

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر و تهيئة الساحل

Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME

DE MASTER EN SCIENCES DE LA MER

Sujet :

**La télédétection de la couleur de
l'océan. Etat de l'Art.**

Présenté par:

- Mlle BOUDJEMAL Nassima

Soutenu le 17/10 /2012 devant le jury suivant :

M ^{me}	MAOUEL D .	Maitre de conférences A	Présidente
Mr	GUERFI M.	Maitre de conférences A	Promoteur
Mr	LARID M.	Maitre de conférences A	Examineur
Mr	HAMDANE Y.	Maitre de conférences B	Examineur

Promotion : 2011-2012

REMERCIEMENT :

Avant tout, je remercie Allah, le Miséricordieux, l'Unique, le Puissant ... pour sa protection et son guide ;

Aussi, je tiens à dire un grand MERCI à toutes les personnes qui ont été à mes côtés pendant ces années et qui m'ont permis d'arriver au bout de ce travail ;

Je remercie vivement Mr GUERFI M, mon promoteur, pour l'aide scientifique et morale qu'il a su m'apporter tout au long de ce mémoire ;

Je voudrais exprimer mon entière reconnaissance à tous les membres du jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger mon travail, merci Mme MAOUEL D., Mr LARID M., et Mr HAMDANE Y.;

Un grand merci, à Mlle OUNADI F., Mme EDDALIA N., Mr et Mme BOUDJELAL. Mme BAMOUNE et M. BOUKRINA M., pour leurs efforts fournis tout au long du stage de master au laboratoire de Sidi-Fredj ;

Mes remerciements très chaleureux et particuliers à ma mère, et mon frère qui sont toujours là pour moi, pour m'aider, me soutenir, et m'encourager ;

Je remercie infiniment LATRECHE Ahmed et BOUGHELLA Meriem pour leur aide, leur soutien, et leur encouragements qui m'ont permis d'avancer et d'aller jusqu'au bout ;

Merci à toute ma famille et mes amis pour leur aide et leur soutien inconditionnel et indéfectible.

A ces remerciements, j'associe l'expression de ma reconnaissance à toutes les personnes qui ont participé bénévolement de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Nassima

Sommaire :

Introduction	01
---------------------------	-----------

Chapitre 1 : Généralités

1. La télédétection de la couleur de l'océan.....	02
2. Pourquoi étudier la couleur de l'océan.....	04
3. Couleur de l'océan.....	05
4. Mesures radiométriques.....	06
5. Effets et perturbations atmosphériques.....	08
6. Quelques algorithmes validés pour la couleur de l'eau.....	11
6.1. Estimation du phytoplancton.....	11
6.2. Estimation des matières en suspension.....	12
6.3. Estimation de la bathymétrie.....	12

Chapitre 2 : Moyens de mesure de la couleur de l'eau

1. Les défis majeurs de l'océanographie spatiale.....	13
1.1. La température de surface de l'océan.....	14
1.2. La salinité, paramètre-clé des échanges verticaux.....	15
1.3. Estimation du phytoplancton.....	16
1.4. La biogéochimie et la couleur de l'océan.....	17
1.5. L'observation et la prévision des glaces.....	19
1.6. Le suivi des anomalies des hauteurs de mer lors d'un épisode El Nino.....	19
1.7. Mesure des vents sur l'océan.....	20
1.8. Les zones côtières: compréhension et suivi.....	21
1.8.1. Turbidité océanique en zone côtière.....	22
1.8.2. L'imagerie radar sur les océans.....	23
2. Les capteurs passés, actuels et futurs de la couleur de l'océan.....	23
2.1. Coastal Zone Color Scanner (CZCS).....	24
2.2. Ocean Color and Temperature Sensor (OCTS).....	25
2.3. Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS).....	25
2.4. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS).....	26
2.5. Medium-Resolution Imaging Spectrometer (MERIS).....	27
2.6. OCM-2.....	28
2.7. Évaluation de la performance VIIRS / NPP.....	29
2.8. Sentinel Mission.....	29
2.9. S-GLI/ GCOM-C1 et GCOM-C2.....	30

2.10. VIIRS/JPSS1 et JPSS2.....	30
2.11. PACE et ACE.....	30
3. Les quatre types de capteurs satellitaires nécessaires pour répondre aux besoins d'observation.....	31
4. Quelles sont les exigences pour obtenir des données couleur de l'océan de haute qualité?.....	31
5. Comment faire progresser la télédétection couleur de l'océan vers l'avenir ?.....	32
5.1. Radiomètre imageur hyperspectral Mondiale.....	33
5.2. Des imageurs Multi-spectrales à Haute résolution spatiale.....	33
5.3. Améliorer les Corrections atmosphériques, Algorithmes, et les produits couleur de l'océan.....	34
5.3.1. Corrections atmosphériques et développement d'algorithmes.....	34
5.3.2. Validation.....	34
5.3.3 Normes(Standards) des données du terrain et protocoles d'échantillonnage normalisés (standardisés).....	34
5.3.3.1 Les mesures atmosphériques.....	35
5.3.3.2 Mesures océaniques.....	35
5.4. Extension de produits satellitaires couleur de l'océan à la dimension verticale.....	35
Conclusion.....	36

Bibliographie

Liste des figures :

Figure 1: La décomposition de la lumière blanche.....	02
Figure 2: les différents Chemins de lumière atteignant le capteur à distance.....	03
Figure 3: Quelques exemples des spectres de réflectance en fonction de longueurs d'onde provenant des différents types d'eaux.....	07
Figure 4: Les paramètres angulaires dans une mesure satellitaire.....	08
Figure 5: Représentation schématique des eaux du cas1 et cas2.....	10
Figure 6: Carte mondiale de concentration en chlorophylle (Instrument Meris) (Crédits Esa)	13
Figure 7: Température de surface du nord atlantique (24 février 2009).....	14
Figure 8: Carte de température de surface sur la façade atlantique (28 juin 2010).....	14
Figure 9: Température de l'océan en surface et sur une coupe verticale des 100 premiers mètres, le long de la trajectoire d'un cyclone dans le golfe du Mexique.....	15
Figure 10: Salinité de l'océan atlantique à l'embouchure du fleuve Amazone en Septembre 2009.....	15
Figure 11: Salinité de surface dans l'atlantique nord (24 février 2009).....	16
Figure 12: Carte satellite du capteur SeaWIFS qui montre l'amplitude et la distribution globale de la production primaire océanique et terrestre (September 1997 - August 1998).....	17
Figure 13: Floraison de phytoplancton au large de l'estuaire de la Gironde. Image acquise par le capteur MERIS.....	17
Figure 14: Surface couverte par la banquise arctique en août 2009.....	19
Figure 15: El Nino et les anomalies de hauteur de mer dans l'océan Pacifique en novembre 2009 (en cm).....	20
Figure 16: Vents de surface océaniques dans l'Atlantique (1 août 1999) mesurés par le diffusiomètre SeaWinds à bord du satellite QuickScat.....	20
Figure 17: Floraison d'algues unicellulaires à test calcaires (« coccolithophorides ») en mer de Barents (image ENVISAT-MERIS / ESA).....	21
Figure 18: Juxtaposition des terres émergées et des eaux côtières riches en sédiments (région de Cardiff; image ALOS-AVNIR2 / ESA).....	21
Figure 19: Panache turbide du delta du Danube en mer Noire (Image ENVISAT-MERIS / ESA).....	22
Figure 20: La charge sédimentaire des eaux côtières dans la Baie de San Francisco mesurée à partir des données du radiomètre ASTER-TERRA.....	22
Figure 21: Image du radar à ouverture synthétique (SAR) du satellite européen ERS-2 acquise en 1999, couvrant le détroit de Gibraltar.....	23
Figure 22 : La séquence de lancement du passé, actuel et prévu des capteurs couleur de l'océan en orbite polaire.....	24
Figure 23 : Cartes globales de concentration moyenne en chlorophylle-a obtenues à partir des images CZCS entre 1979 et 1986(image du haut) et des images SeaWIFS entre 1997 et 2000(image du bas).....	26
Figure 24 : Évolution d'une prolifération de cyanobactérie en surface dans le lac des Bois observée par le capteur de couleur de l'eau MERIS, septembre 2009.....	28

Introduction

L'océan couvre environ 71% de la surface terrestre et joue un rôle essentiel dans la production d'oxygène et la régulation du système climatique. La surveillance de son état et sa productivité est indispensable pour comprendre et gérer les ressources biologiques voire les changements climatiques.

La vaste superficie occupée par l'océan et la difficulté de l'explorer, ainsi que l'incapacité des navires à recueillir des observations rapides et globales du phytoplancton, premier maillon de la chaîne alimentaire, a conduit l'homme à une science très efficace par rapport aux méthodes utilisées auparavant : La télédétection par satellite de la couleur des océans est actuellement la seule manière d'observer et de surveiller l'état biologique de la surface de l'océan mondial à des échelles de temps assez importantes.

Ce n'est que depuis le lancement du satellite couleur de l'océan (Coastal Zone Color Scanner [CZCS]) en 1978 qu'on a pu obtenir une vue globale de la biomasse du phytoplancton dans l'océan. Ces observations ont conduit à des calculs améliorés de production primaire et une meilleure compréhension des processus qui affectent le changement et la productivité de la biomasse phytoplanctonique dans les bassins océaniques de façon continue (**Antoine, 1998**).

La mesure de la couleur de l'océan révèle une richesse des caractéristiques écologiques importantes, notamment: la concentration en chlorophylle (un indicateur de la biomasse des plantes marines ou phytoplancton), le taux de photosynthèse du phytoplancton, le transport des sédiments, la dispersion des polluants, et les réponses des boîtes océaniques aux changements climatiques à long terme (**IOCCG, 2008**). De nombreux scientifiques et des utilisateurs opérationnels, tels que les gestionnaires des ressources côtières et de la pêche, comptent sur ces mesures pour la recherche, le suivi et la gestion.

Les capteurs couleur de l'océan, ont contribué à démontrer l'intérêt des techniques spatiales pour l'océanographie. On ne peut maintenant que constater le très vaste champ d'applications que ces techniques ont ouvert, en permettant l'accès aux mesures de nombreux « paramètres géophysiques » (vent, température de l'océan, houles, marées, paramètres atmosphériques, bilans radiatifs, concentration en chlorophylle). La fréquence élevée et le caractère synoptique des observations spatiales en font un élément indispensable aujourd'hui pour une compréhension globale du fonctionnement de l'océan et plus généralement de la planète.

Dans le premier chapitre, nous verrons en premier lieu quelques concepts de base concernant la télédétection de la couleur de l'océan, pourquoi étudier la couleur de l'océan, les mesures radiométriques, les effets et les perturbations atmosphériques, et quelques algorithmes validés pour la couleur de l'océan.

Dans le deuxième chapitre nous allons parler des défis majeurs de l'océanographie spatiale, quelques capteurs couleur de l'océan passés, actuels et futurs, comment obtenir des données de haute qualité, et comment faire progresser la télédétection couleur de l'océan vers l'avenir.

Généralités

1. La télédétection de la couleur de l'océan:

La télédétection de la couleur de l'océan est une activité qui permet l'analyse de la composition de la couche supérieure de l'eau de mer à partir du signal optique réémis vers l'espace par celle-ci dans différentes longueurs d'onde (**Boussarsar, 2003**).

La couleur d'un objet dépend des couleurs (rayons) qu'il absorbe et qu'il renvoie, par exemple, la tomate nous apparaît rouge car elle absorbe les rayons bleus et verts de la lumière blanche qu'elle reçoit du soleil et renvoie les rayons rouges vers nos yeux. Par contre l'océan absorbe le rouge et renvoie le bleu...

La lumière blanche qu'on voit est en réalité composée de plusieurs couleurs, il y'en a celles qu'on peut apercevoir à l'œil nu lors de sa décomposition (c'est ce qu'on appelle le domaine du visible) et d'autres qui sont invisibles (rayons infrarouges et ultraviolets) ⁽¹⁾.

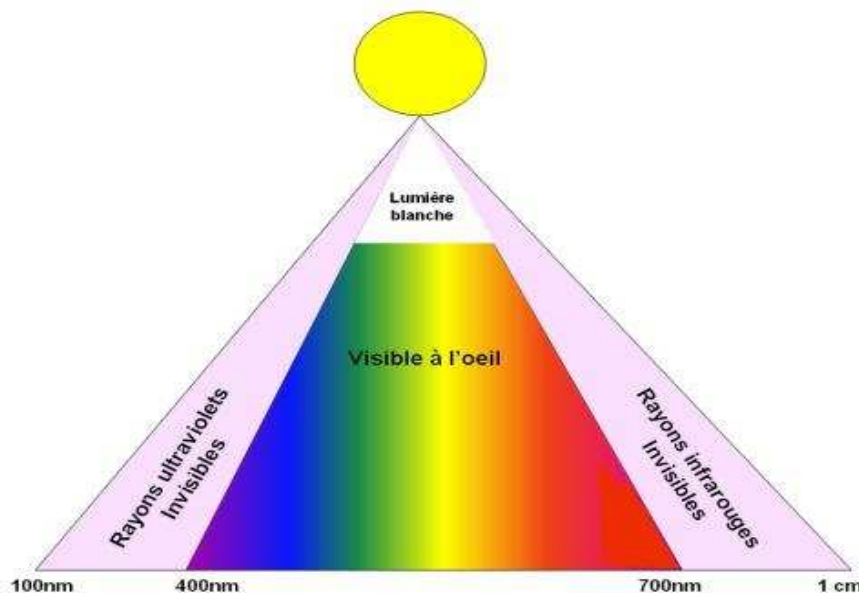


Figure 1 : La décomposition de la lumière blanche

Source : <http://aqt.phido.ca/index.php?p=140&l=fr>

Un appareil plus sensible que l'œil humain, est capable de mesurer séparément et plus précisément les multiples couleurs (rayonnements) visibles et même celles que l'on ne voit pas à l'œil nu: c'est ce qu'on appelle un capteur de télédétection optique⁽²⁾.

