
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).

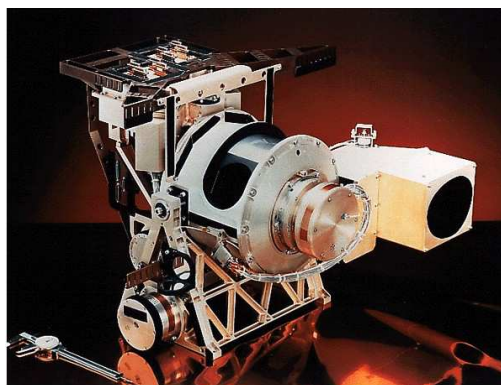


Figure 3.1.1 : Photographie du capteur SeaWiFS. Photo NASA.

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 équicylindrique 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 :

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

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 $nLw_{ref}(\lambda, Chl a)$. 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.

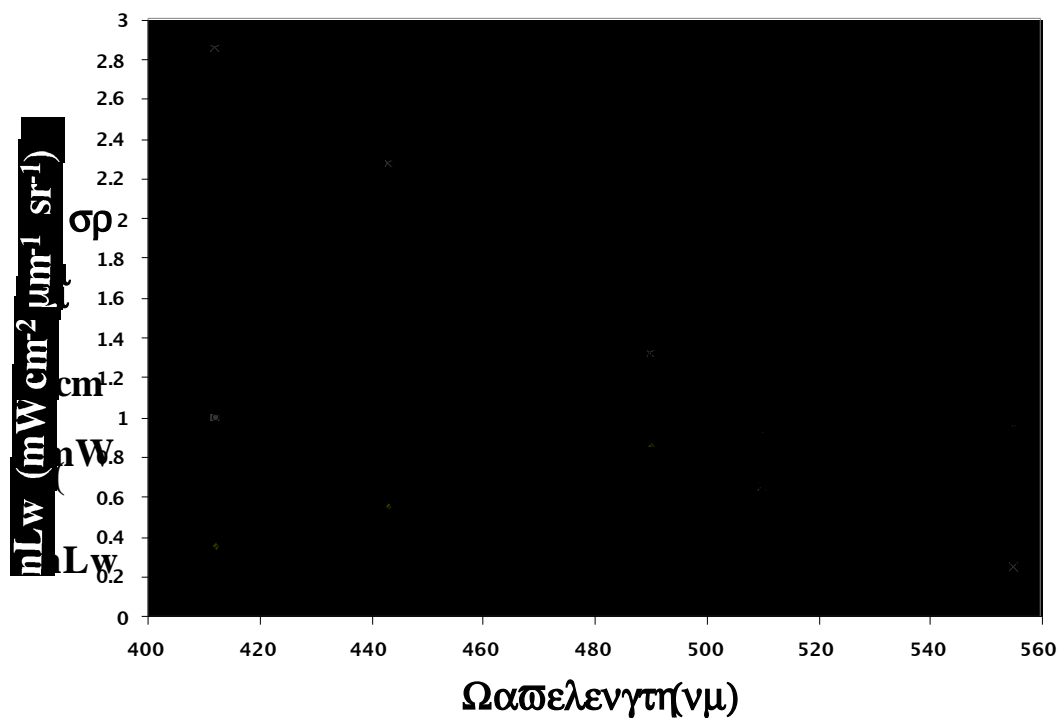


Figure 3.1.2: Valeurs des luminances marines de références $nLw_{ref}(\lambda, Chl a)$, calculées à partir de moyennes pour des petites plages de valeurs de chlorophylle a (valeurs centrales sur la gauche, de 0.04 à 4 $mg.m^{-3}$), à partir de 28800 ensembles de données SeaWiFS Chlorophylle a et $nLw(\lambda)$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

