
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 appliquée :

$$\log(\text{Chl } a) = a \log_4(r) + b \log_3(r) + c \log_2(r) + d \log(r) + e \quad (6.1.1)$$

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

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

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

$$\text{Rrs}(\lambda) = \text{nLw}(\lambda) / \text{E0}(\lambda) \quad (6.1.3)$$

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

Chapitre 6 : Utilisation de PHYSAT pour l'amélioration du produit
 « concentration en chlorophylle *a* du capteur SEAWiFS

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 <i>a</i> 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*.

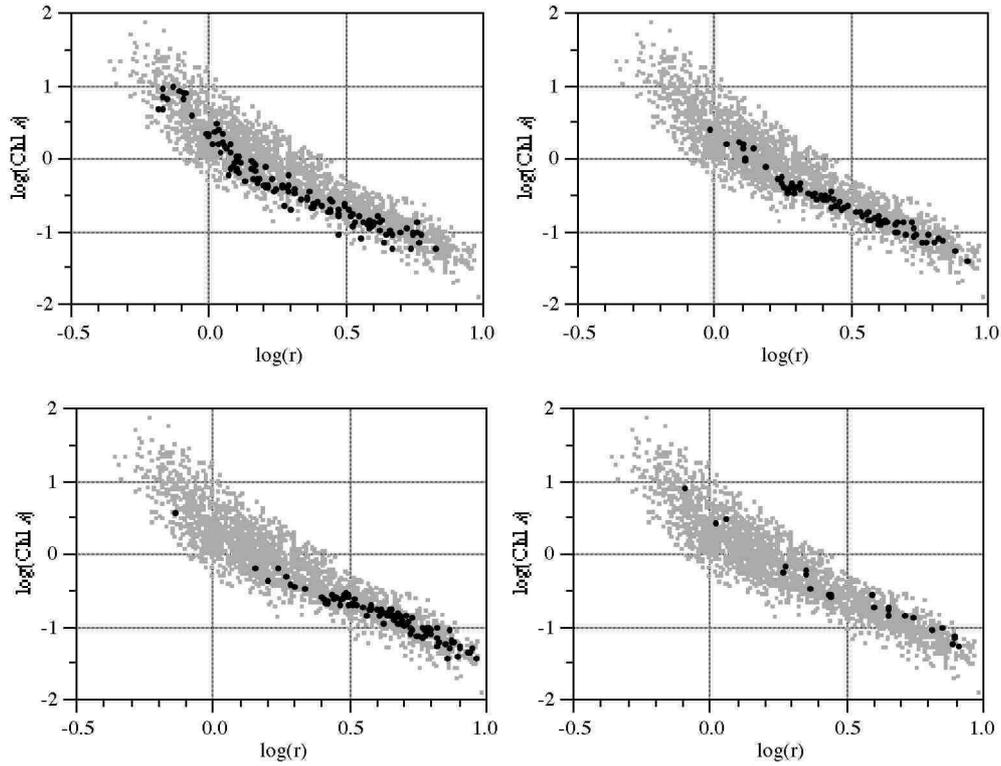


Figure 6.1.1 Valeurs de Chl *a* en fonction du maximum du rapport « bleu sur vert » pour les mesures de la base de données NOMAD. Les points noirs représentent les mesures qui ont été classifiées par PHYSAT comme : haptophytes (haut gauche- 130 données), *Prochlorococcus* (haut droite- 83 données), cyanobactéries (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.

