
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

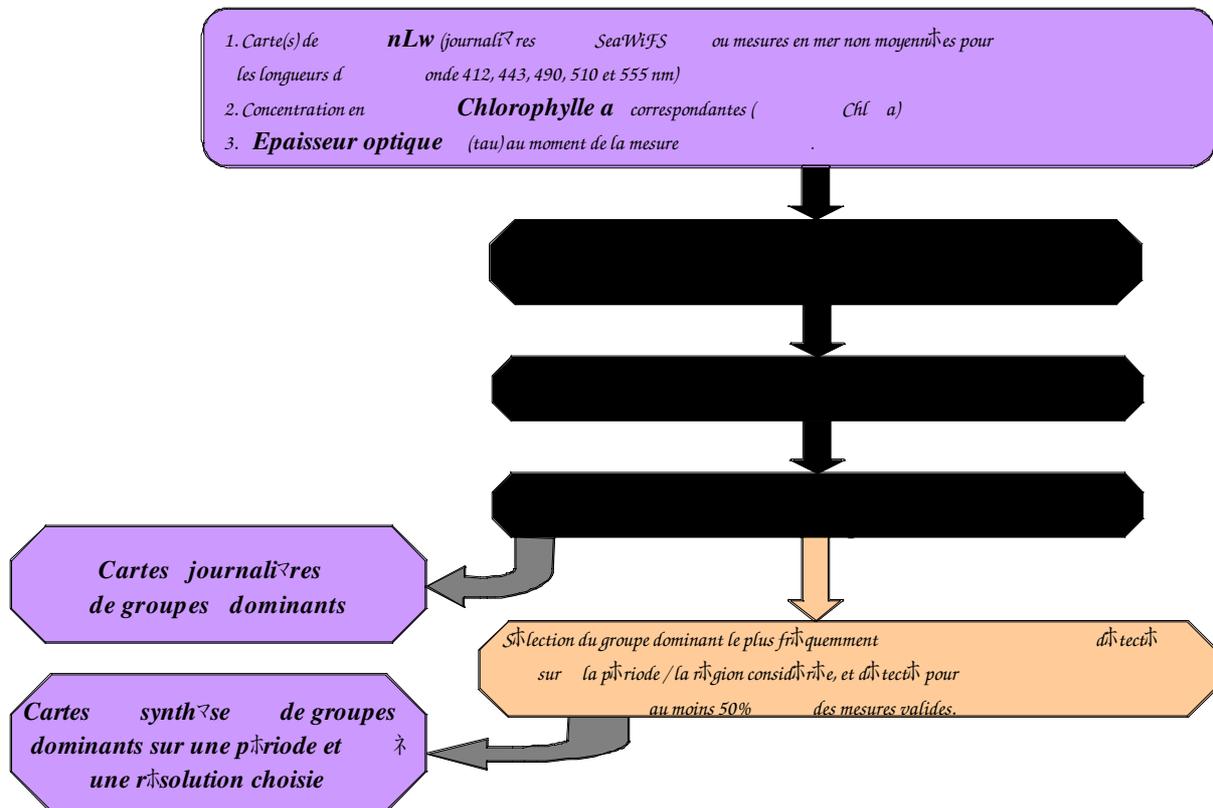


Figure 4.1.1 : Schéma résumant les différentes étapes de la méthode PHYSAT utilisée pour détecter les groupes de phytoplancton dominants à l'échelle globale.

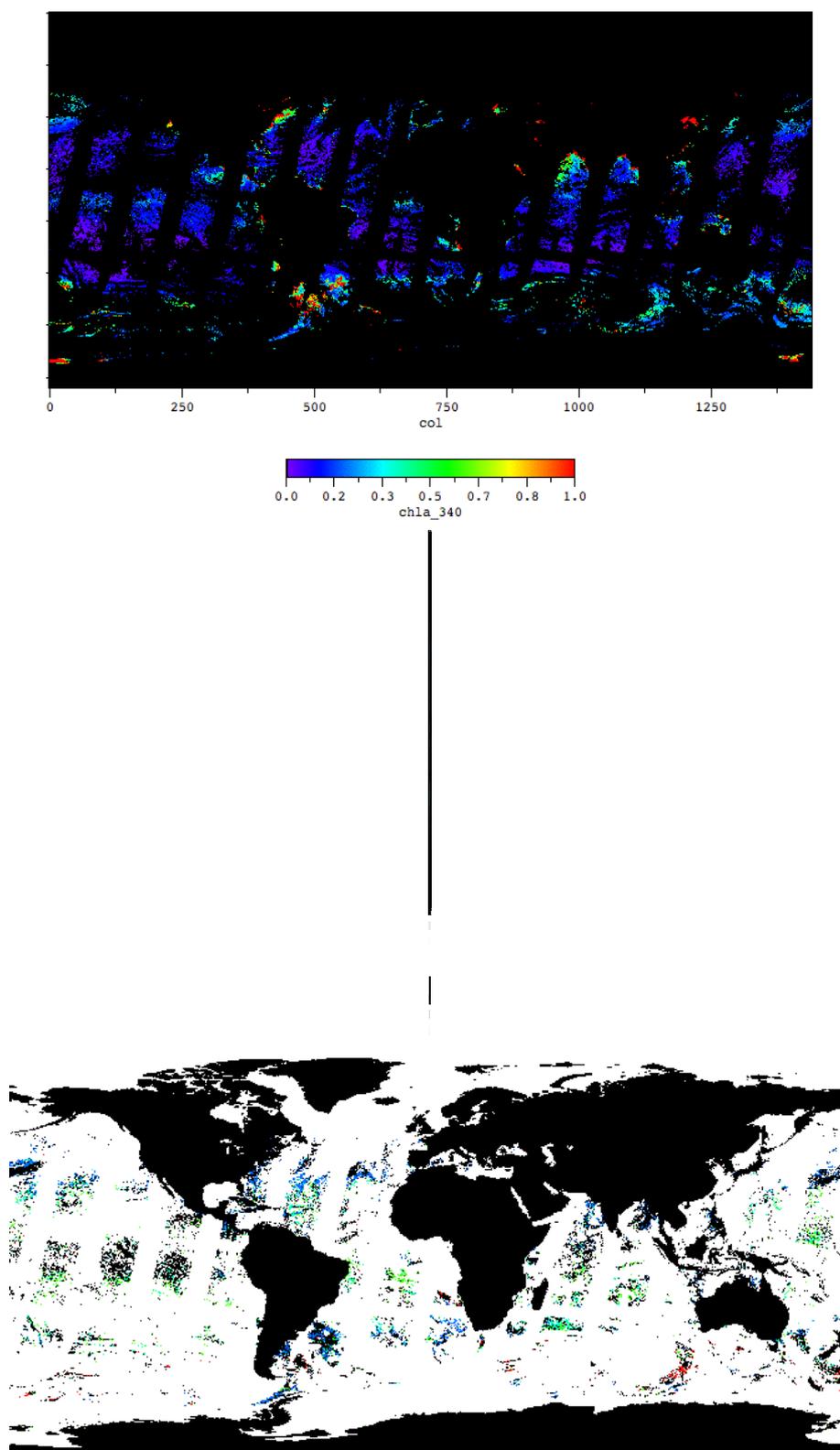


Figure 4.1.2 : Cartes de concentration en chlorophylle a (haut) en mg.m^{-3} et d'épaisseur optique (centre) venant des produits SeaWiFS de niveau 3, ainsi que la cartes des groupes PHYSAT correspondants (bas) avec les haptophytes en bleu, les Prochlorococcus en turquoise, les cyanobactéries en vert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