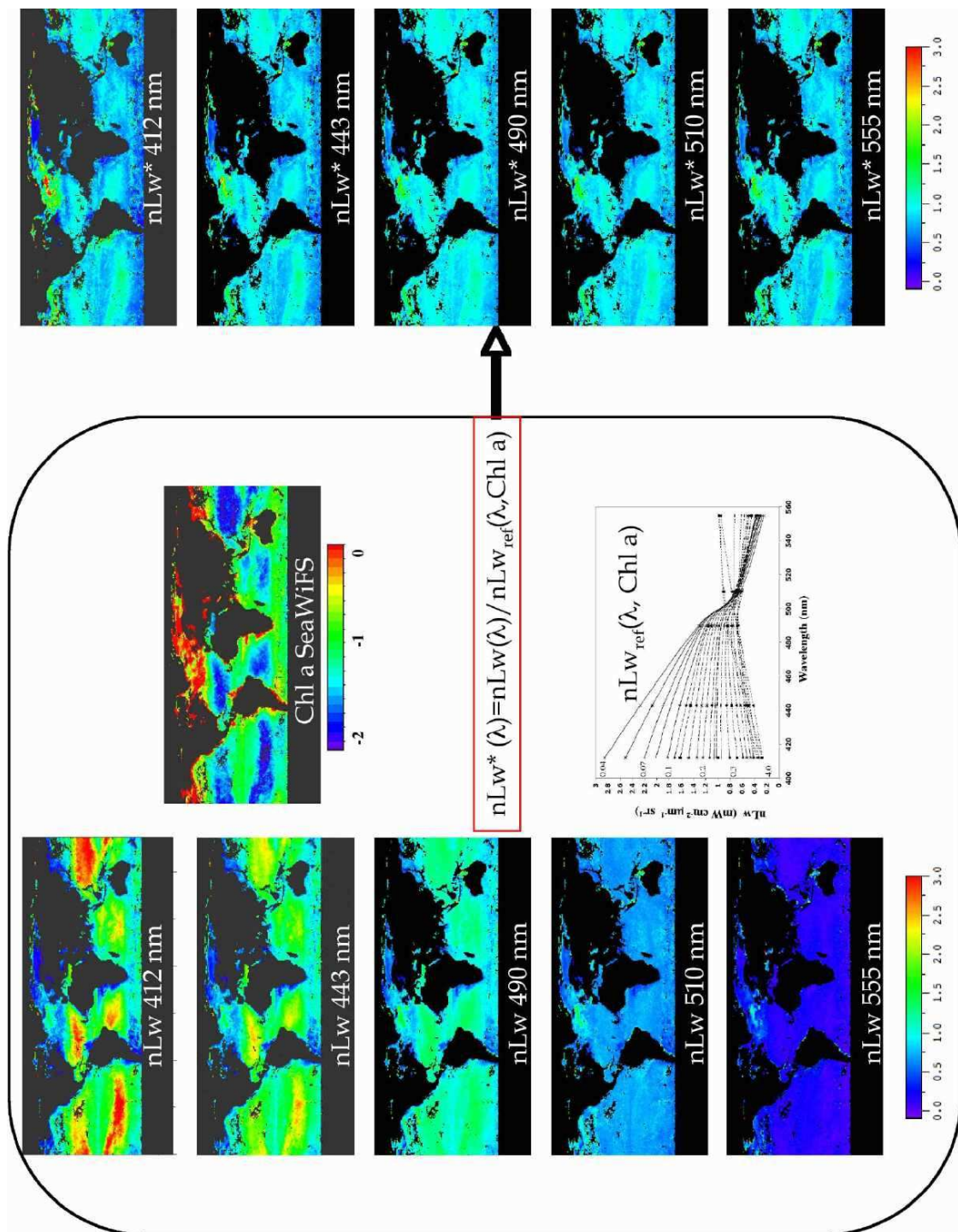


Figure 3.1.3 : Présentation schématique de la méthode de calcul des luminances marines re-normalisées (nLw^*) à partir des luminances marines (nLw) SeaWiFS et des valeurs de chlorophylle *a* associées.

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 $nLw^*(\lambda)$ 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 $nLw^*(\lambda)$ 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 $nLw^*(\lambda)$ était plus grande que 0.1 (environ 10% des $nLw^*(\lambda)$), 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.

