

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

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

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

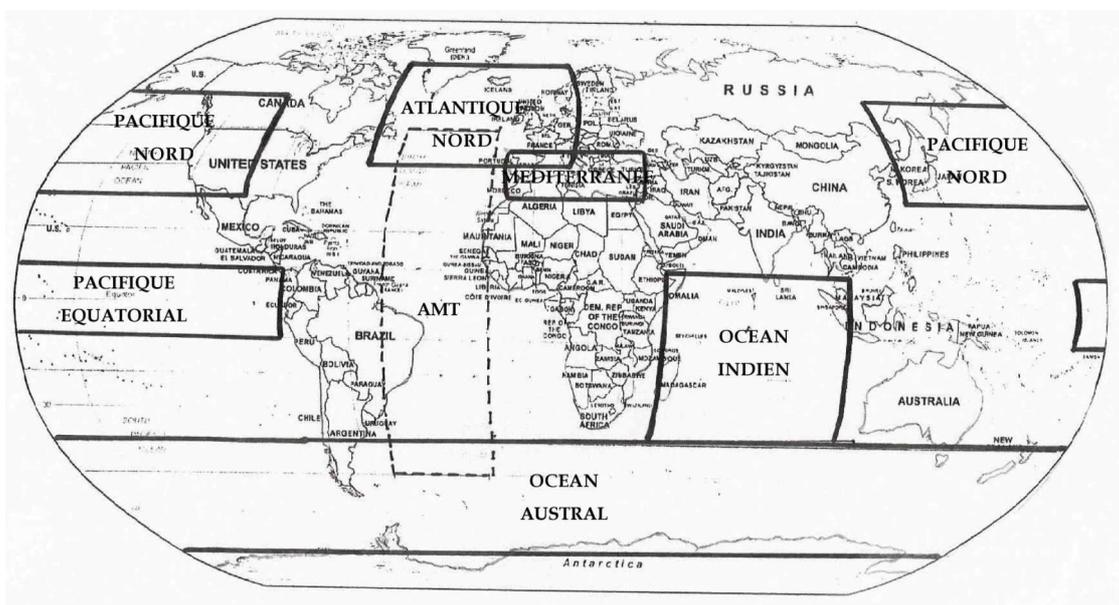


Figure 5.1.1 : Localisations géographiques des zones étudiées dans la suite de ce chapitre.

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

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

5.1 Océan Mondial

5.1.1 Groupes dominants et tendances générales

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

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

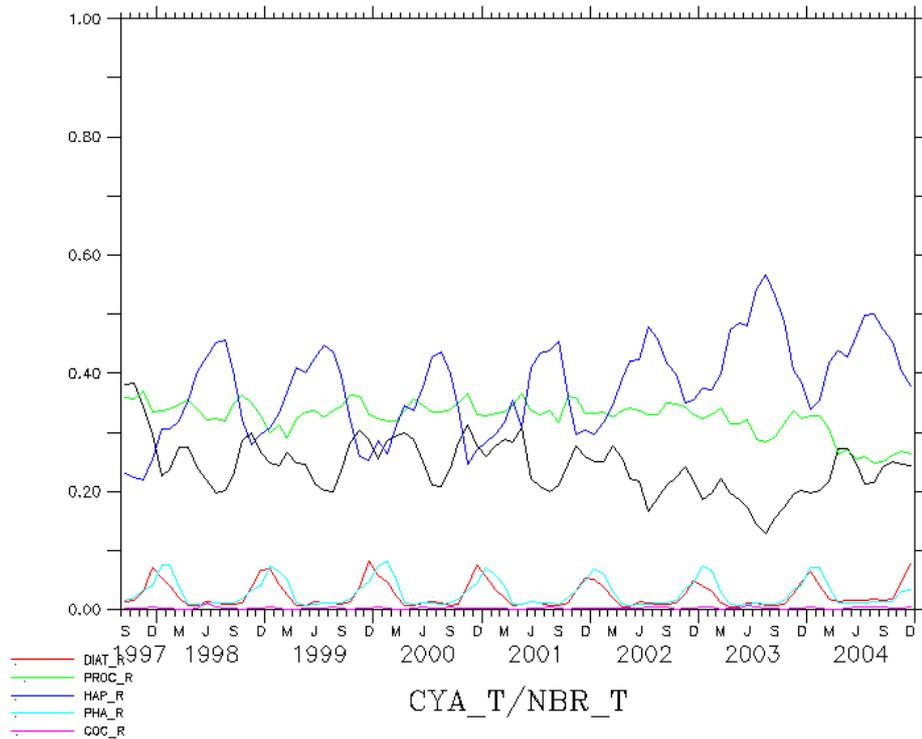


Figure 5.1.1 : Fraction mensuelle de la surface dominée pour chaque groupe (surface dominée par le groupe / surface totale dominée par un des groupes PHYSAT), sur la période septembre 1997 – décembre 2004 pour toutes les eaux du globe.

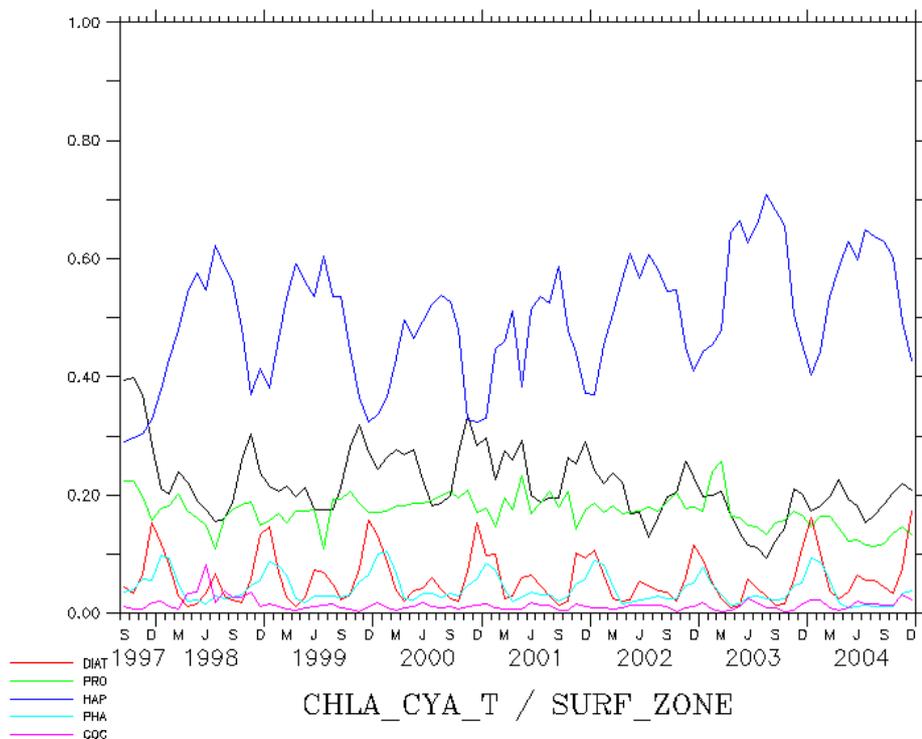


Figure 5.1.2 : Evolution mensuelle du rapport entre la chlorophylle a associée à un groupe et la chlorophylle a, moyennée pour la période de septembre 1997 – décembre 2004 et dans l'océan mondial (80°S-80°N / 1°E – 0°E). En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende de couleur en bas à gauche.