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 fucoxanthine, 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)

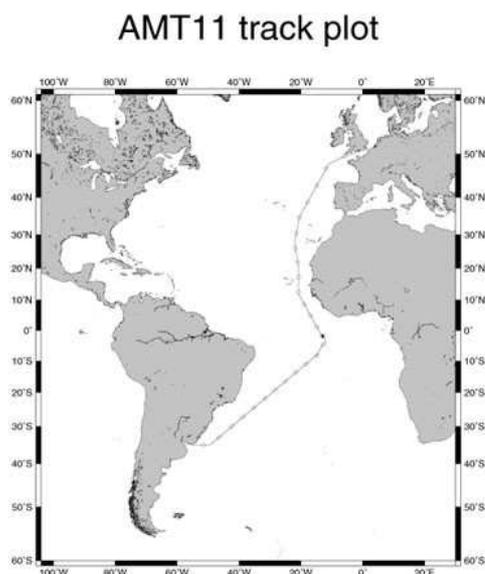


Figure 4.2.4 : Trajet des campagnes AMT (Gibb et al. 2000).

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 phytoplanctons observée 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).

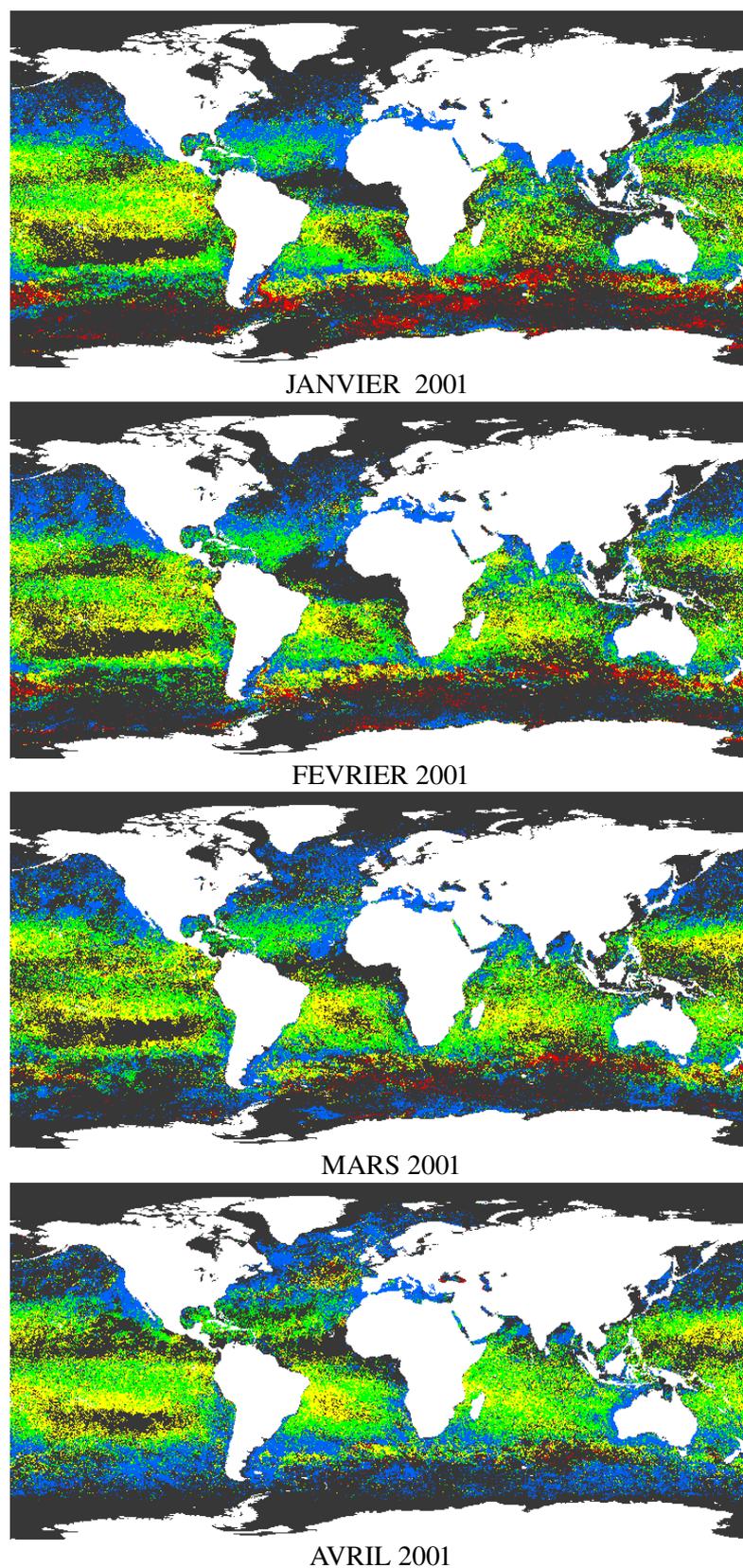


Figure 4.2.1 : Cartes mensuelles au quart de degré pour janvier à avril 2001. En rouge les diatomées, en bleu les haptophytes, en vert les *Prochlorococcus*, en jaune les cyanobactéries, en gris clair et foncé respectivement, les *phaeocystis* et les blooms de coccolithophoridés.