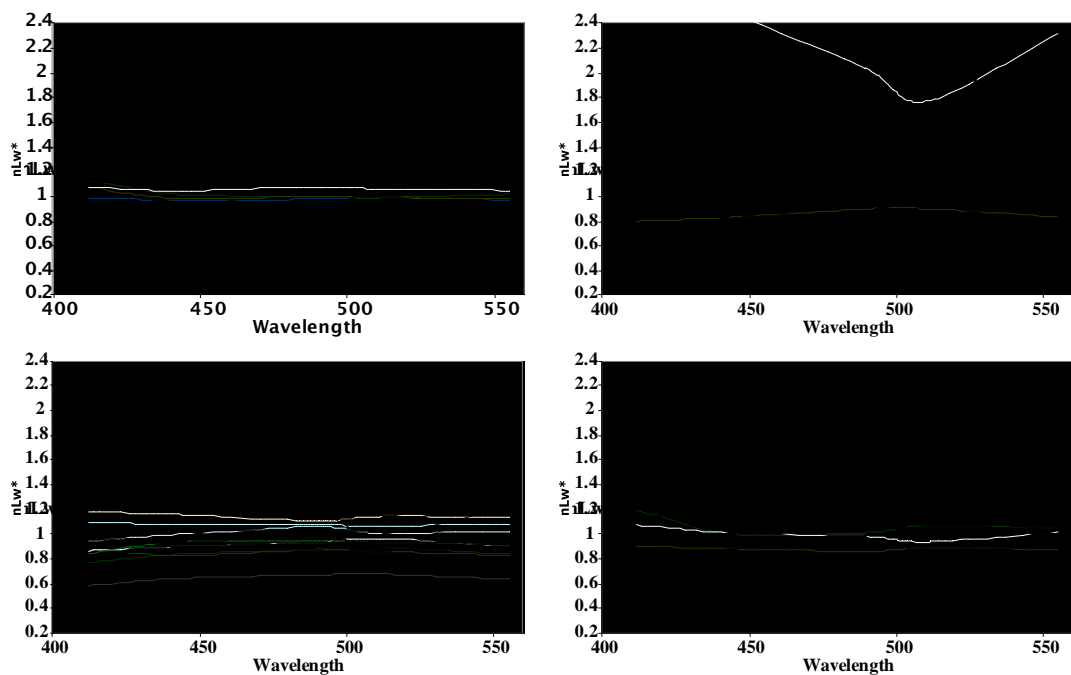


Figure 3.2.1 : *Formes et amplitudes spectrales des nLw^* calculées à partir des nLw SeaWiFS, pour les mesures GeP&CO sélectionnées et pour a) juillet à septembre, b) octobre à décembre, c) janvier à mars et d) avril à juin.*

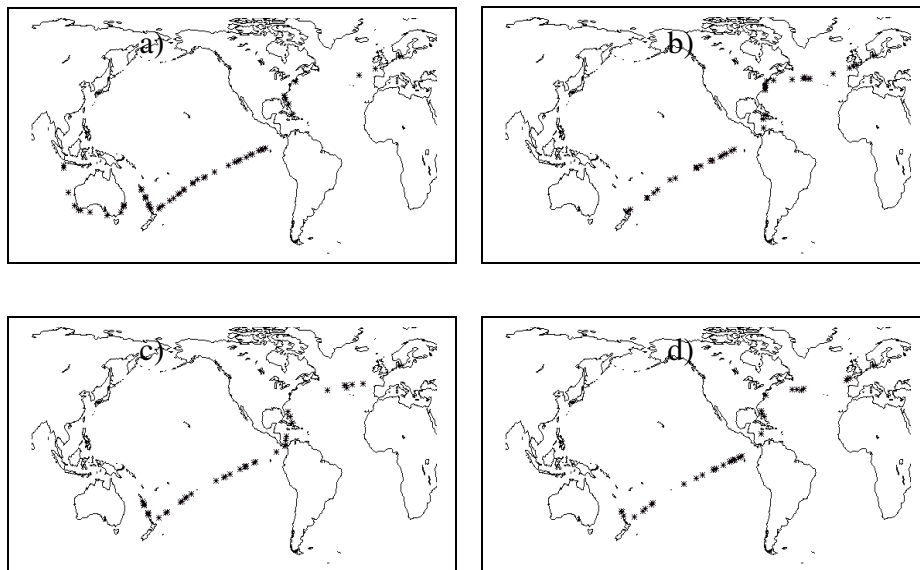


Figure 3.2.2 : Cartes de l'emplacement des données GeP&CO sélectionnées, c'est-à-dire pour lesquelles une mesure coïncidente SeaWiFS a pu être trouvée, pour a) Juillet à Septembre, b) Octobre à Décembre, c) Janvier à Mars et d) Avril à Juin.

