

## **Identifier des écosystèmes marins grâce aux données satellites de couleur de l'eau : l'approche PHYSAT**

Jusqu'à présent les signaux satellitaires permettaient de retracer la signature de la photosynthèse dans l'océan. Désormais une méthodologie vient d'être mise au point pour déterminer à partir de ces signaux les différentes espèces de phytoplancton présentes dans les eaux de surface.

### **Le phytoplancton et son rôle de pompe biologique de carbone**

Le gaz carbonique rejeté dans l'atmosphère du fait de l'activité humaine est la cause principale du changement climatique en cours. Il est soluble dans l'eau de mer, où il est en équilibre avec les carbonates. Dans les premières dizaines de mètres de l'océan, éclairés par le soleil, la photosynthèse transforme une partie de ce carbone en carbone organique, à concurrence de l'épuisement des sels nutritifs disponibles. L'intérêt géochimique de cette transformation est double : d'une part le carbone ainsi transformé ne participe plus au système des carbonates, ce qui augmente d'autant la capacité de l'océan à dissoudre du gaz carbonique, et d'autre part les particules de carbone organique sont sujettes à sédimenter, ce qui retire du carbone des couches superficielles vers l'océan profond où le temps de résidence des masses d'eau est de l'ordre du millier d'années. L'ensemble de ces deux processus est souvent désigné sous l'appellation de «pompe biologique de carbone». Comprendre comment évoluera cette pompe est une des clés pour établir les scénarii de changement du climat dans les décennies à venir, et c'est ce à quoi s'est attaqué le programme international JGOFS (Joint Global Ocean Fluxes Study) depuis le début des années 1990, dont la composante française est actuellement le programme national PROOF.

### **Les pigments du phytoplancton**

Les flux de matière organique résultent de l'activité d'organismes extrêmement variés et nombreux, au sein desquels on distingue de façon classique :

- les producteurs primaires (les algues phytoplanctoniques),
- les producteurs secondaires ou tertiaires (le zooplancton),
- et les reminéralisateurs (les bactéries).

Une propriété commune à tous ces groupes est qu'ils sont difficiles à isoler et à observer, et que mesurer leur abondance n'est possible qu'à un coût élevé. L'exception vient du phytoplancton, qui met en œuvre la photosyn-

## **Diagnosis of marine ecosystems using sea colour detected from space : The PHYSAT approach**

*In the past, remote sensing has been used to retrieve the signature of photosynthesis in the ocean. A new methodology has now been developed that makes it possible to use these signals to determine the dominant phytoplankton species in surface waters.*

### **Phytoplankton and the oceanic biological carbon pump**

*Anthropogenic carbon dioxide in the atmosphere is the main cause of present climate change. This gas dissolves in seawater, in which it is in equilibrium with the carbonates. In the upper, well lit, tens of meters of the ocean, part of the carbon dioxide is transformed into organic carbon through photosynthesis, as long as nutrients are available. This transformation is of geochemical importance for two reasons : on the one hand, the resulting organic carbon no longer participates in the equilibrium of the carbonate system, thus increasing the ocean's ability to dissolve carbon dioxide, and on the other hand, particulate organic carbon issued from marine life is likely to sink, withdrawing carbon from the upper layers to the deep ocean, where the time scale for the renewal of water masses is about 1 000 years. Together these two processes, photosynthesis of organic carbon and sinking of particles, are often referred to as the «biological carbon pump». Understanding how this pump will evolve is a key to working out climate change scenarios for the coming decades. This is one of the main objectives of the international JGOFS program (Joint Global Ocean Fluxes Study), initiated in the early nineties, and of the PROOF program, which is the French contribution to JGOFS.*

### **Phytoplankton pigments**

*Fluxes of organic carbon proceed from the metabolism of extremely numerous and diverse organisms, which are academically divided into :*

- primary producers (phytoplankton)
- secondary or tertiary producers (zooplankton)
- and re-mineralizers (bacteria).

*Common to all these groups is the fact that they cannot be easily isolated and observed, so that measuring and studying them is expensive. The case of phytoplankton is, however, different: phytoplankton make use of photosynthesis, and for this purpose, have pigment antennae with which they capture the energy of photons. First among these phytoplankton pigments is chlorophyll a, which absorbs light, especially in the blue part of the visible spectrum. Thus, chlorophyll a selectively modifies the flux of photons that penetrates the*

thèse, et qui dispose pour cela d'antennes pigmentaires grâce auxquelles il peut capturer l'énergie des photons. Au premier rang des pigments du phytoplancton se trouve la chlorophylle *a*. En absorbant ainsi la lumière, tout spécialement dans la partie bleue du spectre visible, la chlorophylle *a* modifie sélectivement le flux de photons qui transite dans la partie éclairée de l'océan, de telle sorte que la lumière solaire qui ressort de l'océan est moins bleue que lorsqu'elle y a pénétré. Cette propriété a été exploitée par les agences spatiales qui ont lancé des satellites munis de capteurs de couleur afin de pouvoir estimer le contenu en chlorophylle *a* de l'océan et sa variabilité dans l'espace et le temps.

