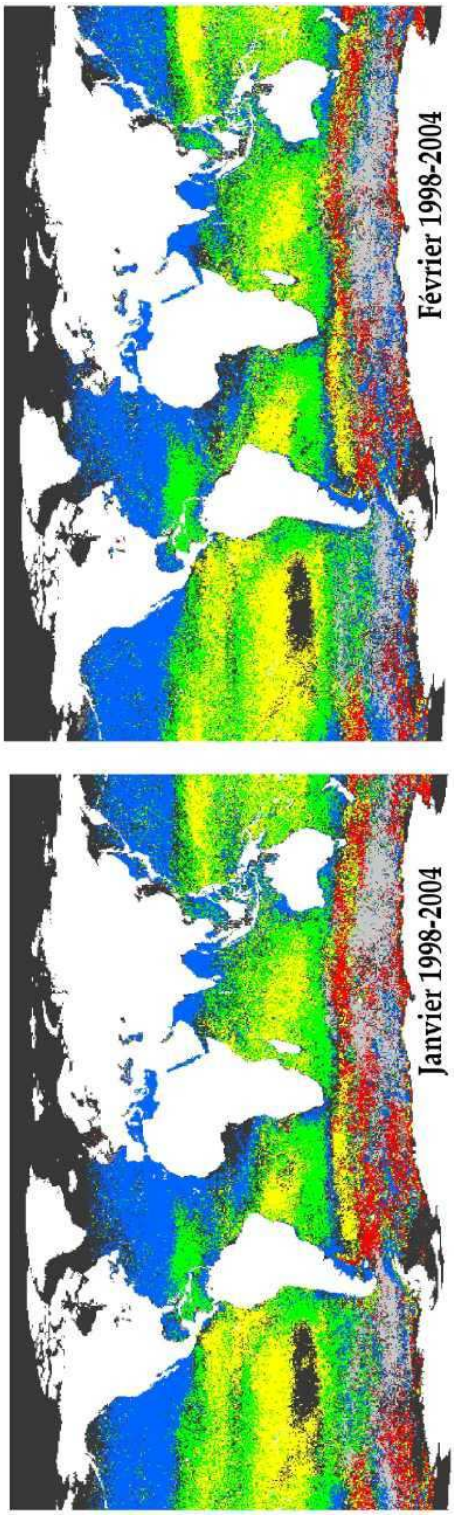
ANNEXE 6

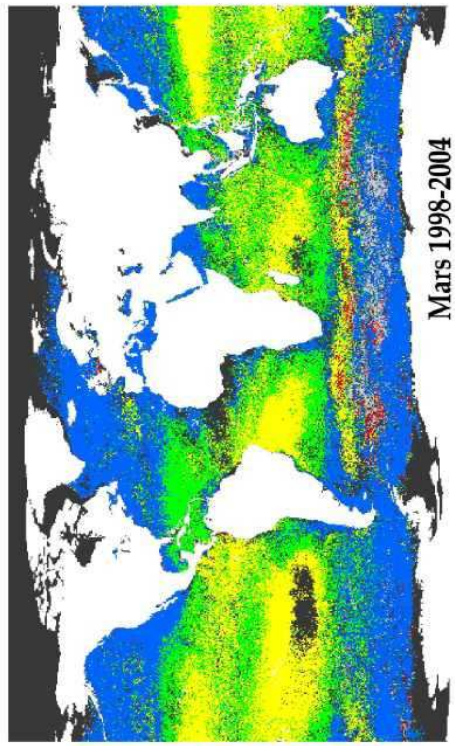
CARTES GLOBALES PHYSAT MENSUELLES AU QUART DE DEGRE de septembre 1997 à décembre 2004 :

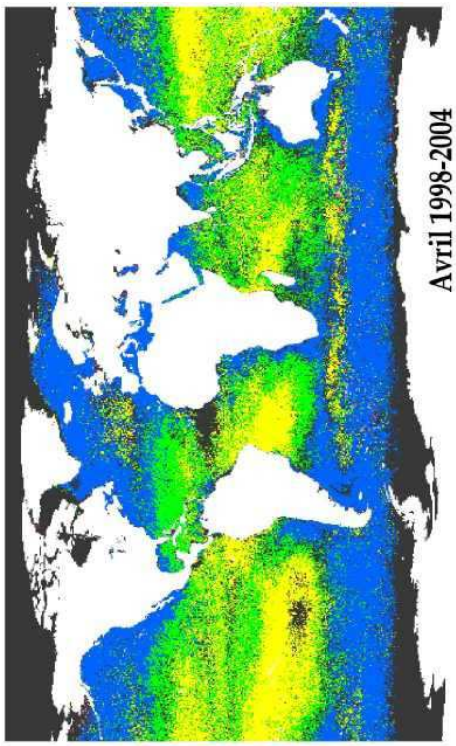
Climatologie sur la période 1998-2004 puis groupe dominant le plus fréquemment détecté et présent pour au moins la moitié des pixels valides de la période.

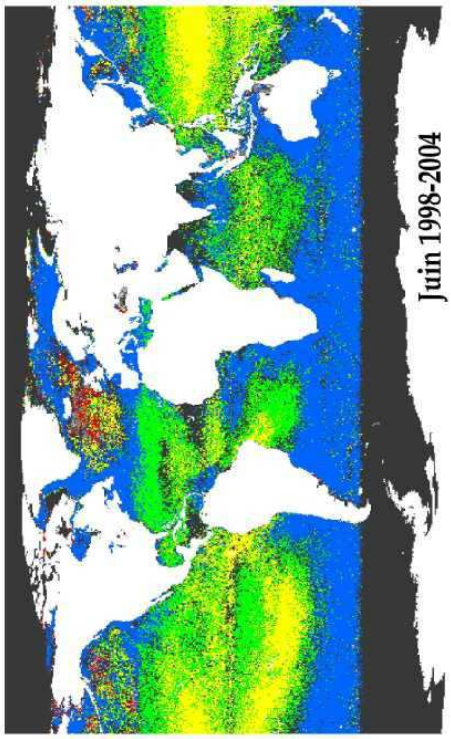
Légende pour toutes les cartes : en rouge les diatomées, en bleu les haptophytes, en vert les Prochlorococcus, en jaune les « SLC », en gris clair les phaeocystis et en gris foncé les blooms de Coccolithophoridés.
Les pixels « noirs » correspondent à des spectres non labellisés ou à des mesures SeaWiFS qui ne répondent pas aux critères de validité définis au chapitre 2.

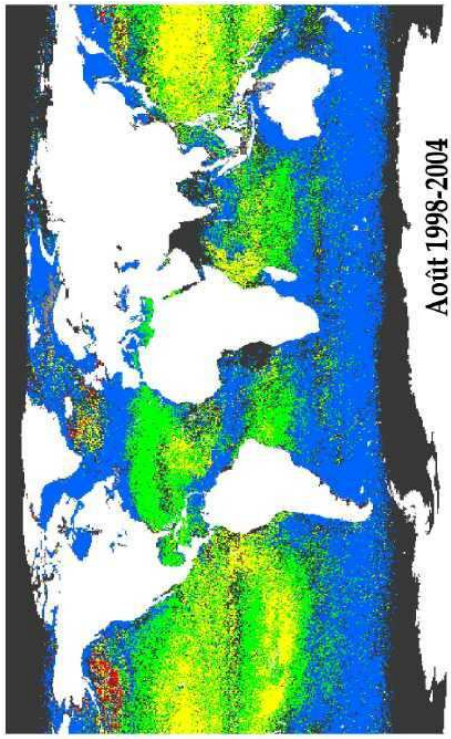
Climatologie des groupes dominants de phytoplancton pour la période 1998-2004 : groupe le plus fréquemment détecté.