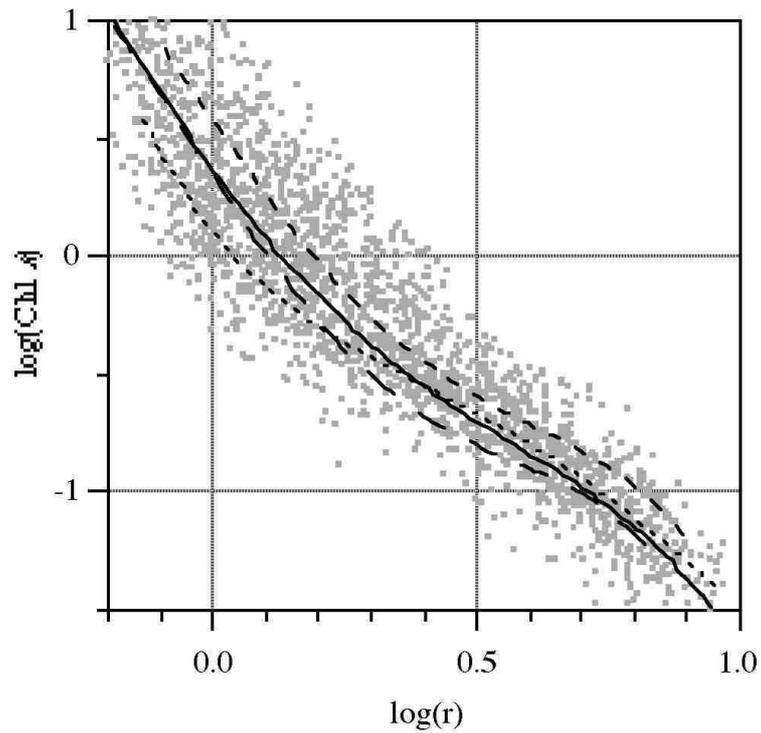


Figure 6.1.2 : Relations de type OC4V4 pour les points labellisés comme haptophytes (ligne de tirets longs), cyanobactéries (ligne de points) et diatomées (ligne de tirets moyens). Comme pour la figure 6.1.1 les points gris représentent l'ensemble de la base NOMAD.

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 *Prochlorococcus*, 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 $\pm 20\%$ 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.