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

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

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

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

5.1.2 Cycles saisonniers de chaque groupe

Les haptophytes

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

Les *Prochlorococcus*

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

Les SLC

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

Les diatomées

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

Phaeocystis

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

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

Blooms de Coccolithophoridés

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

5.1.3 Variabilités interannuelles sur la période 1997-2004

Haptophytes

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

Prochlorococcus

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

Les SLC

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

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

Les diatomées

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

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

Phaeocystis

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

Blooms de coccolithophoridés

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

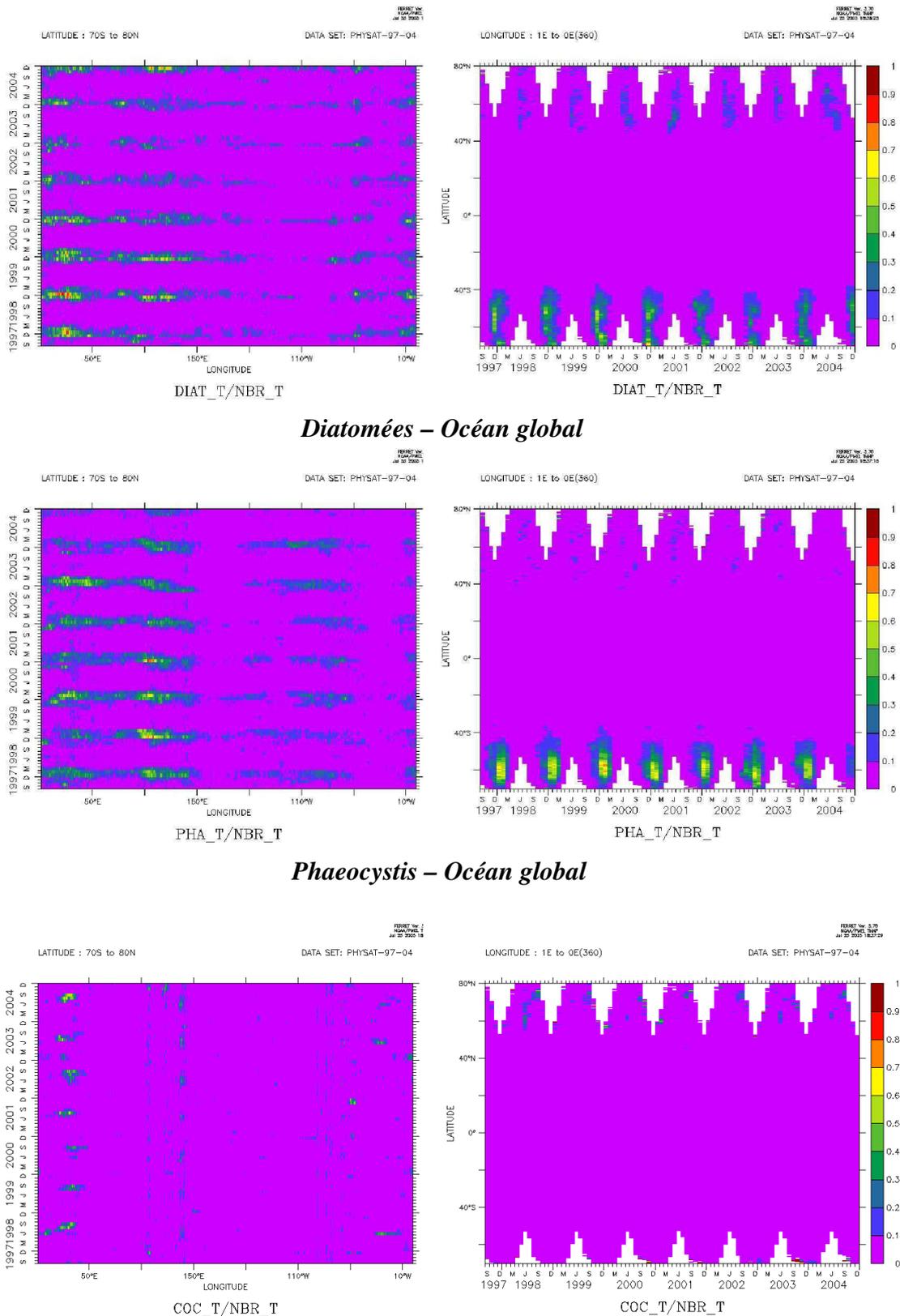


Figure 5.1.3 suite : Représentation de la variabilité mensuelle de la surface labellisée pour les diatomées, phaeocystis et les blooms de Coccolithophoridés, en fonction de la longitude (à gauche) et de la latitude (à droite), de septembre 1997 à décembre 2004.

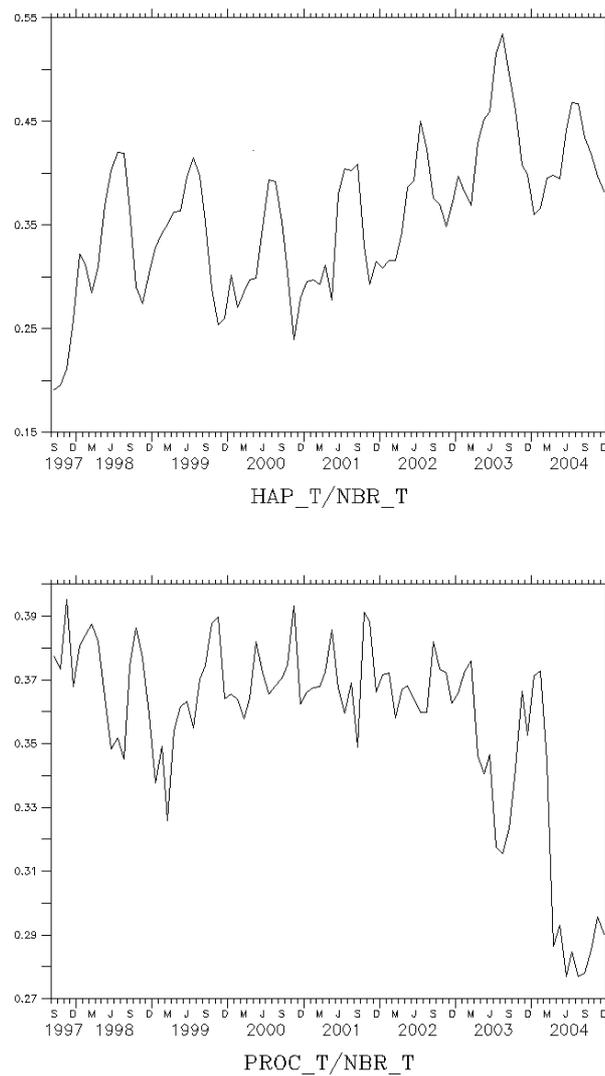


Figure 5.1.4 : Pourcentages mensuels de surface labellisée pour les groupes haptophytes (en haut) et *Prochlorococcus* (en bas) sur la période de septembre 1997 à décembre 2004 l'océan mondial (80°S-80°N / 180°W – 180°E).

5.2 Atlantique Nord

5.2.1 Groupes dominants et tendance générale

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

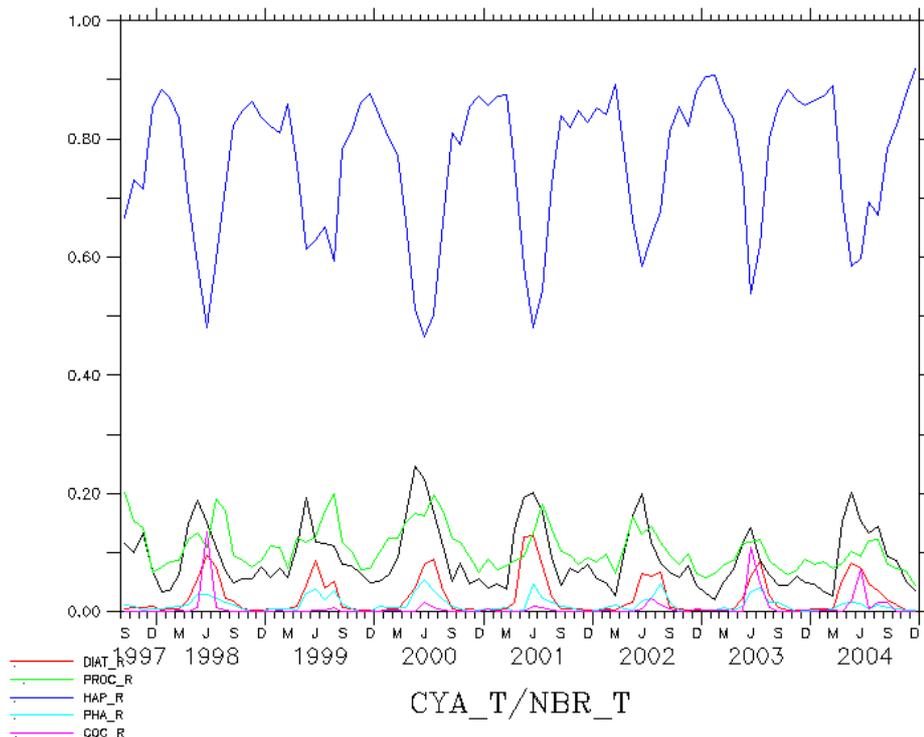


Figure 5.2.1 : Fraction mensuelle de la surface dominée pour chaque groupe (surface dominée par le groupe / surface totale dominée par un groupe), sur la période septembre 1997 – décembre 2004 dans l'Atlantique Nord. En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende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