(1), (2) : <http://aqt.phido.ca/index.php?p=148&l=fr>

Un système passif pour la télédétection de la couleur des océans rend le capteur, dans un champ de vision étroit, capable de contrôler le flux radiométrique à plusieurs longueurs d'onde sélectionnées dans les domaines du visible et proche-infrarouge du spectre électromagnétique. Le capteur monté sur une plate-forme (satellite ou aéronef) est destiné à un point situé sur la surface de la terre. Des dispositifs de balayage sur le capteur, et le mouvement de la plate-forme se combinent pour acquérir des données à partir de différents points de la terre. Les capteurs fonctionnent pendant la journée, et la source ultime de la lumière atteignant le capteur est le soleil. Cependant, les photons du soleil peuvent suivre des chemins différents avant d'atteindre le détecteur à distance (fig.2) :

- * la lumière atteignant le capteur après diffusion des photons par l'atmosphère;
 - * la lumière atteignant le capteur après réflexion spéculaire de la lumière solaire directe sur la surface de la mer;
 - * la lumière ascendante provenant de la surface de la mer, après rétrodiffusion dans l'eau.
- Noter que la remontée de lumière à partir de la surface de la mer serait atténuée lors de son trajet entre la surface de la mer et le capteur, en raison de l'absorption et de la diffusion par l'intermédiaire atmosphère.

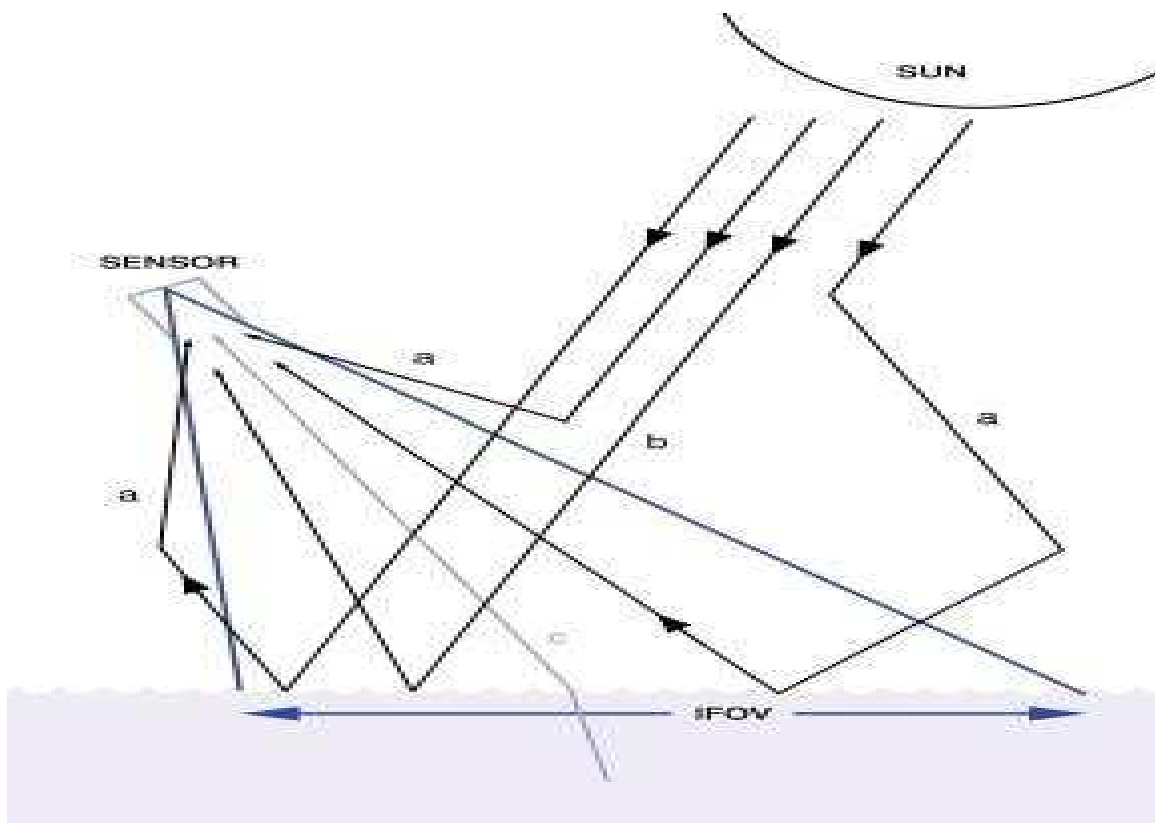


Figure 2 : les différents Chemins de lumière atteignant le capteur à distance. (Sathyendranath, 1986)

Avec :

(a) La lumière diffusée par l'atmosphère. La diffusion multiple est possible. Il est également possible qu'une partie de la lumière qui atteint le capteur sera réfléchi à la surface de la mer avant ou après la diffusion atmosphérique ; (b) La réflexion spéculaire directe du soleil à la surface de la mer ; (c) la lumière quittant la surface de l'eau et se déplaçant dans la direction du capteur, c'est la composante qui contient l'information utile sur le plan d'eau, sachant que ce flux de lumière quittant la surface de l'eau de mer est modifié par l'atmosphère intermédiaire. La géométrie du capteur, son altitude et son angle de vision déterminent le champ de vision instantané (IFOV) ou la taille de pixel du capteur sur la surface du plan d'eau.

C'est seulement la lumière remontée de la surface de la mer qui porte toutes les informations utiles sur le plan d'eau. Les apports atmosphériques et la réflexion spéculaire à la surface de la mer constituent un bruit, et doivent être corrigés. Souvent, les capteurs satellites pour la couleur des océans ont la capacité d'orienter le détecteur pour éviter toute réflexion spéculaire du soleil, mais il n'y a pas de moyens d'empêcher une partie de flux diffusé par l'atmosphère d'atteindre le capteur. En fait, plus de 80% de la lumière atteignant le détecteur peut avoir une origine atmosphérique (**Morel, 1980**), et des petites erreurs dans l'estimation de la contribution atmosphérique peuvent entraîner des biais importants dans l'estimation des composantes de l'eau. En outre, les techniques concernant la correction atmosphérique constituent un élément très important pour la télédétection couleur de l'océan (**Gordon et Morel, 1983; Gordon, 1993; Stürm, 1993; Gordon et Wang, 1994; Gordon, 1997**).

2. Pourquoi étudier la couleur de l'océan ?:

De nos jours, Les modifications climatiques posent un véritable problème en affectant la biologie et la biogéochimie océanique. Des augmentations de température de 0.8°C (**IPCC-2007**) sont notées à la surface des océans depuis les années 1900 occasionnées par une augmentation du CO₂ atmosphérique. Les modifications du climat ont des répercussions sur la productivité marine et les écosystèmes océaniques (phytoplancton, zooplancton, poisson...etc.)

A l'heure du changement climatique, la séquestration du CO₂, est devenu un enjeu important pour l'avenir de la planète et un sujet d'étude primordial pour les océanographes. Il existe un continuum d'échelles spatio-temporelles entre l'atmosphère, l'océan et les micro-organismes (phytoplancton) présents à la surface des océans (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

Le phytoplancton est à la base de la chaîne trophique dans les océans. Ce producteur primaire, représentant moins de 1% de la biomasse photosynthétique terrestre, fixe la moitié du CO₂ atmosphérique (**Falkowski et al., 2000 in Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

Les données de la couleur de l'océan observées depuis l'espace permettent de suivre spatialement et temporellement l'évolution du phytoplancton, dont le pigment principal est la chlorophylle-a.

3. Couleur de l'océan :

Le terme « couleur de l'océan » est déterminé par l'interaction de la lumière incidente avec les substances et les particules présentes dans l'eau. Les utilisateurs sont principalement intéressés par la biomasse phytoplanctonique et la concentration de sédiment. Les mesures depuis les satellites fournissent des valeurs de réflectance, obtenues après des corrections avancées (atmosphère : vapeur d'eau, aérosols, ozone ; angles de visée et d'éclairement ; surface,..). Elles permettent de restituer, à partir d'algorithmes bio-optiques expérimentaux, qu'il est nécessaire de valider, des paramètres évolués à la surface de l'océan (ex : chlorophylle-a, coefficient d'atténuation,..) ou dans l'atmosphère (ex : épaisseur optique,..).

La lumière provenant du soleil et pénétrant la surface de l'eau, peut être absorbée ou dispersée par les molécules d'eau ou par différents matériaux dissous et/ou en suspension présents dans l'eau de mer. Dans les eaux peu profondes et claires, une partie importante de la lumière du soleil peut atteindre le fond, et être réfléchi par celui-ci. Certains photons diffusés et réfléchis se dirigent vers le capteur de télédétection. Ce capteur mesure l'intensité des rayonnements par la surface des océans (water-leaving radiance) dans différentes gammes de longueurs d'onde (bandes) pour en tirer des informations quantitatives sur la nature des substances présentes dans l'eau et leurs concentrations. La radiance (réflectance) de l'eau mesurée tient compte des interactions avec la colonne d'eau et les particules présentes. De toute évidence, cela doit être basé sur une bonne compréhension des propriétés et des procédés optiques du milieu.

Les analyses des propriétés optiques montrent que l'eau de mer est constituée de trois éléments principaux, en plus de l'eau pure: le phytoplancton, les matières inorganiques en suspension et les substances jaunes ou matières organiques colorées dissoutes (CDOM).

***le phytoplancton :** Ce sont des plantes microscopiques, unicellulaires, autotrophes, qui forment la base de la chaîne alimentaire aquatique, et qui constituent un élément important dans le cycle global du carbone. Des milliers d'espèces de phytoplancton, dont le pigment principal est la chlorophylle-a, sont connus dans le milieu marin. Ainsi, la couleur verdâtre des eaux riches en phytoplancton est le fait de ces pigments chlorophylliens qui absorbent le bleu et réfléchissent le vert (**Becu, 2004**).

La quantification de la concentration en chlorophylle-a qui est souvent considérée comme un indice de la biomasse phytoplanctonique dans les eaux de surface est maintenant réalisée à des échelles globales grâce aux satellites d'observation de la Terre; cela permet une étude détaillée des distributions à grande échelle et des variations temporelles aux échelles saisonnières à interannuelles (**Antoine, 2011**).

***les matières en suspension :** ce sont toutes les matières particulaires inorganiques non incluses dans la composante du phytoplancton. Dans les eaux peu profondes, côtières et intérieures, l'action des vagues et des courants peut apporter des sédiments en suspension, ce qui entraîne une modification significative de la couleur des océans. Il est important de reconnaître que le terme "matières en suspension" ne s'applique pas à un seul type de matériau, mais à toute une famille de matériaux avec leurs propres caractéristiques. Par

exemple, les sables blancs d'une plage de corail, lorsqu'ils sont mis en suspension, auront une influence très différente sur la couleur de l'eau, par rapport à l'argile rouge en suspension dans un débit de fleuve (IOCCG, 2000).

***les substances jaunes :** c'est un groupe de substances organiques dissoutes. Elles peuvent avoir une origine locale, par exemple, la dégradation des cellules de phytoplancton et d'autres particules organiques, ou être une advection d'une localité à une source éloignée, par exemple, les cours d'eau qui traversent fortement des régions boisées et des sols plus riches en matière organique accumulent une charge de substances jaunes le long de leur chemin d'écoulement (IOCCG, 2000).

***effets du fond :** en plus de ces trois types de substances présentes dans la colonne d'eau, le fond d'un plan d'eau peut influencer la couleur de l'eau, à condition que l'eau soit suffisamment profonde et claire. De plus, l'influence du fond sur la couleur de l'eau peut varier avec la profondeur du plan d'eau, la clarté de l'eau, la nature des substances présentes dans l'eau, et le type du fond. Le fond peut être rocheux ou sablonneux, et peut ou peut ne pas être couvert, partiellement ou totalement, par une variété d'organismes benthiques (par exemple, les algues, les mollusques). Tous ces facteurs vont influencer la manière dont les effets du fond se manifestent sur la couleur de l'eau, comme on le voit par un capteur de télédétection optique (IOCCG, 2000).