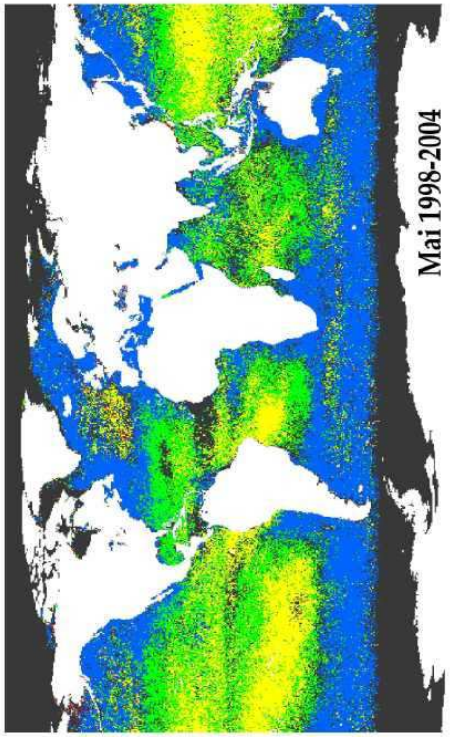


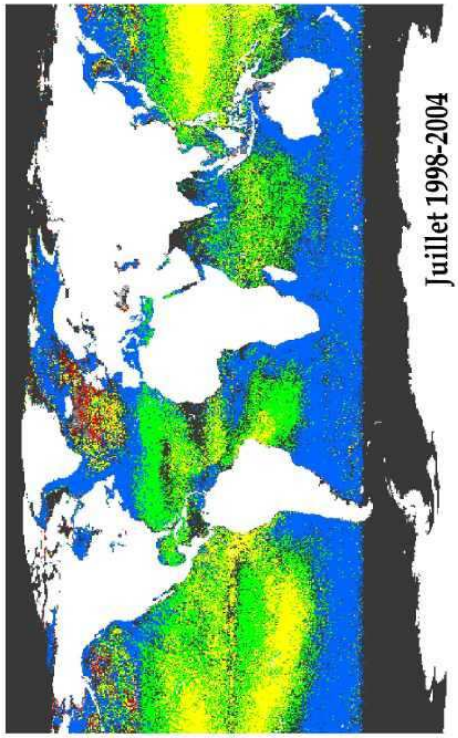


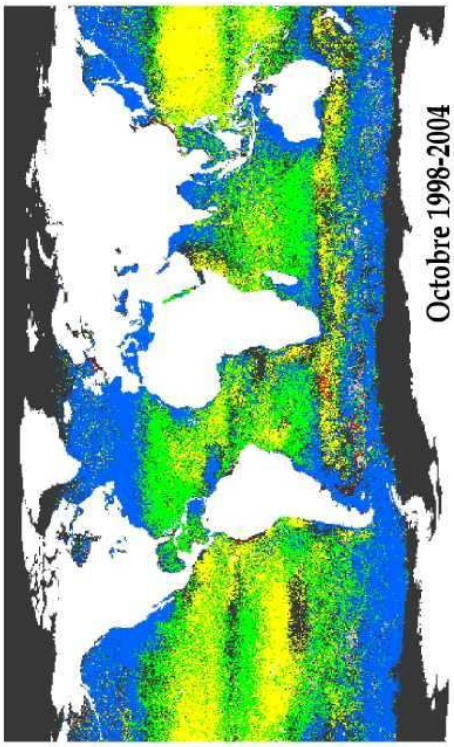


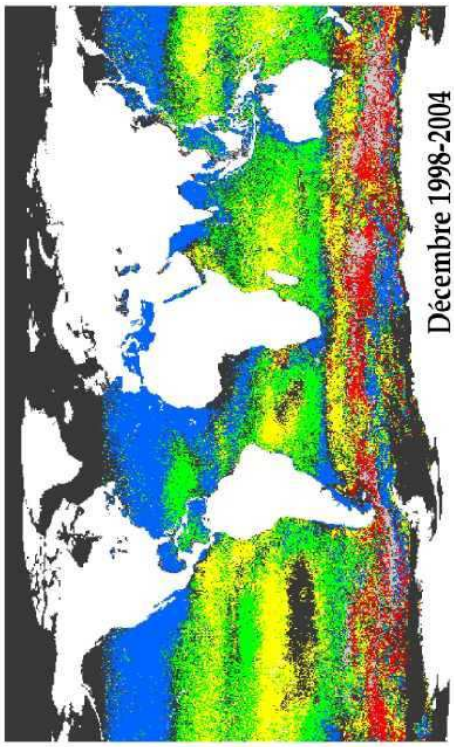

Juin 1998-2004

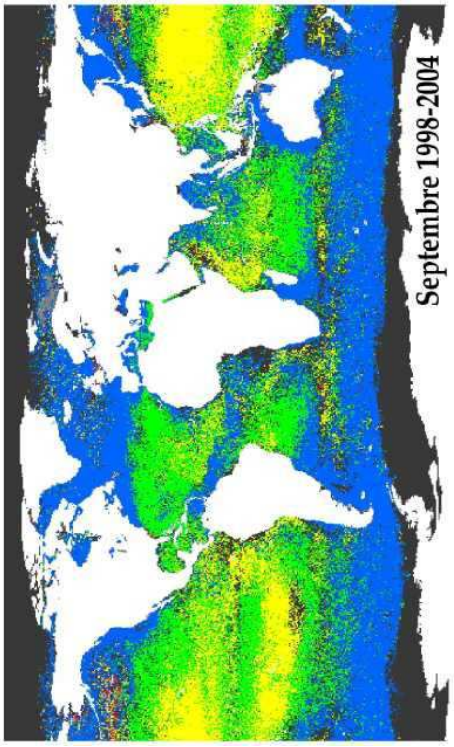

Août 1998-2004

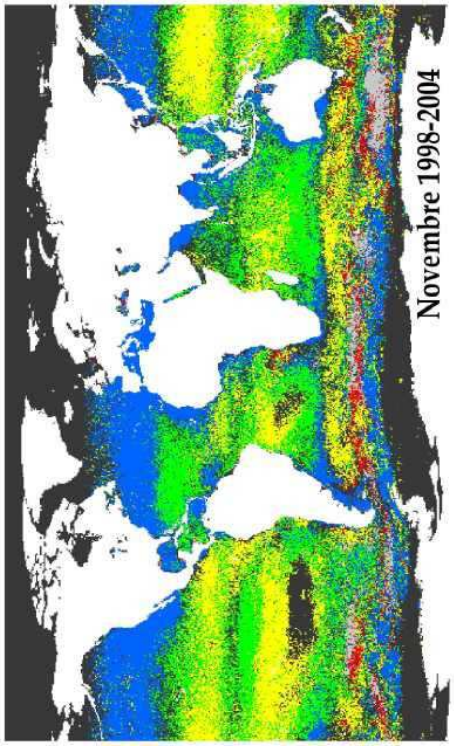

Mai 1998-2004


Juillet 1998-2004

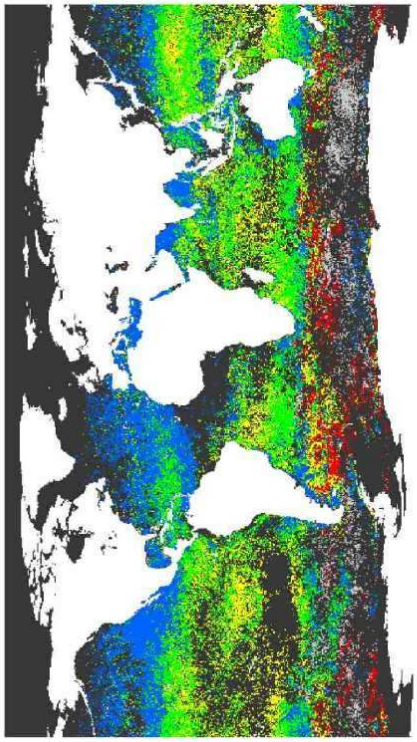

Octobre 1998-2004

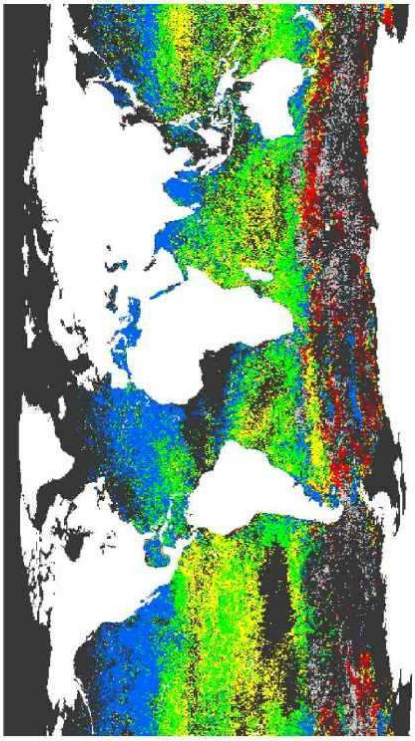

Décembre 1998-2004

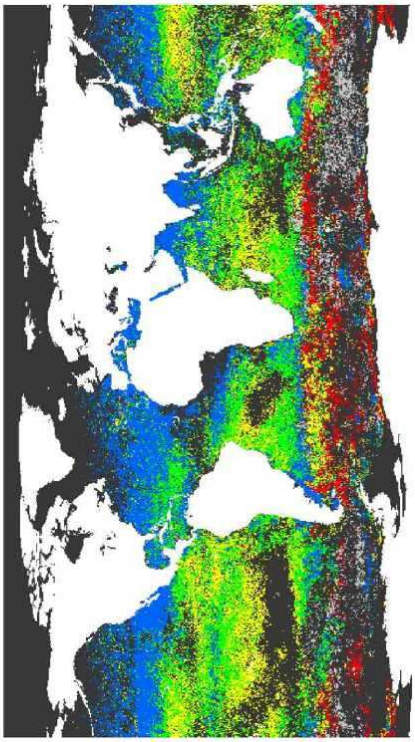

Septembre 1998-2004

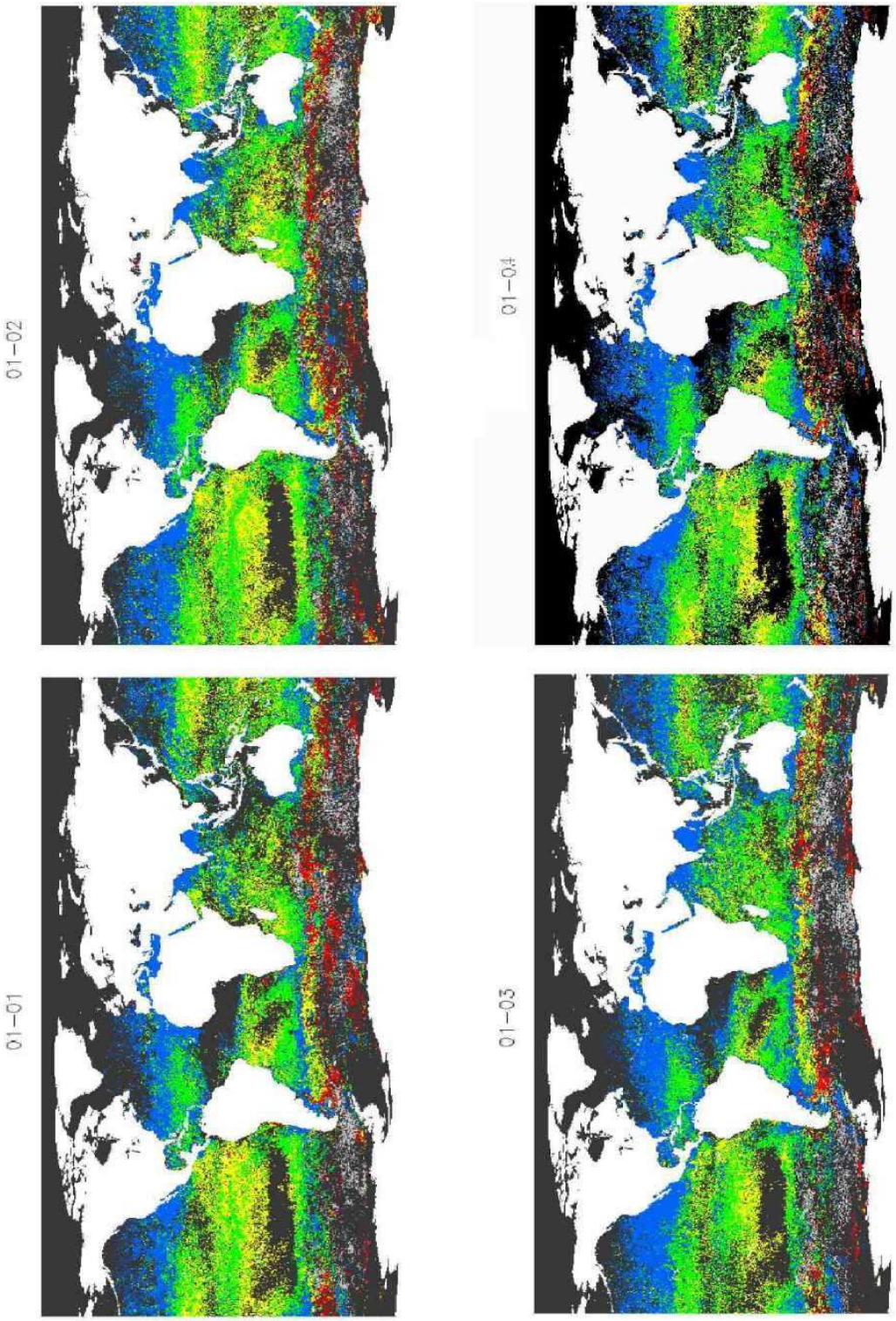

Novembre 1998-2004

Cartes mensuelles des groupes dominants de phytoplancton pour la période 1997-2004