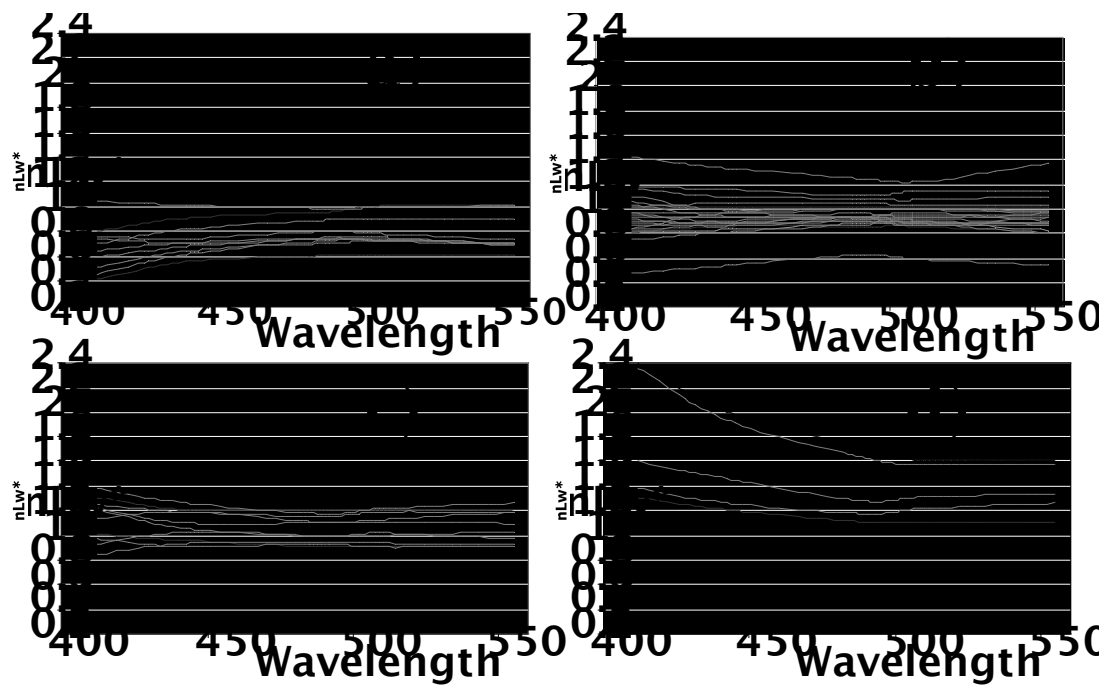


Figure 3.2.3 : Signatures spectrales des nLw^* pour chacun des 4 assemblages de phytoplancton dominés par a) haptophytes, b) *Prochlorococcus*, c) Cyanobactéries et d) diatomées. Les spectres individuels sont en gris clair et les bornes minimales et maximales définissant chaque espèce en traits pleins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

	412	443	490	510	555	Critères supplémentaires
<i>Haptophytes min.</i>	0.4	0.55	0.6	0.6	0.6	$nLw^*(412) < nLw^*(443)$
<i>Haptophytes max.</i>	0.8	0.9	0.95	1.0	1.0	$nLw^*(443) < nLw^*(490)$
<i>Prochlorococcus min.</i>	0.8	0.85	0.85	0.85	0.8	
<i>Prochlorococcus max.</i>	1.0	1.0	1	1.0	1.0	
<i>SLC min.</i>	1.0	0.95	0.9	0.9	0.9	$nLw^*(412) > nLw^*(443)$
<i>SLC max.</i>	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	$nLw^*(412) > nLw^*(490)$
<i>Diatomées min.</i>	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	$nLw^*(412) > nLw^*(490)$
<i>Diatomées max.</i>	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 mêmes 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 prudence 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.