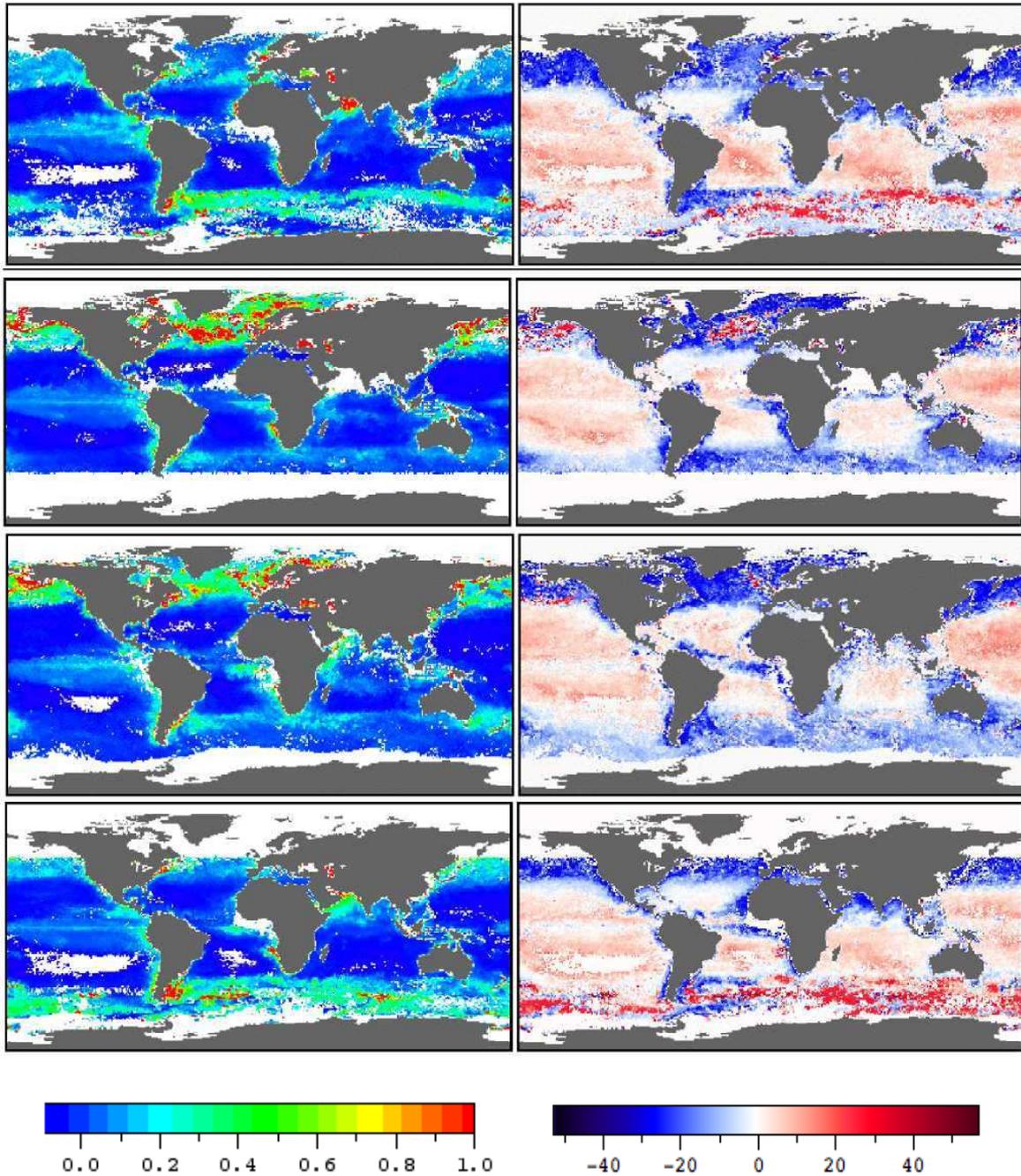


Figure 6.1.3 : Cartes de la concentration en chlorophylle *a* mensuelle pour OC4-SD (à gauche en mg.m-3) et différence relative (à droite en %) entre les valeurs de OC4-SD et OC4V4 pour Mars (en haut), Juin, Septembre et Décembre (en bas) 2001.

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 $\pm 9\text{Km}$), lorsque ces dernières sont de bonne qualité et répondent aux critères fixés ($\tau < 0.15$ et chl *a* $< 10\text{mg.m}^{-3}$). 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 Gyuaue	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	Méditerranée	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 PHYSAT 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.

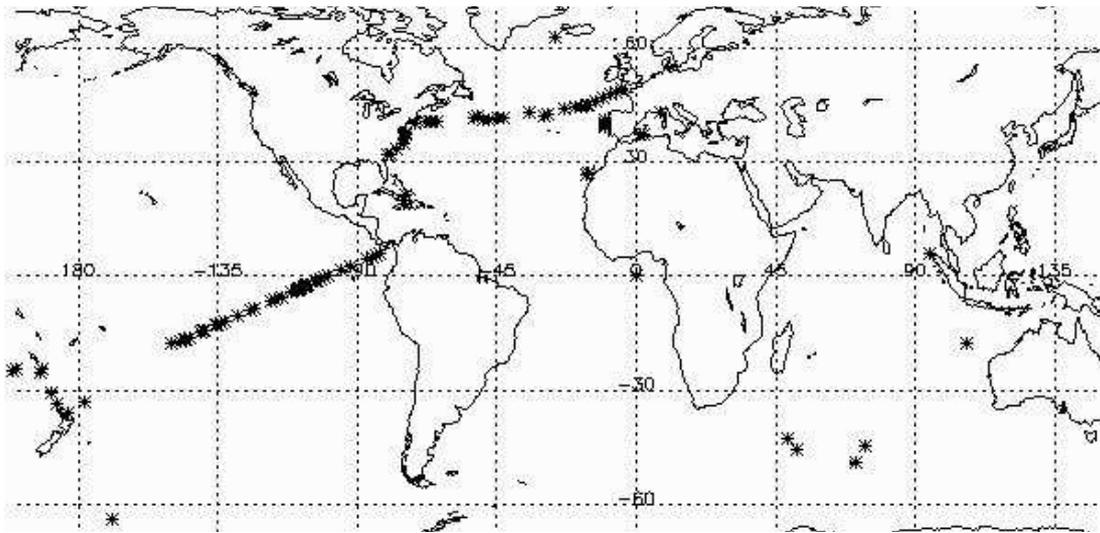


Figure 6.1.4 : Localisation des 111 mesures in-situ utilisées pour la validation du nouvel algorithme OC4-SD. Les données sont issues des campagnes GeP&CO, OISO, Skogafoss, Toucan, Colibri, Kiwi et de la station DYFAMED (voir Table 4.2).