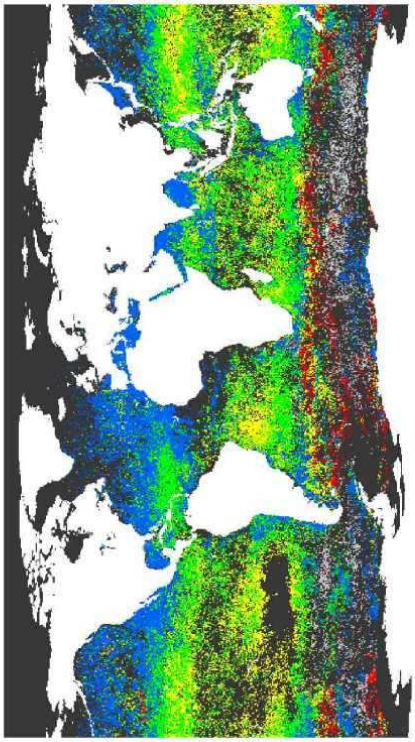


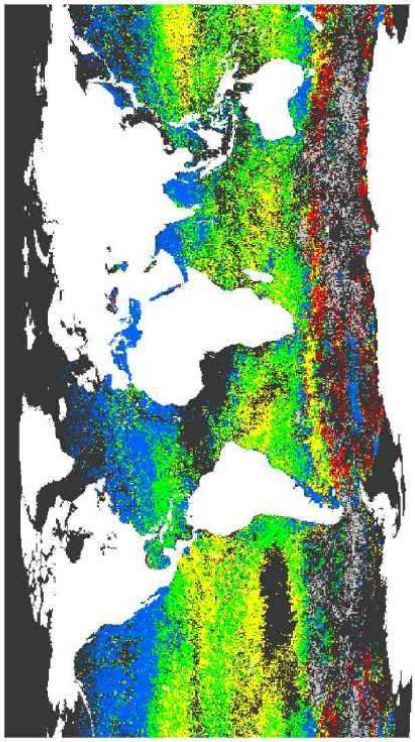


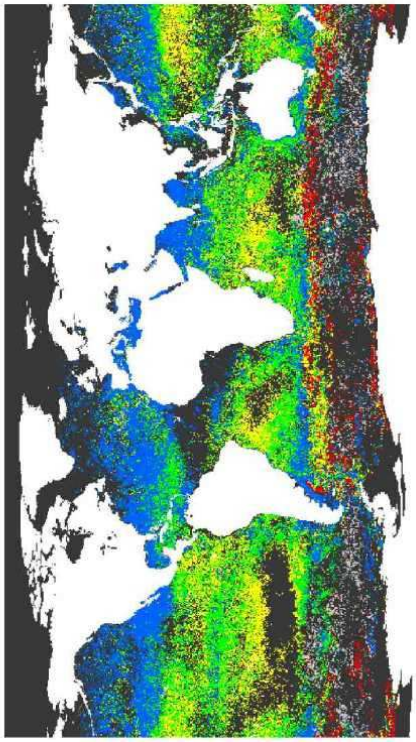


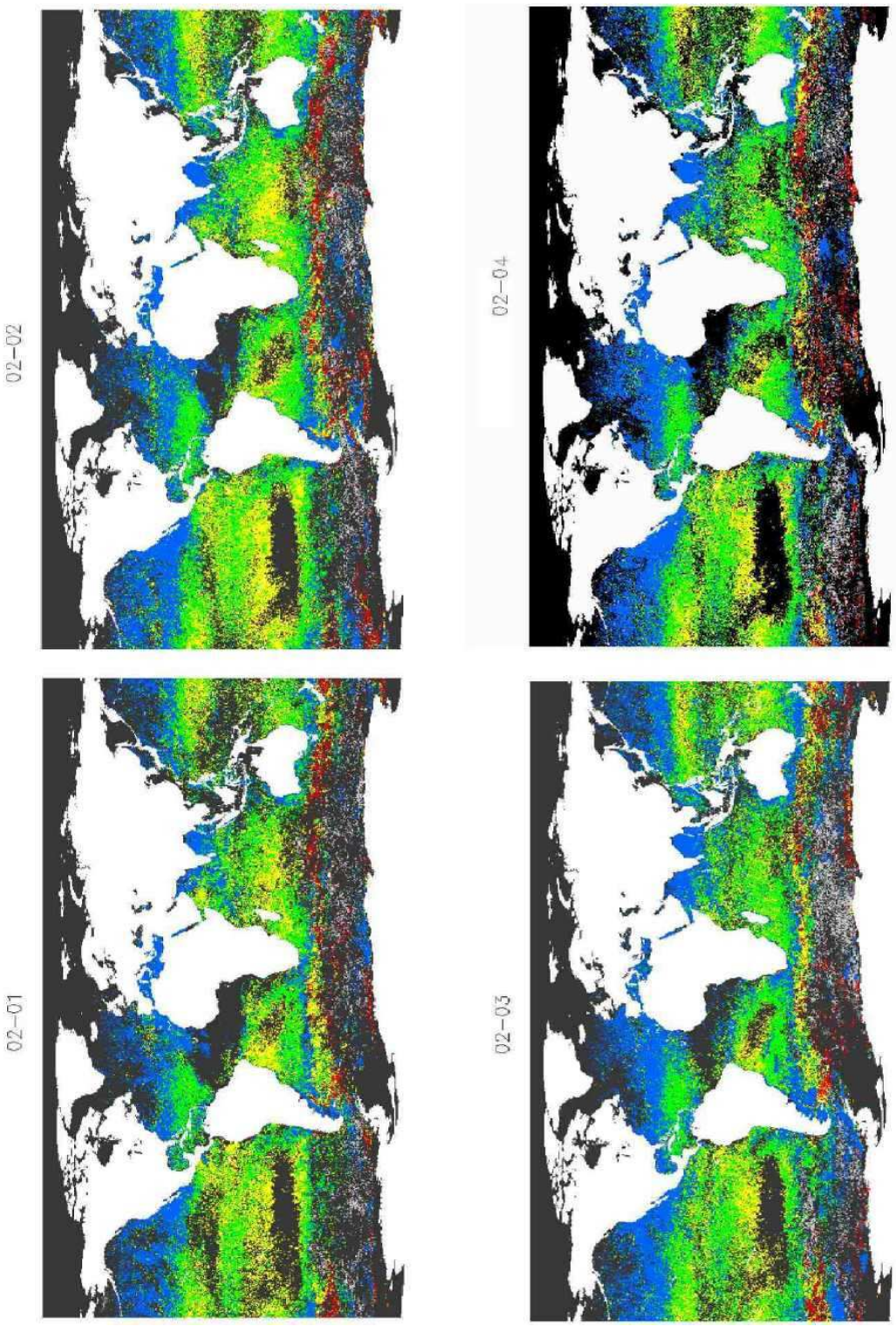


Mois de JANVIER 1998 à 2004

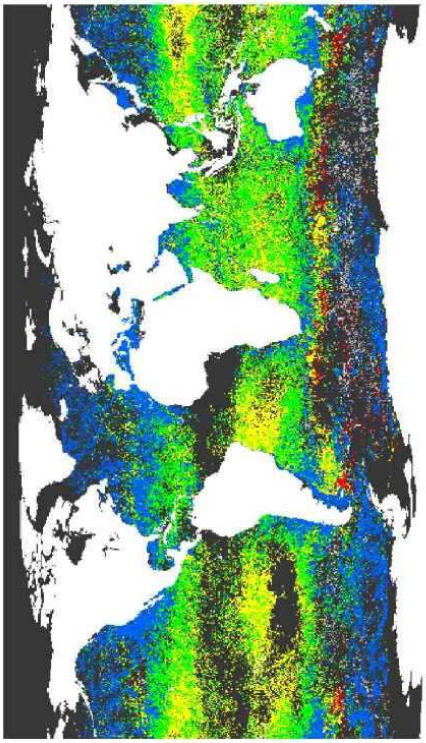

02-98

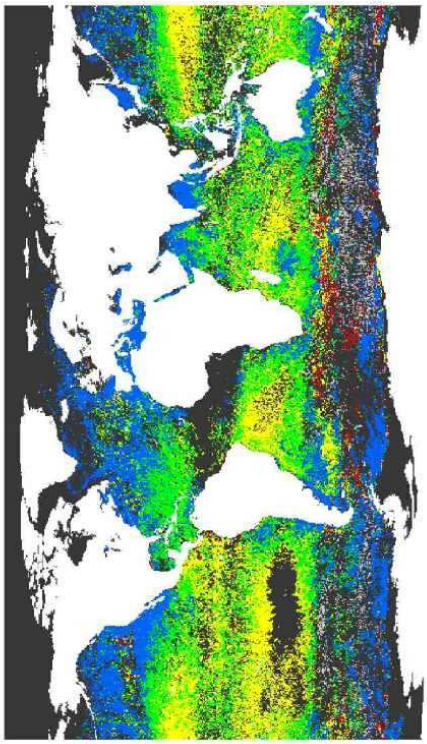

02-00

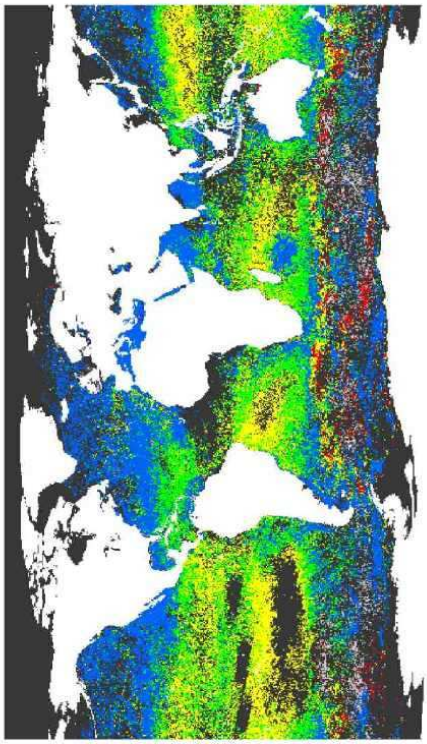

02-99

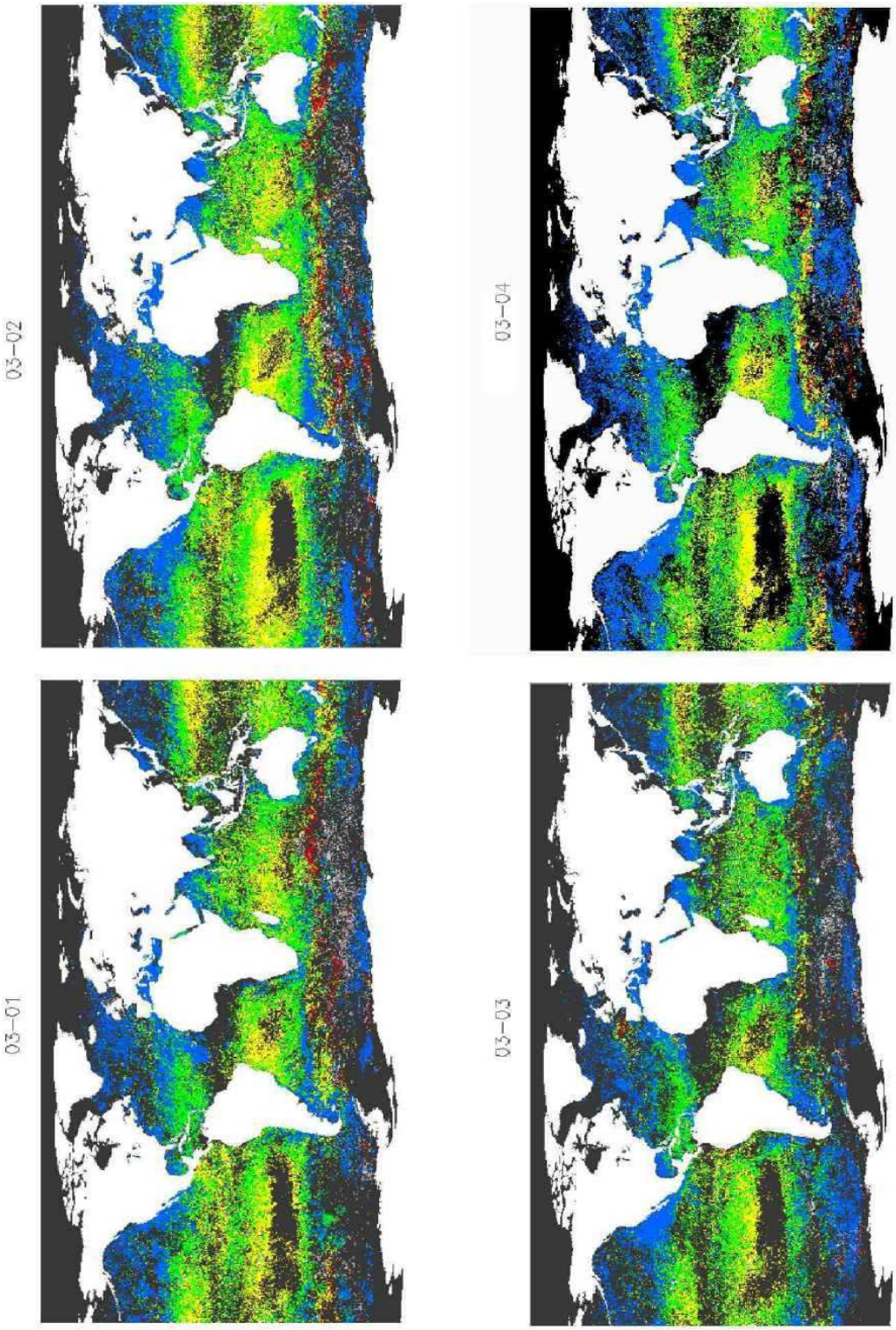


Mois de FEVRIER 1998 à 2004

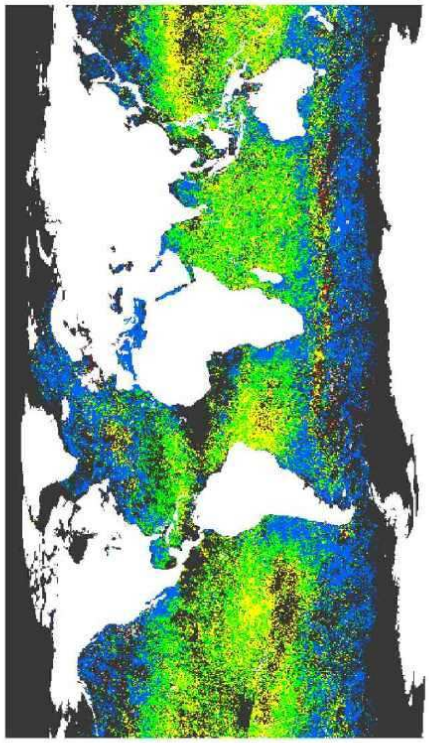

03-98

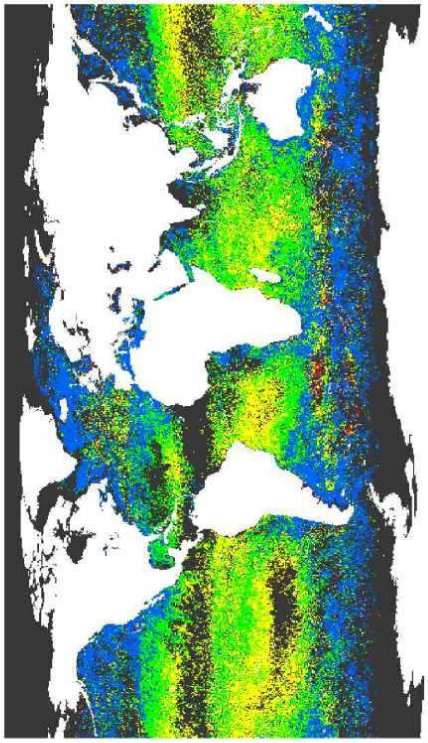

03-00

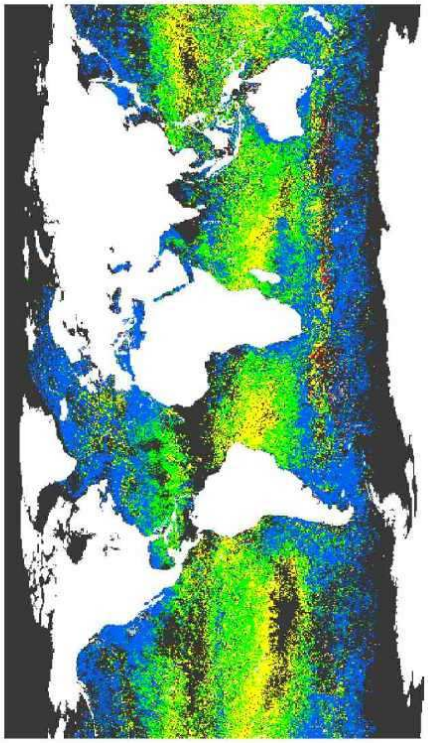

03-99

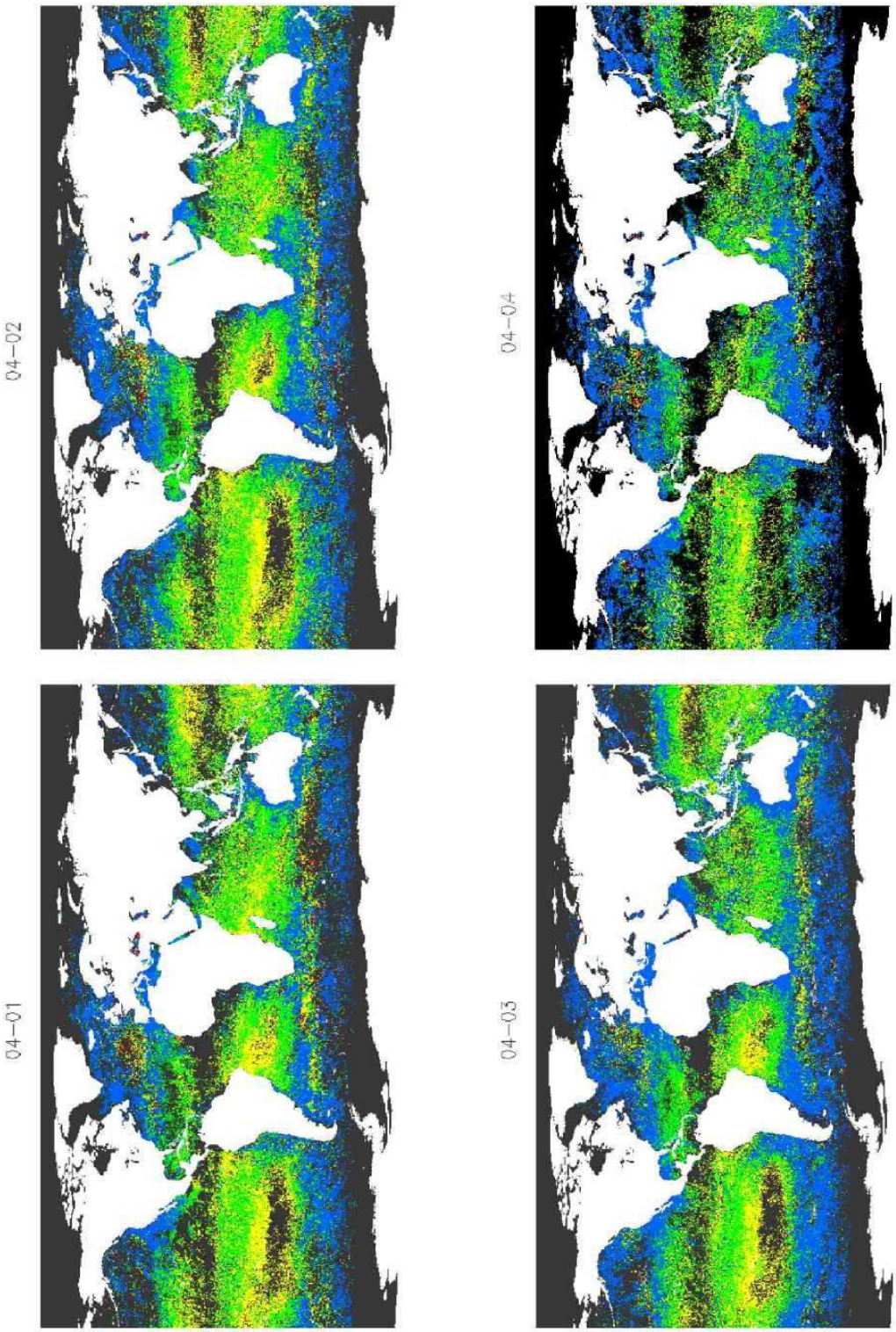


Mois de MARS 1998 à 2004

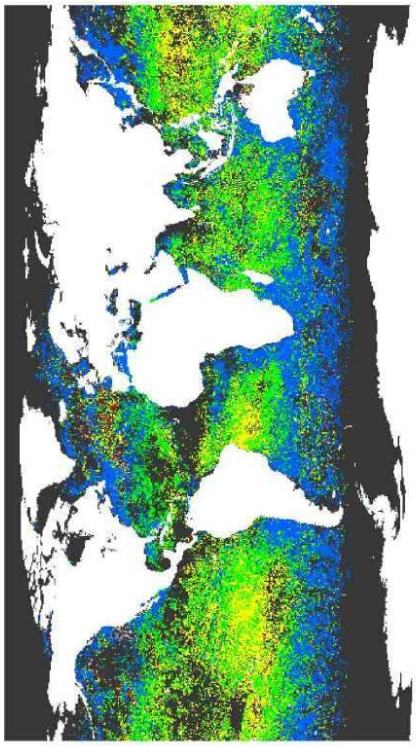

04-98

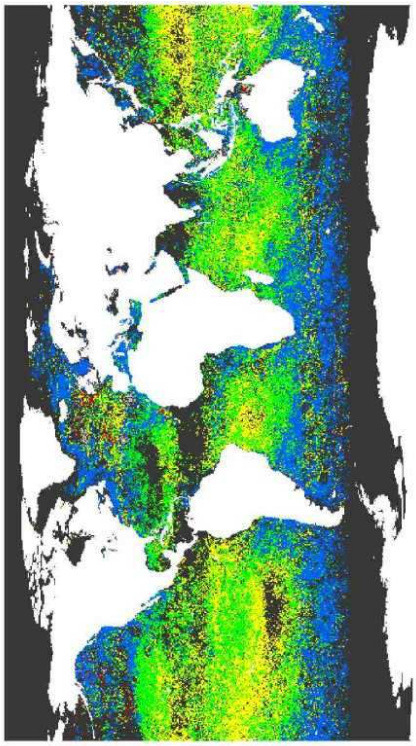

04-00

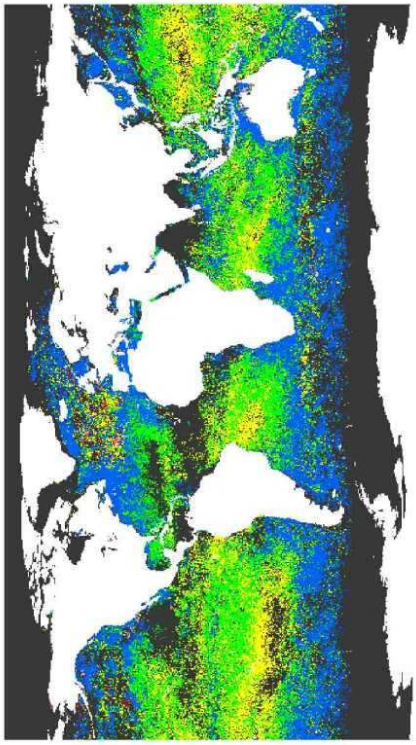

04-99

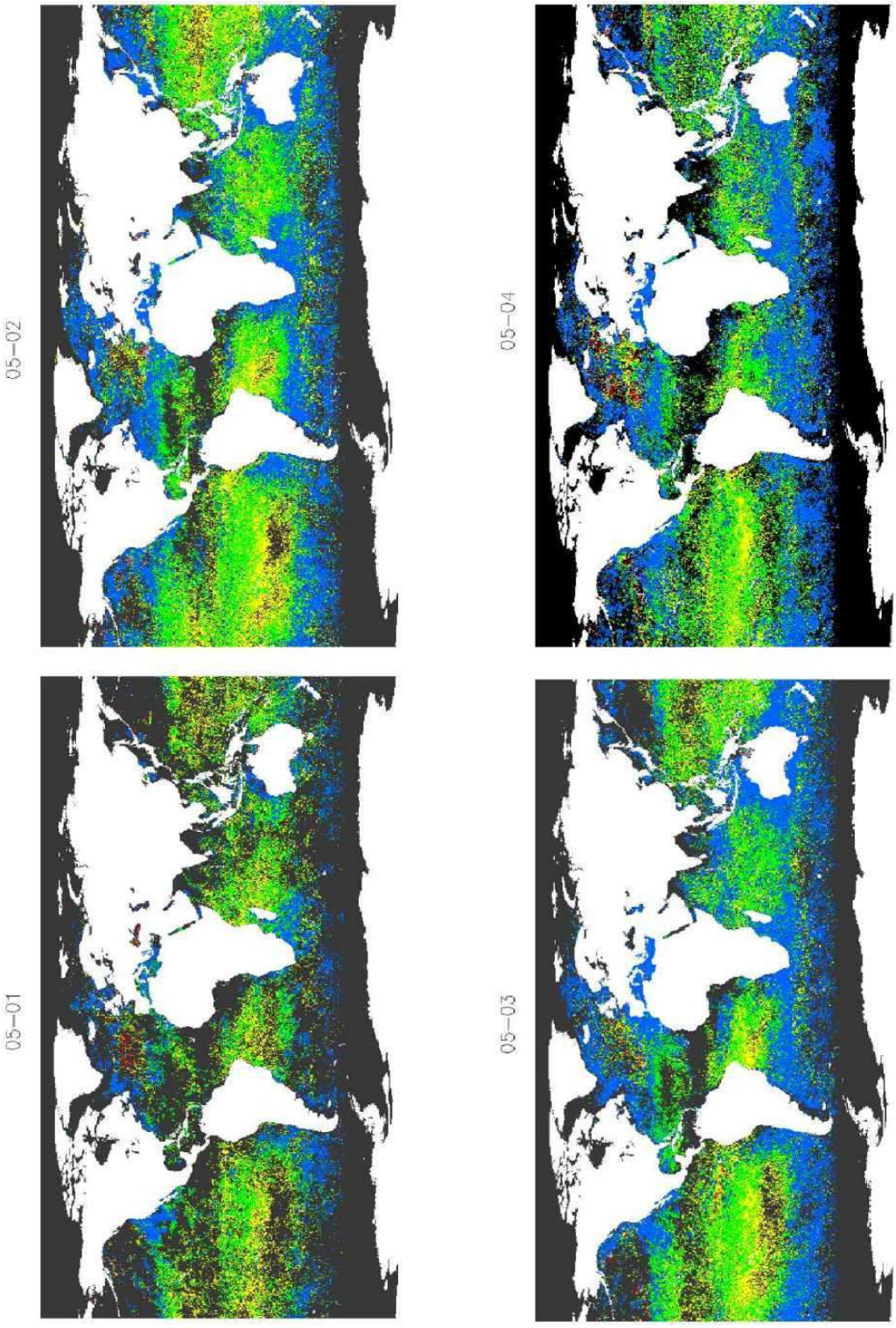


Mois d'AVRIL 1998 à 2004