4. Mesures radiométriques

La dynamique de l'écosystème marin est dépendante de l'afflux constant d'énergie en provenance du soleil. L'activité photosynthétique du phytoplancton capte une partie du spectre solaire dans le visible à l'aide de pigments (principalement la chlorophylle) contenus au sein des cellules. Puisque ces pigments absorbent la lumière provenant du soleil, le phytoplancton exerce une influence profonde sur le champ lumineux sous-marin. L'intensité de ce flux peut être mesurée à différentes longueurs d'ondes par des radiomètres déployés dans la colonne d'eau ou embarqués sur des satellites. L'ensemble de ces mesures constitue la radiométrie du spectre visible de l'océan, communément appelée « couleur de l'océan » (IOCCG, 2008).

Luminance

Pour une longueur d'onde donnée λ (exprimée en nanomètres), le flux d'énergie lumineuse dP émise (ou reçue) par un élément de surface dS dans l'angle solide $d\Omega$ (exprimé en stéradians) et dans la direction (θ, ϕ) s'appelle la luminance. Notée $L(\theta, \phi, \lambda)$, elle s'exprime en $W.m^{-2}.nm^{-1}.sr^{-1}$ (Diouf, 2012). La luminance est donc l'intensité du rayonnement électromagnétique émise dans une direction donnée et c'est elle qui sera mesurée par le capteur (Lei, 2011).

Eclairement

L'éclairement spectral définit la puissance totale émise par une surface à une longueur d'onde donnée. Il représente l'intégrale des luminances émises par la surface dans toutes les directions, il s'exprime en $W.m^{-2}.nm^{-1}$ (Diouf, 2012).

Réflectance

La couleur intrinsèque de l'océan est définie par les variations spectrales de la réflectance R à la surface de la mer jusqu'à une certaine profondeur notée z .

On définit la réflectance comme la partie de la lumière solaire renvoyée par l'océan après absorption-diffusion dans le milieu marin et qui constitue le rapport de l'énergie émise par la surface à l'énergie incidente :

$$R(\lambda, z) = E_u(\lambda, z) / E_d(\lambda, z)$$

Où $E_u(\lambda, z)$ est l'éclairement énergétique (flux par unité de surface) ascendant à une longueur d'onde λ et une profondeur Z , et $E_d(\lambda, z)$ est l'éclairement descendant à la même longueur d'onde et la même profondeur.

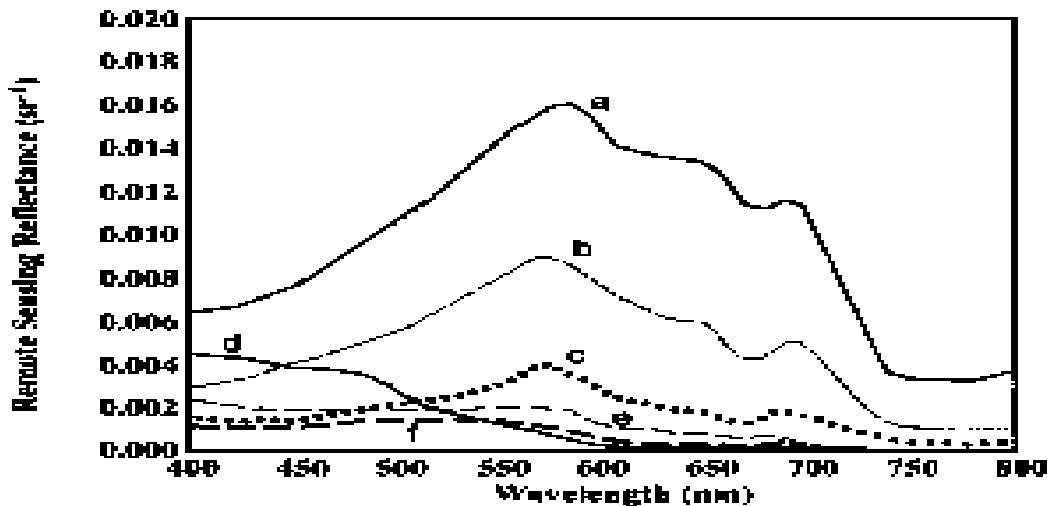


Figure 3 : Quelques exemples des spectres de réflectance en fonction de longueurs d'onde provenant des différents types d'eaux.

(a) : eau très chargée en sédiments et en matières jaunes, (b) taux de sédiment élevé et des concentrations en matières jaunes, (c) taux de sédiments modérée avec un peu de phytoplancton, (d) eau claire, (e) une eau avec une concentration modérée en sédiments et en chlorophylle, (f) eau avec une concentration modérée en chlorophylle. a, b, c et e sont des eaux du cas2, d et f sont des eaux de cas1. Données fournies par **Robert Duchesne**.

La réflectance de télédétection est fortement directionnelle car la surface de la mer n'est pas Lambertienne, donc elle est soumise aux effets des angles d'observation et d'éclairement.

Le rayonnement incident provenant du Soleil affecte la surface de la mer avec un angle θ_s , que l'on appelle angle zénithal d'éclairement ou angle zénithal solaire. Une partie de ce rayonnement remonte vers le capteur par réflexion ou émission avec un angle θ_v , que l'on

appelle angle zénithal de visée ou angle zénithal du capteur. L'angle relatif entre la direction du soleil et la direction du satellite s'appelle l'angle azimuthal φ . l'angle que forment les directions de la lumière incidente et la direction d'observation du satellite s'appelle l'angle de diffusion Θ .

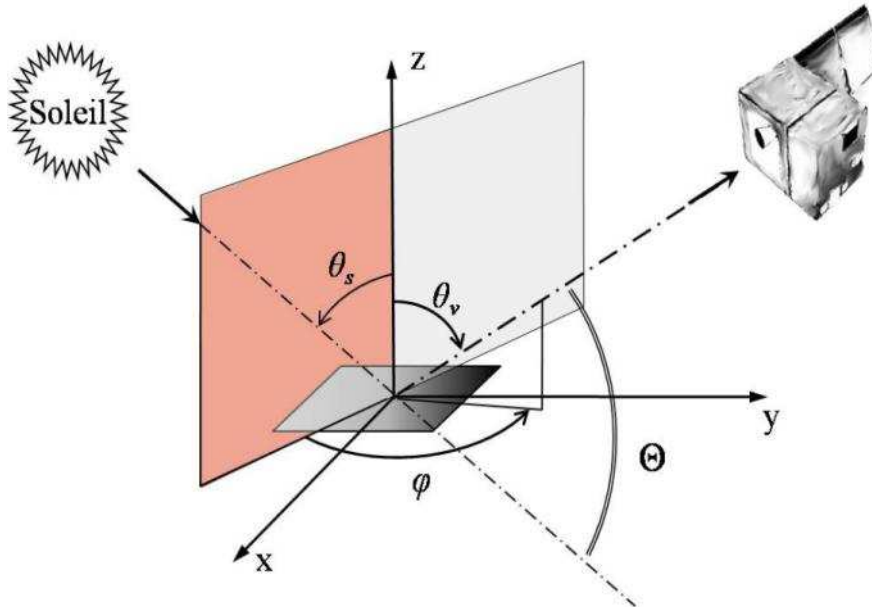


Figure 4 : Les paramètres angulaires dans une mesure satellitaire (Harmel, 2009).

Le transfert radiatif

Quand la lumière du Soleil et du ciel pénètre la surface de la mer, elle est absorbée et diffusée dans la colonne d'eau. Le processus est décrit par la loi de transfert radiatif. Le comportement spectral de lumière ascendante à la surface est lié aux propriétés optiques de l'eau et aux paramètres environnementaux qui décrivent l'état de la mer et du ciel.

La théorie du transfert radiatif relie les luminances émises par un système éclairé à ses propriétés optiques inhérentes et permet de calculer les contributions physiques du couple océan-atmosphère à l'énergie lumineuse au cours du trajet. Ceci peut être défini par la relation suivante :

$$L_{toa} = L_{atm} + t_u * L_w + T * L_g$$

Où L_{toa} est le signal observé au sommet de l'atmosphère, L_{atm} est la luminance provenant exclusivement du milieu atmosphérique, L_w est la luminance sortant de la mer, t_u est la part du signal transmise de l'océan au sommet de l'atmosphère, L_g est la réflexion spéculaire du soleil sur l'océan (glitter en anglais), et T représente la transmission directe.

5. Effets et perturbations atmosphériques :

Dans l'atmosphère, deux grands types de perturbations affectent significativement le rayonnement mesuré par le capteur: l'absorption et la diffusion causées par les molécules d'air (oxygène, eau...etc.), et les aérosols (les particules en suspension, y compris, la poussière, le pollen,...).

L'absorption consiste en une transformation des rayonnements incidents en énergie, surtout thermique, par les particules contenues dans l'atmosphère.

La diffusion se traduit par la dispersion d'une partie de la radiation solaire dans différentes directions. Ses trois principales formes sont:

- La diffusion de Rayleigh (diamètre des particules $\ll \lambda$). Cette diffusion est surtout affectée par des molécules gazeuses.
- La diffusion de Mie (diamètre des particules $\sim \lambda$). Elle est surtout affectée par les aérosols et les gouttes d'eau, elle domine sous des ciels ennuagés. Elle est particulièrement importante près des sites industriels
- Et enfin la diffusion non sélective.

Correction atmosphérique :

Une mesure satellite au-dessus des océans ouverts dans le spectre visible est constituée à plus de 80% d'un signal d'origine atmosphérique (**Hovis & Leung, 1977, in Harmel 2009**) ; les 20% restants possèdent alors une information sur la couche marine. Afin d'obtenir une mesure radiométrique d'origine strictement marine, un traitement algorithmique est appliqué aux mesures satellite, dénommé « correction atmosphérique ». Cette opération consiste à soustraire la composante atmosphérique et celle de l'interface eau-air du signal mesuré au sommet de l'atmosphère, afin d'estimer la contribution du signal marin. En raison de la faible intensité du signal marin, la correction atmosphérique est une opération délicate et ne peut se faire que si la résolution radiométrique du capteur est suffisante. Malgré l'excellente résolution radiométrique des capteurs « couleur de l'océan » (**IOCCG, 1997**), l'incertitude sur la luminance marine peut atteindre $\pm 35\%$ à cause du bruit du capteur dans l'infrarouge (**Hu et al., 2001**).

Par ailleurs, le signal atmosphérique est fortement variable du fait de la présence d'aérosols. La signature optique des aérosols est par conséquent l'inconnue principale, que la correction atmosphérique a pour but d'estimer. Les aérosols ont une faible durée de vie dans l'atmosphère (inférieure à 15 jours) ; leur répartition spatiale est donc fortement variable. Les aérosols existent à l'état naturel (poussières désertiques, aérosols marins, etc.). Cependant, l'industrialisation et les activités humaines relâchent des doses excessives de particules dans l'atmosphère. Or, les aérosols jouent un rôle majeur dans le transfert de l'énergie radiative dans l'atmosphère (induisant un forçage climatique positif, i.e. réchauffement), ainsi que dans la conversion de la vapeur d'eau en gouttelettes nuageuses et en pluies (induisant un forçage climatique négatif). De ce fait, les aérosols ont un effet complexe sur le bilan radiatif terrestre et les aérosols restent la plus large incertitude présente dans l'estimation du forçage climatique (**IPCC, 2007**), principalement à cause du manque de mesures fiables à l'échelle planétaire.

Les eaux du cas1 et cas2 :

La réflectance marine r_w dépend directement des constituants de l'eau de mer, pour cela une classification des eaux a été établie afin de les distinguer selon leurs propriétés optiques.

Un schéma de classification selon lequel les eaux océaniques sont partitionnés en Cas 1 Cas 2 a été introduit par **Morel et Prieur (1977)**, et plus tard raffiné par **Gordon et Morel (1983)** (aussi **Sathyendranath et Morel, 1983**).

Par définition, les eaux du cas1 sont les eaux dans lesquelles le phytoplancton est le principal agent responsable des variations des propriétés optiques de l'eau. D'autre part, les eaux du cas2 sont influencées non seulement par le phytoplancton et les particules liées, mais aussi par d'autres substances, qui varient indépendamment du phytoplancton, les particules en suspension, notamment les particules inorganiques et les substances jaunes.

En général, les eaux du Cas 1 sont les eaux océaniques (du large), tandis que les eaux du cas2 sont les eaux côtières.

Ce système de classification n'exclut pas la possibilité que d'autres substances en plus du phytoplancton peuvent contribuer aux propriétés optiques des eaux du cas1. En fait, il est reconnu (**Sathyendranath et Morel, 1983**) que certain nombre de substances, y compris les débris biologiques produits par le pâturage et la décomposition naturelle des organismes phytoplanctoniques ainsi que la matière organique dissoute (substances jaunes) peuvent contribuer aux propriétés optiques des eaux du cas1, en modifiant leurs caractéristiques d'absorption. On a aussi démontré que les petits organismes qui coexistent avec le phytoplancton tels que les flagellés, des bactéries hétérotrophes et des virus, jouent un rôle important dans la détermination des propriétés optiques des eaux du cas1 (**Morel et Ahn, 1991 ; Stramski et Kiefer, 1991; Ulloa et al, 1992**). Ainsi, l'idée n'est pas que le phytoplancton est le seul agent responsable de la couleur des eaux du cas1, il est simplement stipulé que la contribution d'autres substances, si elle est présente, est relativement faible dans les eaux du cas1. D'autre part, dans les eaux du cas2, les substances jaunes (ou d'autres types de substances) peuvent apporter une contribution significative aux propriétés optiques. En outre, ces contributions ne sont pas liées à la concentration de phytoplancton, au contraire, elles doivent être traitées en tant que variables indépendantes.