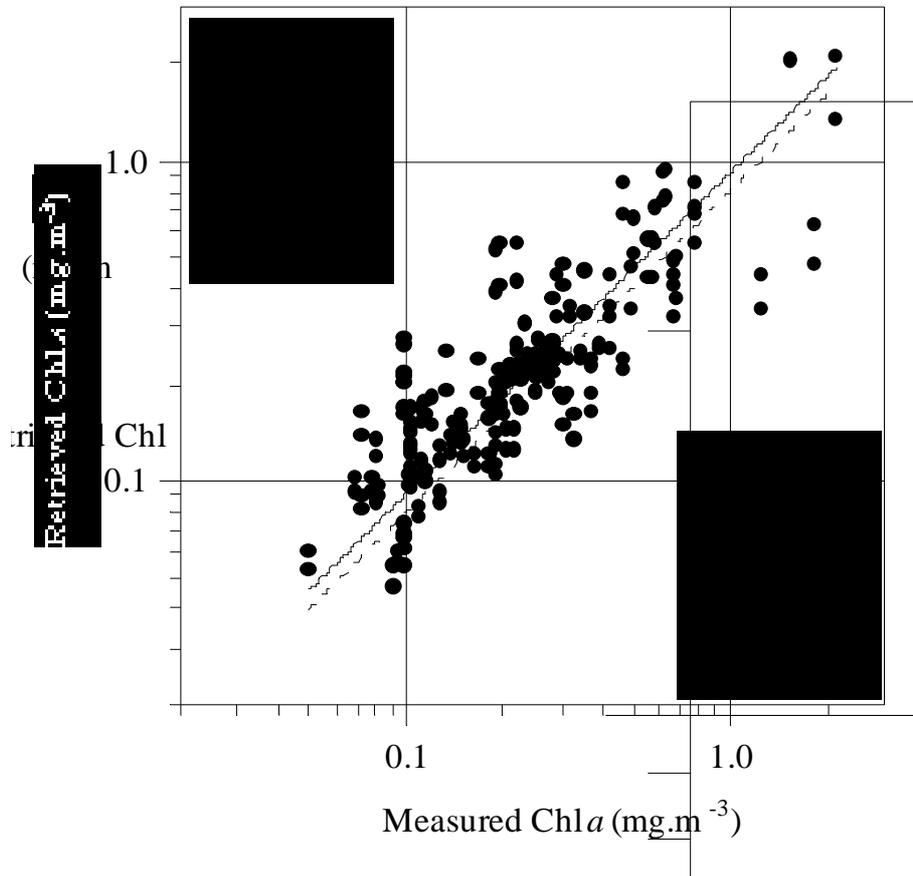


Figure 6.1.5 : Comparaison de la chlorophylle *a* calculée à la fois par OC4V4 (cercles ouverts) et OC4-SD (cercles pleins) avec la mesure in-situ pour les 111 mesures indépendantes de la validation. Ces dernières ont été classées par PHYSAT comme haptophytes (50 mesures), cyanobactéries (55 mesures) et diatomées (6 mesures). Les régressions linéaires de la forme : $Chl\ a(calculée) = \alpha \cdot Chl\ a(mesurée)$ 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 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 améliorée 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 Interaction Scheme for Carbon and Ecosystem Studies") comporte une représentation 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...

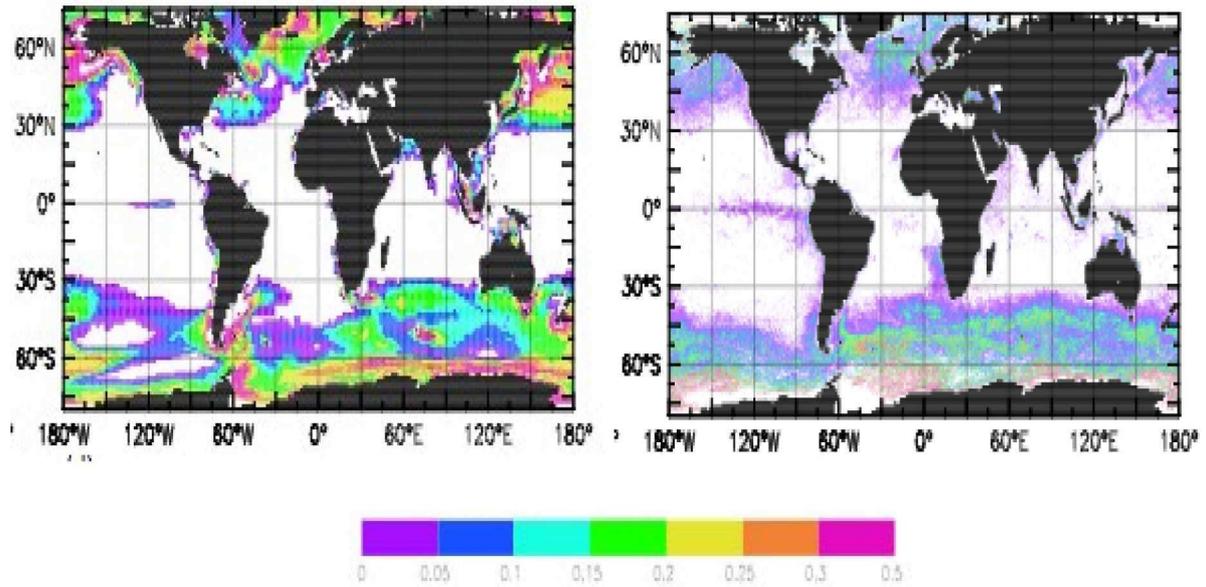


Figure 7.1.1 : *Fréquence sur une année d'apparition de diatomées dominantes dans PHYSAT (à droite) ou dans PISCES-IPSL-CM4 (à gauche). Figure extraite de l'article Bopp et al. en révision.*

7.1.1 Pacifique Equatorial : suivi de El Niño

Le terme El Niño est utilisé historiquement par les pêcheurs 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 événements 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 dite 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.