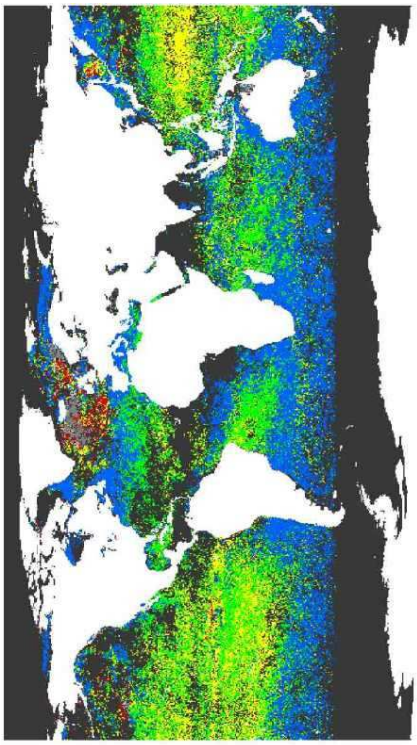

05-98

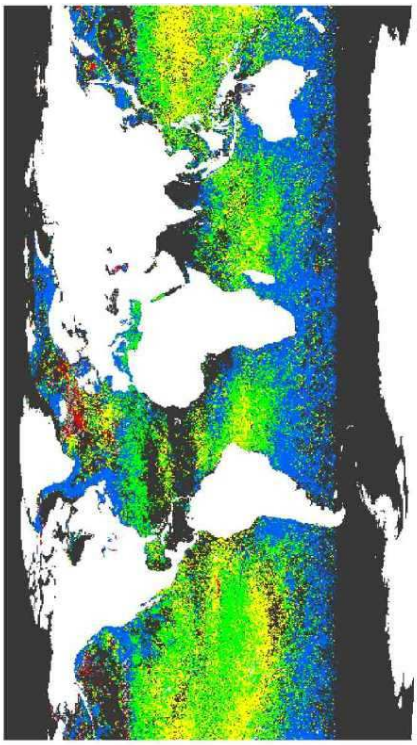

05-00

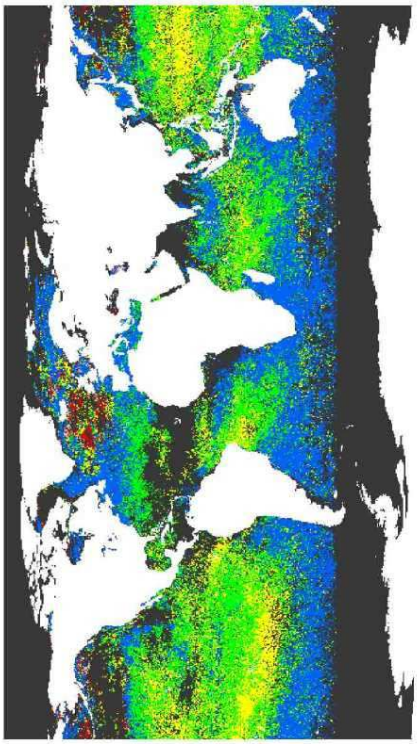

05-99

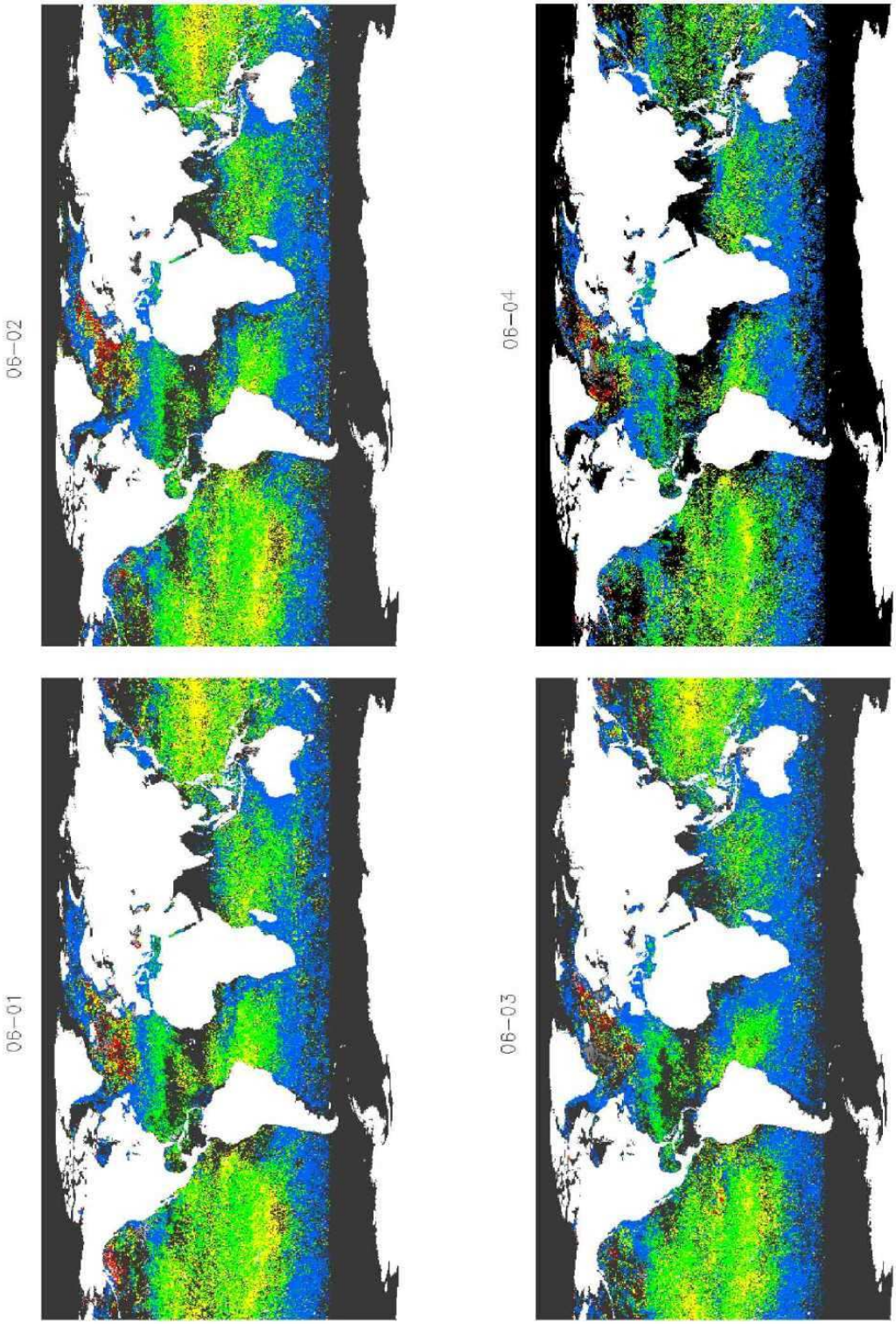


Mois de MAI 1998 à 2004

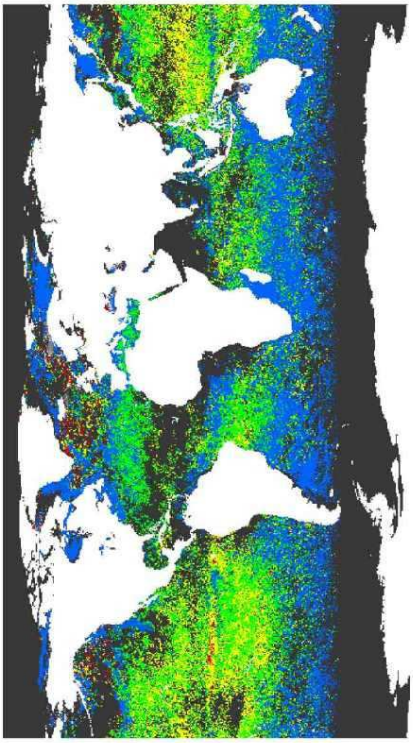

06-98

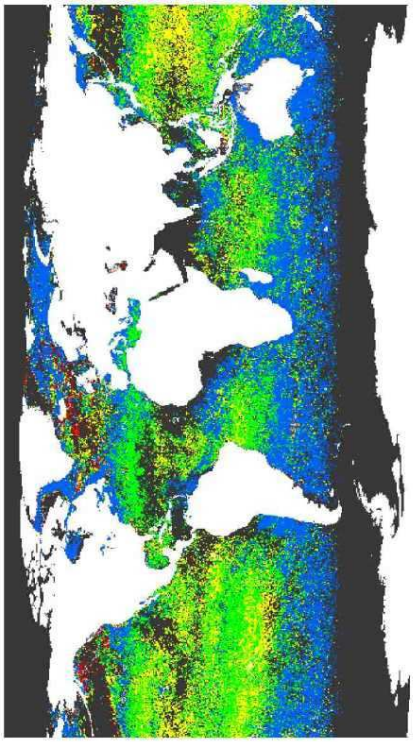

06-00

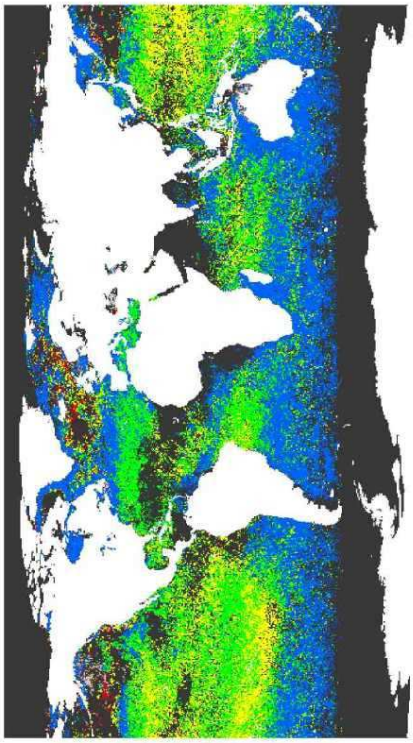

06-99

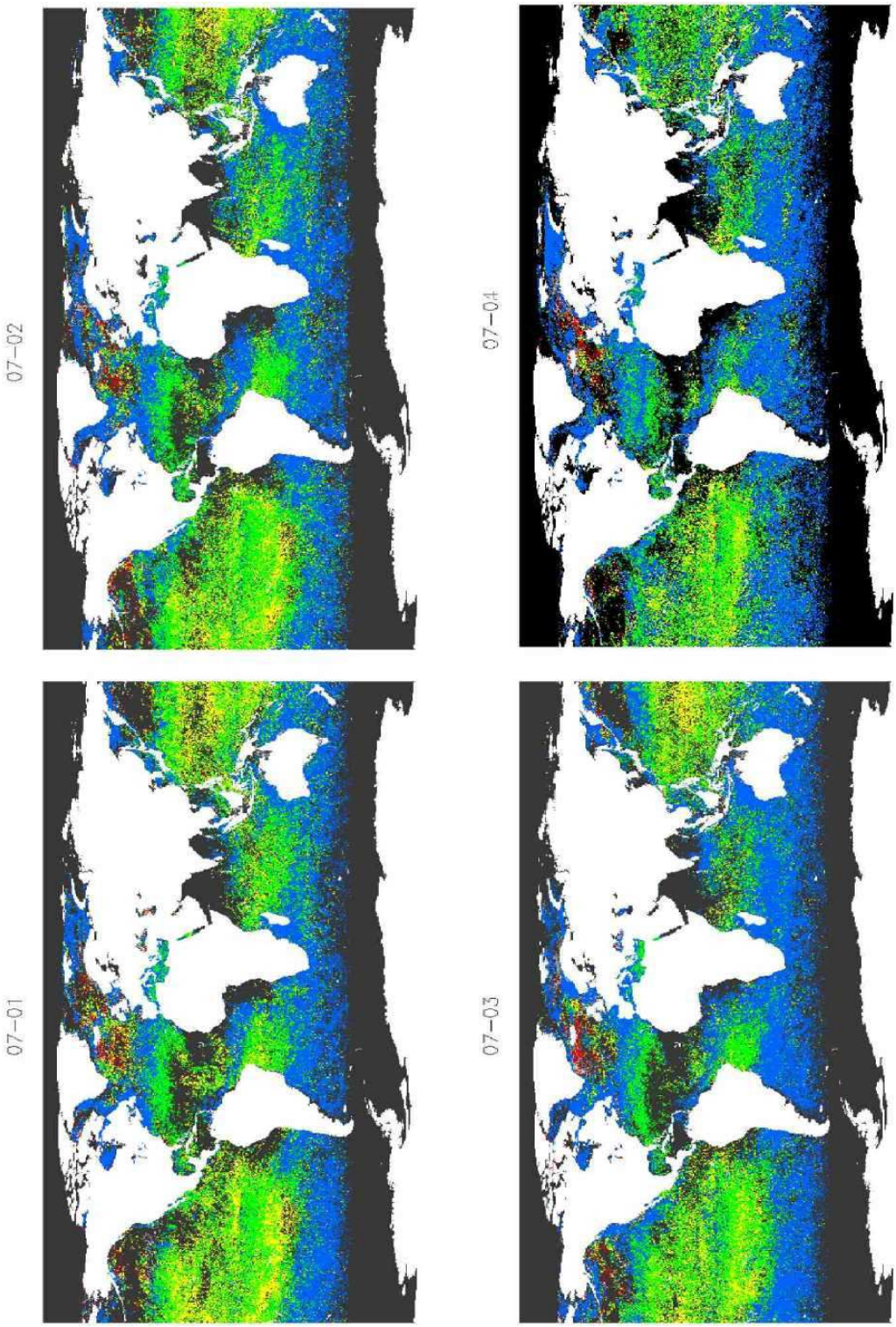


Mois de JUIN 1998 à 2004

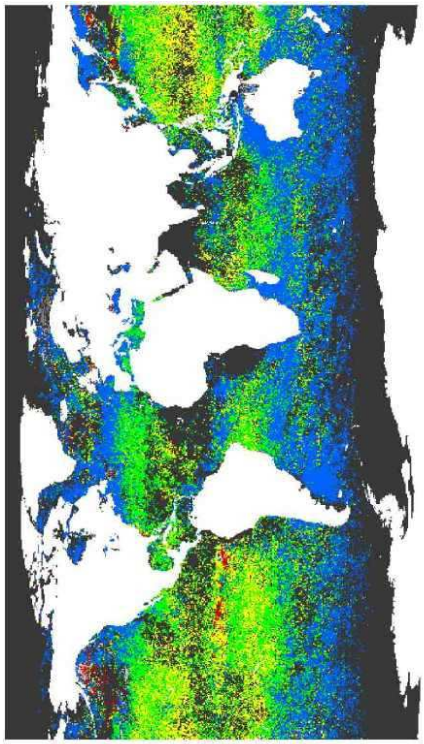

07-98

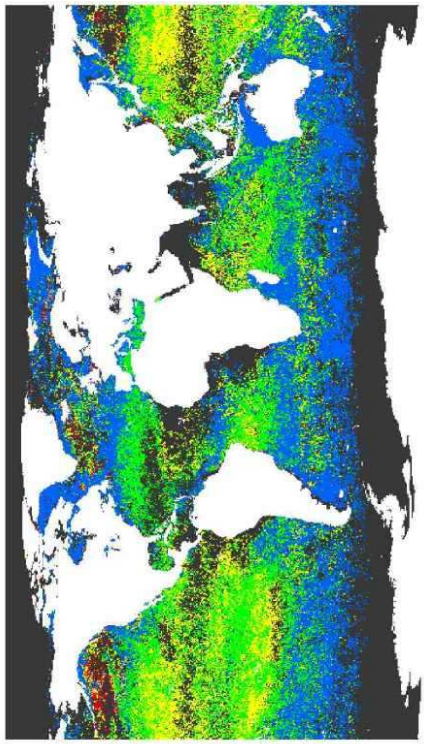

07-00

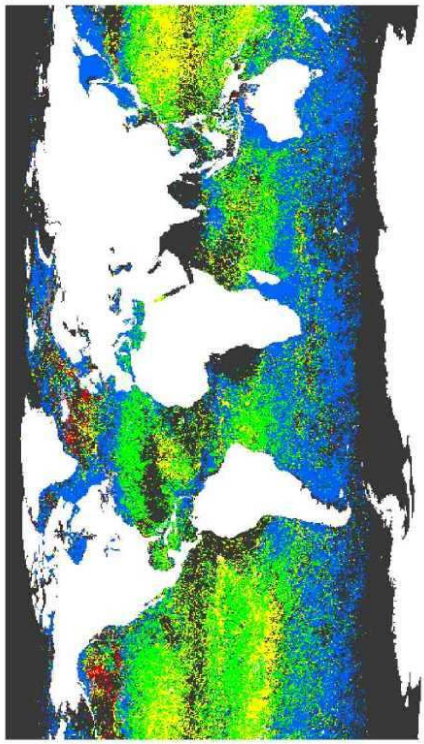

07-99

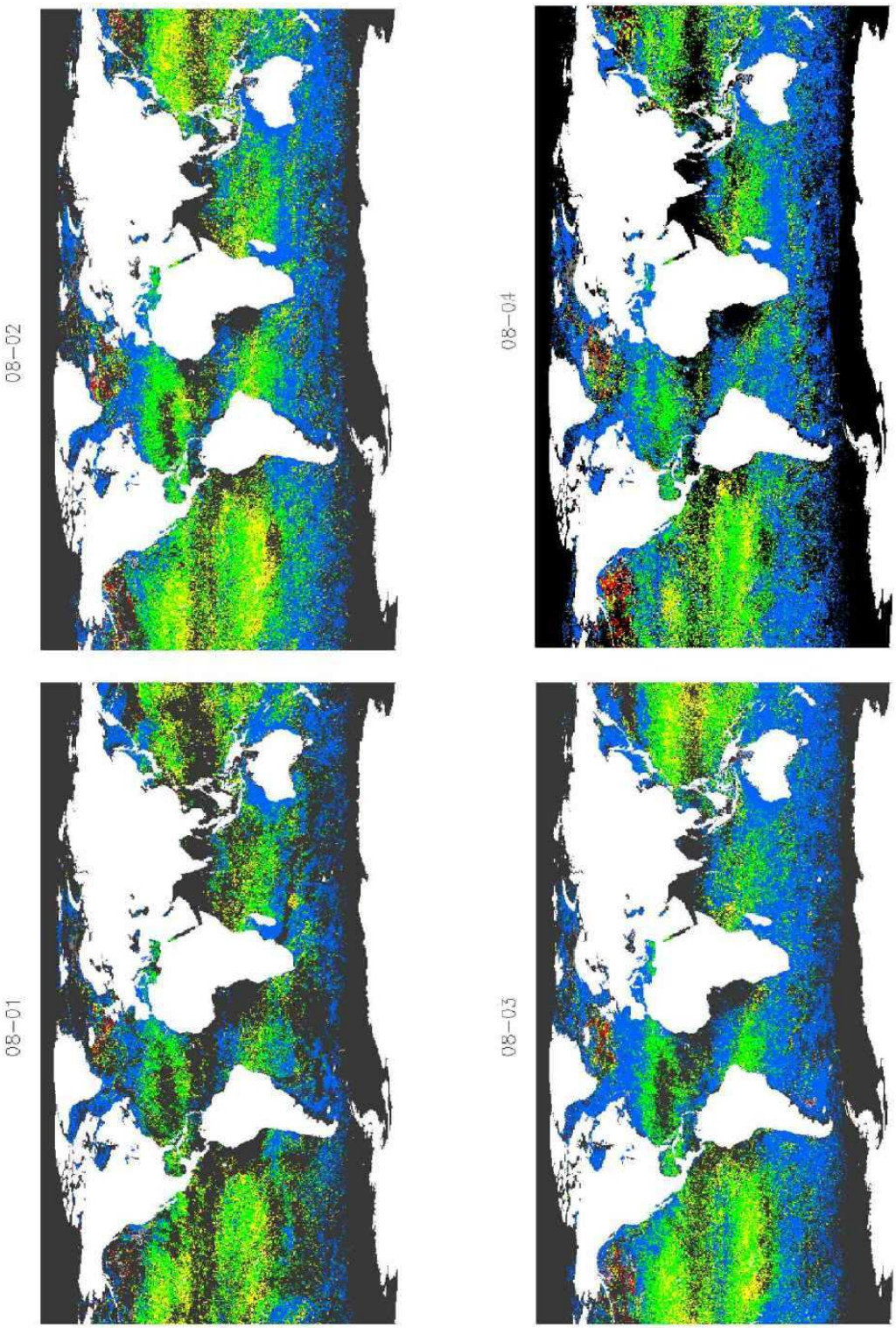


Mois de JUILLET 1998 à 2004

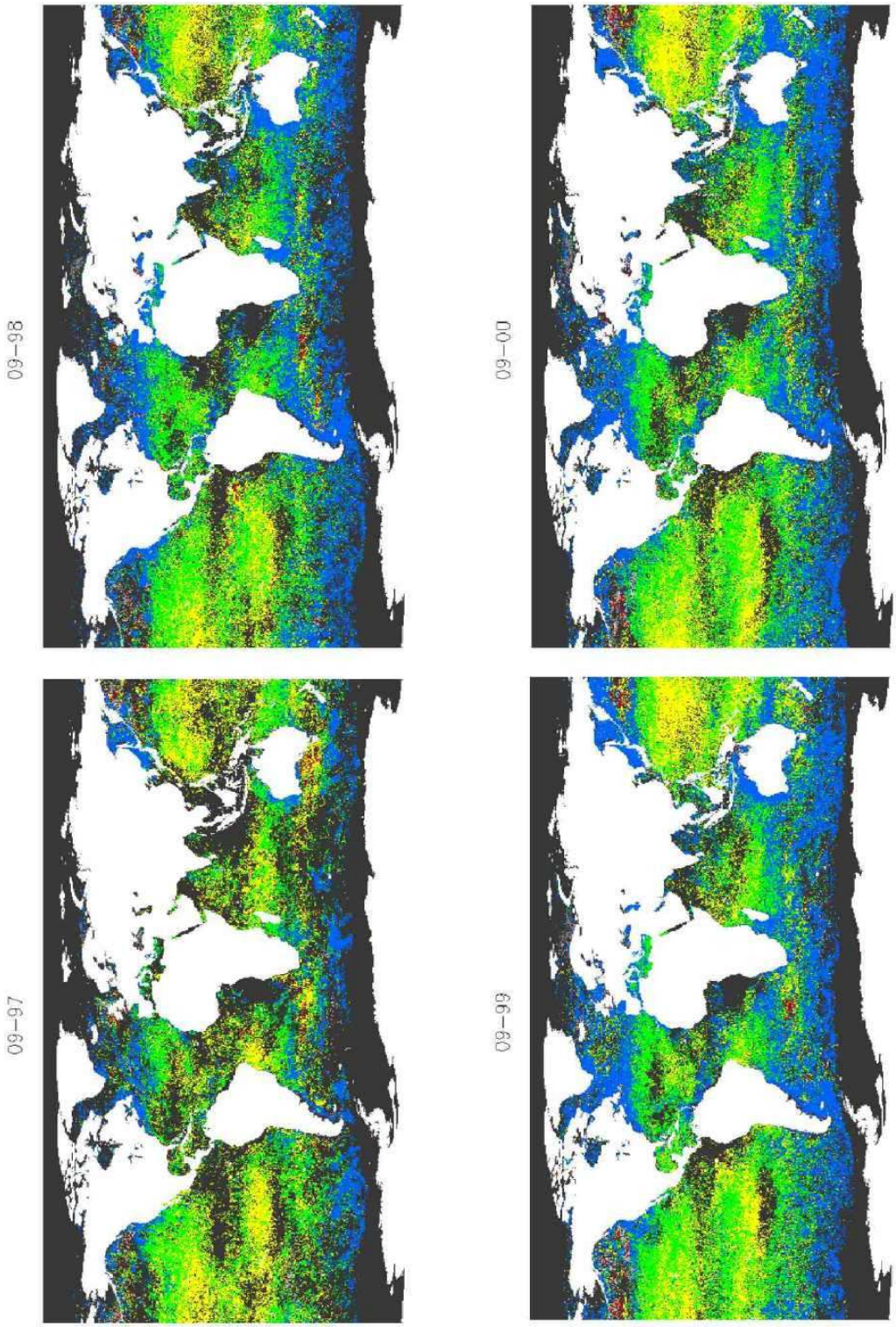

08-98

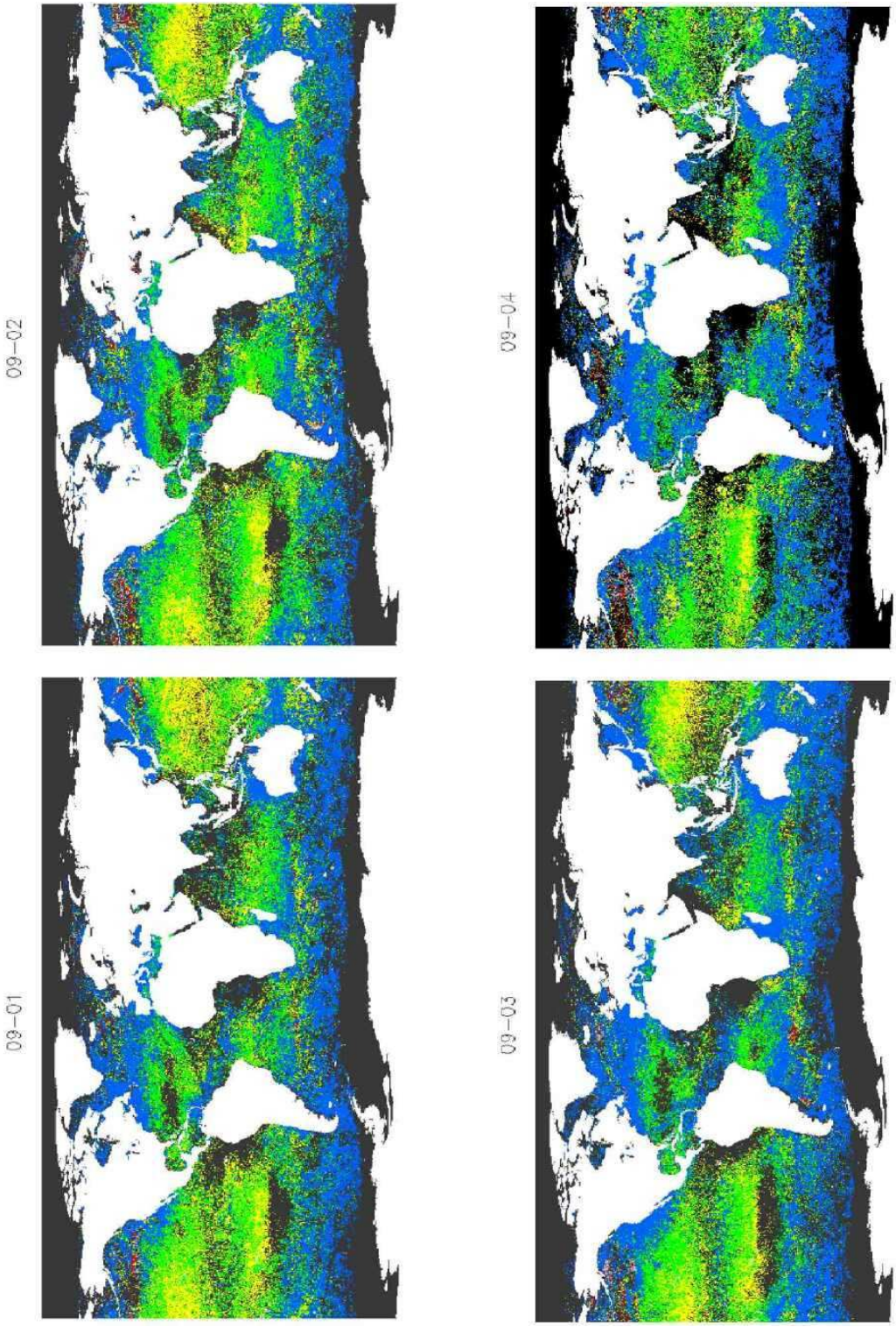

08-00


08-99

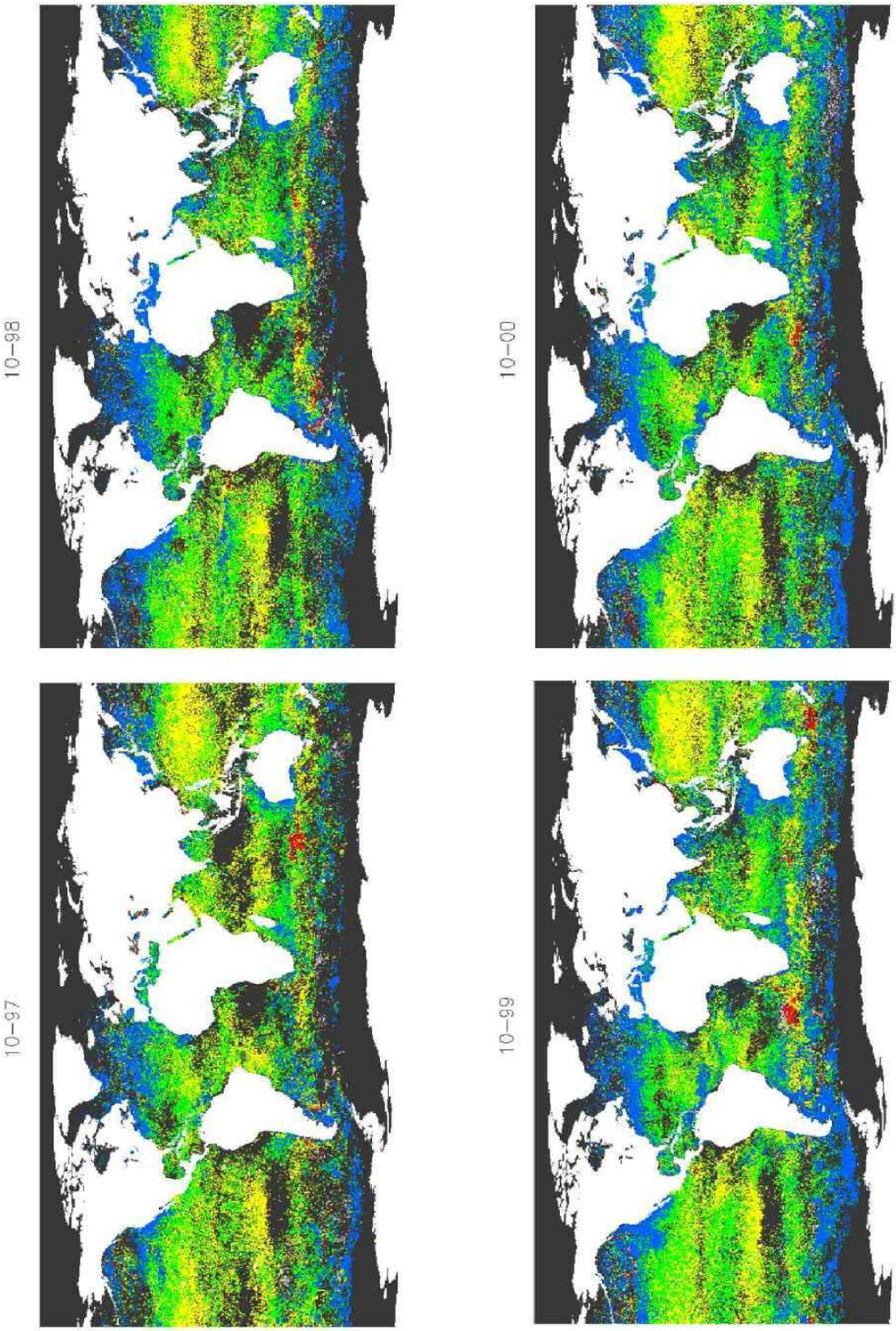


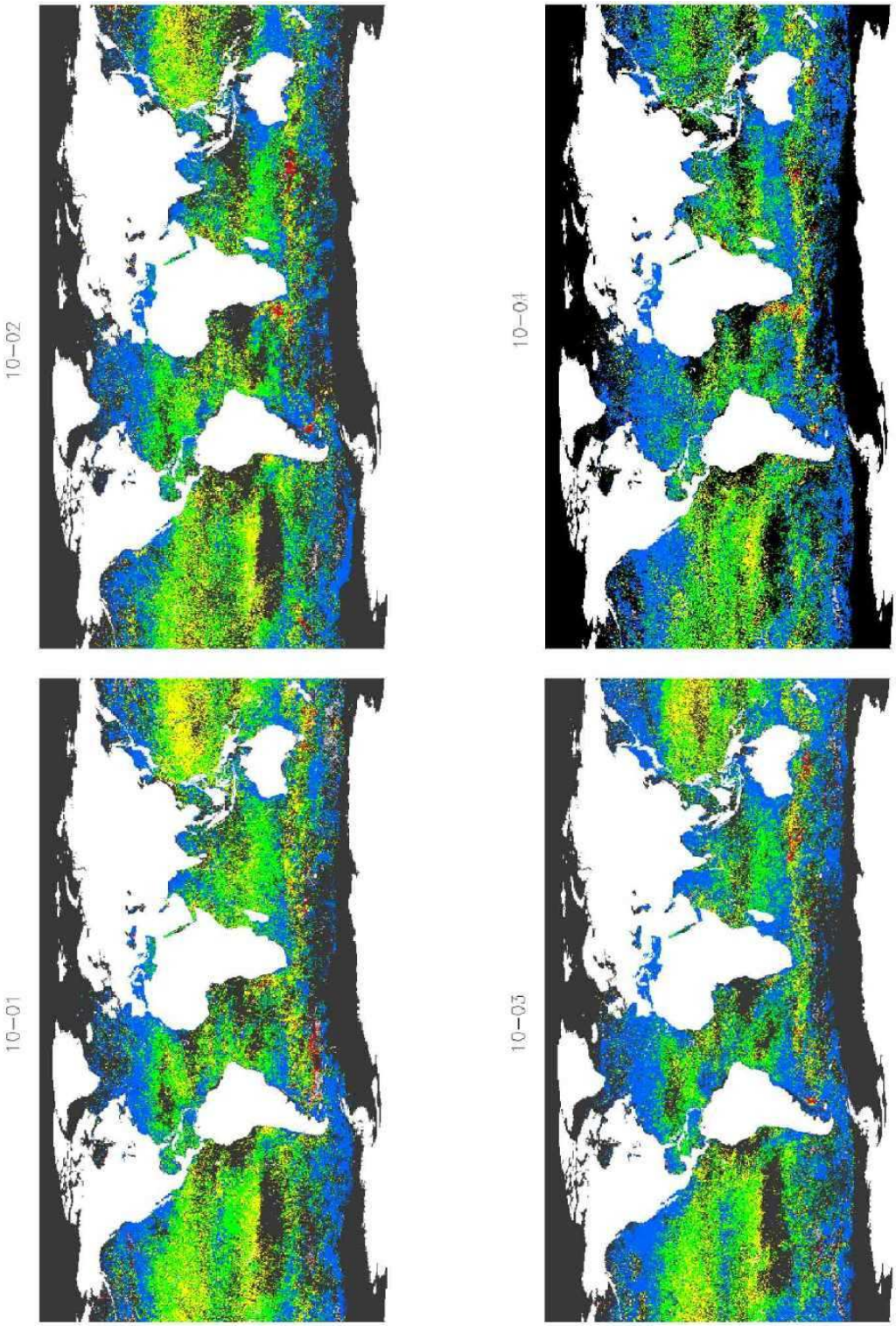