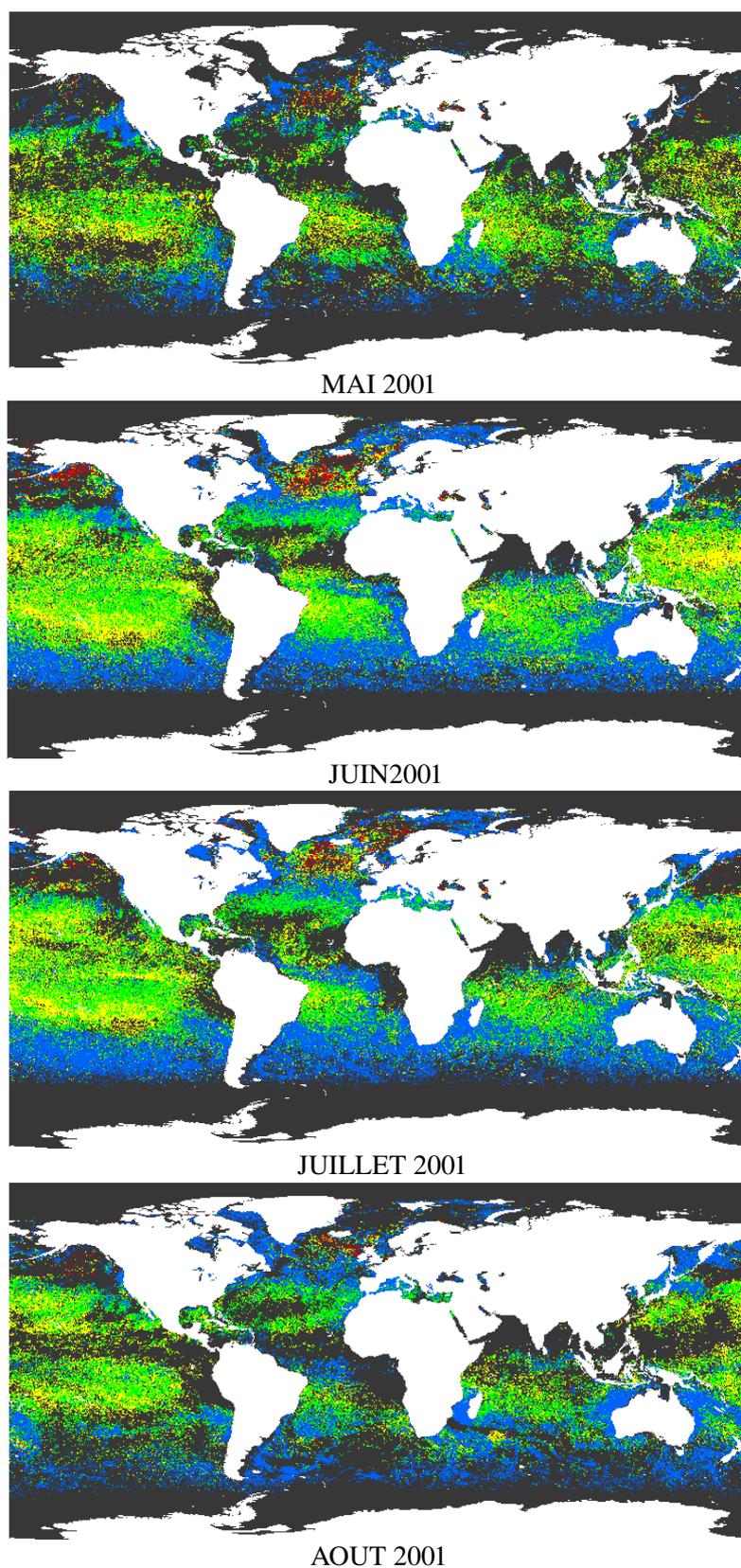


Figure 4.2.1 (suite) : Cartes mensuelles au quart de degré pour mai à juillet 2001. En rouge les diatomées, en bleu les haptophytes, en vert les *Prochlorococcus*, en jaune les cyanobactéries, en gris clair et foncé respectivement, les phaeocystis et les blooms de coccolithophoridés.

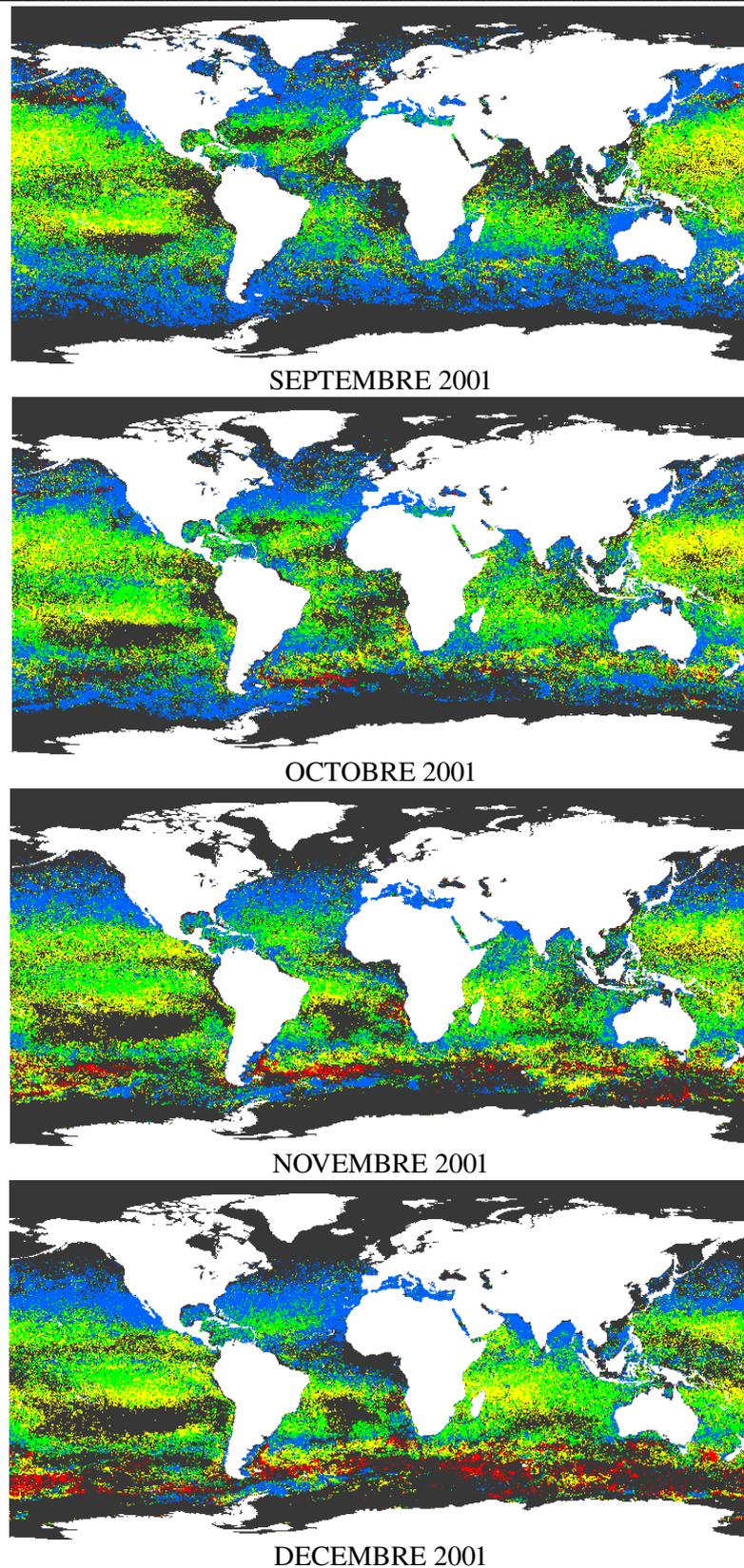


Figure 4.2.1 (suite) : Cartes mensuelles au quart de degré pour septembre à décembre 2001. En rouge les diatomées, en bleu les haptophytes, en vert les *Prochlorococcus*, en jaune les cyanobactéries, en gris clair et foncé respectivement, les *phaeocystis* et les blooms de *coccolithophoridés*.