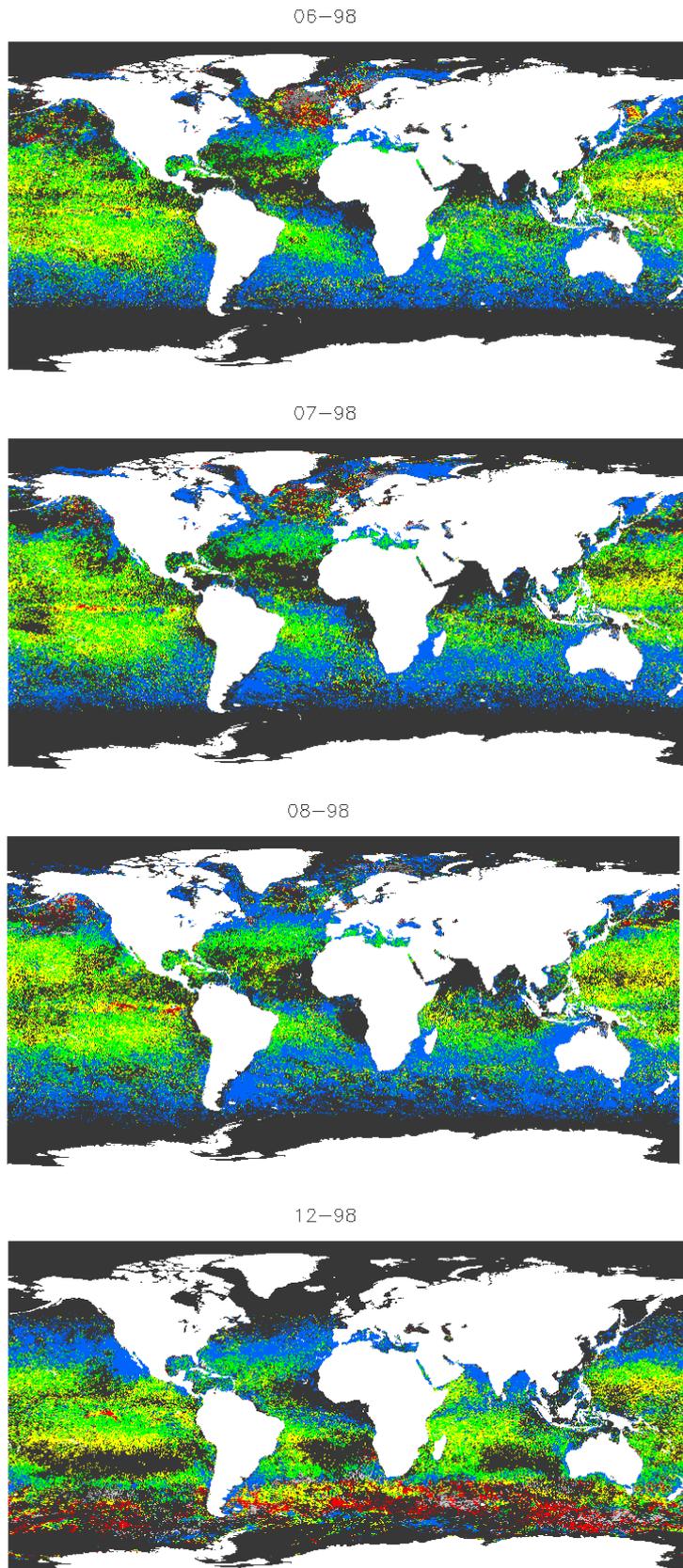


Figure 7.1.2: Cartes mensuelles PHYSAT pour les mois de juillet à août et décembre 1998.