Mois d'AOÛT 1998 à 2004


09-97
09-98
09-99
09-00

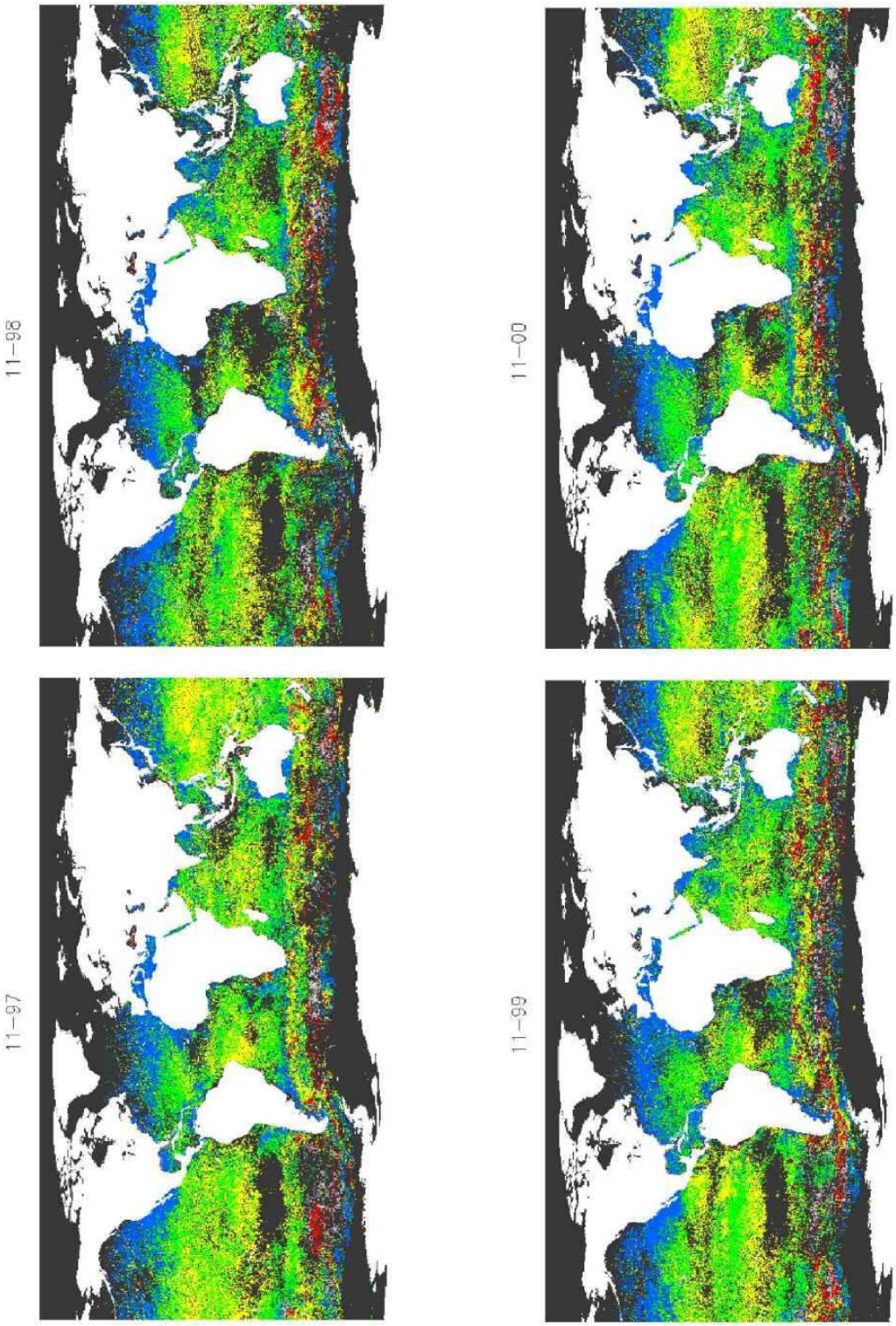


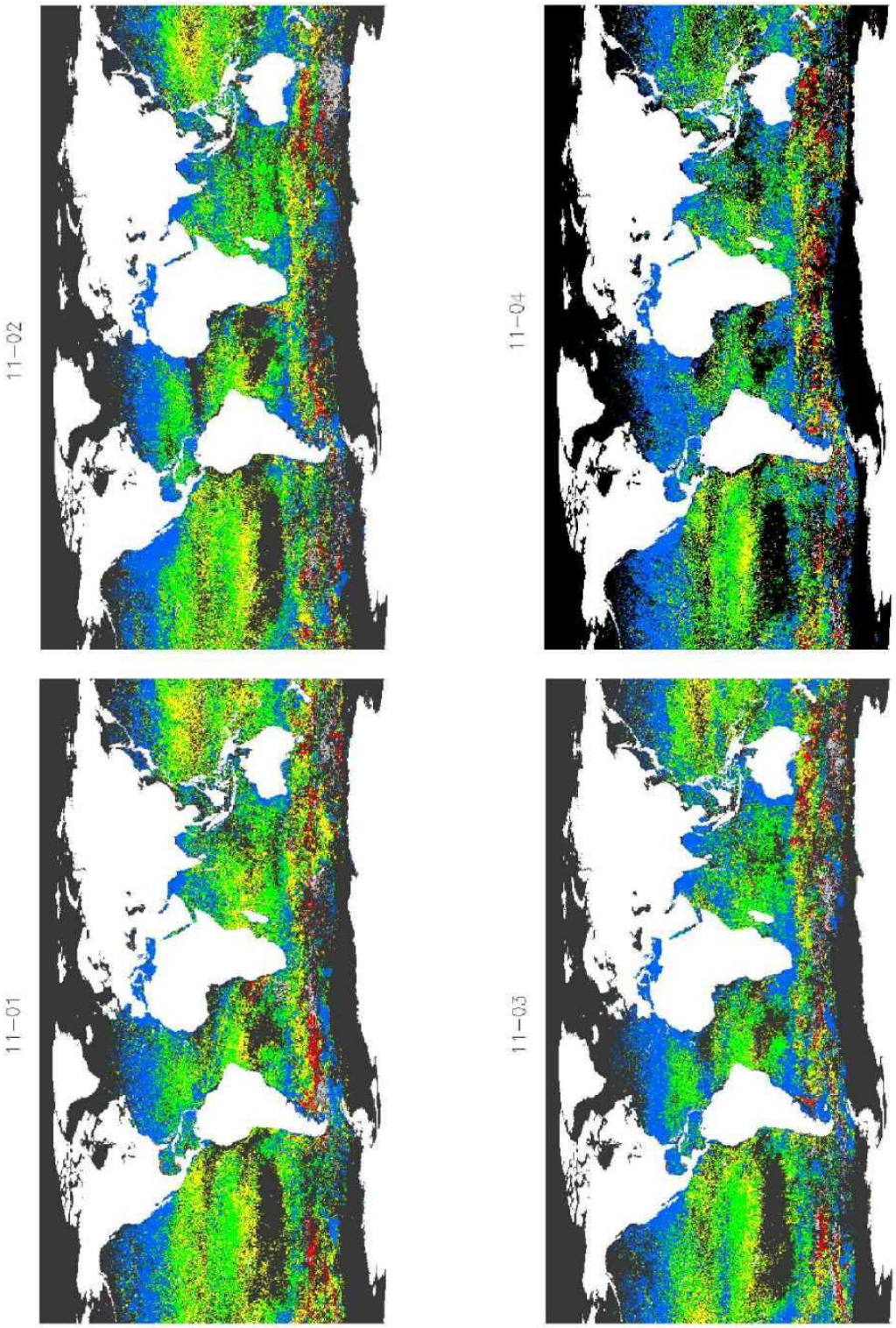
Mois de SEPTEMBRE 1997 à 2004


10-97
10-98
10-99
10-00

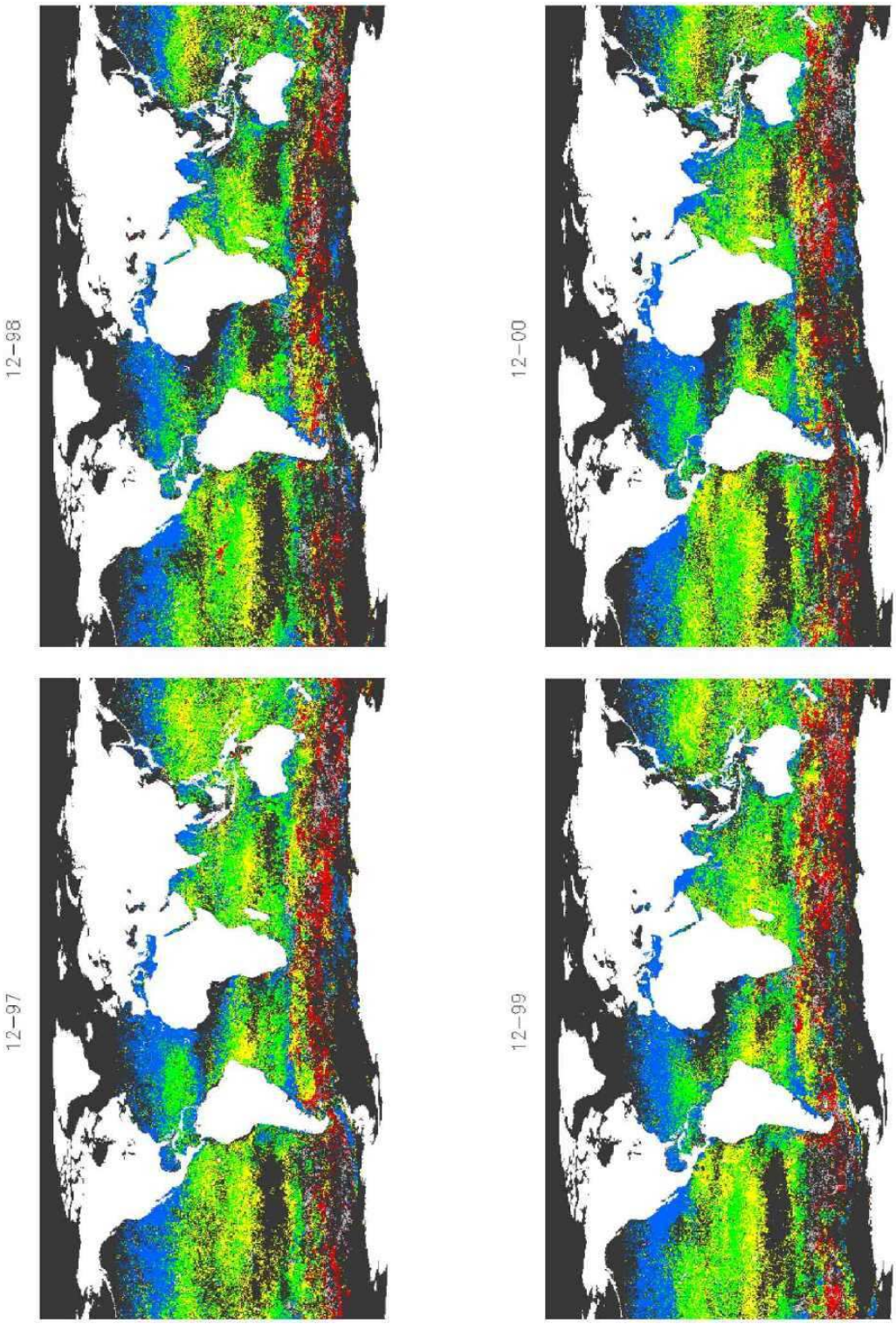


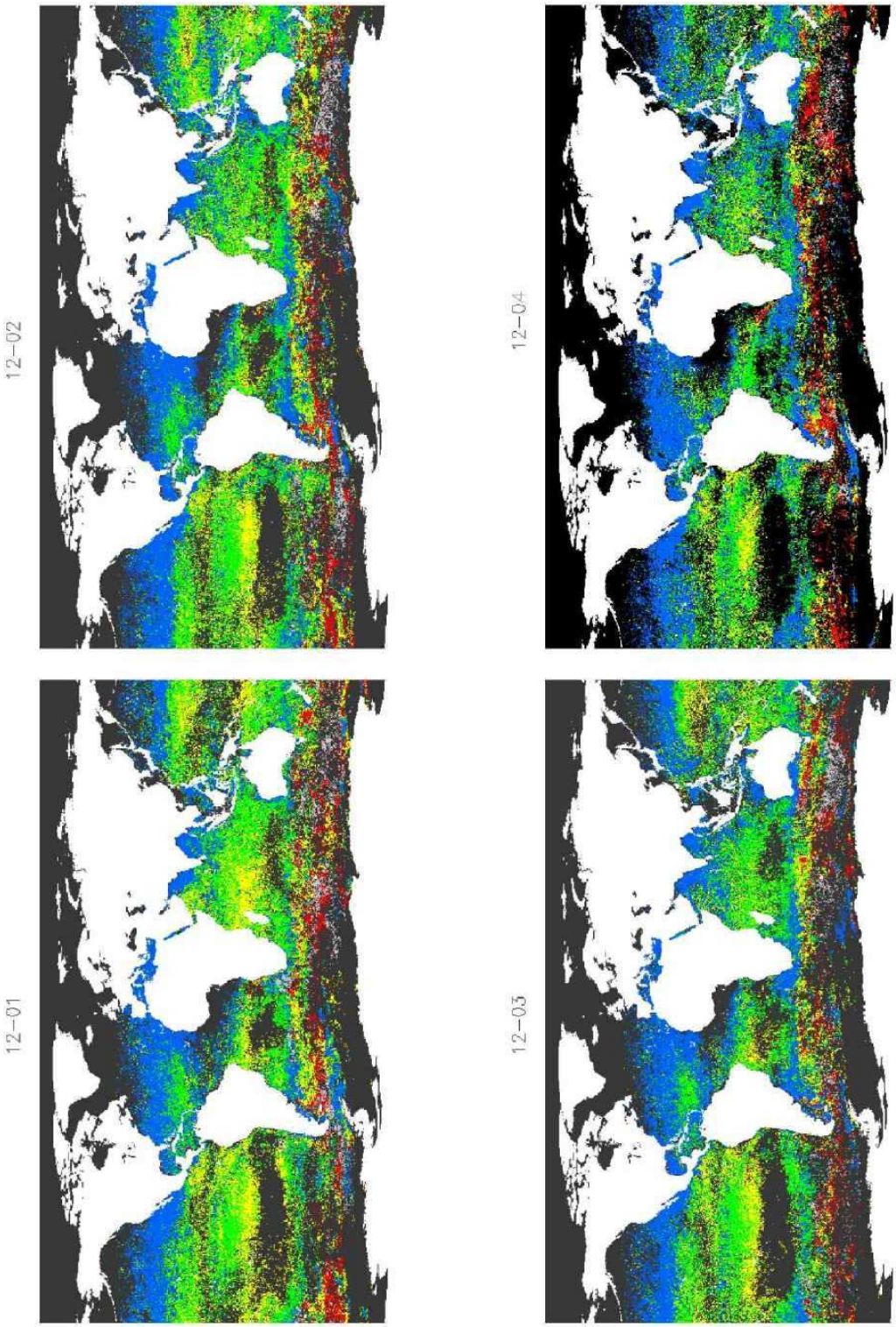
Mois d'OCTOBRE 1997 à 2004


11-97
11-98
11-99
11-00



Mois de NOVEMBRE 1997 à 2004


12-98
12-00
12-97
12-99



Mois de DECEMBRE 1997 à 2004

RESUME

Le phytoplancton joue un rôle important dans le cycle océanique du carbone. Les capteurs spatiaux de « couleur de l'océan » permettent, depuis plus de vingt ans, un suivi quasi-quotidien de la concentration en phytoplancton dans les eaux de surface du globe. Ces données sont utilisées pour quantifier la « pompe biologique marine » de carbone. Cependant, l'efficacité de cette « pompe biologique » varie