Figure 5 : Représentation schématique des eaux du cas1 et cas2,

(Priour et Sathyendranath (1981)).

D'après ce schéma on distingue qu'il y'a plusieurs cas qui peuvent être identifiés :

- ❖ Cas où une seule composante (P, S ou Y) domine. Ces cas sont représentés par l'un des trois petits triangles dans la figure.
- ❖ Cas où les contributions de deux des substances dominent, tandis que la troisième composante joue un rôle mineur. Ces cas sont représentés par les trois trapèzes qui s'étendent le long des trois axes.
- ❖ Cas où toutes les composantes (P, S et Y) jouent un rôle important. Ce cas est représenté par la centrale, triangle intérieur dans la Figure. En principe, ce serait le type le plus complexe, d'un point de vue optique

Donc les eaux du Cas1 le cas où le phytoplancton est dominant, et les eaux du Cas2 représentent tous les autres cas possibles. D'une autre façon les eaux du Cas1 englobent seulement un petit sous-ensemble de tous les cas possibles, tandis que les eaux du Cas2 est une expression fourre-tout pour tout ce qui n'est pas cas 1.

La lumière qui atteint la surface de la mer est déjà largement modifiée depuis son arrivée au sommet de l'atmosphère. Les gaz, l'absorption des aérosols ainsi que la diffusion entraînent des changements dans l'intensité, le spectre et la direction de celle-ci. La redistribution de la lumière est influencée par la réfraction et la réflexion à la surface de la mer.

Une fraction de la lumière qui atteint la surface de la mer et pénètre dans l'eau de mer sera réfléchi. Cette lumière ascendante est de nouveau affectée par l'atmosphère et ses constituants avant d'atteindre le vaisseau spatial en orbite de la terre (**Zaneveld et al., 2005**). Le transfert radiatif doit quantifier tous ces processus qui se réalisent avant que le satellite reçoit le signal optique.

6. Quelques algorithmes validés pour la couleur de l'eau :

En règle générale, les algorithmes d'interprétation des données satellitaires sont construits en calibrant des changements dans la couleur des océans contre les variations de la concentration de chlorophylle-a ou d'autres constituants dans les couches superficielles de l'océan. Ces algorithmes simples ont connu un succès remarquable dans la récupération de la chlorophylle à partir de données satellitaires. Toutefois, nous reconnaissons également que ces algorithmes ont une plus grande probabilité de défaillance dans des eaux où la matière particulaire (autre que le composant phytoplancton) et des substances jaunes ou des effets inférieurs exercent une influence importante. En outre, il serait utile de savoir comment, quand et où ces algorithmes peuvent échouer, et comment nous pouvons améliorer la performance des algorithmes de couleur de l'océan, et d'étendre leur domaine d'applicabilité.

6.1. Estimation du phytoplancton :

Le phytoplancton est l'ensemble des espèces de plancton autotrophes vis-à-vis du carbone par la photosynthèse. C'est le 1er maillon de la chaîne alimentaire de l'océan, il est à

la base de la production primaire. Comme il contient de la Chlorophylle, avec des méthodes d'inversion, on peut estimer la concentration en chlorophylle par l'observation de la couleur de l'océan afin établir la carte de biomasse phytoplanctonique.

Comme la variation de la couleur de l'océan dans les bandes bleue et verte est influée par la variation du phytoplancton, de nombreux algorithmes empiriques ou semi-empiriques de la couleur de l'océan qui ont été développés sont souvent basés sur le rapport des bandes bleu-verte (Clark, 1981; Gordon *et al.*, 1983; O'Reilly *et al.*, 1998; O'Reilly *et al.*, 2000; Loisel *et al.*, 2002; Morel et Antoine, 2007 *in* Lei, 2011).

6.2. Estimation des matières en suspension :

Dans les zones côtières, les panaches turbides sont nettement visibles sur les images satellitaires, par la forte concentration des matières en suspension.

L'estimation de la concentration en matières en suspension ou la turbidité permet de donner un indicateur sur la qualité de l'eau, les algorithmes de leurs estimation sont souvent basés sur la relation entre les mesures de concentration in situ et la valeur de réflectance dans les bandes verte, rouge ou proche infrarouge (Tassan, 1994; Doxaran *et al.*, 2002; Doxaran *et al.*, 2003 *in* Lei, 2011) ou même avec une seule bande (Froidefond *et al.*, 1999; Nechad *et al.*, 2010 *in* Lei, 2011).

6.3. Estimation de la bathymétrie :

Comme l'eau absorbe plus ou moins la lumière en fonction de la profondeur, un même type de fond aura des couleurs différentes en fonction de la profondeur. On peut donc utiliser cette propriété pour estimer la profondeur à condition que celle-ci soit limitée (<40 m) (pour avoir une influence sur la réflectance de surface) et que l'eau soit assez claire pour permettre à la lumière réfléchi par le fond de remonter à la surface (Minghelli-Roman *et al.*, 2007 *in* Lei, 2011).

La modélisation qui décrit la réflectance de surface en fonction de la profondeur, de l'atténuation diffuse, de la réflectance de l'eau et du fond, est donnée par (Maritorena *et al.*, 1994 *in* Lei, 2011).

$$\rho_s(\lambda) = [\rho_f(\lambda) - \rho_e(\lambda)] e^{-2k(\lambda)z} + \rho_e(\lambda)$$

Où ρ_s est la réflectance de surface, ρ_f est la réflectance du fond, ρ_e est la réflectance de l'eau profonde, k est l'atténuation diffuse de la colonne d'eau et z est la profondeur.

On utilise cette équation pour estimer la profondeur à partir de ρ_s dans deux longueurs d'onde différentes (Philpot, 1989 *in* Lei, 2011).

*Moyens de mesure
de la couleur de
l'eau*

1. Les défis majeurs de l'océanographie spatiale :

Le simple fait d'utiliser couramment de nos jours l'expression « océanographie spatiale » montre à quel point les observations satellitaires sont devenues une pièce maîtresse du dispositif d'étude de l'océan (observation, compréhension, prédiction).

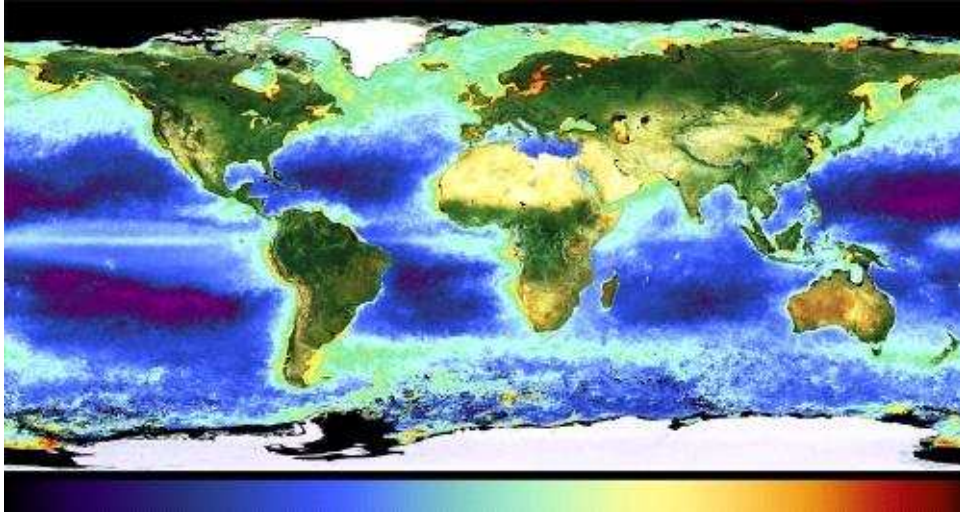


Figure 6 : Carte mondiale de concentration en chlorophylle (Instrument Meris) (Crédits Esa). Source http://argonautica.jason.oceanobs.com/html/argonautica/tutorial/sensor_radiometer_optical_fr.html

En un peu plus de vingt ans, les observations du niveau de la mer (altimétrie radar), de la température de surface (SST), et de la couleur de l'océan ont révolutionné notre vision et notre compréhension du fonctionnement de l'océan.

La modélisation et les applications opérationnelles sont devenues simultanément de grosses consommatrices de données satellitaires, via les techniques d'assimilation qui permettent d'accroître le réalisme et la portée des simulations des modèles de l'océan mondial, qui couplent maintenant physique et biologie. Il y a ainsi une complémentarité entre les satellites qui fournissent les observations synoptiques, sur le long terme et à multi-échelles, et la modélisation qui permet l'extrapolation sur la verticale, la prédiction, et la description des variables non observables depuis l'espace⁽¹⁾.

Deux échelles spatiales et temporelles extrêmes émergent de l'analyse des besoins actuels: d'une part l'échelle diurne et les échelles de la turbulence océanique (incluant méso- et sub-mésoéchelle), pour une meilleure compréhension des processus physiques et biologiques dans l'océan, et, d'autre part, l'échelle « multi-décennale » et globale pour répondre aux grandes questions liées au changement climatique. L'organisation de ce document reflète cette évolution⁽²⁾.

Les domaines appréhendés relèvent aussi bien de la géophysique (température, salinité, vitesses de surface, vagues, niveau de la mer, évolution du trait de côte et de la bathymétrie, ...) que de la chimie (nutriments et oxygène dissous) ou de la biologie (biomasse phytoplanctonique et zooplanctonique, caractéristiques optiques de la colonne d'eau).

^{(1),(2)} : http://www.cnes.fr/automne_modules_files/standard/public/p8673_8bcb9c85cd0b55871de6944939761596
11 Terre environnement climat Prospective du groupe Ocean3.pdf

1.1. La température de surface de l'océan :

La température de surface est une donnée essentielle pour les prévisions météorologiques ou climatiques. À titre d'exemple (**fig. 8 à droite**), les précipitations en automne sur la côte de la Méditerranée sont liées à la température de surface de cette mer. Par ailleurs, la faune et la flore aquatiques sont impactées par la température. Ainsi, les phytoplanctons seront d'autant plus abondants que la température est basse⁽¹⁾.

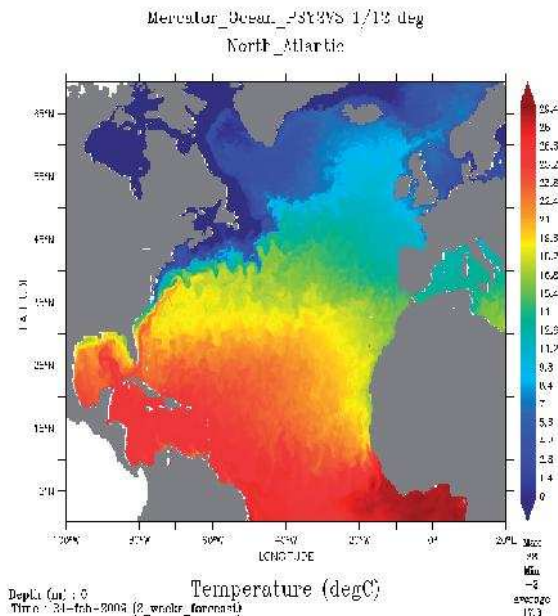


Figure 7 : Température de surface du nord atlantique (24 février 2009) Source: <http://www.cnes.fr>

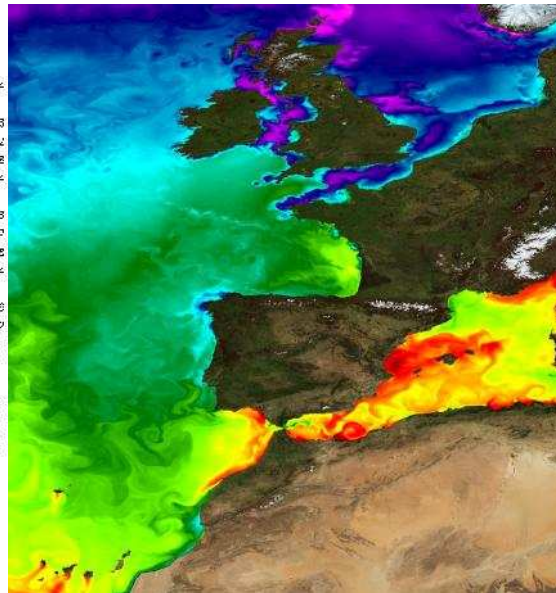


figure 8 : Carte de température de surface sur la façade atlantique (28 juin 2010). Source <http://www.mercator-ocean.fr/fre/>

Ainsi, le suivi de la température des eaux superficielles en interaction avec l'atmosphère permet d'appréhender leur influence sur les phénomènes météorologiques dangereux, comme les cyclones tropicaux (**fig. 9**). L'épaisseur de la couche d'eaux chaudes dont la température dépasse 26°C est un facteur déterminant du développement ou de la régénération des cyclones, ces derniers puisant leur énergie dans les eaux chaudes superficielles de l'océan⁽²⁾.