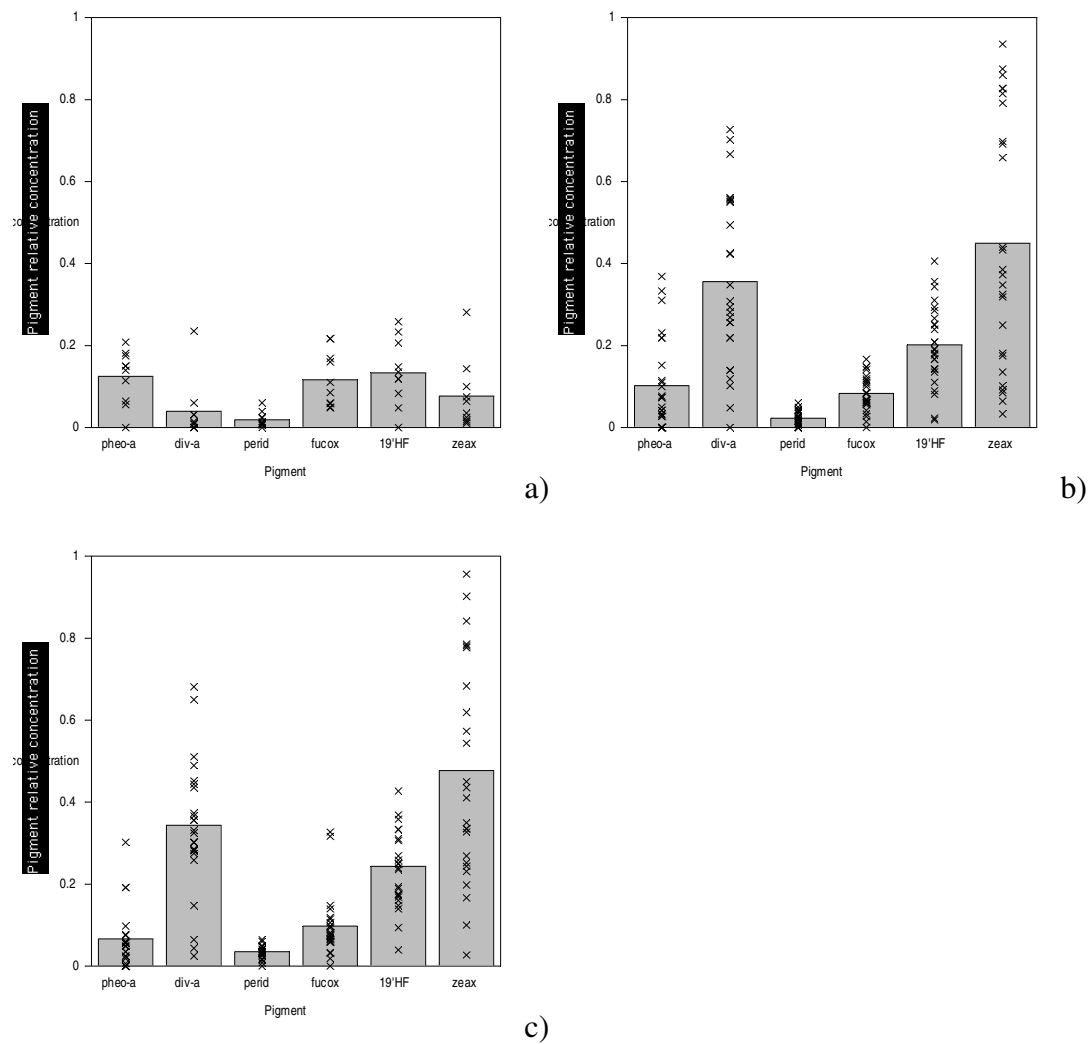


Figure 3.2.4 : Compositions en pigments biomarqueurs relatifs, associés aux spectres de nLw^* SeaWiFS coïncidents aux données GeP&CO mais non labellisés par les critères de la table 2.3.2. Les graphiques correspondent à la labellisation par PHYSAT en a) haptophytes, b) *Prochlorococcus*, c) cyanobactéries.