fortement en fonction du groupe de phytoplancton présent dans les eaux de surface. Distinguer les principaux groupes depuis l'espace était donc un enjeu majeur des études de la couleur de l'océan au début de ma thèse.

Durant ma thèse, j'ai utilisé une approche empirique visant à mettre en évidence des relations entre les mesures spectrales effectuées par le capteur spatial SeaWiFS et la présence de groupes dominants de phytoplancton identifiés à l'aide d'inventaires pigmentaires collectés lors des campagnes GeP&CO (10/1999 - 07/2002) entre la France et la Nouvelle-Calédonie. J'ai montré que quatre grands groupes de phytoplancton peuvent être identifiés de façon fiable (Haptophytes, *Prochlorococcus, Cyanobacterie* et Diatomées) et que trois groupes supplémentaires sont probablement détectables (*Trichodesmiums*, Phaeocystis, Coccolithophoridés). J'ai appliqué cette classification, appelée PHYSAT, à l'ensemble des données journalières du capteur SeaWIFS de 1997 à 2004. Les résultats obtenus apportent, pour la première fois, une information sur la distribution spatio-temporelle des principaux groupes de phytoplancton à l'échelle du globe.

SUMMARY

Phytoplankton plays an important role in the carbon cycle in the ocean. Ocean color sensors allow for more than 20 years a quasi-daily monitoring of the surface concentration in phytoplankton. These data are used to quantify the "ocean biological pump" of carbon. However, the efficiency of this « biological pump » strongly depends on the phytoplankton group present in surface waters. Distinguishing dominant phytoplankton groups from remote sensing was thus one of the major challenges of ocean color at the beginning of my PhD.

During my PhD, I used an empirical approach to derive relationship between SeaWiFS spectral measurements and dominant phytoplankton groups by using a large set of quantitative inventories of phytoplankton pigments collected during GeP&CO cruises between France and New Caledonia (10/1999 - 07/2002). I have shown that four major phytoplankton groups, ie. Haptophytes, *Prochlorococcus, Synechococcus-like cyanobacteria* and diatoms can be detected from their spectral signatures and that three additional ones can also likely be detected (*Trichodesmiums*, Phaeocystis, Coccolithophorids). This classification, named PHYSAT, has been applied to all daily SeaWiFS data from 1997 to 2004. These results bring for the first time information about the space and time distribution of main phytoplankton groups at the global scale.