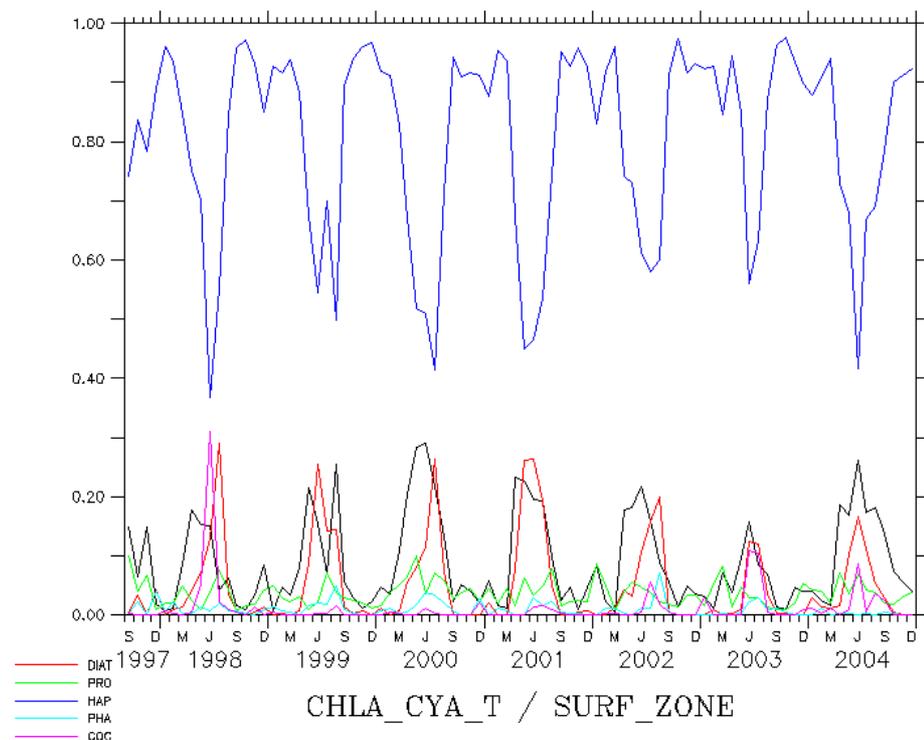


Figure 5.2.2 : Evolution mensuelle du rapport entre la chlorophylle a associée à un groupe et la chlorophylle a, moyennée pour la période de septembre 1997 – décembre 2004 dans l'Atlantique Nord. En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende de couleur en bas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

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

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

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

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

5.2.2 Cycles saisonniers de chaque groupe

Les haptophytes

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

Les Prochlorococcus

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

Les SLC

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

Les diatomées

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

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

Sud vers le Nord pendant la saison.

Les phaeocystis

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

Blooms de coccolithophoridés

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

5.2.3 Variabilités interannuelles sur la période 1997-2004

Les haptophytes

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

Les Prochlorococcus

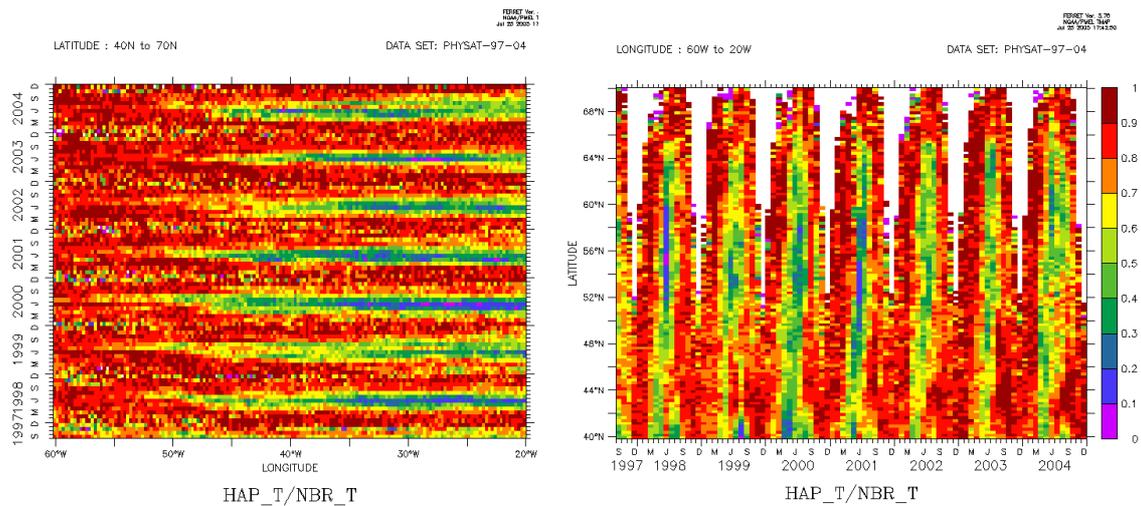
Leur tendance à la baisse, pour la surface couverte par ce groupe, sur la période 1998 – 2004 est assez nette (Tableau 5.2.1. et Figure 5.2.4), surtout pour les années 2003 et 2004 où ils semblent reculer vers le Sud, cédant la place aux haptophytes (Figure 5.2.3). La tendance en termes de chlorophylle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

Les SLC

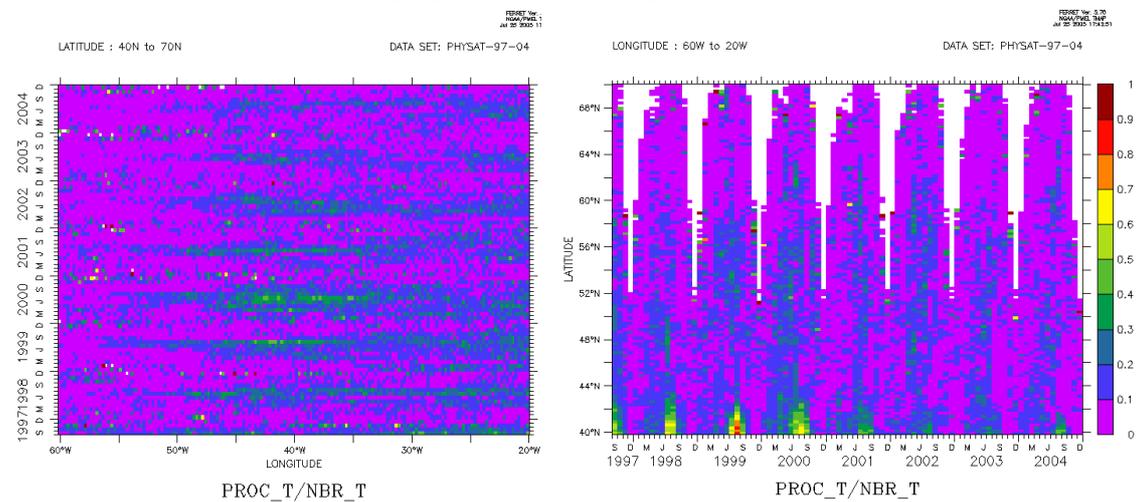
Moins nombreux en 2003 mais toujours bien présents en 2004, leur tendance n'est pas évidente sur la période. Il sera cependant intéressant d'étudier à l'avenir les liens potentiels entre la variation de la limite géographique haptophytes-*Prochlorococcus* dans cette région, et l'indice d'Oscillation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