### La mesure des pigments par satellite

La principale difficulté technique d'une telle entreprise vient de la présence de l'atmosphère dont les molécules et les particules (ou aérosols) diffusent et absorbent, elles aussi, les photons. D'une part, l'atmosphère rediffuse vers le capteur une grande quantité de photons avant qu'ils n'atteignent la surface de l'océan, et d'autre part elle atténue le signal provenant de l'océan avant qu'il ne parvienne au capteur en rediffusant des photons dans toutes les directions. Dans le bleu, l'atmosphère est responsable d'environ 95% du signal reçu par un capteur spatial. Toutefois, le mélange des signatures spectrales des deux milieux n'est pas inextricable, et la démonstration en a été faite au cours de l'expérience du capteur CZCS (Coastal Zone Color Scanner) lancé par la NASA en 1978 : il est possible de corriger le signal reçu de l'effet de l'atmosphère avec suffisamment de précision pour isoler la signature spectrale des réflectances océaniques. Le rapport bleu/vert de ces réflectances est en particulier utilisé depuis le début de l'avènement de la couleur de l'océan pour estimer la concentration en chlorophylle *a* de l'eau de mer superficielle. Les données du capteur CZCS ont ainsi permis de réaliser les premières cartes globales permettant le suivi du cycle annuel de l'activité biologique marine. L'exploitation des données de couleur de l'océan est devenue quasi-opérationnelle avec le lancement des capteurs OCTS (NASDA) et POLDER (CNES) en 1996, SeaWiFS, MODIS-T et MODIS-A (NASA) respectivement en 1997, 1999 et 2002, et MERIS (ESA) en 2001.

La première utilisation des données de concentration en chlorophylle ainsi obtenues consiste à estimer la photosynthèse marine, ou production primaire, première étape de la chaîne de réactions biogéochimiques par lesquelles s'effectue le cycle océanique du carbone. En effet, le flux de photosynthèse peut être compris comme l'utilisation d'une énergie (la lumière capturée par les antennes pigmentaires, dont la concentration en chlorophylle fournit une estimation assez précise) selon un rendement quantique qu'il est possible de déterminer lors d'expériences *in situ*. Les océanographes français ont joué un rôle de tout premier plan dans la mise au point de la chaîne d'algorithmes pour l'estimation de ce flux (voir article précédent).

*well lit surface ocean layer, in such a way that the light that leaves the ocean is less blue than penetrating light. Space agencies have exploited this property and have launched*

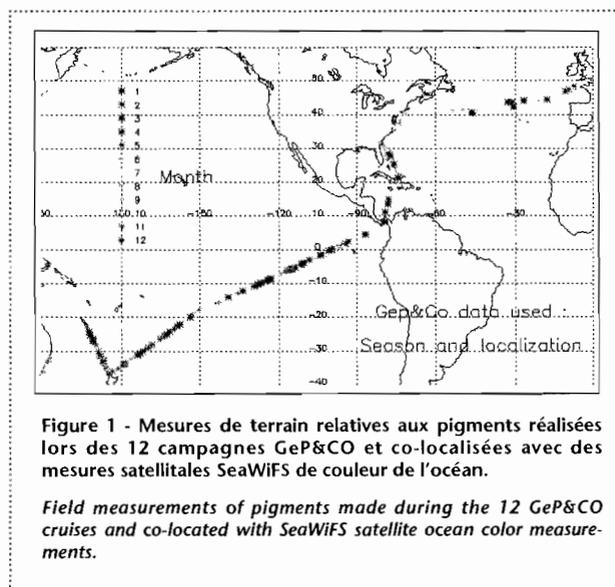


Figure 1 - Mesures de terrain relatives aux pigments réalisées lors des 12 campagnes GeP&CO et co-localisées avec des mesures satellitales SeaWiFS de couleur de l'océan.

*Field measurements of pigments made during the 12 GeP&CO cruises and co-located with SeaWiFS satellite ocean color measurements.*

*satellites with ocean color sensors in order to estimate seawater chlorophyll content and its spatio-temporal variability.*

### Satellite measurement of pigment concentration

*The main difficulty is caused by the gas molecules and aerosols in the atmosphere which also diffuse and absorb photons. On the one hand, the atmosphere backscatters a large number of photons towards the sensor before they have reached the ocean, and on the other hand, it partly absorbs and backscatters the photons emitted by the ocean before they reach the sea color sensor. The atmosphere is responsible for about 95 % of the blue light detected by a satellite-borne sensor. However, the part of the signal that is created by the ocean and the part created by the atmosphere can be deconvoluted. This was demonstrated after the launch of the CZCS sensor (Coastal Zone Color Scanner) by NASA in 1978: the signal captured by the satellite can be corrected for the effect of the atmosphere with enough precision to work out the spectral signature of ocean reflectances. The blue/green ratio of these reflectances is used to estimate the chlorophyll content of surface seawater. Using the CZCS data, it has thus been possible to work out the first global maps of marine biological activity over a seasonal cycle. Sea color data are now globally and routinely available in near real time, after the launches of sensors OCTS (NASDA) and POLDER (CNES) in 1996, SeaWiFS, MODIS-T and MODIS-A (NASA) in 1997, 1999 and 2002 respectively, and MERIS (ESA) in 2001.*

*The first use of the chlorophyll concentration data was to estimate marine photosynthesis, or primary production, which is the first step in the chain of biogeochemical reactions that constitute the oceanic carbon cycle. The photosyn-*

### **Du flux de photosynthèse à la pompe biologique de carbone : l'importance des acteurs biologiques**

Toutefois, il y a loin du flux de photosynthèse à la pompe biologique de carbone : la matière organique ainsi nouvellement formée sert à augmenter la biomasse du phytoplancton, mais sert aussi de carburant pour en assurer les besoins métaboliques (la respiration). De plus, avant d'alimenter un flux descendant de particules détritiques, la biomasse du phytoplancton est broutée par du zooplancton, lui-même consommé par d'autres organismes de plus grande taille. Au terme de cette activité de prédateurs et de proies, à laquelle participent aussi les bactéries marines, une large part des particules qui sédimentent est constituée de pelotes fécales. Entre une chaîne très courte lorsque le phytoplancton est constitué en majorité de diatomées dont la croissance est rapide et qui, à leur mort, sédimentent vers la profondeur, et des chaînes plus longues et complexes où intervient une foule variée d'espèces planctoniques, la vie marine permet des voies multiples à la pompe biologique de carbone. Ces voies ont chacune des caractéristiques propres en termes de qualité de la matière exportée : labilité vis à vis de l'action bactérienne, rapport entre les éléments majeurs que sont le carbone, l'azote, et le phosphore. Estimer les flux de matière vers la profondeur implique donc qu'on en connaisse les acteurs biologiques. C'est d'ailleurs un objectif pour la nouvelle génération de modèles globaux qui couplent la circulation océanique avec la biogéochimie.