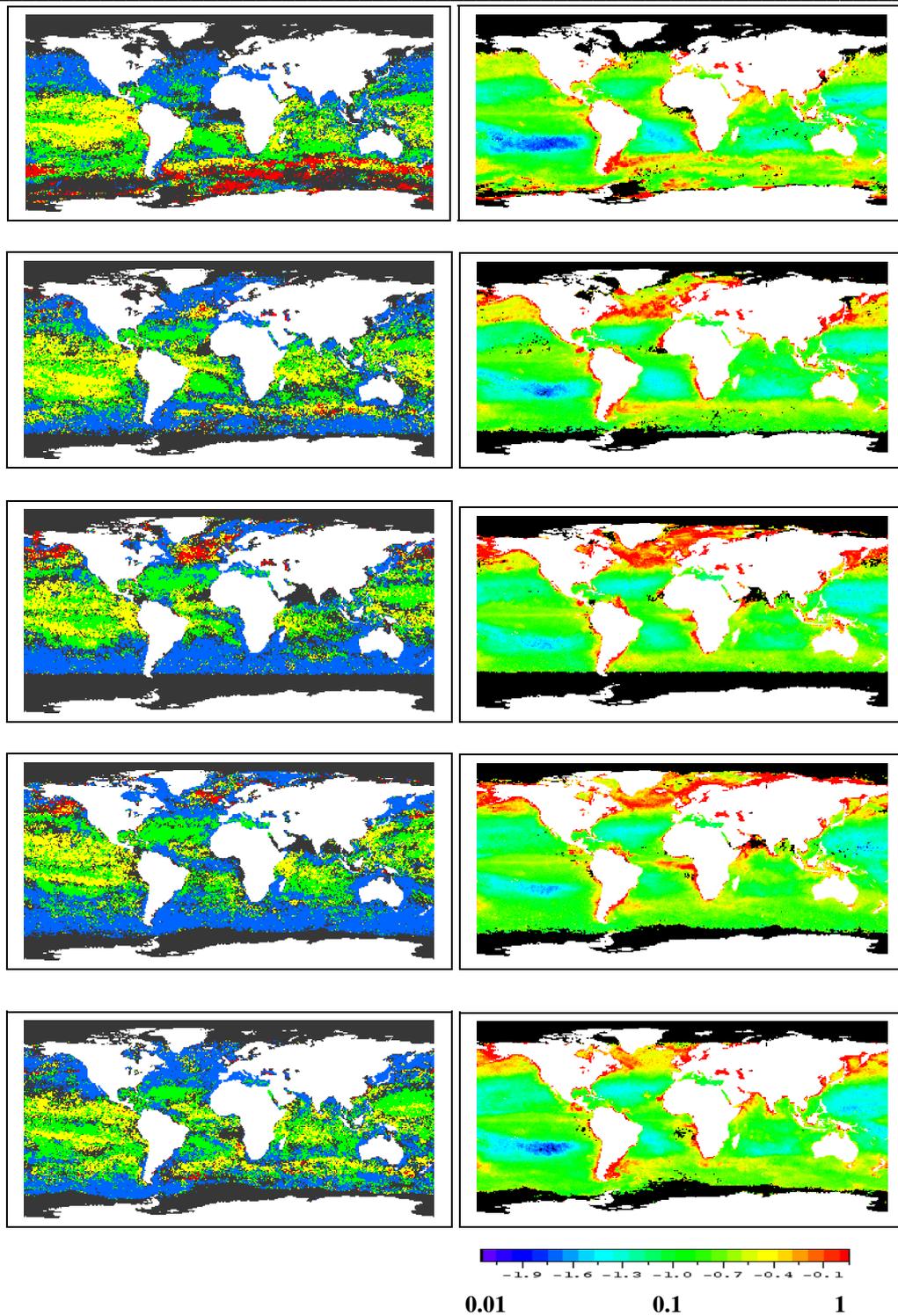


Figure 4.2.2: Cartes mensuelles de concentrations en chlorophylle a SaWiFS (à droite en mg.m^{-3}) et les groupes dominants, obtenus par PHYSAT, associés (à gauche, avec en rouge les diatomées, en bleu les haptophytes, en vert les *Prochlorococcus* et en jaune les cyanobactéries) pour les mois de janvier, 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.