⁽¹⁾: http://www.cnes.fr/automne_modules_files/standard/public/p8673_8bcb9c85cd0b55871de694493976159611_Terre_environnement_climat_Prospective_du_groupe_Ocean3.pdf

⁽²⁾: <http://www.mercator-ocean.fr/fre/>

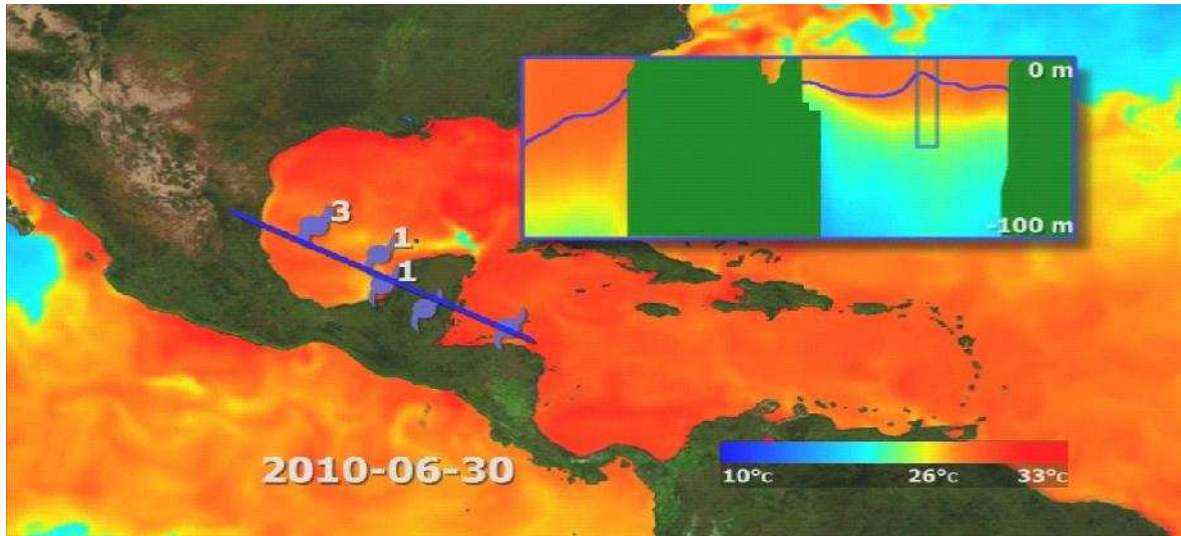


Figure 9 : Température de l'océan en surface et sur une coupe verticale des 100 premiers mètres, le long de la trajectoire d'un cyclone dans le golfe du Mexique. Source <http://www.mercator-ocean.fr/fre/>

1.2. La salinité, paramètre-clé des échanges verticaux :

La salinité est un des paramètres clés pour comprendre la dynamique des océans, notamment la façon dont l'eau se répand dans les profondeurs. Elle varie sur toute la surface du globe, en particulier à l'embouchure du fleuve Amazone (**fig. 10**), qui rejette dans l'océan des centaines de milliers de m^3/s d'eau fluviale⁽¹⁾.

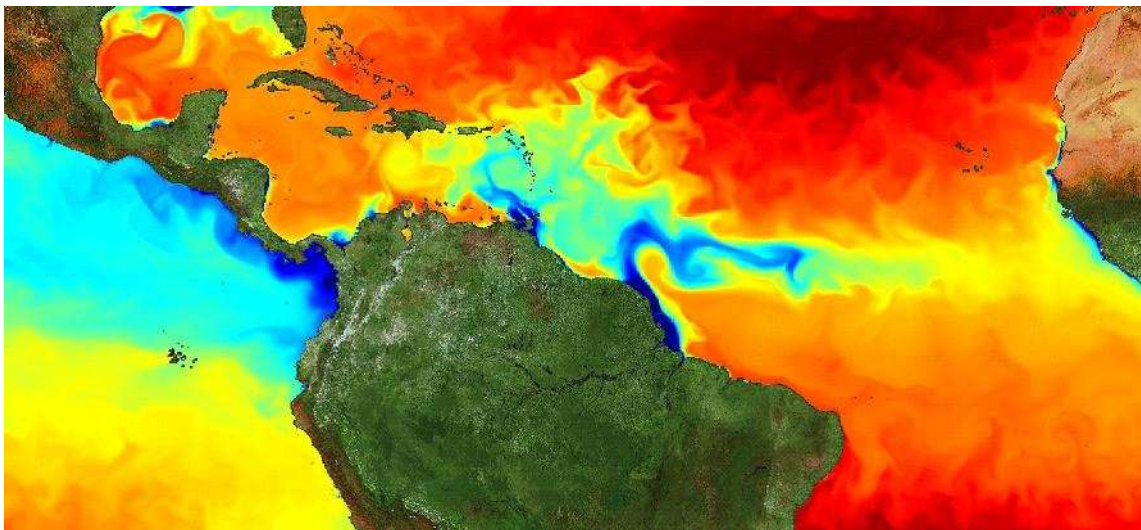


Figure 10 : Salinité de l'océan atlantique à l'embouchure du fleuve Amazone en Septembre 2009. Source <http://www.mercator-ocean.fr/fre/>

⁽¹⁾: <http://www.mercator-ocean.fr/fre/>

Un autre exemple de la variation de salinité de surface dans l'atlantique nord en février 2009

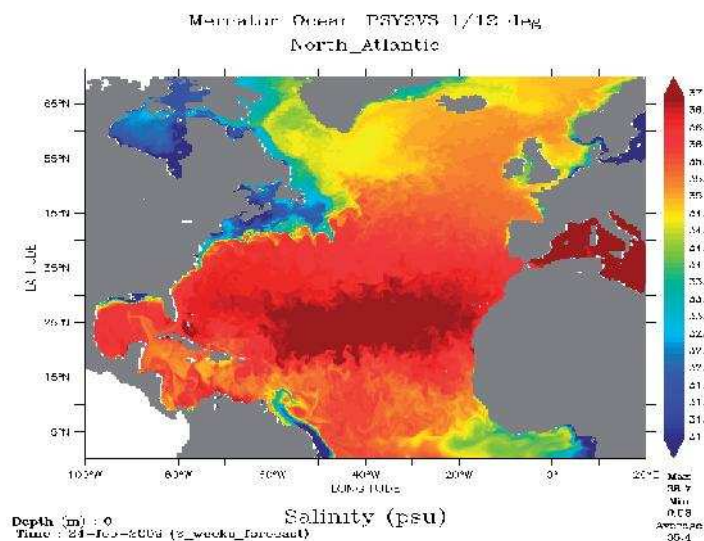


Figure 11 : Salinité de surface dans l'atlantique nord (24 février 2009)

Source: <http://www.cnrs.fr>

1.3. Estimation du phytoplancton :

Un mètre cube d'eau de mer contient des millions d'espèces Phytoplanctoniques qui forment l'élément de base de la chaîne alimentaire océanique. Le total de la biomasse phytoplanctonique est supérieur à celui de tous les animaux marins (zooplancton, poissons... etc.).

En plus de son rôle dans la chaîne alimentaire, le phytoplancton est un élément indispensable dans le système climatique de la planète, sa présence dans l'eau provoque soit la dispersion ou l'absorption de la lumière, ce qui réchauffe les couches supérieures de l'océan. Il produit aussi des composés chimiques qui s'échappent dans l'atmosphère et jouent un rôle dans la formation des nuages (**John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2000**).

D'autre part, ces algues photosynthétiques créent de la matière organique grâce à l'énergie radiative du soleil, en fixant du CO₂ dissous et des éléments nutritifs présents dans l'eau de mer ; ce processus s'accompagne d'une production d'oxygène avec une régulation des gaz atmosphériques et des espèces chimiques présentes dans l'océan. La connaissance de la répartition mondiale et des variations temporelles des concentrations en phytoplancton est un passage obligatoire pour une étude approfondie du cycle océanique du carbone et des éléments associés. Enfin, c'est bien sûr l'aspect synoptique des observations satellitaires et leur haute fréquence d'acquisition qui rendent la télédétection de la « couleur de l'océan » si attrayante pour l'étude des phénomènes océaniques, la plupart étant très variables tant dans leur distribution spatiale que dans leur évolution temporelle. Le phytoplancton, détecté à partir de l'espace, est un excellent « traceur » de ces mouvements, sauf dans le cas d'un développement très rapide de la population algale (**Antoine, 1998**).

La carte satellite suivante a été capturée par le capteur SeaWiFS (September 1997 - August 1998) du projet SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor). Les couleurs

donnent une indication de l'amplitude et de la distribution globale de la production primaire océanique et terrestre.

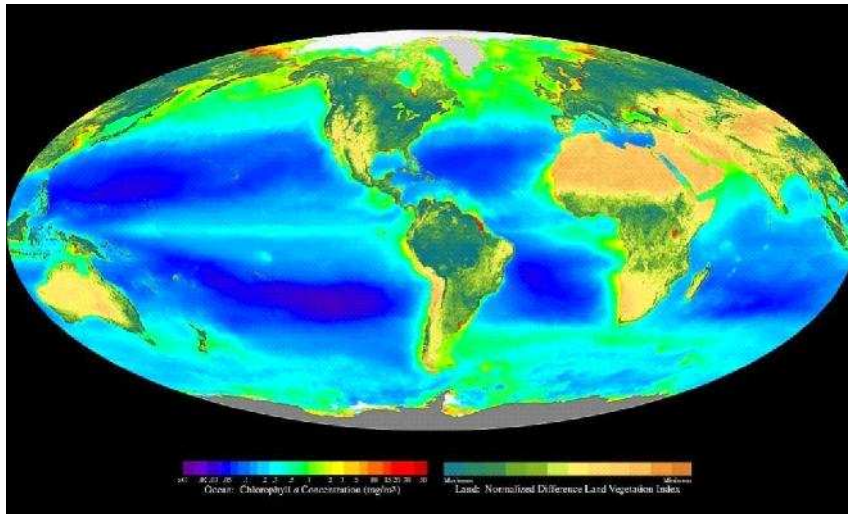


Figure 12 : Carte satellite du capteur SeaWiFS qui montre l'amplitude et la distribution globale de la production primaire océanique et terrestre (September 1997 - August 1998). Source : <http://blog.mysciencework.com/2011/06/15/1%E2%80%99oceanographie-une-histoire-de-passion-de-technologies-et-de-plancton.html>

Une autre carte qui montre un bloom algal ce qui permet d'en suivre sa prolifération, son expansion et son devenir.



Figure 13 : Floraison de phytoplancton au large de l'estuaire de la Gironde. Image acquise par le capteur MERIS d'ENVISAT. Le 09-04-2011 à 10h39 Crédit image : Agence Spatiale Européenne (ESA). Source : http://regard-sur-la-terre.over-blog.com/photo-1931875-Algal-bloom---Envisat---Meris---09-04-2011--10h39_jpg.html

1.4. La biogéochimie et la couleur de l'océan:

L'océan est une composante clef régulatrice du Système Terre, en interaction permanente avec l'atmosphère et les continents. La productivité marine est contrôlée par la dynamique océanique et les apports continentaux (éoliens et/ou fluviatiles) en éléments nutritifs (fer, silice, azote, phosphore) essentiels à la photosynthèse. La circulation océanique et les processus de mélanges verticaux qui y sont associés déterminent le niveau d'éclairement

pour les organismes planctoniques ainsi que l'apport physique en ces éléments nutritifs essentiels.

L'océan est perturbé par les activités humaines à de multiples échelles, de la pollution locale des eaux côtières à des perturbations planétaires souvent invisibles. Le réchauffement de l'atmosphère, observé depuis un siècle, gagne l'océan qui, du fait de son volume et des propriétés de l'eau, stocke déjà l'essentiel de la chaleur excédentaire.

Le réchauffement de l'océan affecte aussi la vie marine, d'un bout à l'autre de la chaîne alimentaire : du plancton jusqu'aux poissons et mammifères prédateurs. Les organismes des profondeurs seront aussi touchés par les modifications de la ventilation des masses d'eau. Parallèlement à la perturbation climatique qu'il contribue à provoquer, le gaz carbonique acidifie les eaux de surface de l'océan, ce qui entraîne d'autres conséquences sur la vie marine, en particulier les organismes à coquille calcaire. Toutes ces influences climatiques se surimposent graduellement aux effets néfastes, déjà très visibles, de la pollution et de la surpêche.