Par ailleurs, il reste une marge pour l'interprétation de la couleur de l'océan, laquelle est due pour une part à son contenu en chlorophylle, mais aussi à la rétrodiffusion de la lumière par des particules, et à son absorption par des substances autres que les pigments du phytoplancton : la matière organique colorée dissoute. Au premier ordre, on peut admettre que les propriétés d'absorption et de rétrodiffusion covarient avec la teneur en chlorophylle. Mais on sait que dans certaines situations, il existe des exceptions. Le besoin de savoir quel écosystème est actif à un moment et à un endroit donné pour estimer les flux biogéochimiques dans l'océan, et la part inexpliquée de la variabilité de la couleur de l'océan, ont été à l'origine de recherches qui viennent récemment de déboucher sur une méthode permettant d'identifier la signature de groupes d'espèces dans les données satellite de couleur de l'océan. C'est cette méthode que nous présentons ici.

### **Vers l'identification des diverses espèces du phytoplancton à partir du signal satellital de couleur de l'océan**

Les diverses espèces du phytoplancton diffèrent par les proportions de leurs pigments accessoires (c'est à dire autres que la chlorophylle), ce qui se traduit par des spectres d'absorption légèrement différents (voir article «Les virus un élément important dans la boucle microbienne de l'océan» Lettre n°9). Introduites dans des modèles de transfert radiatif, ces différences ne permet-

*thesis flux can be seen as the conversion of energy (light captured by the pigment antennae, for which chlorophyll concentration is a reasonably accurate estimate) into chemical energy, with a quantum yield that can be estimated by in situ experiments. French oceanographers have actively contributed to the development and validation of the algorithms to estimate this flux.*

### **From photosynthesis to the biological carbon pump : the importance of biological actors**

*However, there is a big difference between the photosynthesis flux and the biological carbon pump: newly formed organic matter is used to increase the phytoplankton biomass, but it is also used to fuel its metabolic requirements (respiration). In addition, prior to feeding a downward flux of particulate detritus, the phytoplankton biomass is grazed by zooplankton, which, in turn, are consumed by larger organisms. The main final product of this predator-prey activity, to which marine bacteria also contribute, is made up of sinking particles, mostly fecal pellets. Marine life offers a wide variety of pathways for the biological carbon pump, from very short chains when the phytoplankton is made up of rapid-growth diatoms which, after death, quickly sink to depth, and longer, more complex chains operated by a multitude of plankton species. The quality of exported matter varies widely, in terms of lability of bacterial activity, or of carbon / nitrogen / phosphorus ratios. Measuring the fluxes of matter to depth thus requires knowledge not only of the chlorophyll concentration, but also of the species that control these fluxes. This challenge is now taken up by a new generation of global models that couple ocean circulation with biogeochemistry.*

*Chlorophyll concentration in the ocean is the main cause of sea color variability, but backscattering of light by all kinds of marine particles, and absorption by dissolved substances also impact the transfer of photons through the water. In first order, it can be considered that these two processes co-vary with absorption by chlorophyll. However, exceptions have been recognised in certain situations. The need to know which ecosystem is active at a given place and a given time, and the possibility that some part of the variability of sea color might be explained by something other than chlorophyll concentration, have generated research that has recently made it possible to identify the signatures of groups of species in the satellite ocean color data. It is this method that we present here.*

### **Towards the identification of phytoplankton species based on satellite-detected ocean color**

*The various phytoplankton species have different proportions of accessory pigments (i. e. pigments other than chlorophyll), resulting in slightly different absorption spectra (see the article «Viruses: an important component of the microbial food web in the ocean», Newsletter 9). When forced by these different absorption spectra, radiative transfer models show only very small changes in the simulated*

tent de simuler que des changements très faibles dans les spectres de réflectances marines, inférieurs à l'erreur admise pour l'estimation de ces réflectances. La distinction de groupes d'espèces dans les données de couleur de l'océan semblait donc sinon théoriquement impossible, du moins très difficile. Toutefois, le besoin d'accéder à cette connaissance pour mieux comprendre le fonctionnement global de la pompe biologique et son évolution est tel que nous avons tenté d'y répondre, en abordant le problème de manière empirique.

**Première étape : un long travail préparatoire d'échantillonnage *in situ***

La première étape a consisté à recueillir des données pertinentes pour ce projet, c'est-à-dire des observations *in situ* suffisamment détaillées pour qu'on puisse y diagnostiquer la dominance d'espèces, associées à des observations de couleur de l'océan par satellite au même endroit et au même moment, le tout dans une grande variété de conditions climatiques.

De telles données existent, mais d'une part leur accès n'est pas toujours autorisé, et d'autre part, collectées lors de campagnes océanographiques, elles fournissent une abondance de renseignements sur des zones et à des périodes limitées, et laissent la majeure partie de l'océan, inexplorée. Par contre le recours à un échantillonnage le long d'une route commerciale maritime, déjà expérimenté par le passé dans l'océan Pacifique, par les chercheurs de l'IRD à Nouméa, a semblé une solution appropriée pour réaliser un tel échantillonnage, et un accord a été passé avec une compagnie de navigation allemande pour qu'un océanographe puisse

marine reflectance spectra, smaller than the error commonly admitted for the estimate of these reflectances. Thus, identifying groups of species in ocean color data has long been considered, if not theoretically impossible, then at least very difficult. However, the need to access this knowledge in order to better understand the functioning of the biological pump and its evolution is such that we decided to tackle this problem empirically.