Les diatomées

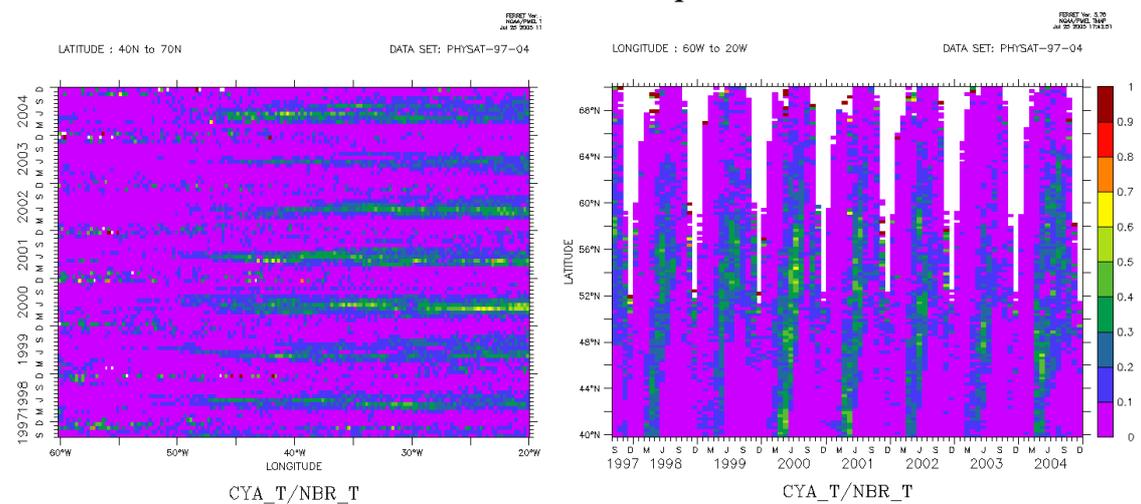
L'année 2001 se distingue par ses valeurs fortes en termes de surface couverte et de contribution à la chlorophylle *a* par les diatomées. L'année 2003 est plutôt caractérisée par des valeurs faibles de ces paramètres. En dehors de ces deux années il n'apparaît pas de tendance sur la période 1997-2004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



Haptophytes – Atlantique Nord

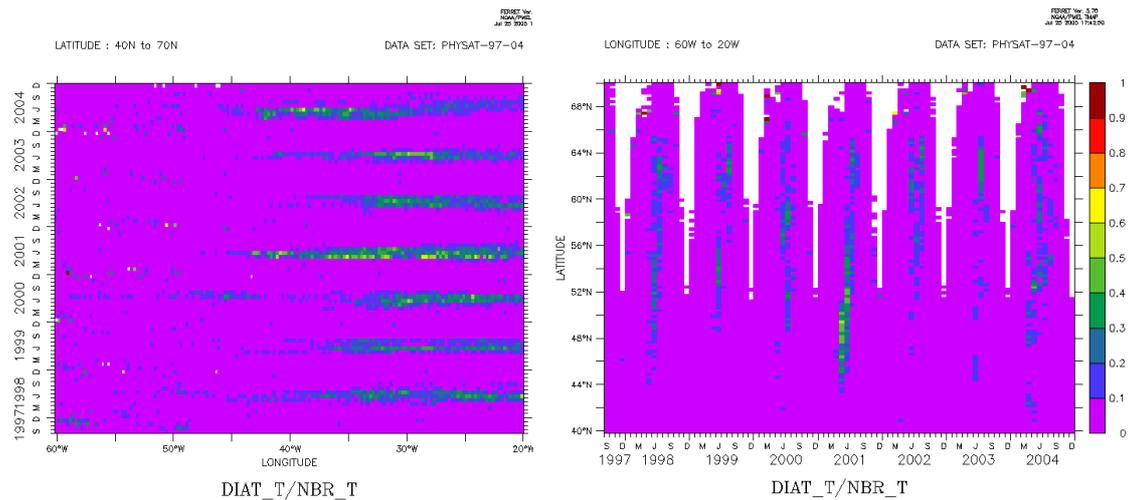


Prochlorococcus – Atlantique Nord

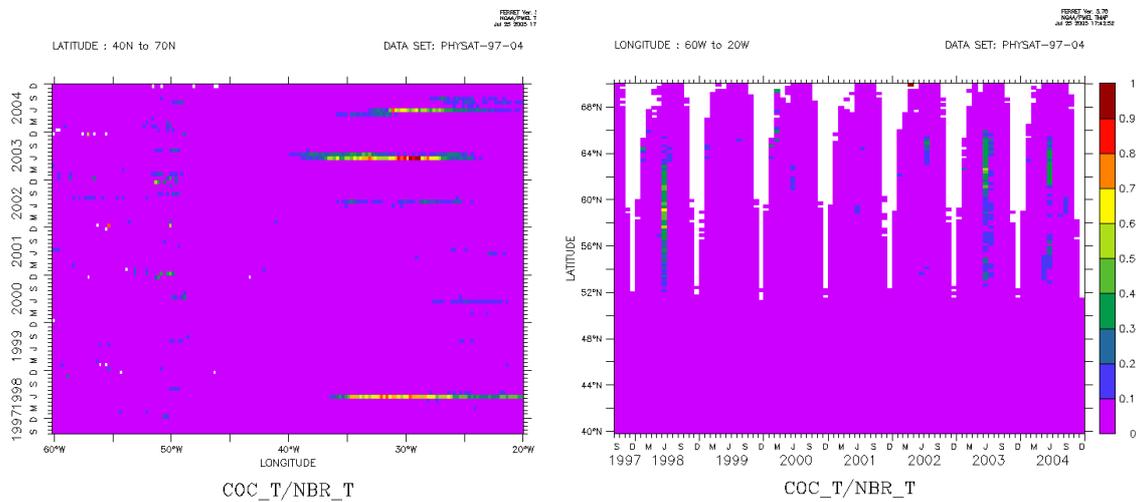


SLC – Atlantique Nord

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



Diatomées – Atlantique Nord



Bloom de Coccolithophoridés – Atlantique Nord

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

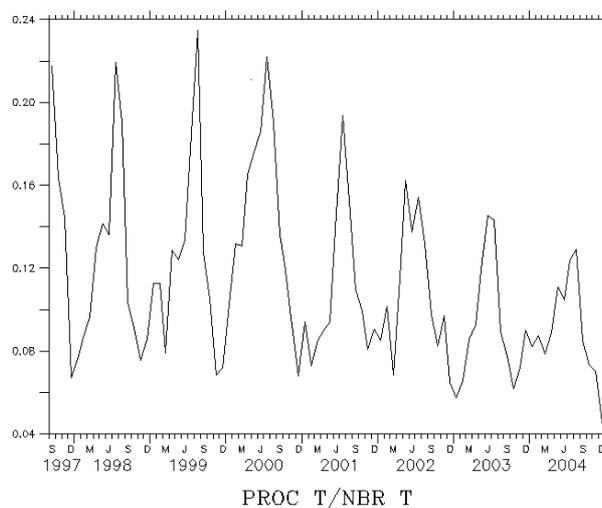


Figure 5.2.4 : Pourcentages mensuels de surface labellisée pour le groupe Prochlorococcus sur la

Chapitre 5 : Répartition et succession des groupes de phytoplancton dominants à l'échelle globale sur la période SeaWiFS