L'étude biogéochimique est indispensable pour comprendre le rôle de la biologie marine dans la régulation des flux de dioxyde de carbone, suivre les changements globaux et décennaux de la biomasse du phytoplancton, et comprendre aussi le couplage entre la circulation océanique et la production primaire

Le carbone est continuellement échangé entre l'océan, l'atmosphère, et la terre, son temps de résidence dans la surface de l'océan est relativement court. L'eau contenant le carbone dissous descend vers les profondeurs océaniques (Pompe de solubilité). Le phytoplancton prend une partie du carbone vers les couches de surface ensoleillées lors de la photosynthèse pour produire des particules de carbone organique. Une fraction de ce carbone organique peut couler (pompe biologique) dans les plaines abyssales, une fraction encore plus petite est enterrée dans les sédiments. Dans ce sens, le CO₂ est extrait des eaux de surface et est déplacé vers les eaux profondes et les sédiments, où il reste pendant des siècles, voire des millénaires. La combinaison entre la pompe de solubilité et la pompe biologique représentent l'absorption nette du carbone par les océans. (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**). Il est intéressant d'améliorer notre compréhension sur ces processus car ils sont la clé du cycle global du carbone et d'autres cycles biogéochimiques qui sont essentiels à la vie sur Terre.

Les navires fournissent une couverture insuffisante du territoire, les blooms phytoplanctoniques et les zones à forte productivité sont des phénomènes de courte durée, il est impossible de les surveiller suffisamment. Ce n'est qu'avec la disponibilité des satellites couleur de l'océan que les scientifiques ont pu estimer de façon routinière la production primaire nette à des échelles de temps interannuelles et détecter les tendances mondiales (**NRC, 2008**).

Différentes méthodes existent pour identifier la fixation de l'azote par satellite (**Subramaniam et al, 2002 ; Westberry et al, 2005**). Par exemple, de grandes fleurs contenant de la chlorophylle dans le Pacifique sud-ouest, ont été observées à la fois par les capteurs CZCS et SeaWiFS, et ont été identifiées comme fleurs *Trichodesmium* (**Dupouy et al, 1998; Dupouy et al, 2000; Westberry et Siegel, 2006**). Basé sur des observations biologiques faites sur le terrain, ces fleurs ont été attribuées à des fixateurs d'azote (**Wilson et**

al, 2008). La compréhension des tendances spatiales et temporelles de la production de ces fleurs est essentielle en raison de leur taille, la durée et le potentiel de modification du climat planétaire (Michaels et al, 2001; Sañudo-Wilhelmy et al, 2001.).

Les données couleur de l'océan ont également montré qu'il existe des proliférations inhabituelles produites dans des régions pauvres en éléments nutritifs (observées dans le Pacifique nord-est (Wilson, 2003; Wilson, et al, 2008) et au sud-est de Madagascar (Longhurst, 2001; Srokosz, et al, 2004; Uz, 2007)). Les mécanismes physiques qui fournissent des nutriments pour les soutenir demeurent inconnus. La découverte met en évidence le peu que nous savons sur l'océan et comment notre compréhension de la complexité des écosystèmes marins évolue. Les données couleur de l'océan ont joué et joueront un rôle crucial dans le processus de découverte.

1.5. L'observation et la prévision des glaces :

L'observation des couvertures de glace de mer est obtenue grâce à l'observation satellitaire. Cependant, la prévision des glaces est un exercice complexe, combinant de nombreux paramètres (vents, courants, température de surface, salinité, etc.). Le rétrécissement de la surface couverte par la banquise arctique (fig. 14) est, par exemple, un signal à surveiller dans le cadre du changement climatique.

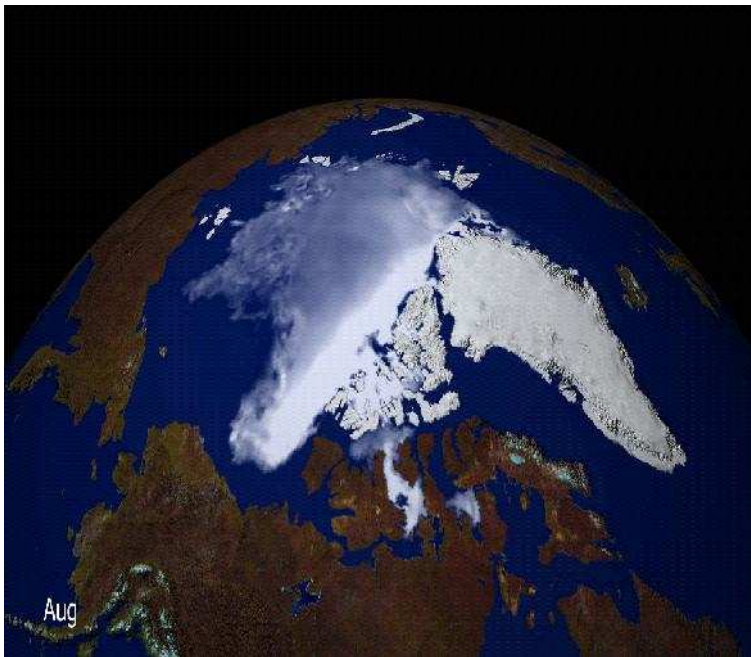


Figure 14 : Surface couverte par la banquise arctique en août 2009
Source <http://www.mercator-ocean.fr/fire/>

1.6. Le suivi des anomalies des hauteurs de mer lors d'un épisode El Niño :

La surface océanique est mouvante et n'a pas une altitude uniforme. Outre des déformations ondulatoires dues aux vents (les vagues), et des variations régulières de hauteur sous l'effet des marées, la surface de l'océan est aussi déformée par des mouvements des eaux transportées par les courants. Les variations horizontales de la hauteur de l'océan traduisent des déséquilibres entre les masses d'eau. Ces masses d'eau étant soumises à la gravité et à la

rotation de la Terre, une relation d'équilibre s'établit entre les variations horizontales de la hauteur de l'océan et les courants océaniques. Les courants tournent autour des creux et des bosses de l'océan, comme les vents autour des dépressions et des anticyclones (dans le sens inverse des aiguilles d'une montre autour des creux ou des dépressions dans l'hémisphère nord). La mesure, grâce aux satellites altimétriques, de la hauteur de l'océan, avec ses variations spatiales et temporelles, offre donc une information précieuse pour estimer les courants. Elle permet également d'observer des anomalies de la circulation océanique comme le phénomène El Niño (fig. 15).

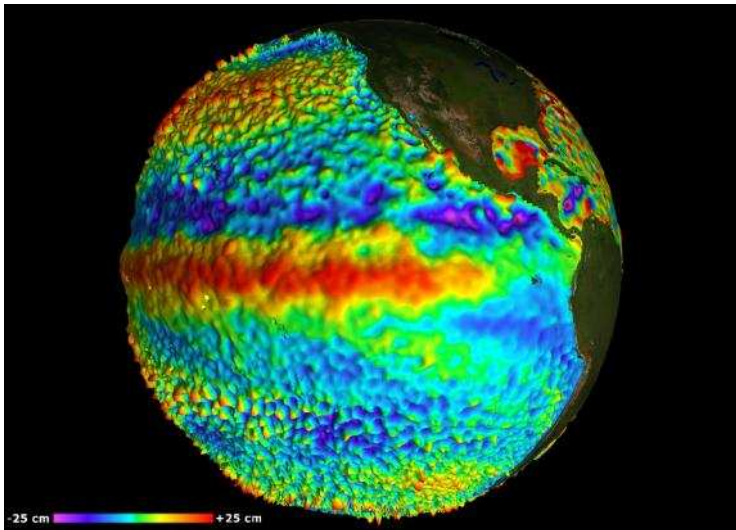


Figure 15 : El Nino et les anomalies de hauteur de mer dans l'océan Pacifique en novembre 2009 (en cm)
 Source <http://www.mercator-ocean.fr/fre/>.

1.7. Mesure des vents sur l'océan :

La mesure des vents (vitesse et direction) à la surface des océans se fait à l'aide des diffusiomètres radar qui permettent le suivi constant des vents et de l'état de surface des océans.

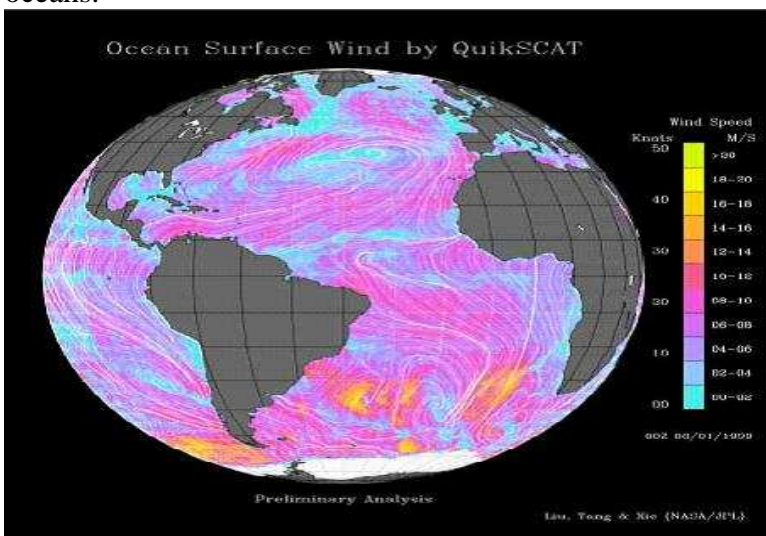


Figure 16 : Vents de surface océaniques dans l'Atlantique (1aout 1999) mesurés par le diffusiomètre SeaWinds à bord du satellite QuickScat. Source : <http://winds.jpl.nasa.gov>

1.8. Les zones côtières: compréhension et suivi :

Le renforcement de l'implantation des populations dans les zones littorales, couplé à une évolution du climat propre à accentuer les événements extrêmes régionaux demandent à la communauté scientifique de contribuer à l'amélioration de la prévisibilité des risques pour les côtes. Ces risques incluent la modification des écosystèmes marins (avec diminution implicite des ressources), les efflorescences de composés organiques nuisibles, l'érosion du littoral, et les inondations et tsunamis aux conséquences souvent dramatiques. L'élévation du niveau des mers peut également amplifier les effets des ondes de tempête sur le domaine côtier.

L'environnement côtier est en outre caractérisé par des fluctuations bio-géo-physiques à haute fréquence (floraisons phytoplanctoniques envahissantes et toxiques, remise en suspension de sédiments, panaches de rivières, lessivages des côtes, fortes marées ...), et par des frontières hétérogènes et irrégulières (trait de côtes, bathymétrie) (**voir figures suivantes**).

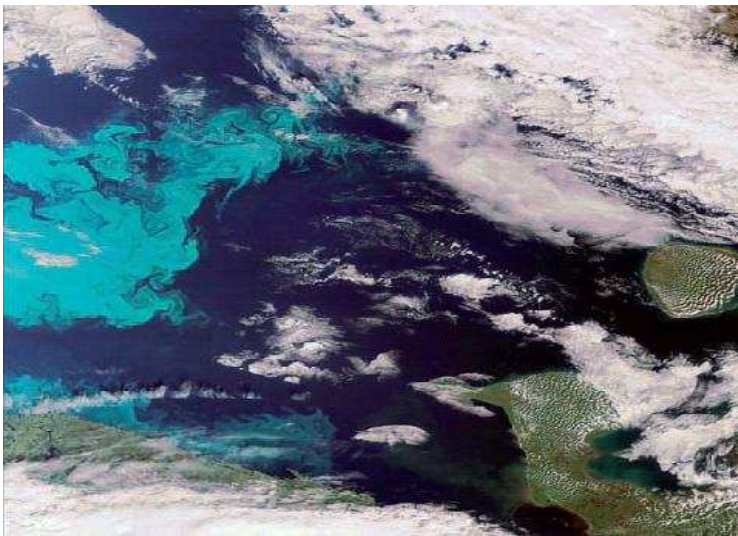


Figure 17 : Floraison d'algues unicellulaires à test calcaires (« coccolithophorides») en mer de Barents (image ENVISAT-MERIS / ESA). Source: <http://www.cnes.fr>



Figure 18 : Juxtaposition des terres émergées et des eaux côtières riches en sédiments (région de Cardiff; image ALOS-AVNIR2/ESA). Source: <http://www.cnes.fr>



Figure 19 : Panache turbide du delta du Danube en mer Noire
(Image ENVISAT-MERIS / ESA). Source: <http://www.cnes.fr>

1.8.1. Turbidité océanique en zone côtière:

Les radiomètres optiques opérant dans les longueurs d'onde du visible enregistrent les réflectances de la surface marine (« couleur de l'océan »). Le traitement de ces données permet de quantifier certaines caractéristiques des eaux de surface, en particulier la teneur en matière en suspension (turbidité) et en chlorophylle (phytoplancton). Les mesures ainsi acquises sont d'une grande utilité dans le suivi des courants, de la pollution et de la productivité biologique des eaux côtières.