**The first step: the long preliminary task of collecting *in situ* data**

The first step was to collect the pertinent data for this purpose, i.e. *in situ* measurements with biological information rich enough to indicate the dominant species, together with ocean color measurements made by satellite at the same time and at the same place. All of this should preferably be representative of a wide range of climatic conditions.

Such data already exist but, on the one hand, access to them is restricted, and on the other hand they have been collected mostly during oceanographic

cruises, and so they over-represent small parts of the ocean during limited periods, leaving most of the ocean unexplored. By contrast, sampling along a commercial sea route, already carried out experimentally in the Pacific Ocean by IRD scientists from New Caledonia, seemed an appropriate solution for building a dataset representative of the world ocean. A German shipping company agreed to host an oceanographer on board one of its ships, the «Contship London», on each of its voyages from le Havre to Noumea, in order to collect and process the needed water samples. This idea is at the origin of the GeP&CO project (Geochemistry, Phytoplankton and Color of the Ocean), coordi-

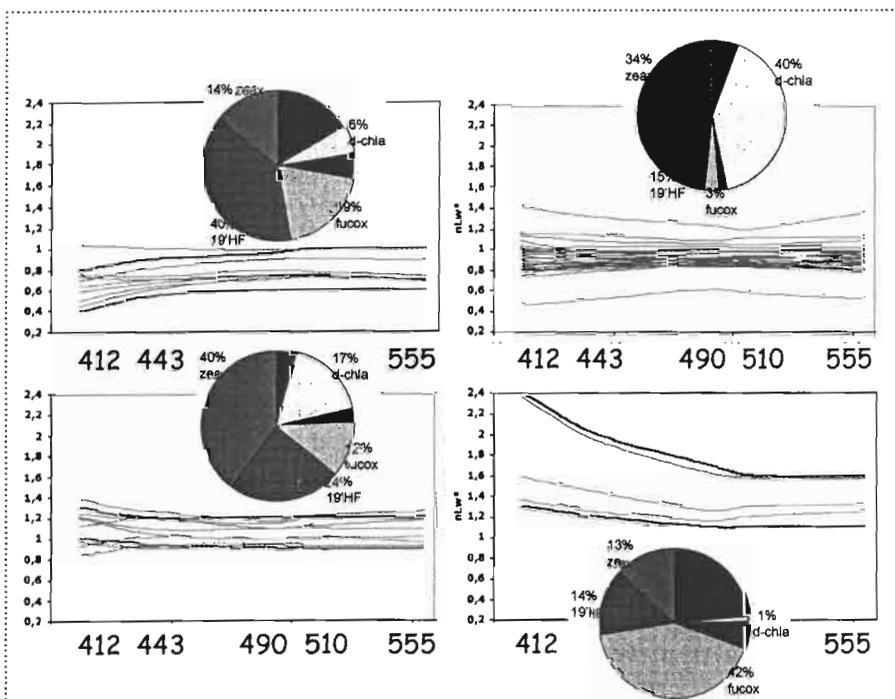


Figure 2 - Évolution des anomalies de réflectances en fonction de la longueur d'onde (courbes) groupées selon des valeurs croissantes et caractéristiques pigmentaires (camemberts) pour les observations de terrain co-localisées avec des observations du satellite SeaWiFS. La 19'hexanoyloxyfucoxanthine (19'HF) est un pigment diagnostique des haptophytes, la divinyle-chlorophylle a et la zeaxanthine caractérisent les *Prochlorococcus*, la zéaxanthine seule caractérise les *Synechococcus*, et la fucoxanthine est le pigment diagnostique des diatomées. Voir texte.

Reflectance anomalies arranged by increasing magnitude (curves) and pigment characteristics (pie charts) for the field observations co-located with SeaWiFS satellite observations. 19'hexanoyloxyfucoxanthin (19'HF) is a diagnostic pigment for haptophytes, divinyl-chlorophyll a and zeaxanthin characterize *Prochlorococcus*, zeaxanthin alone characterizes *Synechococcus*, and fucoxanthin is the diagnostic pigment for diatoms.

embarquer entre le Havre et Nouméa à chacun des voyages du porte-conteneurs «Contship London» afin de recueillir les données nécessaires au projet. Cette idée est à la base de l'opération GeP&CO (Géochimie, Phytoplancton et Couleur de l'Océan), soutenue par le programme national PROOF (voir article «Observation des peuplements de phytoplancton et de leur impact sur la géochimie de l'océan» dans la Lettre n° 14). Ce long trajet maritime est représentatif des conditions qu'on peut rencontrer dans l'océan global, hormis les régions polaires et subpolaires car il traverse des systèmes océaniques variés :

- Atlantique nord soumis à un bloom printanier de phytoplancton,
- côte est américaine,
- Mer des Caraïbes, et Golfe de Panama,
- Pacifique équatorial riche en sels nutritifs mais généralement dépourvu de fer,
- tourbillon anticyclonique pauvre en plancton du Pacifique tropical sud,
- eaux sous régime tempéré au voisinage de la Nouvelle Zélande, et mer de Tasman .