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 $nLw(\lambda)$ pour toute une gamme de valeurs de chlorophylle a , allant de 0.04 à 3 mg.m^{-3} . J'ai ensuite re-normalisé les $nLw(\lambda)$ 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 $nLw^*(\lambda)$ 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 $nLw^*(\lambda)$ 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 rééchantillonnées (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.

LA METHODE PHYSAT

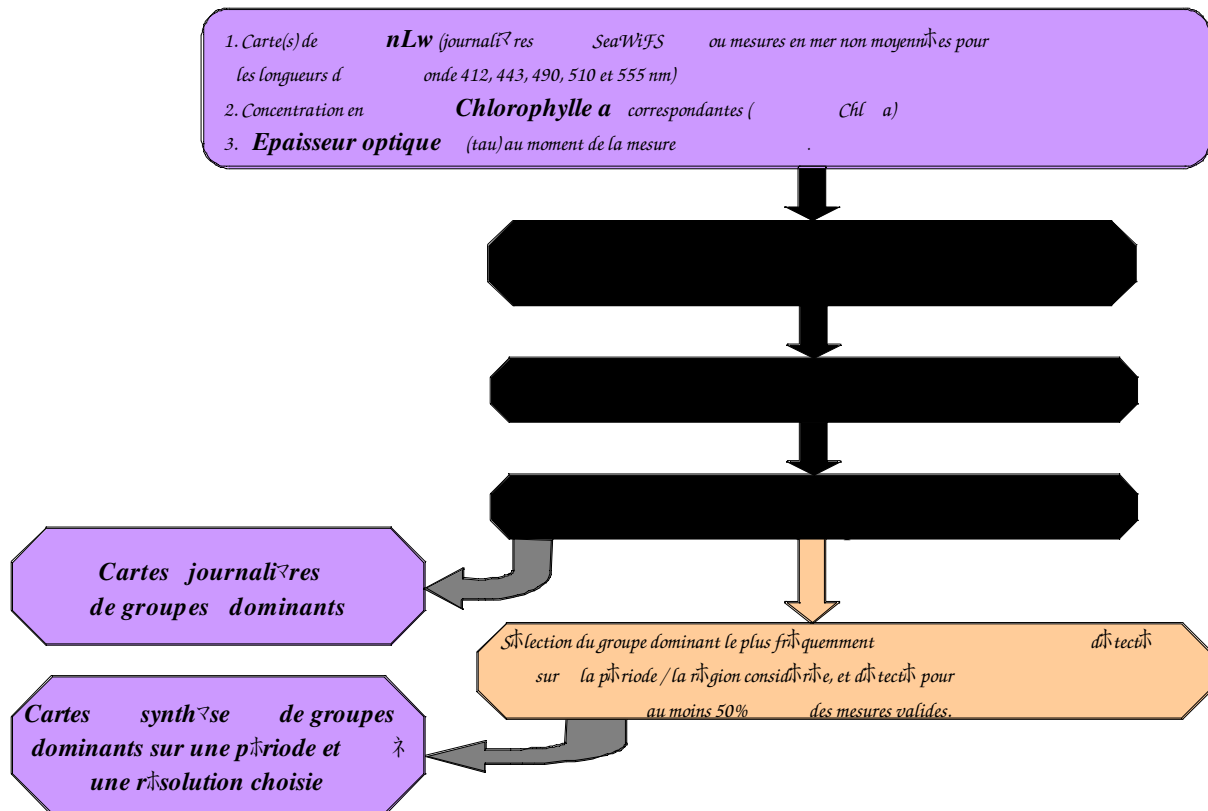


Figure 4.1.1 : Schéma résumant les différentes étapes de la méthode PHYSAT utilisée pour détecter les groupes de phytoplancton dominants à l'échelle globale.