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

5.3 Océan Austral

5.3.1 Groupes dominants et tendance générale

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

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

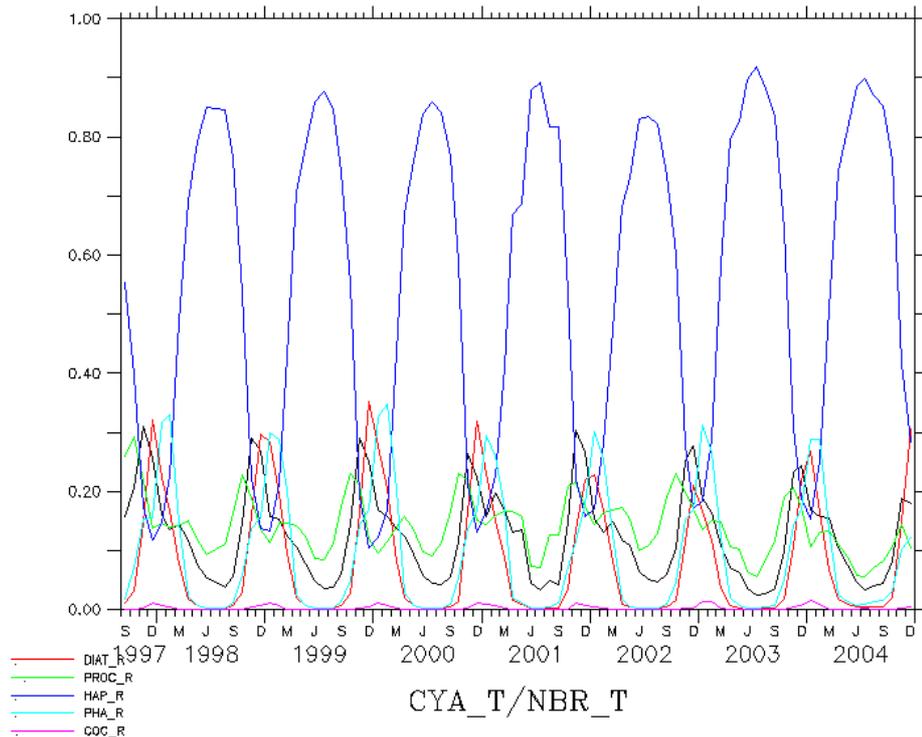


Figure 5.3.1 : Fraction mensuelle de la surface dominée pour chaque groupe (surface dominée par le groupe / surface totale dominée par un groupe), sur la période septembre 1997 – décembre 2004 dans l'Océan Austral. En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende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

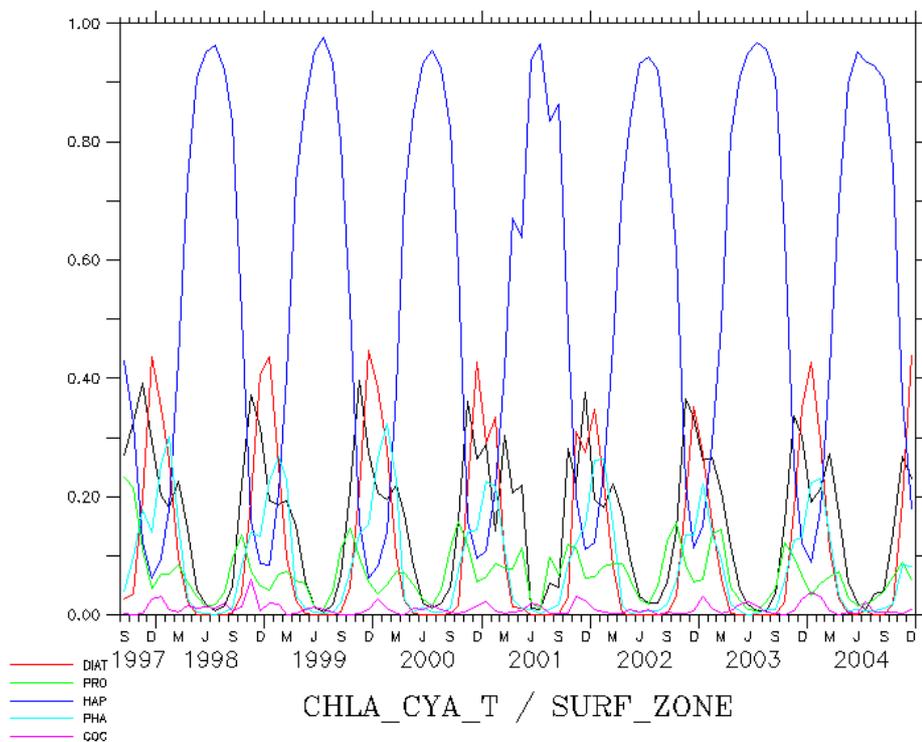


Figure 5.3.2 : Evolution mensuelle du rapport entre la chlorophylle a associée à un groupe et la chlorophylle a totale, moyennée pour la période de septembre 1997 – décembre 2004 dans l'Océan Austral. En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende de couleur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

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

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

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

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

5.3.2 Cycles saisonniers de chaque groupe

Les haptophytes

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

Les Prochlorococcus

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

Les SLC

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

Les diatomées

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

Les phaeocystis

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

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

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

Blooms de coccolithophoridés

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

5.3.3 Variabilités interannuelles sur la période 1997-2004

Les haptophytes

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

Les Prochlorococcus

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

Les SLC

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

Les diatomées

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

Les phaeocystis

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

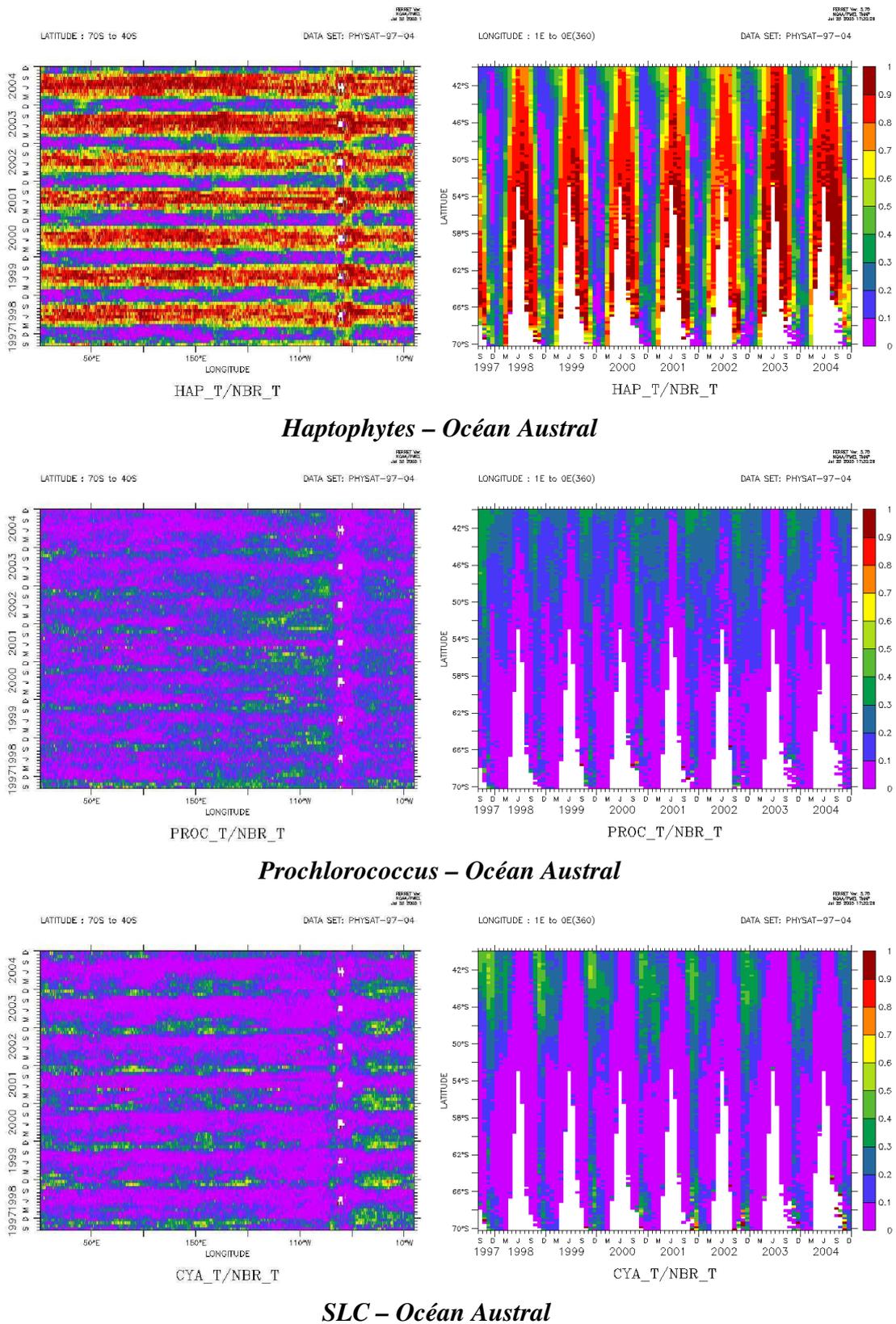


Figure 5.3.3: Représentation de la variabilité mensuelle de la surface labellisée pour les haptophytes, *Prochlorococcus* et SLC, en fonction de la longitude (à gauche) et de la latitude (à droite), de septembre 1997 à décembre 2004.