Lors de ces trajets la mesure en routine d'une vingtaine de pigments permettait, grâce aux connaissances existantes sur les pigments qui caractérisent certains groupes du phytoplancton, de diagnostiquer la présence de ces groupes. Des données des sels nutritifs, des comptages de coccolithophoridés et de picoplancton, ainsi que des spectres d'absorption de lumière et des mesures de réflectances étaient aussi recueillis, permettant à tout le moins de fournir une description et une étude de la variabilité globale du phytoplancton à l'issue de GeP&CO en cas d'échec de la tentative d'identifier des groupes de phytoplancton par satellite.

Les opérations de terrain de GeP&CO ont duré trois ans et ont permis de réaliser 12 campagnes, à raison d'une par trimestre, de novembre 1999 à août 2002 (voir : <http://www.lodyc.jussieu.fr/gepco>).

Des ~1400 observations ainsi réalisées, un dixième seulement s'est avéré colocalisé (figure 1) avec une mesure de réflectance par le satellite SeaWiFS utilisable, en raison de la couverture nuageuse, ce qui souligne l'intérêt de disposer d'un jeu de données global et répétitif comme celui de GeP&CO.

#### **Un choix déterminant : écarter l'effet de la concentration en chlorophylle**

Etablir des liens entre réflectances marines et les groupes d'espèces in situ diagnostiqués d'après l'abondance relative de certains pigments a fait l'objet de la thèse de S. Alvain au LSCE (IPSL) sous la direction de Cyrille Moulin en collaboration avec le LOCEAN (IPSL), qui a débuté en octobre 2002. La première difficulté pour ce travail a consisté à retirer du spectre des réflectances marines

noted by the French national program PROOF. (See the article «The cruises : Observing phytoplankton populations and their impact on ocean geochemistry» in Newsletter 14.) This long sea route crosses a variety of the conditions that can be encountered in the world ocean (except the polar and subpolar regions):

- North Atlantic with its spring bloom of phytoplankton
- east coast of North America
- Caribbean Sea and Gulf of Panama
- equatorial Pacific with abundant nutrients but no iron
- South Pacific anticyclonic gyre where plankton is scarce
- temperate waters near New Zealand, and Tasman Sea.

Routine measurements of about 20 pigments during the voyages of the «Contship London» enabled certain phytoplankton groups, with known pigment signatures, to be identified. Additional nutrient data, coccolithophorid and picoplankton counts, as well as light absorption spectra and reflectance measurements were also collected, in order to build at least a description of the global variability of phytoplankton, a useful result even if the attempt to identify phytoplankton groups from space failed.

GeP&CO consisted of 12 campaigns, one per trimester from November 1999 to August 2002 (see: <http://www.lodyc.jussieu.fr/gepco>).

Finally, only one tenth of the ~1400 GeP&CO observations were found to be co-located with SeaWiFS reflectance measurements (Figure 1), mainly because of cloud cover. This underlines the need to collect field data with global and seasonal coverage, like the GeP&CO dataset.

#### **The decisive choice : filtering out the effect of chlorophyll concentration**

Linking marine reflectances to groups of species identified according to the relative abundance of certain diagnostic pigments was the objective of Séverine Alvain's PhD work, which started in October 2002 at LSCE (IPSL) in collaboration with LOCEAN (IPSL). The first task was to filter the signature of the chlorophyll a concentration out of the satellite-detected marine reflectance spectra. As stated above, these spectra respond strongly to chlorophyll a concentration, and these first order variations were likely to dominate and blur any second order signal produced by specific phytoplankton populations. For this purpose, we established an average statistical model of marine reflectances as a function of chlorophyll a concentration, using a large number of SeaWiFS chlorophyll and reflectance data, sorted by small chlorophyll concentration intervals from 0.04 to 4 mg m<sup>-3</sup>. Normalizing the measured reflectances versus this model makes it possible to work out sea color anomalies which are not affected by chlorophyll a concentration.

#### **The results**

Comparison of these reflectance anomalies with the

mesurées par satellite la marque de la chlorophylle *a*. En effet, nous avons déjà dit que l'impact spectral de premier ordre est lié à la concentration en chlorophylle *a*, qui va donc masquer celui, éventuel, de peuplements planctoniques particuliers. Nous avons pour cela bâti de façon statistique un modèle moyen du spectre des réflectances marines en fonction de la concentration en chlorophylle *a*, en utilisant d'un grand nombre de données de l'archive SeaWiFS, et ce tour à tour pour toutes les valeurs

GeP&CO pigments data at the 140 co-located observations revealed a remarkable organisation (figure 2) :

- The lowest negative spectral anomalies correspond to abundant 19'hexanoyloxyfucoxanthin, a pigment found in Haptophytes
- Some waters showed relatively abundant divinyl-chlorophyll *a*, which exists only in the genus *Prochlorococcus*