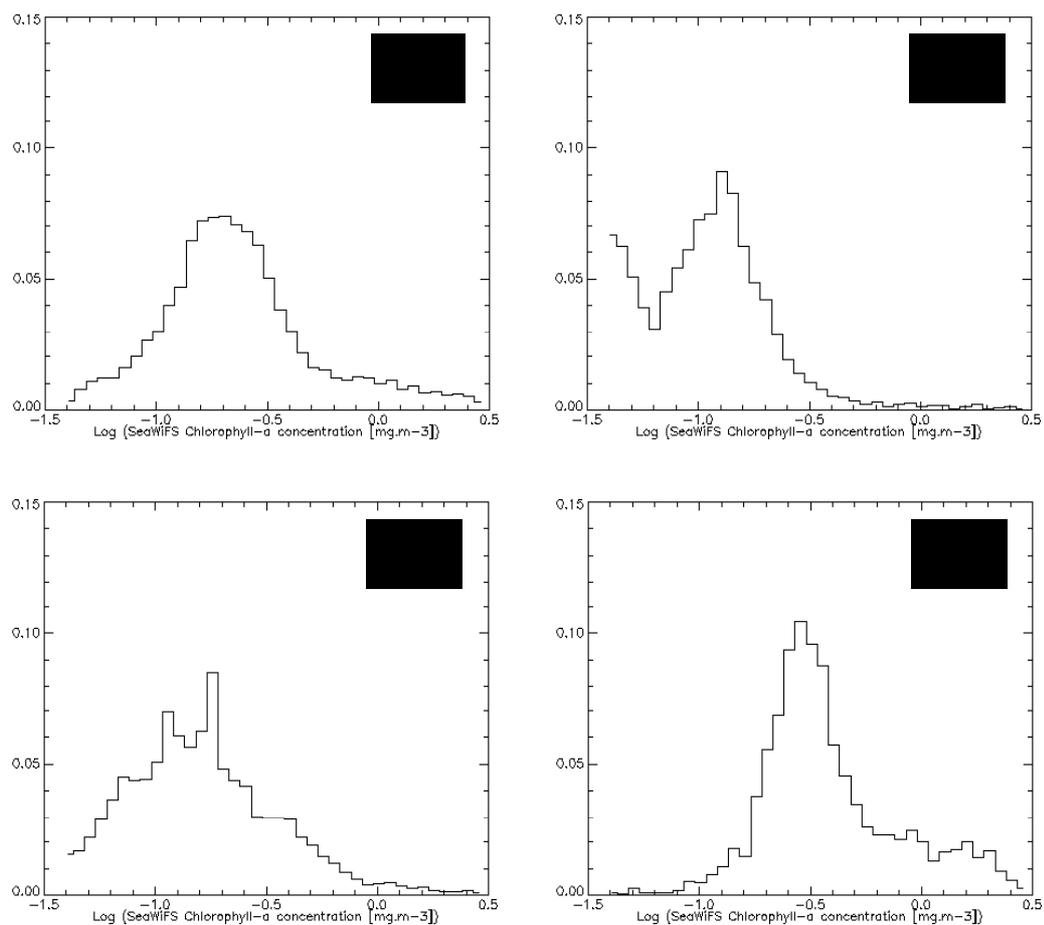


Figure 4.2.3 : Histogramme des fréquences relatives des valeurs de Chl a SeaWiFS pour l'année 2001 et pour les quatre assemblages de phytoplancton dominés par a) haptophytes, b) Prochlorococcus, c) cyanobactéries et d) diatomées.

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 précédente, 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 (Iglesias-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 aux 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 biaisées 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 résultats 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
<i>Coccolithophoridés min.</i>	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	

<i>Coccolithophoridés max.</i>	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.

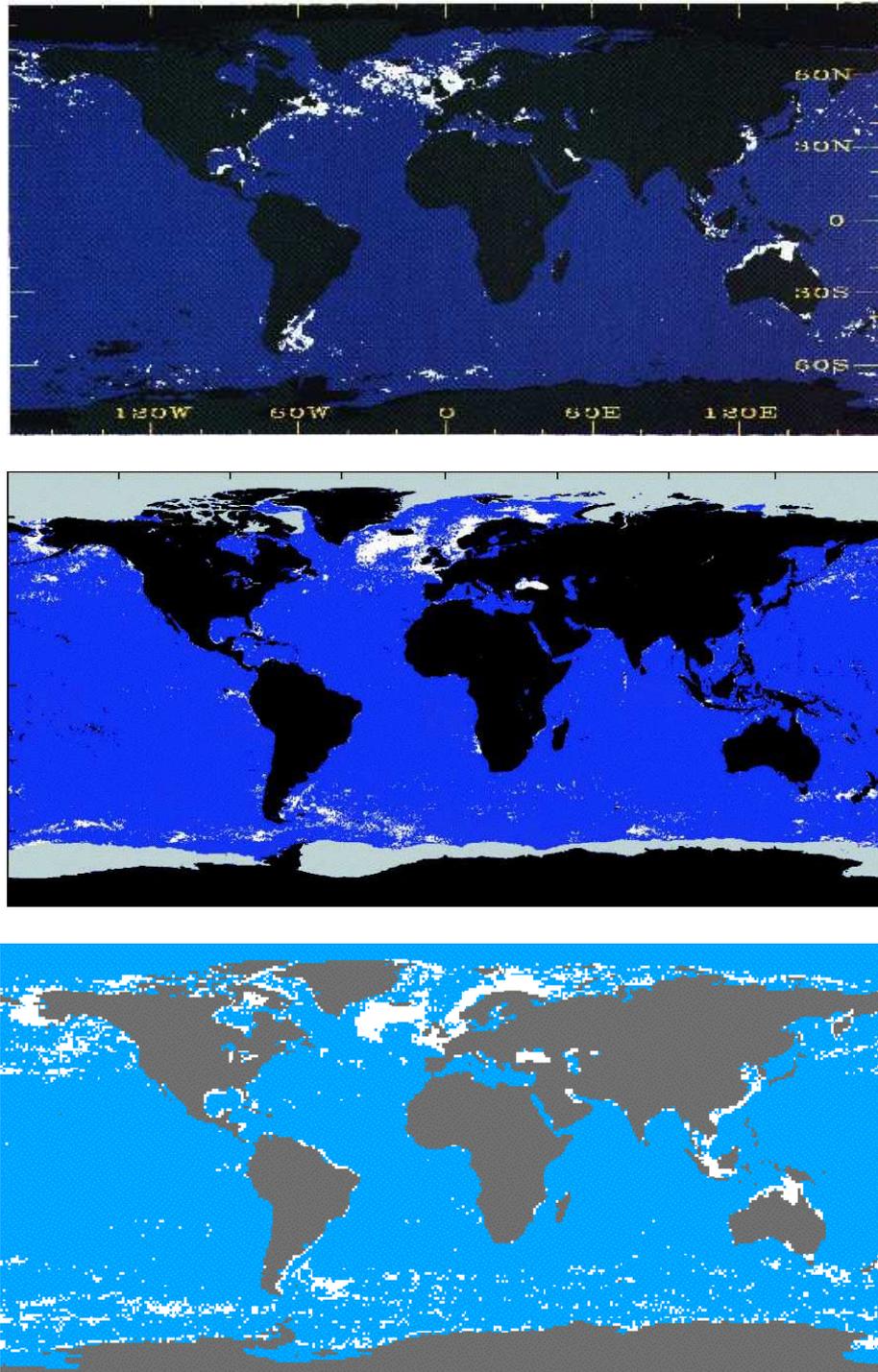


Figure 4.3.1 : Climatologie de détection de blooms de Coccolithophoridés (en blanc) pour 1978 à 1986 avec CZCS d'après Brown et al., 1994 (en haut), pour la période 10/97 à 09/99 avec SeaWiFS d'après Iglesias-Rodriguez et al., 2002 (au centre) et la méthode PHYSAT (en bas). Ces cartes sont réalisées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