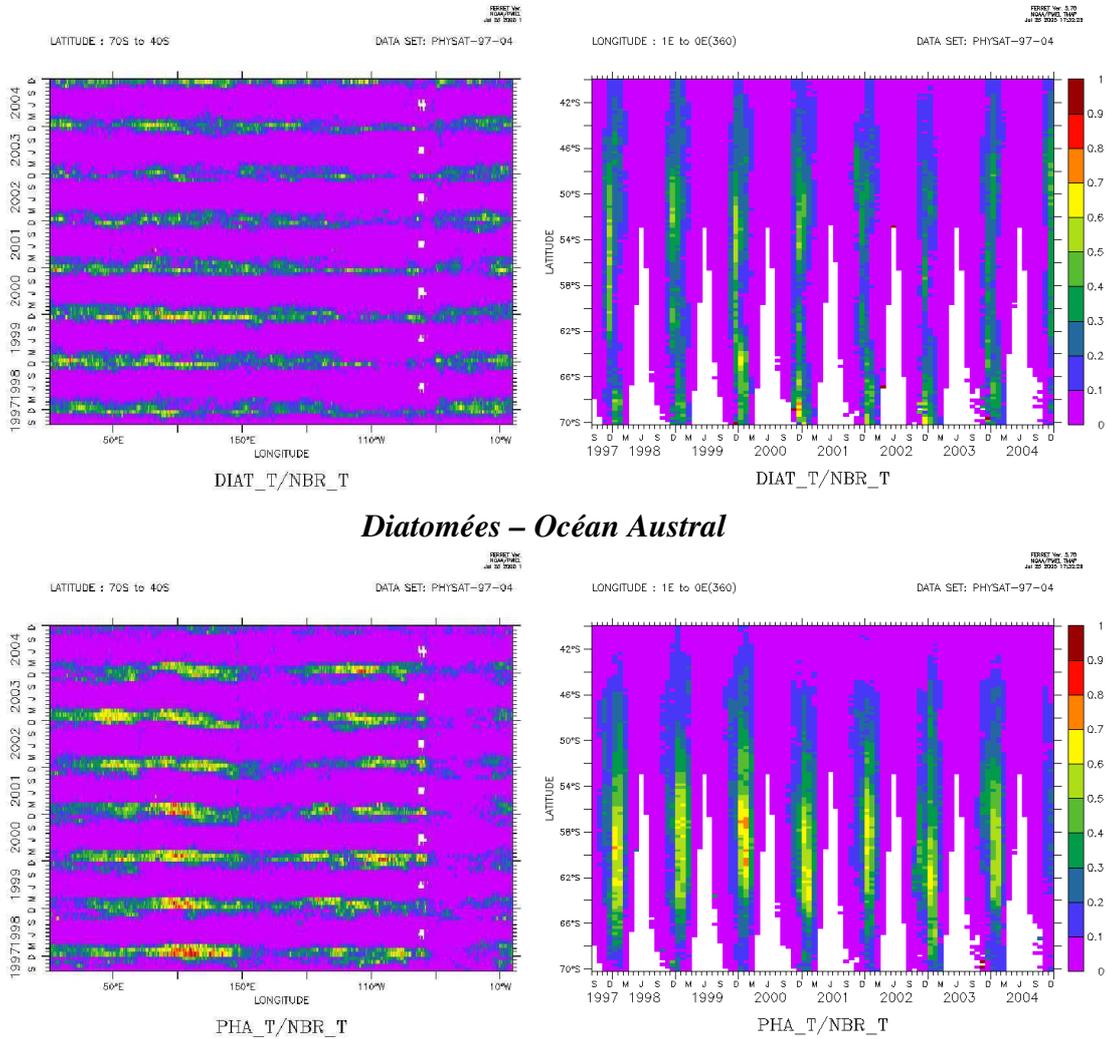


Figure 5.3.3 (suite): Représentation de la variabilité mensuelle de la surface labellisée pour les diatomées et les phaeocystis, en fonction de la longitude (à gauche) et de la latitude (à droite), de septembre 1997 à décembre 2004.

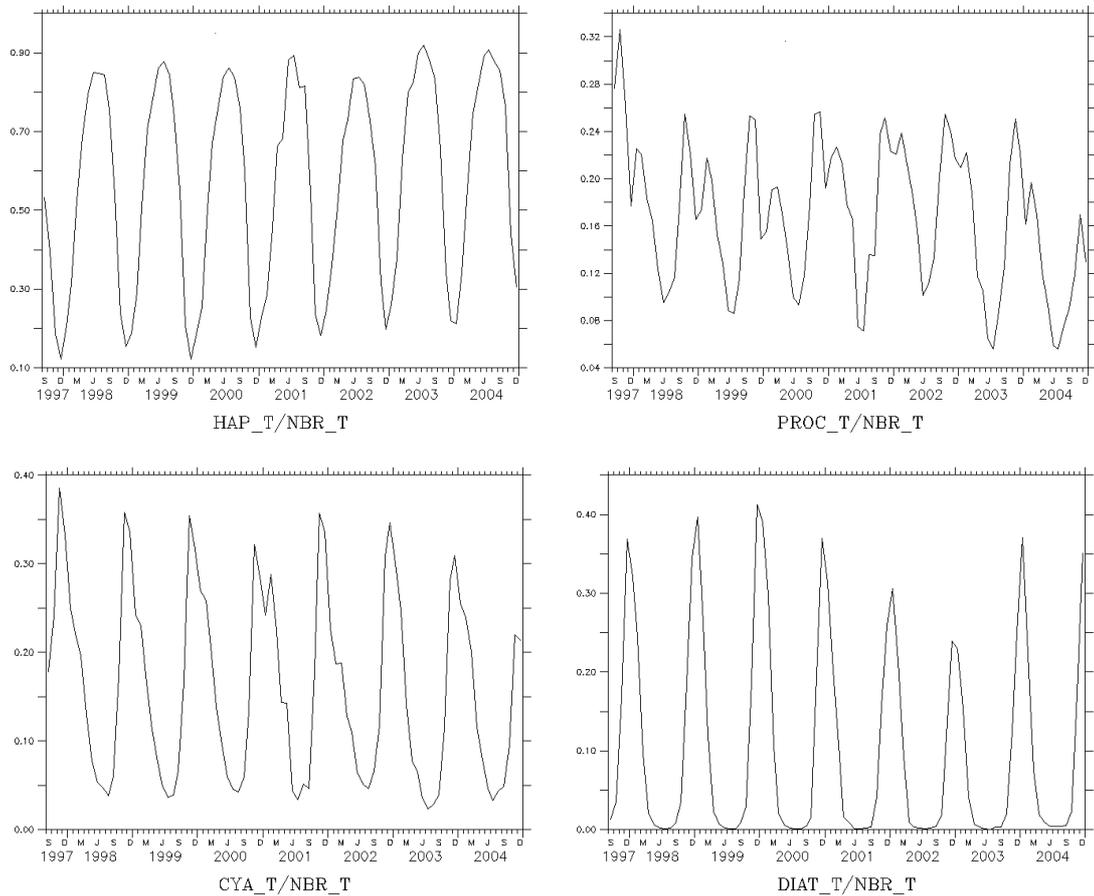


Figure 5.3.4 : Pourcentages mensuels de surface labellisée pour les groupes haptophytes, *Prochlorococcus*, SLC et Diatomées, sur la période de septembre 1997 à décembre 2004 dans l'Océan Austral (70°S-40°S / 1°E – 0°E).