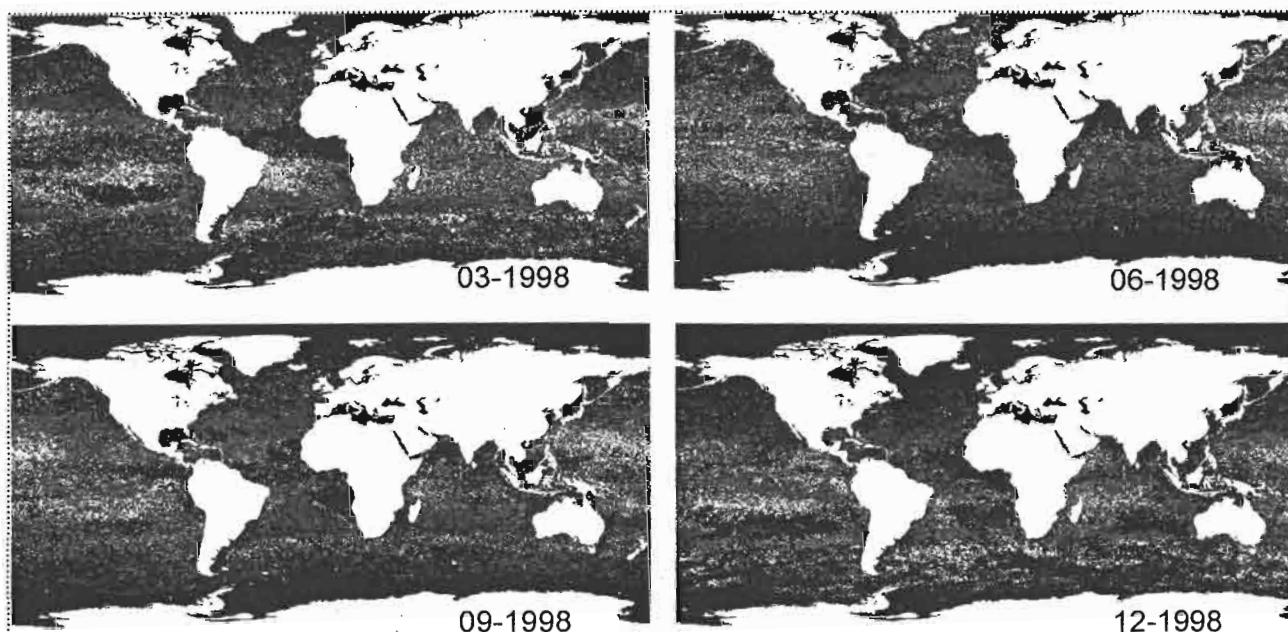


Figure 3 - Variations saisonnières des peuplements de phytoplancton (en bleu : haptophytes ; en vert : *Prochlorococcus* ; en jaune : *Synechococcus* ; en rouge : diatomées). Les diatomées abondent au printemps aux hautes latitudes, où les haptophytes dominent le reste de l'année. *Prochlorococcus* et *Synechococcus* dominent en permanence dans les régions tropicales.

Seasonal variations in phytoplankton populations (blue: haptophytes ; green: *Prochlorococcus* ; yellow: *Synechococcus* ; red: diatoms). Diatoms bloom in spring at high latitudes, where haptophytes dominate the rest of the year. *Prochlorococcus* and *Synechococcus* dominate all year round in tropical regions.

de chlorophylle rencontrées couramment dans l'océan (de 0,04 à 4 mg m<sup>-3</sup>). La comparaison entre les réflectances mesurées et ce modèle moyen permet de mettre en évidence des anomalies de couleur débarassées de l'effet de la chlorophylle *a*.

### Les résultats

Confrontées à ces réflectances normalisées, nos 140 observations ont montré une remarquable organisation (figure 2) :

- Aux anomalies spectrales les plus négatives correspondent à une forte abondance de 19'hexanoyloxyfucoxanthine, un pigment très présent chez les haptophytes.
- Puis on trouve des eaux caractérisée par une abon-

- Other observations with slightly positive anomalies have a high zeaxanthine to divinyl-chlorophyll *a* ratio. Zeaxanthin characterizes the photosynthetic cyanobacteria, essentially the genera *Synechococcus* and *Prochlorococcus*, while divinyl-chlorophyll *a* is present only in *Prochlorococcus*. Thus, this category differs by the abundance of *Synechococcus*.
- Finally, the highest positive spectral anomalies (reflectances markedly above average) were found for observations with especially high fucoxanthin content (this carotenoid pigment characterizes diatoms).

### The PHYSAT method

Since the above data processing requires only information that can be provided by satellite (marine reflectance spectra and chlorophyll concentration), it can be applied to any satellite ocean color measurement. We thus fixed a chain of data analysis, named PHYSAT, that aims to identify which

dance relative de divinyl-chlorophylle *a* qui ne se trouve que dans le genre *prochlorococcus*.

- viennent ensuite des observations pour lesquelles le rapport zéaxanthine/divinyl-chlorophylle *a* est élevé. La zéaxanthine caractérise les cyanobactéries photosynthétiques, c'est-à-dire essentiellement les genres *synechococcus* et *prochlorococcus*, tandis que la divinyl-chlorophylle *a* n'est présente que chez *prochlorococcus*. Cette catégorie est donc marquée par l'abon-

*kind of phytoplankton group dominates in a given pixel, and to draw up global maps of the distribution of the four groups defined above (figure 3).*