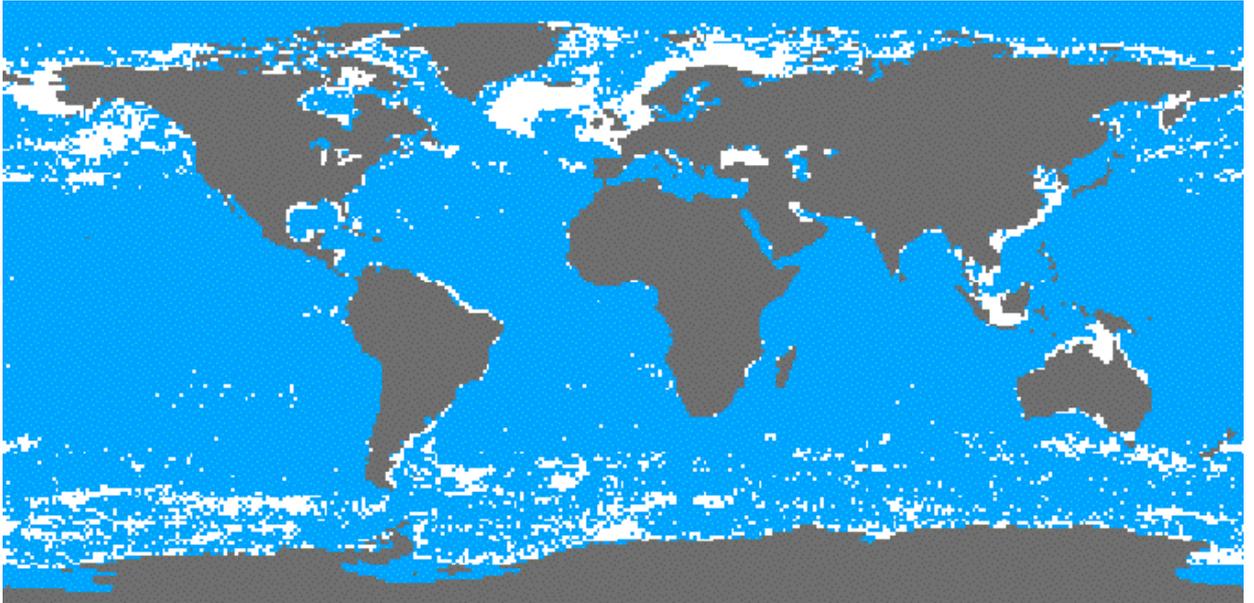


Figure 4.3.2 : Climatologie de détection de blooms de Cocolithophoridés par la méthode PHYSAT. Synthèse sur la période SeaWiFS 1998-2003.

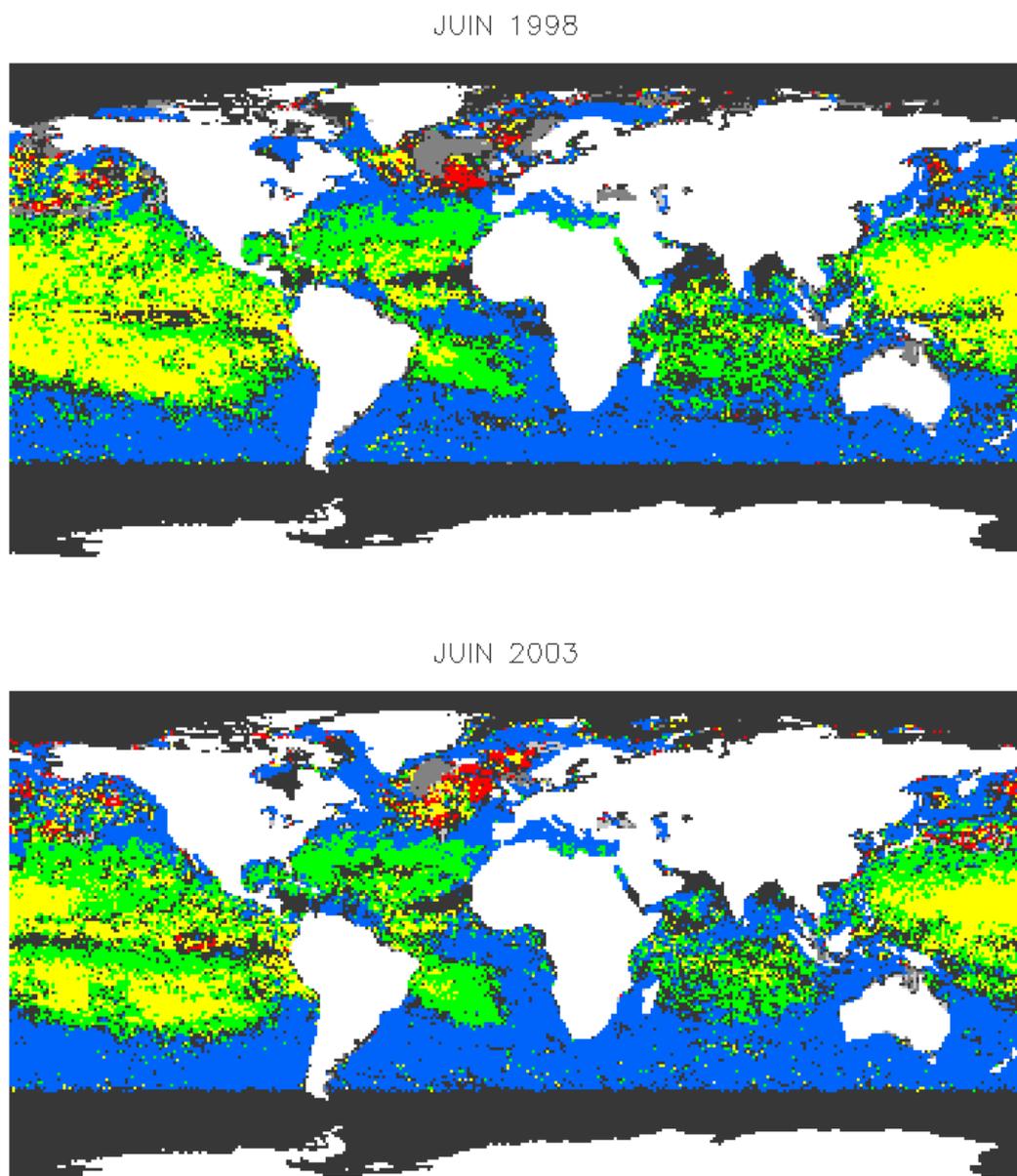


Figure 4.3.3 : *Cartes de groupes de phytoplancton dominants pour les mois de Juin 1998 et Juin 2003 réalisées avec PHYSAT complété par les Coccolithophoridés. Ces deux mois sont remarquables en raison des blooms de coccolithophoridés étendus dans l'Atlantique Nord, en gris foncé. Les autres couleurs 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 PII 3 en Janvier 2004. IRD Nouméa.

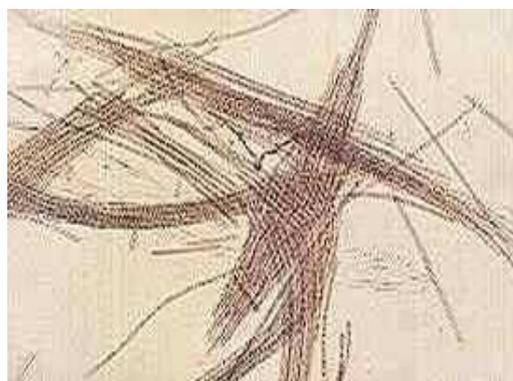


Figure 4.3.5 : Cellules de *Trichodesmiums* et filaments associés (Photographie IRD).