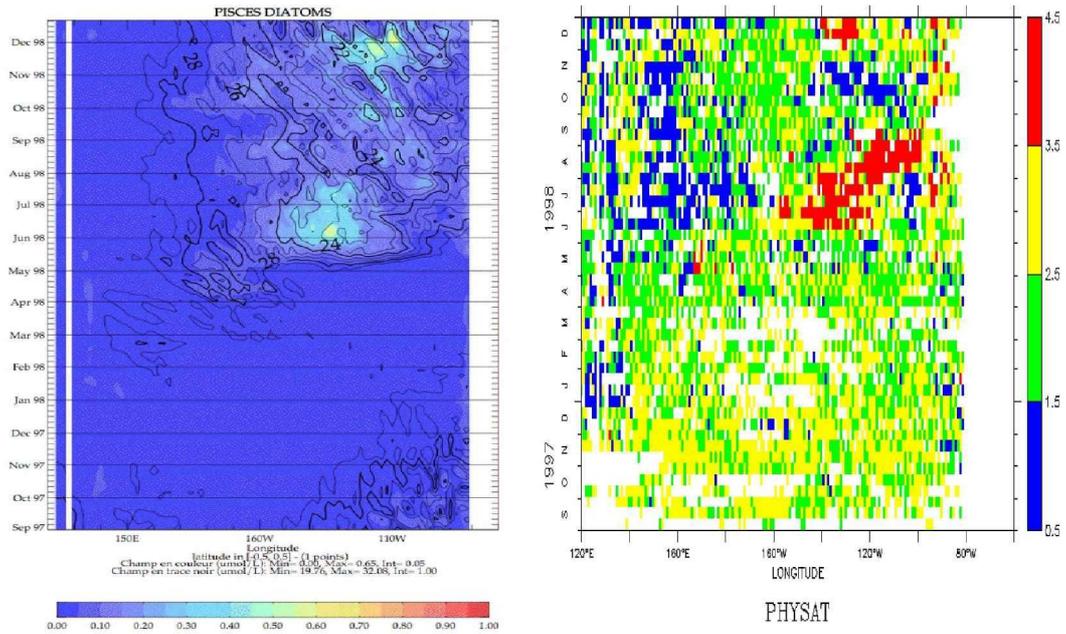


Figure 7.1.3 : À droite, détection de la floraison de diatomées à l'équateur dans PHYSAT (groupes le plus fréquent) et à gauche, la fraction relative de la chlorophylle a des diatomées sur la concentration totale dans le modèle PISCES.

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.