***For the first time, a global view of phytoplankton groups in the ocean***

*The result shown in figure 3 is in good agreement with previ-*

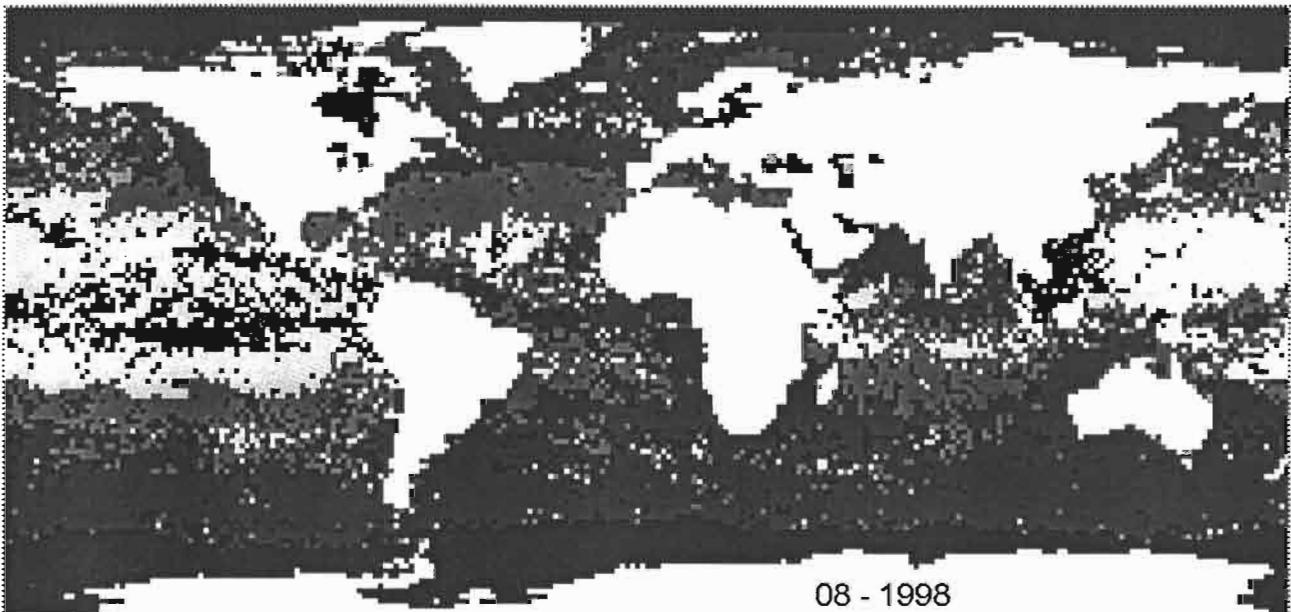


Figure 4 - Floraison exceptionnelle de diatomées (en rouge) dans le Pacifique équatorial pendant l'épisode d'alizés intenses qui a suivi l'El Niño de 1997-98 (voir figure 3 pour les codes de couleurs) : upwelling très actif avec remontée d'eau froide et riche en silice ? Ce phénomène, rare dans cette région, est une réponse à l'upwelling très actif à cette période qui a amené en surface des eaux riches en silice et, probablement, en fer.

*Exceptional bloom of diatoms (red) in the equatorial Pacific during the episode of strong trade winds that followed the 1997-98 El Niño (see figure 3 for the color codes). The phenomenon, rare in this region, was triggered by the intense upwelling that prevailed during this period and brought to the surface waters rich in silicon, and probably in iron.*

dance des *synechococcus*.

- enfin viennent les anomalies spectrales les plus positives (réflectances mesurées très au dessus de la moyenne) ; toutes les observations montraient alors un taux de fucoxanthine (le pigment caroténoïde qui caractérise les diatomées) particulièrement élevé.

**La méthode d'analyse PHYSAT**

Cette analyse ci-dessus ne nécessitant que des informations fournies par le satellite (le spectre de réflectance marine et la concentration en chlorophylle *a*), il est possible d'interpréter à la lumière de ces résultats toute mesure satellitaire de couleur de l'océan. Nous avons donc mis au point une méthode d'analyse, dénommée PHYSAT, qui identifie le type de groupe de phytoplancton dominant pour chaque pixel et permet d'élaborer des cartes globales de distribution de ces quatre groupes de phytoplancton (figure 3).

*ous knowledge of the distribution of phytoplankton groups. Such maps provide unequaled validation datasets for biogeochemical models of the global ocean. This new operational product will also offer a tool to observe the influence of climate on marine ecosystems. Thus, exceptionally abundant chlorophyll in the equatorial Pacific during the climate anomaly «La Niña» in August 1998 (figure 4) was caused by a diatom bloom according to PHYSAT, a result that is all the more striking since this is a region in which diatoms are generally scarce.*

*There exist phytoplankton groups with special optical properties, which were not encountered during the GeP&CO experiment. For example the coccolithophorids, with its calcareous plates, and *Phaeocystis*, with its mucus production, strongly impact the color of the ocean. Using new field data from areas that were not sampled by GeP&CO, we have been able to extend the PHYSAT protocol to these new groups. All these are pioneering results that open new*