5.4 Pacifique Equatorial

5.4.1 Groupes dominants et tendance générale

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

Pacifique Equatorial	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Haptophytes	8.1	6.8	3.9	7.8	7	17	13.5
Prochlorococcus	45.2	54.1	51	51.7	53.8	52.1	49.1
SLC	44.4	38.9	44.5	40.5	39.1	30	34.6
Diatomées	1.8	0.2	0.3	0.3	0.1	0.5	1.3
Phaeocystis	0	0	0	0	0	0	1.1
Coccolithophoridés	0	0	0	0	0	0	0

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

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

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

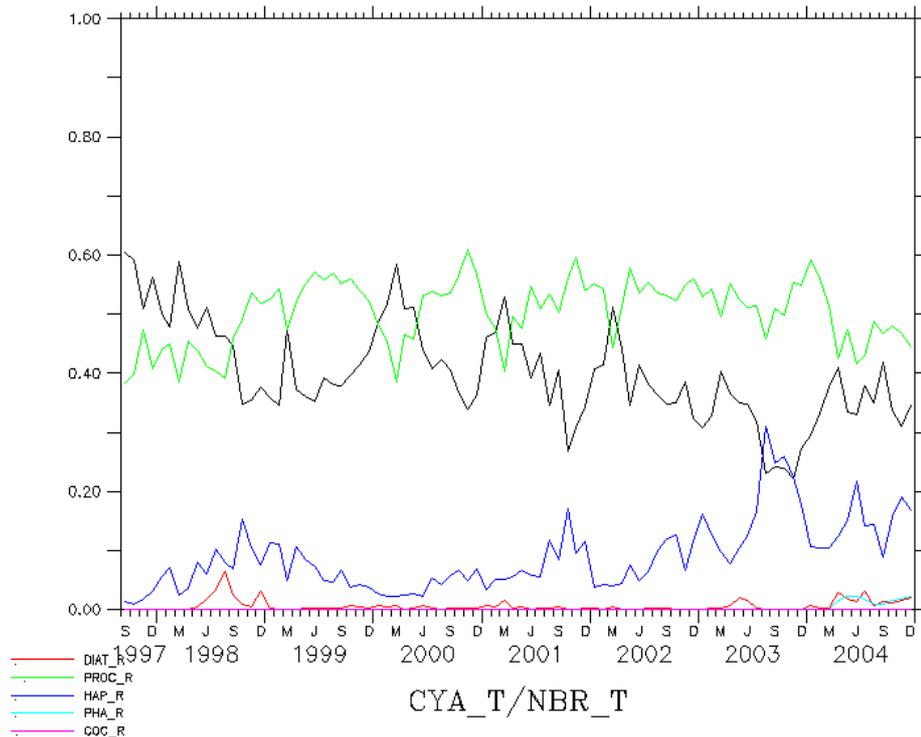


Figure 5.4.1 : Fraction mensuelle de la surface dominée pour chaque groupe (surface dominée par le groupe / surface totale dominée par un groupe), sur la période septembre 1997 – décembre 2004 dans le Pacifique équatorial. En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon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

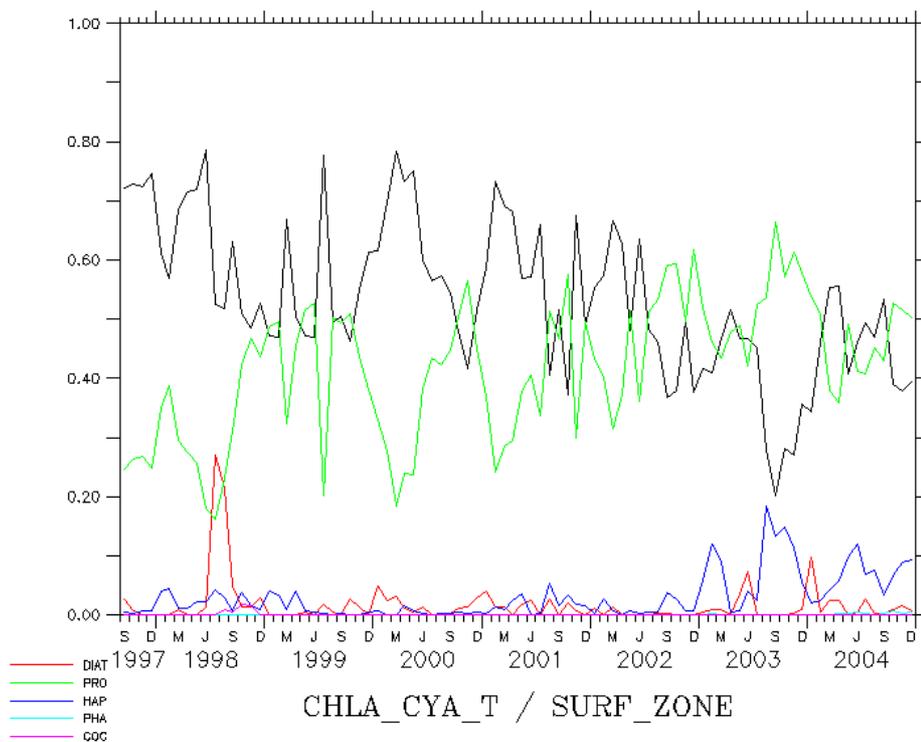


Figure 5.4.2 : Evolution mensuelle du rapport entre la chlorophylle a associée à un groupe et la chlorophylle a, moyennée pour la période de septembre 1997 – décembre 2004 dans le Pacifique équatorial. En noir les cyanobactéries, puis les autres groupes détectés par PHYSAT, selon la légende de couleur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

5.4.2 Cycles saisonniers de chaque groupe

Les haptophytes

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

Les Prochlorococcus

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

Les SLC

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

Les diatomées

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

5.4.3 Variabilités interannuelles sur la période 1997-2004

Les haptophytes

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

Les Prochlorococcus

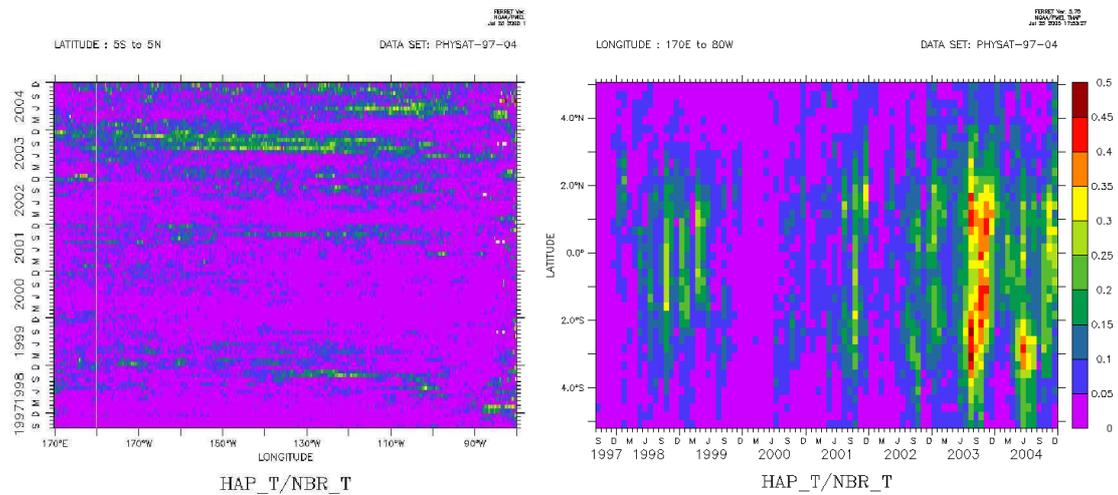
Les *Prochlorococcus* dominent cette région sur presque toute la période d'étude en termes de surface (Figure 5.4.1 et 5.4.3). Ils sont dépassés par les SLC en fin d'année 1997 et 1998 et lors du printemps 2000. Le nombre de pixels labellisés *Prochlorococcus* pour la période 1998-2004 est plutôt stable.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