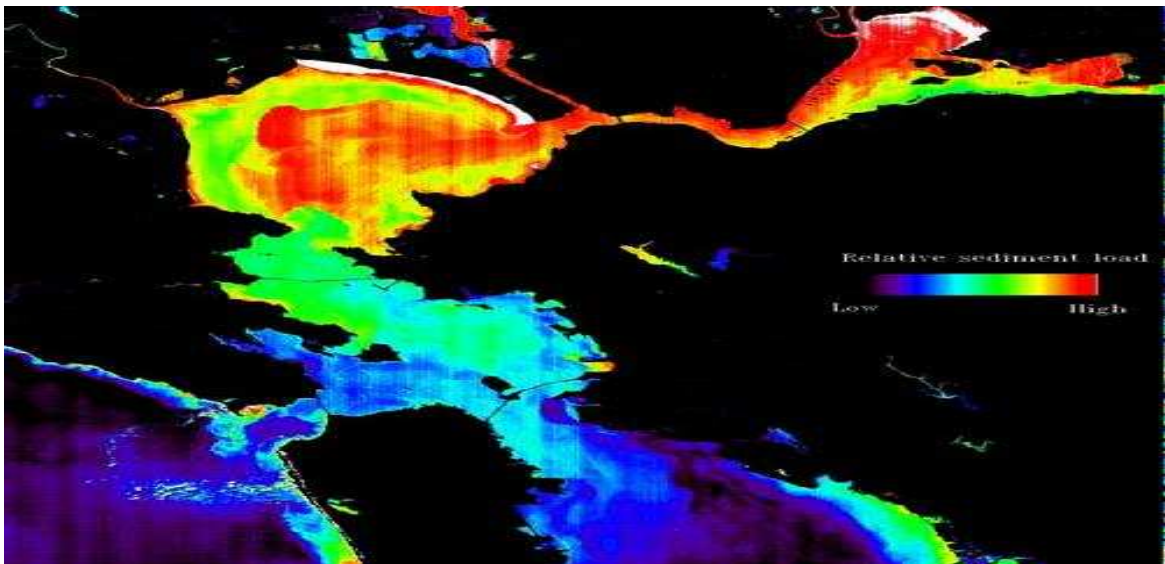


Figure 20 : La charge sédimentaire des eaux côtières dans la Baie de San Francisco mesurée à partir des données du radiomètre ASTER-TERRA. Source : <http://asterweb.jpl.nasa.gov>

1.8.2. L'imagerie radar sur les océans :

Les radars imageurs à synthèse d'ouverture sont des outils de surveillance de l'océan à haute résolution spatiale ; ils sont particulièrement utiles dans les zones côtières. Ils permettent d'observer les vagues et houles et divers phénomènes ondulatoires (ondes internes) ; ils permettent de surveiller le trafic maritime et les pollutions, et même dans certains cas la topographie sous-marine à faible profondeur.

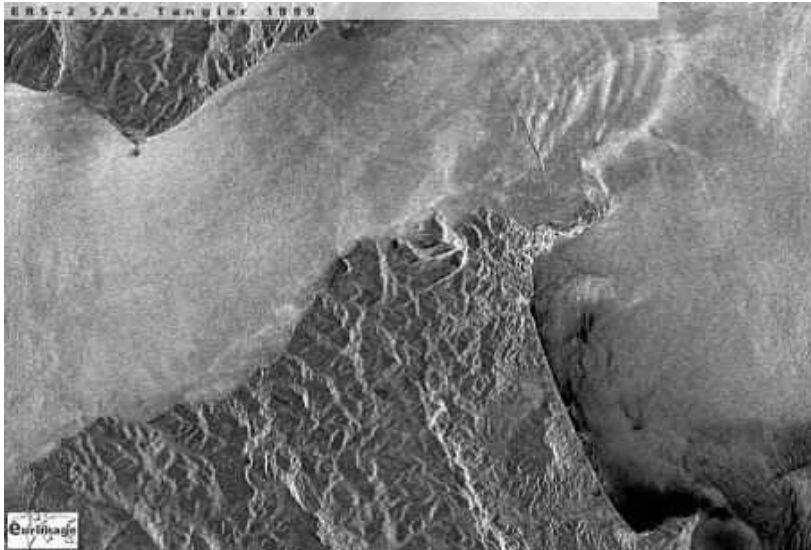


Figure 21 : Image du radar à ouverture synthétique (SAR) du satellite européen ERS-2 acquise en 1999, couvrant le détroit de Gibraltar. On y distingue les zones de mer agitée (claires) ou abritées (sombres), un remarquable système d'ondes à l'est du Détroit et le sillage d'un car ferry traversant le détroit. Source : <http://www.eurimage.com>

2. Les capteurs passés, actuels et futurs de la couleur de l'océan

Plusieurs capteurs se sont intéressés à la couleur de l'océan pour comprendre les changements physiques et biologiques ainsi que les phénomènes qui s'effectuent à la surface de la mer.

La figure suivante illustre la ligne de temps pour les lancements passés et prévus des capteurs de la couleur de l'océan aux Etats-Unis et autres pays.

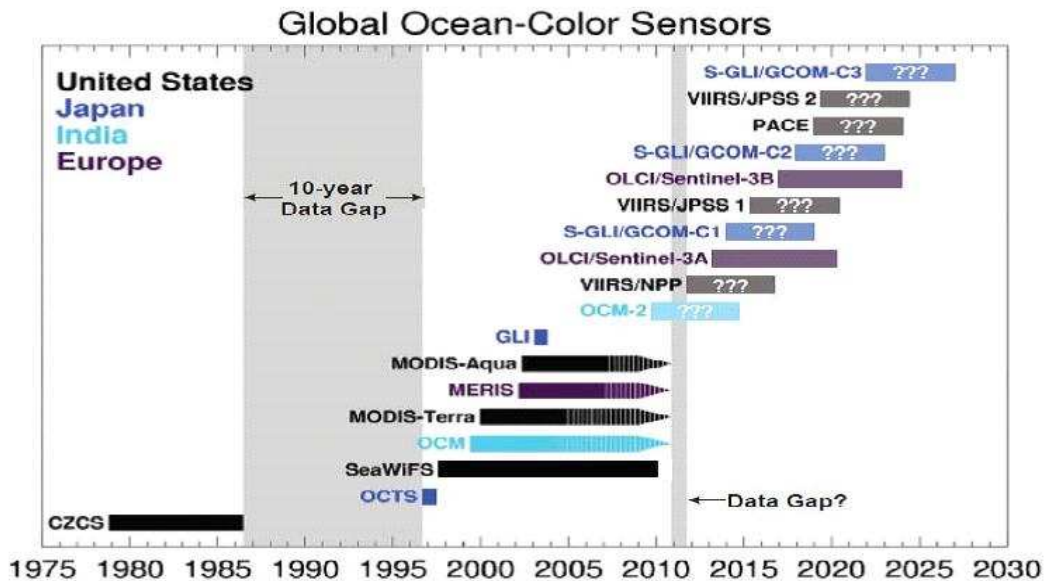


Figure 22 : La séquence de lancement du passé, actuel et prévu des capteurs couleur de l'océan en orbite polaire. Source: http://www.ioccg.org/sensors_ioccg.html.

Les capteurs encore opérationnels sont présentés avec une flèche à sens unique, la zone hachurée indique quand un capteur est au-delà de sa durée de vie. Le fond grisé indique une lacune dans les données dans le passé et un manque de données potentielle découlant si les capteurs MODIS et MERIS cessent aujourd'hui. Les questions sont des marques utilisées pour indiquer les capteurs qui, soit ne répondent pas encore aux exigences minimales ou sont vulnérables aux changements dans l'affectation des fonds. Les futurs capteurs qui sont représentés ayant soit une durée de vie de cinq ou sept ans, en fonction de leurs caractéristiques individuelles.

Avec :

CZCS: Coastal Zone Color Scanner; OCTS: Ocean Color and Temperature Scanner; SeaWiFS: Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor; OCM/OCM-2: Ocean Colour Monitor; MODIS-Terra/MODIS-Aqua: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer on Terra/Aqua respectively; MERIS: Medium Resolution Imaging Spectrometer; GLI: Global Imager; VIIRS: Visible Infrared Imager Radiometer Suite; OLCI: Ocean Land Colour Instrument onboard Sentinel-3; PACE: Pre- Aerosol-Clouds-Ecosystem.

2.1. Coastal Zone Color Scanner (CZCS):

Le CZCS est le premier capteur concernant la couleur de l'océan qui a fourni des observations océaniques globales lors de son opération de 1978 à 1986 (**Hovis et al, 1980;** **Gordon et Morel, 1983**).

Le CZCS a été lancé sur le satellite américain Nimbus 7 pour démontrer que la couleur de l'océan peut être récupérée à partir de l'espace. La qualité des données de CZCS a été gravement compromise par l'absence d'un programme de surveillance in situ, et de bandes proche-infrarouges pour la correction atmosphérique (**Evans and Gordon, 1994**). Au cours de la phase initiale de CZCS, la NASA et l'équipe du Nimbus ont soutenu un programme des

observations bien élaboré in situ, mais le programme était actif uniquement pendant les premiers mois de la survie de CZCS (**Werdell et al, 2007.**).Le CZCS a connu une dégradation importante des bandes vertes et bleues, et la bande rouge utilisée pour la correction atmosphérique a connu un changement brutal dans sa performance. En outre, l'échantillonnage par CZCS n'était pas mondial, aucune observation n'a été faite dans de vastes régions de l'océan mondial, tels que les gyres subtropicales du Pacifique Sud, la limitation des performances du capteur a restreint sa capacité à quantifier les changements de la biosphère océanique à long terme (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

Durant la période de CZCS, les scientifiques ont appris l'importance d'amélioration continue d'échantillonnage et la réalisation d'une couverture globale de l'océan afin d'évaluer les changements qui se passent au fil du temps.

La nécessité de mesures proche-infrarouges pour améliorer les corrections atmosphériques a été comptabilisée au cours de l'expérience CZCS (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

2.2. Ocean Color and Temperature Sensor (OCTS) :

Le monde a connu une carence de données concernant la couleur de l'océan par télédétection, qui a duré dix années après la dégradation du capteur CZC. L'OCTS a été lancé en Août 1996 sur le satellite ADEOS. Malheureusement, la mission avait une courte durée de vie car le satellite ADEOS a subi un échec en Juin 1997, acquérant ainsi que neuf mois de données. L'OCTS a été muni de six bandes visibles et deux bandes proches infrarouges, ce qui correspondait très étroitement aux bandes du capteur SeaWiFS. En outre, les PTOM ont eu quatre bandes dans l'infrarouge thermique, ce qui a permis la récupération de température de surface SST, fournissant ainsi des informations sur la biologie contemporaine de l'océan.

2.3. Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) :

SeaWiFS a été lancé sur la plate-forme OrbView-2 en Septembre 1997, avec une durée de vie de cinq ans, et a fonctionné pendant 13 ans (jusqu'au 14 Décembre, 2010) (**Hooker et al, 1992;. McClain, 2009**).

SeaWiFS a fourni presque tous les jours une couverture mondiale de la Terre à partir d'une orbite polaire des données de qualité très élevés.

SeaWiFS avait six bandes dans la partie visible du spectre électromagnétique et deux bandes dans le proche infrarouge pour la correction atmosphérique. Ces bandes sont très semblables à celles d'OCTS. L'augmentation du nombre de bandes visibles, ainsi que les bandes dans le proche infrarouge, et la sensibilité améliorée permettra une meilleure correction atmosphérique des données et la récupération progressée de l'information biologique.

Les principales caractéristiques de conception est la mesure de la luminance océanique à un signal faible, et la réflectance de la terre et les nuages à des signaux très élevés. Un diffuseur solaire a aidé le capteur en orbite pour l'évaluation des performances (**Eplee et al.,**

2007 in Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011), et la capacité de calibrage lunaire (Barnes et al., 2004 in Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011) a permis d'atteindre une superbe stabilité de SeaWiFS à long terme.