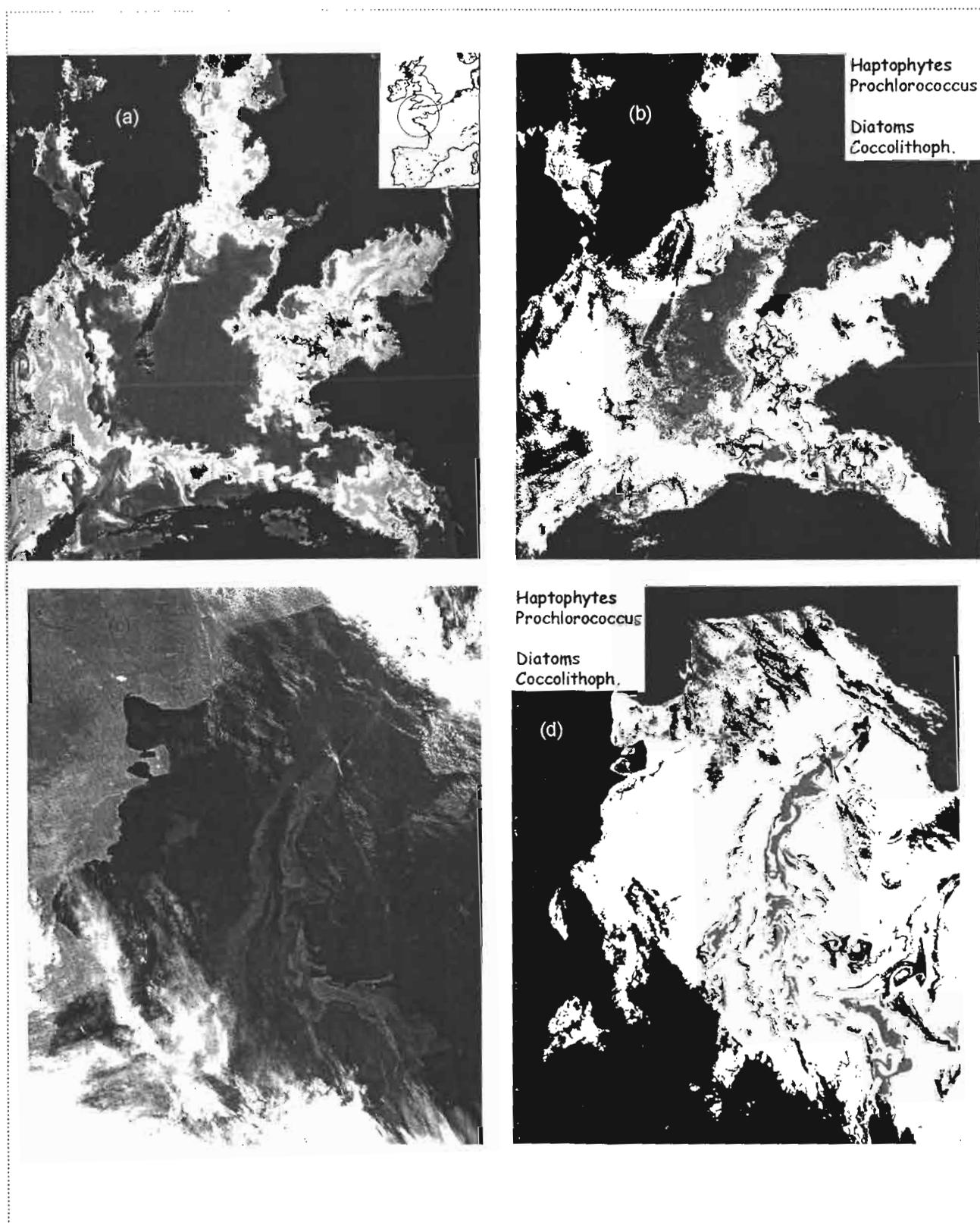


Figure 5 : Interprétation de la variabilité de la couleur de l'océan par PHYSAT. (a) et (b) : blooms de phytoplancton dans la Manche au printemps. (c) et (d) : image à haute définition du plateau continental de Patagonie. A gauche : concentration en chlorophylle, ou vraie couleur. A droite : groupes de phytoplancton diagnostiqués par PHYSAT.

Interpretation of mesoscale ocean color variability by PHYSAT. (a) and (b): blooms of phytoplankton in the English Channel in spring. (c) and (d): high definition image of the continental shelf off Patagonia. Left: chlorophyll or true color. Right: phytoplankton groups diagnosed by PHYSAT.

### **Une couverture globale de l'océan en variétés groupes de phytoplancton : un produit sans précédent**

Le résultat que montre la figure 3 est parfaitement en accord avec les connaissances existantes sur la distribution de ces groupes, et permet de fournir aux modèles biogéochimiques une validation sur l'océan global qui n'a pas d'équivalent. Ce nouveau produit va aussi permettre de mettre en évidence l'influence du climat sur les écosystèmes marins. Ainsi, une exceptionnelle abondance de chlorophylle dans le Pacifique équatorial pendant l'anomalie climatique La Niña en août 1998 (figure 4) est attribuée aux diatomées par PHYSAT, ce qui est d'autant plus remarquable que les diatomées sont très rarement abondantes dans cette région.

### **Pour l'avenir...**

Il existe des groupes de phytoplancton dotés de propriétés très particulières qu'il n'a pas été donné de rencontrer au cours de l'expérience GeP&CO. Ainsi, les coccolithophoridés, par leurs pièces calcaires, et les Phaeocystis, par le mucus qu'ils produisent et les bulles qui s'y forment, ont un très fort impact sur la couleur de l'océan. Grâce à de nouvelles observations de terrain dans des régions non observées par GeP&CO, il a été possible d'étendre le protocole PHYSAT à ces nouveaux groupes. L'ensemble de ces résultats est très novateur, et ouvre de nouvelles portes aux recherches océanographiques : il est désormais possible d'étudier la variabilité des groupes du phytoplancton, et leur réponse à la circulation océanique à mésoéchelle, en utilisant simplement des données satellite de couleur de l'eau (figure 5). Ceci ne doit pas faire oublier qu'il reste à comprendre les causes mécanismes optiques des leurs signatures spectrales particulières, car, comme mentionné plus haut, les seules différences dans la composition pigmentaire de ces groupes, bien qu'elles correspondent à ces signatures, ne les expliquent toutes pas.

*doors for oceanographic research: from now on, it is possible to study the variations of phytoplankton groups, and their forcing by mesoscale ocean circulation, using only satellite ocean color data (figure 5). However, the optical mechanisms that produce their specific spectral signatures are still not fully understood; as mentioned above, the differences in the pigment composition of these groups, although they correspond to these signatures, do not explain them.*



**Contact : Séverine Alvain**  
IPSL-LSCE, UMR CNRS/IRD/UVSQ  
Saclay , 91191 Gif surYvette  
**Yves Dandonneau**  
IPSL-LOCEAN, UMR CNRS/IRD/UPMC/MNH  
4 place jussieu 75252 Paris Cedex 05  
yves.dandonneau@lodyc.jussieu.fr

Alvain Séverine, Dandonneau Yves (2006)

Identifier des écosystèmes marins grâce aux données satellites de couleur de l'eau : l'approche PHYSAT = Diagnosis of marine ecosystems using sea colour detected from space : the PHYSAT approach

Lettre PIGB-PMRC - Changement Global, (19), 33-41

ISSN 1261-4246