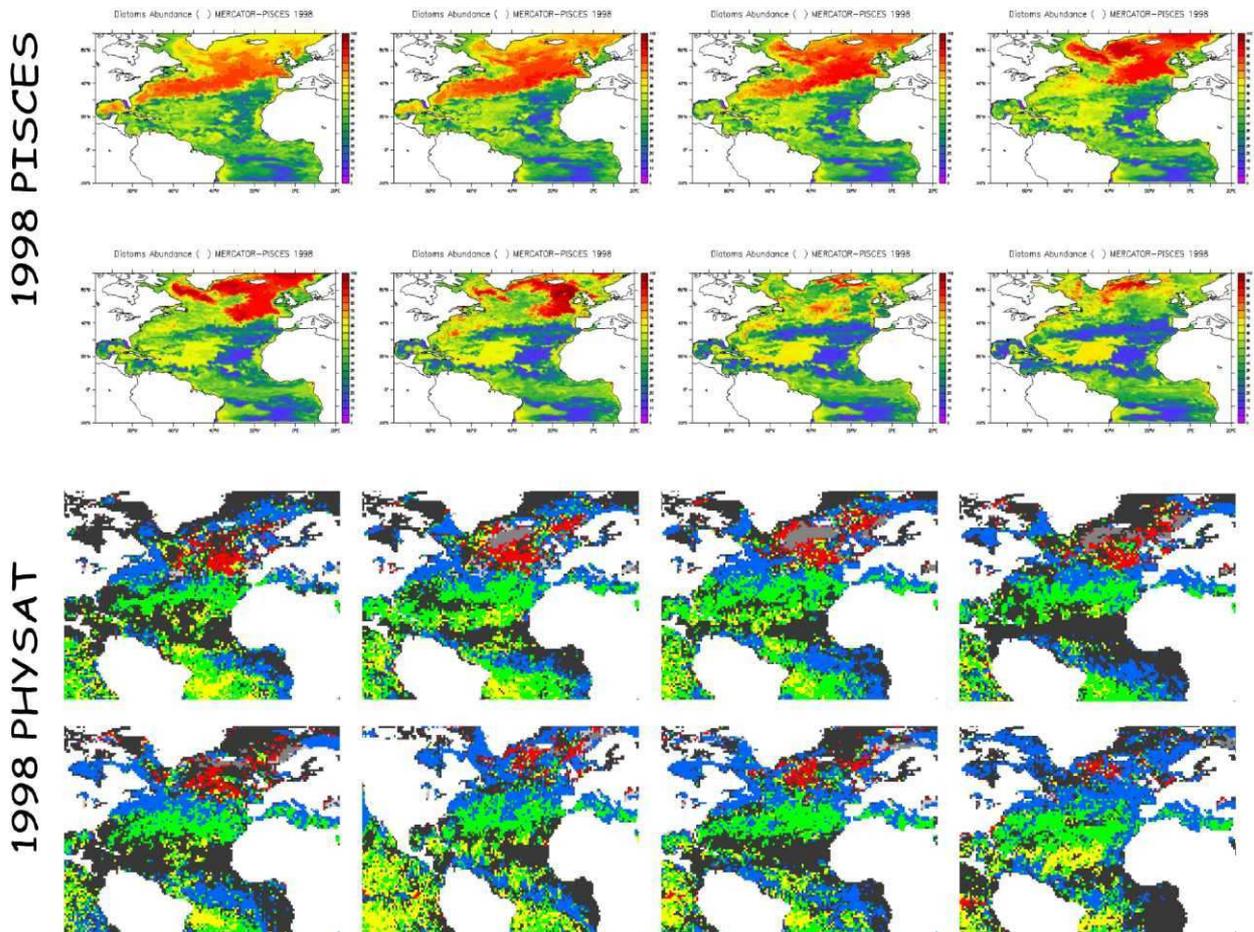


Figure 7.1.4 : Déroulement de la floraison de diatomées dans l'Atlantique Nord au printemps 1998, observé par PHYSAT à partir du 20 Mai (en bas, en rouge : diatomées dominants), et modélisé par PISCES à partir du 10 avril (en haut, pourcentage de diatomées dans le modèle : l'équivalent PHYSAT correspond 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 événements 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 incluses 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 7.2.1 en 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'éclairage. 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 7.2.1 au 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 *Prochlorococcus* 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.