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
<i>Trichodesmium min.</i>	1.6	1.1	1.1	1.1	1.3	nLw*(412) > nLw*(443) nLw*(412) > nLw*(490)
<i>Trichodesmium max.</i>	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.

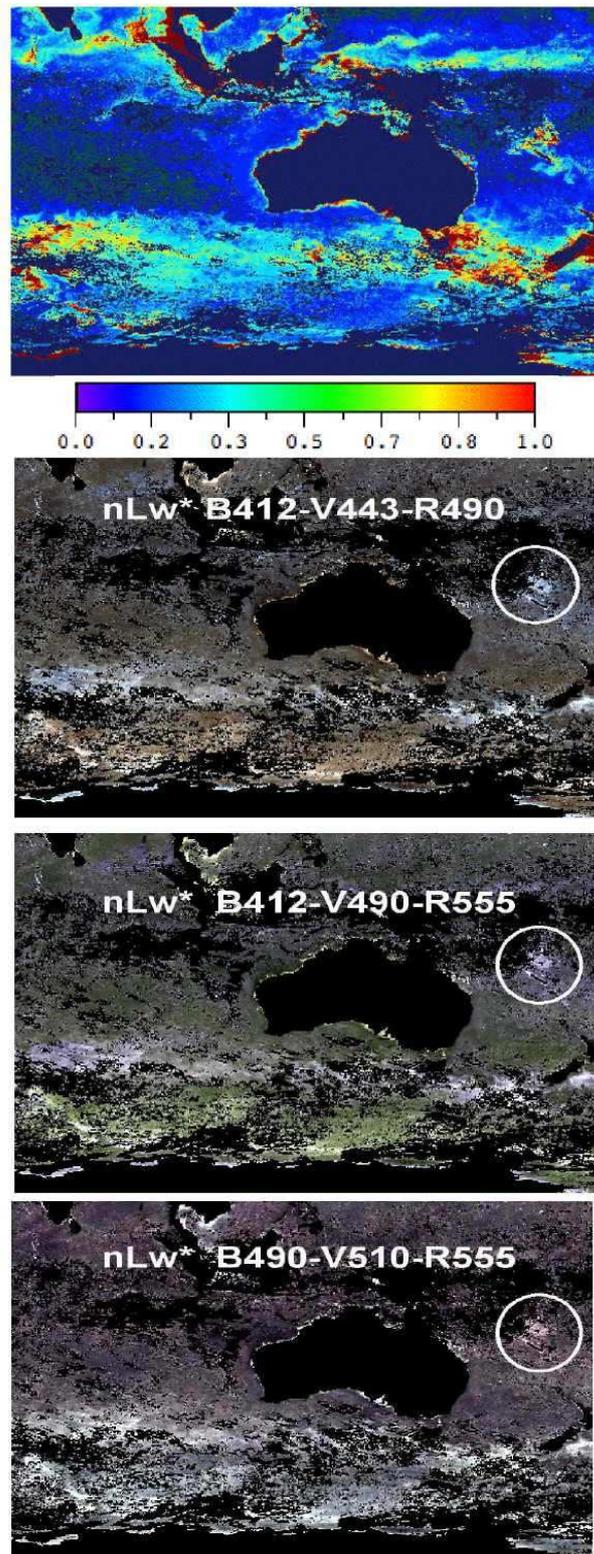


Figure 4.3.6: Cartes de concentrations en chlorophylle *a* (en haut) et compositions colorées des *nLw** à 412 nm (B), 443 nm (V) et 490 nm (R) en haut, à 412 nm (B), 490 nm (V) et 555 nm ® au centre et à 490 nm (B), 510 nm (V) et 555 nm (R) en bas, autour de la zone d'étude du signal *Trichodesmium*,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

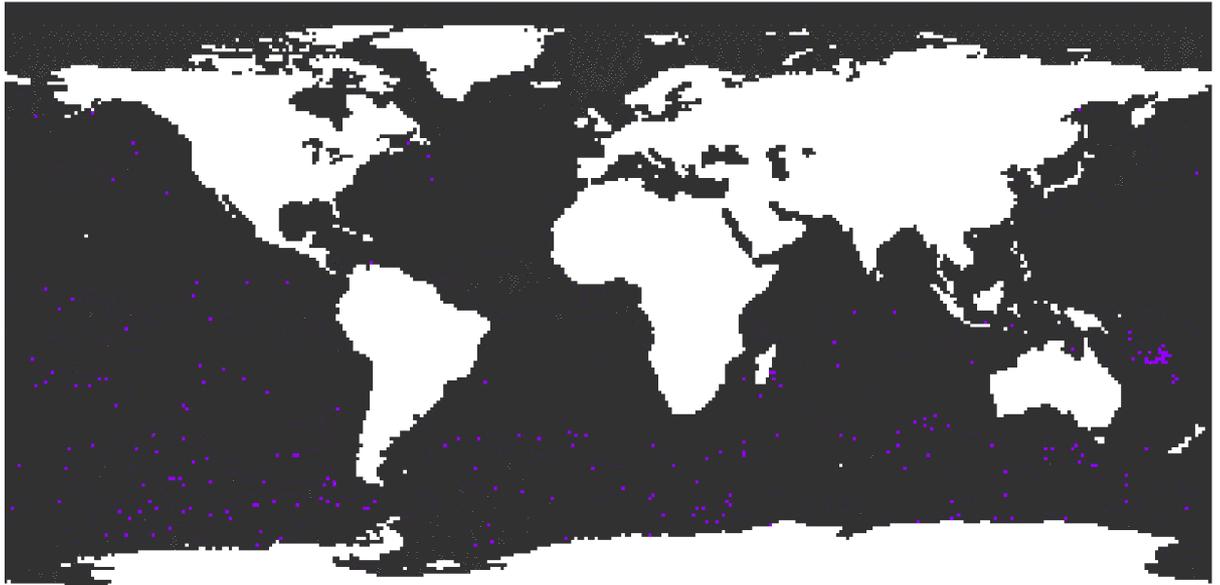


Figure 4.3.7 : Synthèse de la détection de floraisons de *Trichodesmiums* dominants sur la période du jour 49 au jour 58 de l'année 1998. En dehors de quelques pixels isolés dans l'océan Austral, et plutôt caractéristiques d'un « bruit », la zone Nord-Est de la Nouvelle-Calédonie ressort nettement.