Les SLC

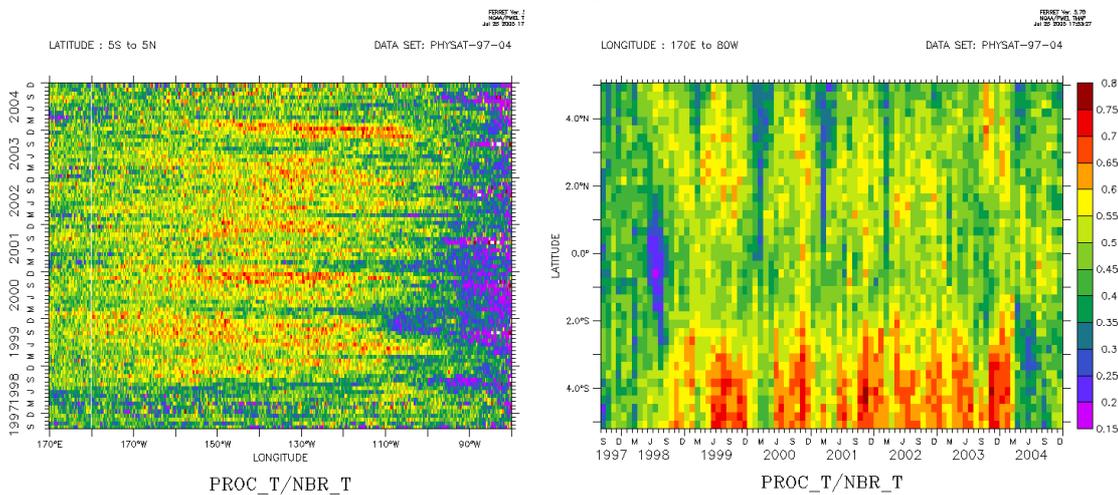
Les données disponibles permettent d'observer qu'en fin d'année 1997 et 1998 les SLC étaient largement dominants et n'ont cessé de diminuer depuis, laissant la place aux *Prochlorococcus* et aux haptophytes (Figure 5.4.4).

Les diatomées

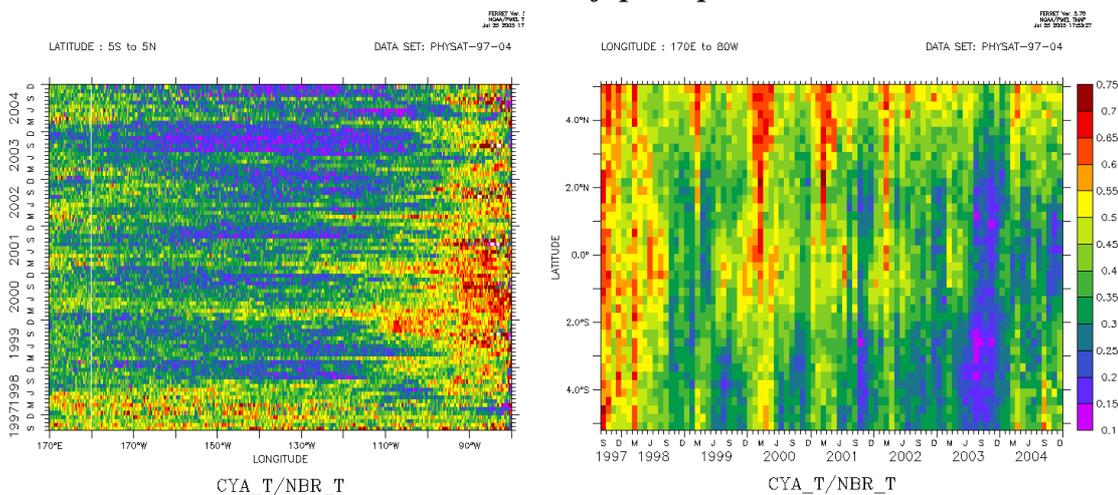
L'événement majeur concernant les diatomées dans cette région est le pic important durant les mois d'août, septembre et décembre 1998 (Figure 5.4.4). Cette floraison de diatomées qui représente plus de 6% de la zone et plus de 30% de la *chlorophylle a*, à comparer avec l'absence presque totale de diatomées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



Haptophytes – Pacifique Equatorial



Prochlorococcus – Pacifique Equatorial



SLC – Pacifique Equatorial

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

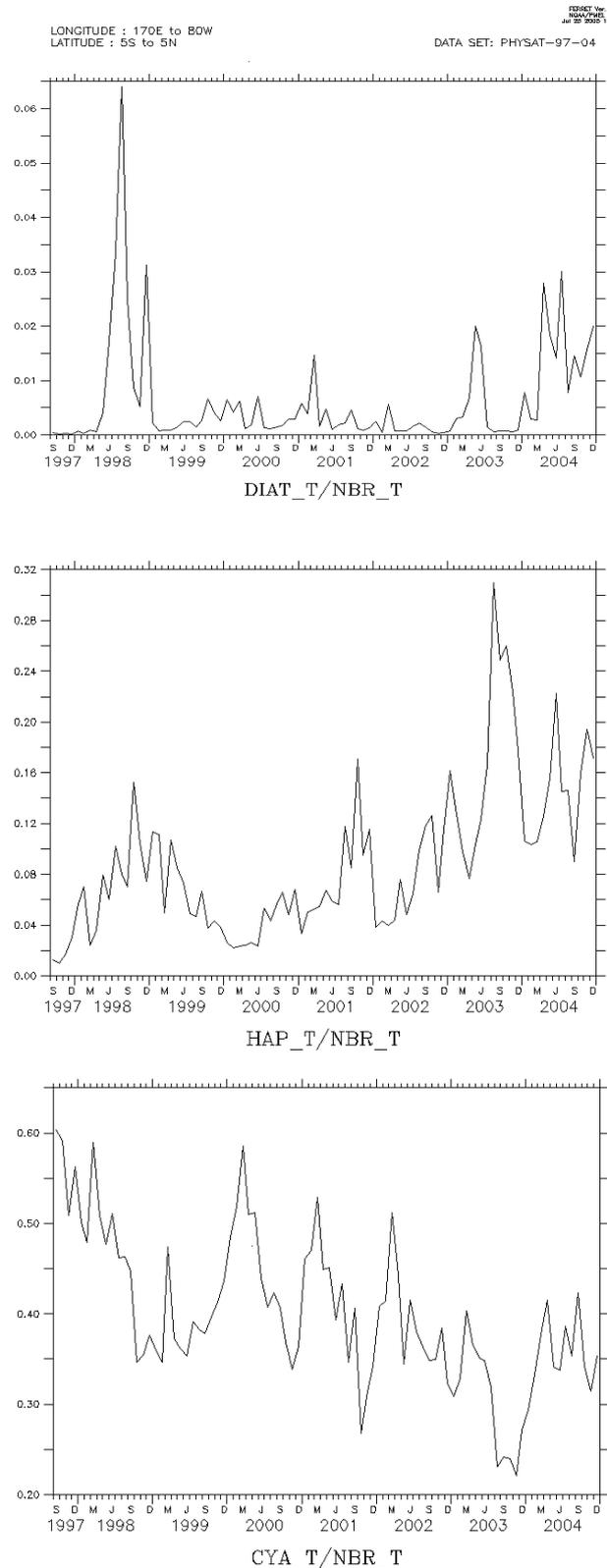


Figure 5.4.4 : Pourcentages mensuels de surface labellisée pour les groupes diatomées, haptophytes (à gauche) et SLC (à droite), sur la période de septembre 1997 à décembre 2004 dans le Pacifique Equatorial (5°S-5°N / 170°E – 80°W).

CONCLUSION DU CHAPITRE 5

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

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

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