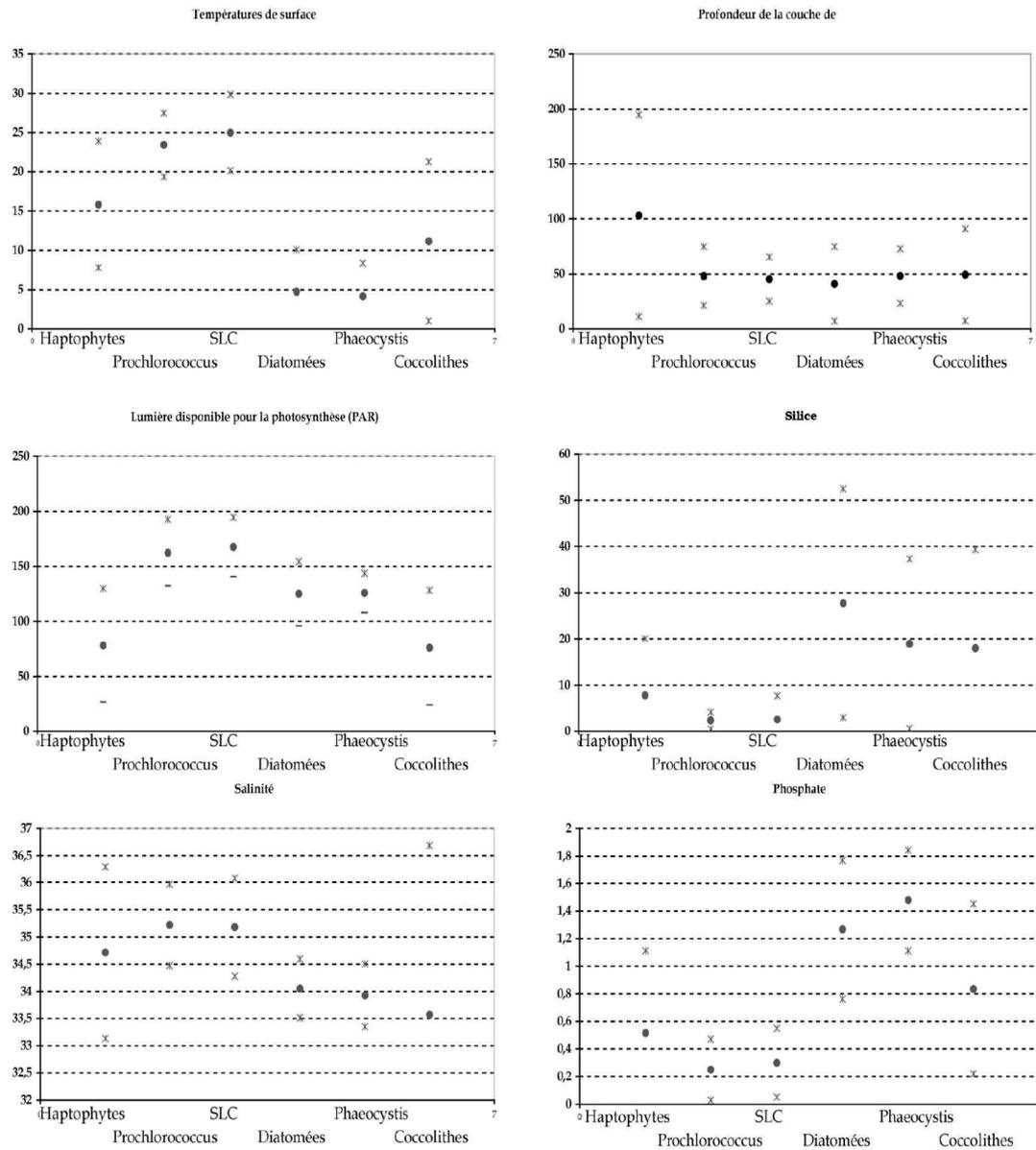


Figure 7.2.1-1: Moyennes des paramètres marins issus des climatologies du NODC pour chaque groupe PHYSTAT (points noirs, d'après une climatologie PHYSTAT sur la période 1998-2003) et écarts types associés (croix grises). De bas en haut et de gauche à droite : Température de surface, profondeur de la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

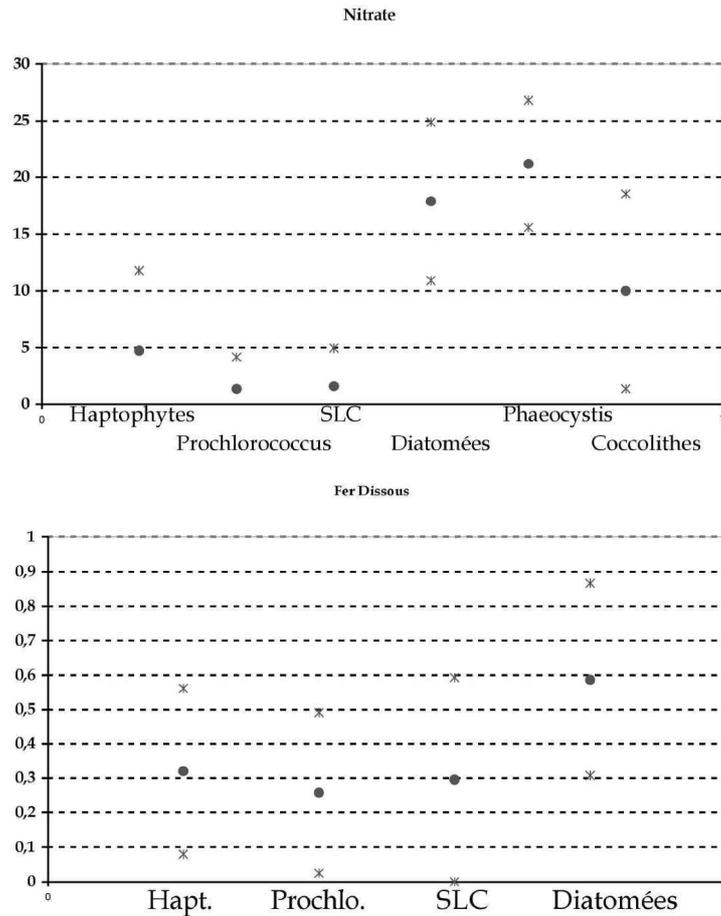


Figure 7.2.1-2: Moyennes des paramètres marins issus des climatologies du NODC pour chaque groupe PHYSTAT (points noirs, d'après une climatologie PHYSTAT sur la période 1998-2003) et écarts types (croix grises). De bas en haut: nitrate et fer dissous. Notons que pour le fer dissous les deux groupes phaeocystis 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 équatoriale 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.