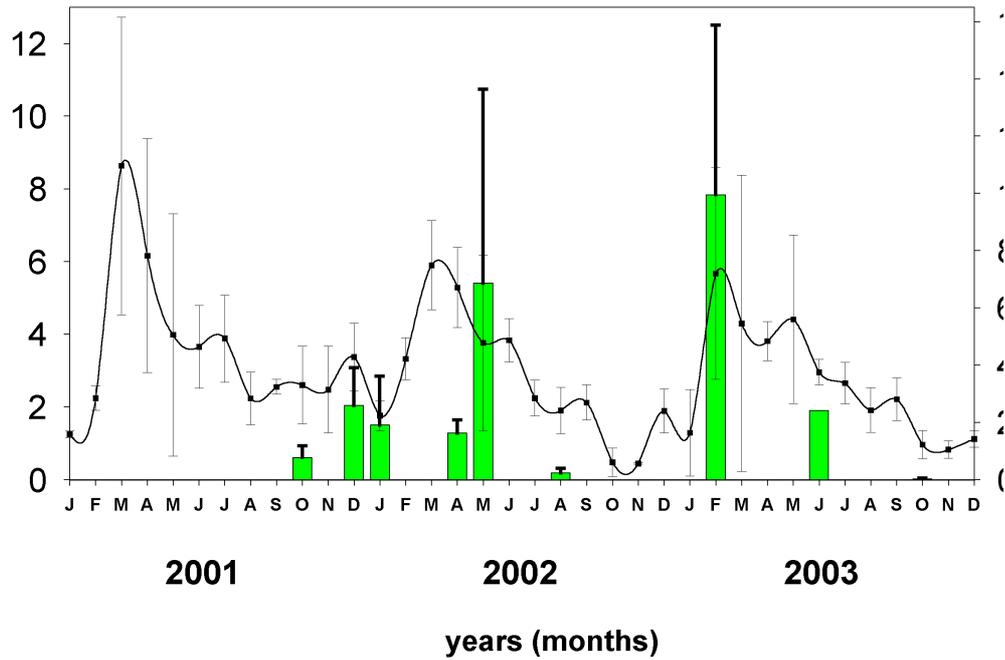


Figure 4.3.8 : Comparaison entre le nombre relatif de pixels détectés comme étant dominés par le groupe *Trichodesmium* sur des synthèses PHYSAT de 10 jours (courbe) et l'abondance de ce groupe mesuré lors des campagnes en mer (comptage entre 0 et 80m pour 42 profils effectués lors de 9 campagnes DIAPALIS 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 entre 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 importants 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
<i>Phaeocystis min.</i>	1.0	1.1	1.2	1.2	1.2	$nLw^*(412) < nLw^*(443)$
<i>Phaeocystis max.</i>	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*

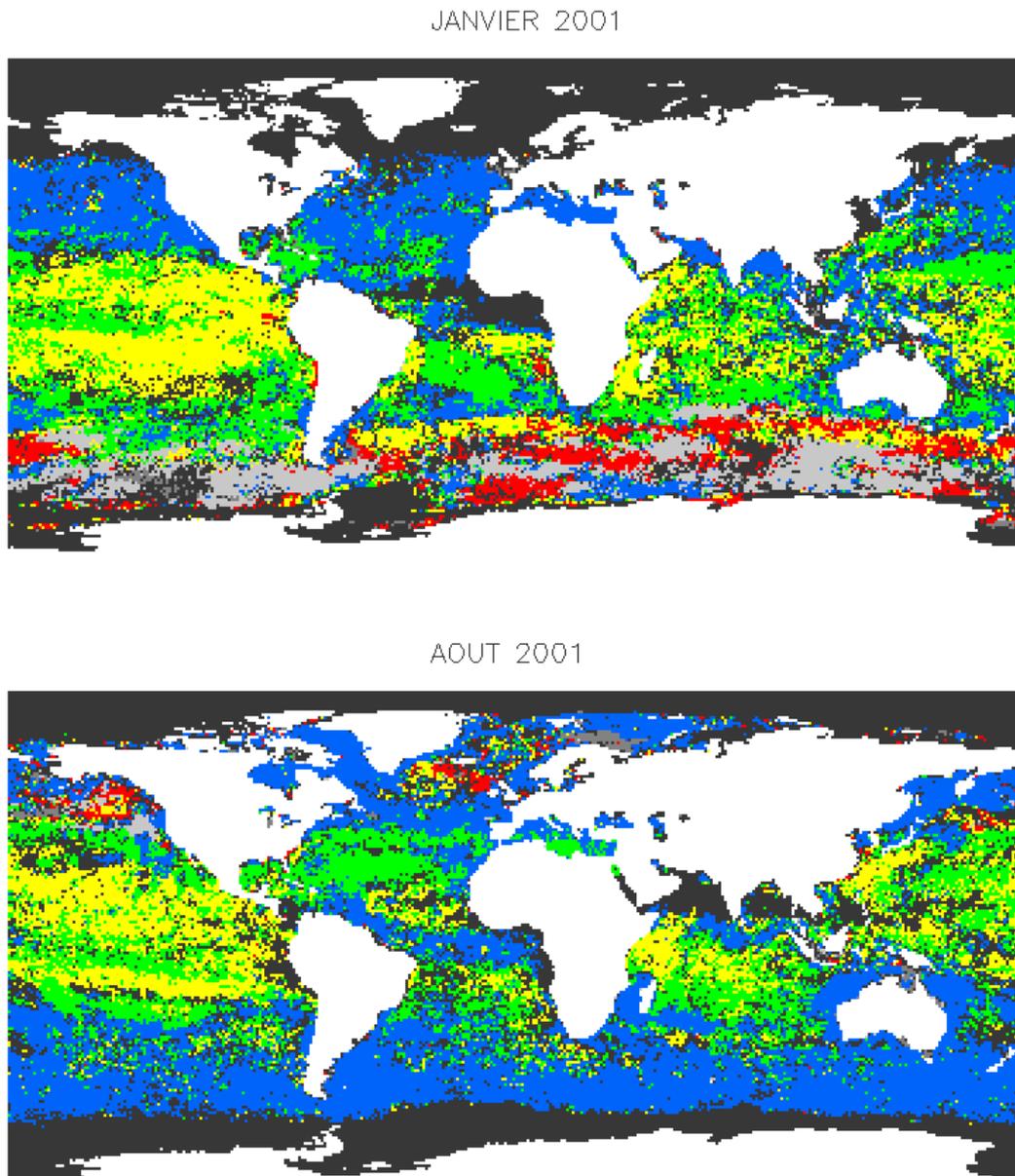


Figure 4.3.9: Carte de groupe de phytoplancton dominants, réalisée à l'aide de PHYSAT avec les coccolithophoridés (gris foncé) et les *Phaeocystis* (gris clair), pour le mois de janvier et août 2001.



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.