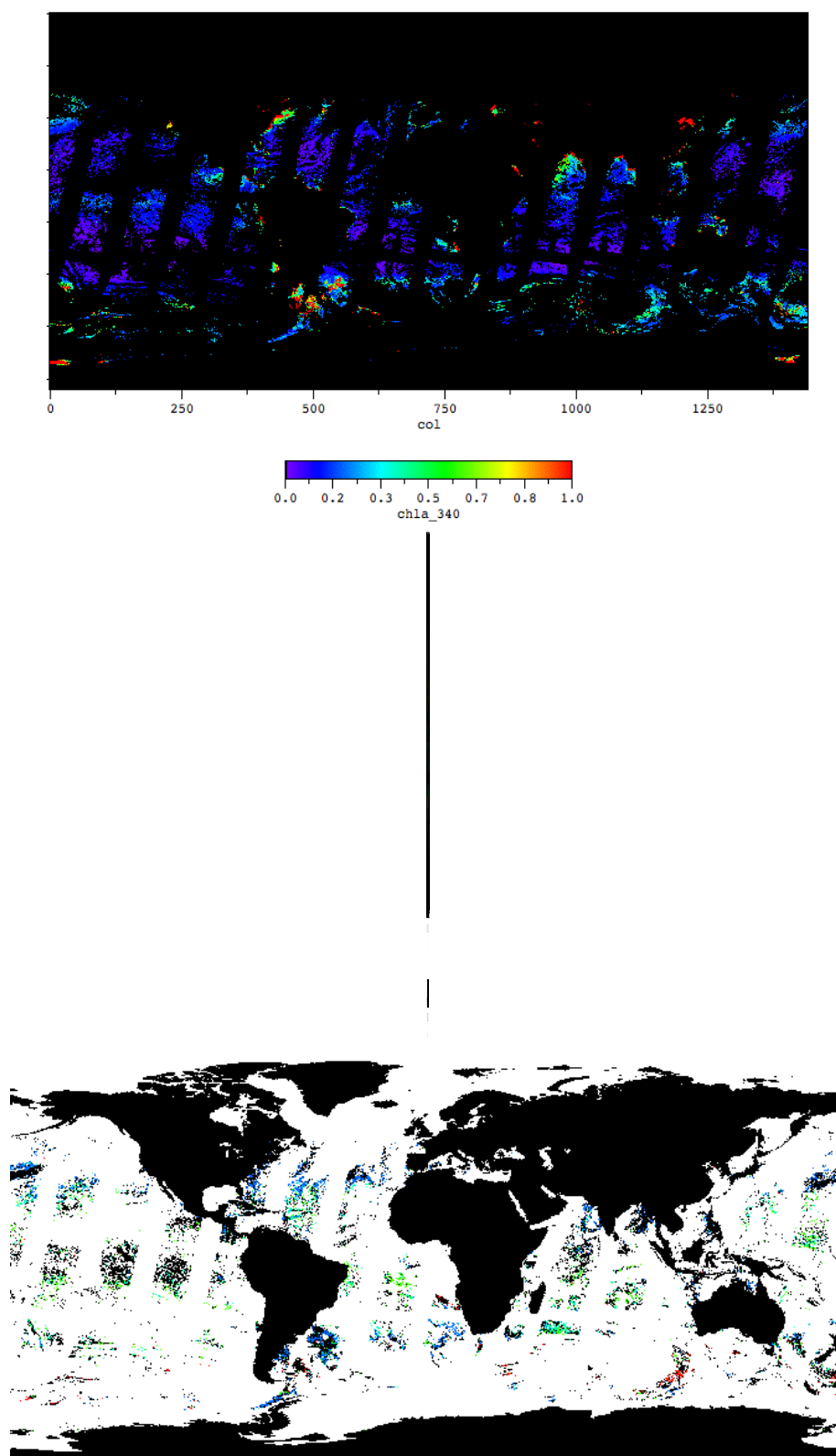


Figure 4.1.2 : Cartes de concentration en chlorophylle a (haut) en mg.m^{-3} et d'épaisseur optique (centre) venant des produits SeaWiFS de niveau 3, ainsi que la cartes des groupes PHYSAT correspondants (bas) avec les haptophytes en bleu, les Prochlorococcus en turquoise, les cyanobactéries en vert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