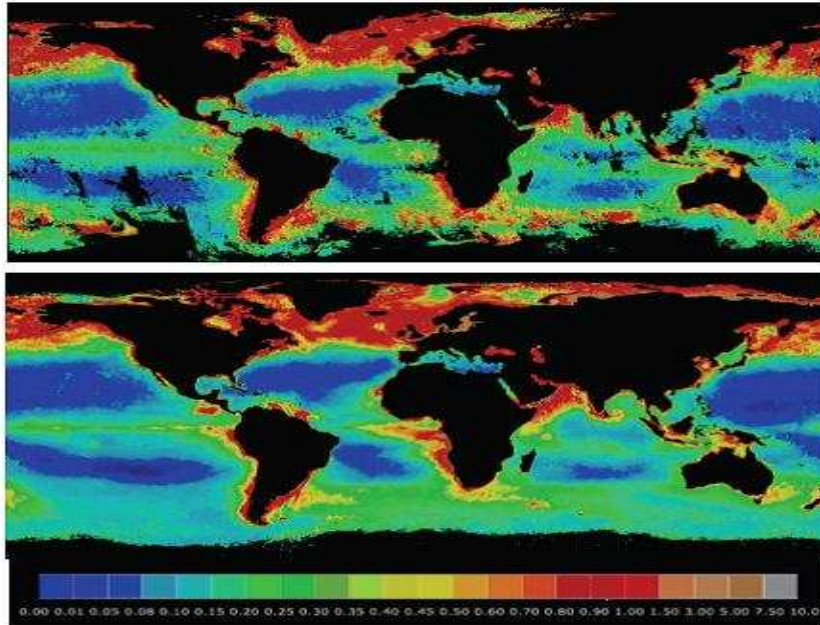


Figure 23 : Cartes globales de concentration moyenne en chlorophylle-a obtenues à partir des images CZCS entre 1979 et 1986(image du haut) et des images SeaWiFS entre 1997 et 2000(image du bas)
source : <http://svs.gsfc.nasa.gov>

2.4. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) :

En Décembre 1999, MODIS a suivi SeaWiFS sur le système d'observation de la Terre (EOS) Terra par vaisseau spatial et en mai 2002, le EOS Aqua. Chacun avait une durée de vie de cinq ans. Tous les deux demeurent opérationnels en orbite, après 11 et huit ans, respectivement. MODIS a abordé l'atmosphère, la terre, et les exigences de la recherche océanique (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

Cet instrument dispose de 36 bandes dans la partie visible et infrarouge du spectre électromagnétique utilisées pour les études atmosphériques et terrestres, ainsi que pour l'océanographie biologique. Il convient de noter que la capacité de MODIS pour mesurer la SST (en utilisant les bandes IR), en plus de la couleur de l'océan, lui permettra de fournir des données sur les interactions biophysique. Les informations de base dérivée concernent les données sur les concentrations de pigments chlorophylle-a, coccolithophores, la phycoérythrine (un pigment spécifique pour les algues), la production primaire de l'océan, et la fluorescence chlorophyllienne (**Srokosz, 2000**).

Malheureusement, le capteur MODIS Terra avait des limitations majeures dans les applications de l'océan en raison de la pauvre radiométrie et la stabilité de polarisation (**Franz et al., 2007**). Le récent retraitement de Terra MODIS (Janvier 2011) n'a été possible que par l'ensemble des données qui ont été indirectement calibrées à l'aide des observations

SeaWiFS. Ces difficultés de Terra MODIS ont mis en évidence le besoin d'un capteur couleur de l'océan stable et bien caractérisé (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

MODIS fournit une couverture spectrale et radiométrique de l'atmosphère pleine, la terre, et l'océan pour une large gamme d'application, MODIS offre également des vues lunaires pour évaluer la stabilité, mais il n'est pas capable de réduire les reflets du soleil sur l'orbite (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

Le Succès SeaWiFS / MODIS dans la production de données de haute qualité est dû à l'engagement de toutes les étapes critiques de la mission, y compris la caractérisation du pré-vol, évaluation de la stabilité du capteur, l'étalonnage solaire et lunaire, la correction atmosphérique et les algorithmes bio-optique, et enfin la validation des produits de retraitement.

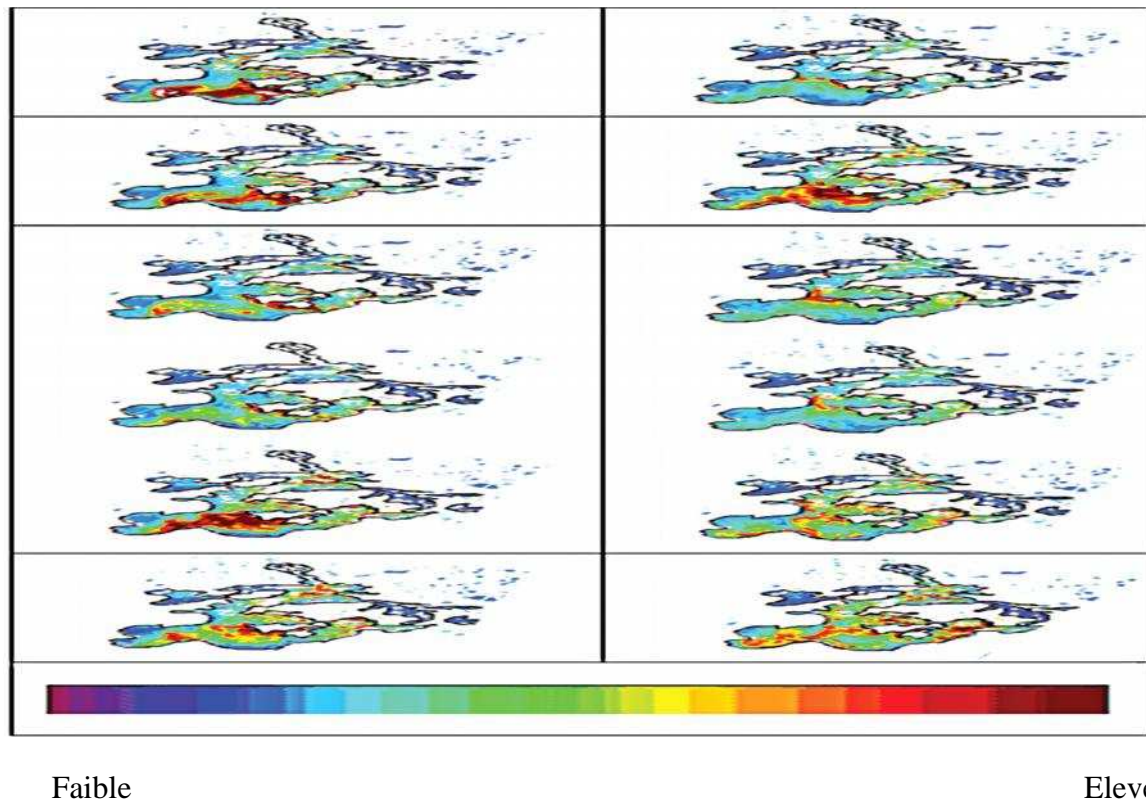
2.5. Medium-Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) :

MERIS de l'ESA (Agence spatiale européenne) a été lancé sur le satellite environnemental ENVISAT en Mars 2002. La mission avait initialement une durée de vie de cinq ans, qui a été prolongée plus tard de manière à ce que les opérations se poursuivent jusqu'à la fin de 2013.

MERIS est non seulement conçu pour les mesures couleur de l'océan, mais aussi pour des données sur l'atmosphère et la végétation terrestre. Il est muni de 8 bandes visibles qui servent à la mesure de turbidité, l'absorption maximale de chlorophylle et d'autres pigments, les sédiments en suspension...etc., il possède 8 bandes aussi dans le domaine du proche infrarouge pour la correction atmosphérique, l'absorption d'oxygène, la mesure des aérosols...etc.

La caractérisation prudente du pré lancement a joué un rôle crucial dans le succès du capteur. La première expérience avec MERIS illustre deux leçons importantes : 1) la collaboration internationale est un aspect important pour réaliser des missions de haute qualité; et 2) des groupes techniques d'experts doivent être formés et engagés dès le début et donc leur expertise peut être efficacement et rapidement disponible pour de nouvelles missions (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

Cependant, malgré ses données de haute qualité, quelques éléments de la mission MERIS l'ont empêché de devenir aussi populaire dans la communauté internationale couleur de l'océan comme SeaWiFS et MODIS. Une des raisons était une politique de données initiales qui était relativement restrictive, combinée au manque d'un réseau de distribution de données convenablement conçues et dimensionnées. Une autre raison est l'absence des produits globaux qui sont essentiels pour s'assurer que les données peuvent être utilisées efficacement dans l'ensemble des applications (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).



INDICE DE BIOMASSE DE CHLOROPHYLLE

Figure 24 : Évolution d'une prolifération de cyanobactérie en surface dans le lac des Bois observée par le capteur de couleur de l'eau MERIS, septembre 2009. Source : <http://www.ec.gc.ca/scitech>

2.6. OCM-2 :

Tous les capteurs actuellement en orbite polaire sont au-delà de leurs vies de conception, à l'exception de l'OCM-2. Si ces capteurs échouent, OCM-2 sera le seul capteur couleur de l'océan dans l'espace avec VIIRS qui a été lancé sur NPP. Par conséquent, ce capteur pourrait devenir une composante importante d'un plan d'atténuation afin de minimiser les lacunes dans les données (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

L'OCM-2 permet d'évaluer la stabilité en utilisant l'étalonnage d'énergie solaire et lunaire. OCM-2 s'incline deux fois par an afin d'éviter les reflets du soleil sur l'océan Indien. Ainsi, l'actuel mécanisme d'évitement des reflets du soleil est optimisé pour l'océan Indien. En raison de cette contrainte, la mission n'est pas conçue pour acquérir des données globales (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

Bien que l'Inde soit un membre du groupe de constellation couleur de l'océan et prévoit des plans pour rendre les produits disponibles en ligne, aucun accord de données n'a encore été établi pour avoir accès aux données de l'OCM-2 pour les enquêteurs américains. La négociation pour l'accès aux données de l'Agence spatiale indienne est la seule option pour éviter de perdre l'accès à court terme aux données couleur de l'océan. Même si des utilisateurs américains acquièrent l'accès aux données, à l'heure actuelle, il est difficile de déterminer si ce capteur peut produire des produits de qualité de climat pour la couleur de l'océan. Par

exemple, l'inclinaison de l'OCM-2 est actuellement optimisée uniquement pour l'océan Indien (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

Avant qu'il ne puisse être déterminé si les produits OCM-2 auront l'équivalence de la haute qualité des produits SeaWiFS, l'accès aux données, y compris la caractérisation et le calibrage des données, doivent être mis au point. En outre, il n'est pas clair à ce stade si les opérations de la mission peuvent inclure une couverture mondiale. Pour OCM-2 afin de répondre aux exigences d'un étalonnage principal, le retraitement de routine et la surveillance de la stabilité doivent être mis en œuvre. Par conséquent, il n'est pas encore possible de déterminer si OCM-2 peut fournir des données sur la qualité du climat mondial. Enfin, il n'existe aucun plan en place pour accéder régulièrement aux données OCM-2 (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

Les efforts actuels de la NASA et de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) pour résoudre les problèmes internationaux d'accès aux données devraient se poursuivre. La NASA, la NOAA et l'ESA devraient continuer à inclure des scientifiques étrangers dans le cadre de leurs équipes scientifiques de la mission afin de favoriser l'information et l'échange de données (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

2.7. Évaluation de la performance VIIRS / NPP :

En 2007, la communauté nationale de couleur de l'océan a articulé des problèmes avec VIIRS sur NPP du NPOESS (**Siegel et Yoder, 2007**). Les utilisateurs ont été préoccupés par la capacité des VIIRS sur NPP de livrer les données multi-spectrales de qualité suffisante pour soutenir la série chronologique des produits océanographiques provenant de SeaWiFS et MODIS-Aqua. La communauté est parvenue à ces conclusions sur la base d'un programme intégré (IPO) de NPOESS qui porte sur des tests de performances du VIIRS au laboratoire. La communauté a proposé deux options pour atténuer le risque d'une perturbation de l'enregistrement des données couleur de l'océan: «1) Le programme devrait pousser et documenter les améliorations du capteur VIIRS sur NPP qui lui permettent de satisfaire les spécifications du climat requises par la couleur océanique, ou 2) Mettre en place une mission autonome, de la couleur globale de l'océan ». (**Siegel and Yoder, 2007**)

La deuxième option n'a pas été retenue. Cette étude vise à évaluer des améliorations du capteur VIIRS.

Comme ce rapport était écrit, VIIRS/NPP a été avec succès intégré au vaisseau spatial. Les essais du pré-lancement VIIRS / NPP menés indiquent dans l'ensemble, que VIIRS / NPP répond aux exigences de la plage dynamique, la transition de gain, linéarité, l'uniformité, la différence radiométrique absolue et la stabilité.

2.8. Sentinel Mission:

L'ESA développe une mission opérationnelle dans le cadre de la surveillance mondiale de l'environnement et la sécurité (GMES). Comme la mission Sentinel est opérationnelle, les exigences relatives à la revisite, la couverture et le cycle de vie de la mission sont strictes. Deux OLCI (Ocean and Land Colored Instrument) sont en cours de construction dans le cadre

de ce programme, le premier OLCI doit être lancé en Avril 2013. Le design suit MERIS avec un système de contrôle de stabilité d'un double diffuseur solaire et des regards spatiaux profonds.

Sur la base de la qualité de la mission MERIS et les caractéristiques de ce capteur, les données sont susceptibles d'être de haute qualité, en particulier parce que la recherche climatique est l'une de ses principales applications. Cela suppose qu'une calibration principale sera poursuivie comme cela a été fait récemment pour MERIS. Cependant, comme avec MERIS, les questions concernant l'accès aux données devront être résolues (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

2.9. S-GLI/ GCOM-C1 et GCOM-C2 :

La Mission GCOM planifie de lancer deux capteurs couleur de l'océan à des fins de surveillance du climat. Pour contrôler la stabilité du capteur, le SGLI Visible et le radiomètre proche infrarouge offrent un diffuseur solaire. On prévoit des regards lunaires aussi. Le capteur aura 19 bandes de fréquences et une résolution spatiale de 250 m, dans le but d'amélioration côtière et des observations d'aérosols. Après une période d'évaluation initiale, les produits de données sont susceptibles d'être ouvertement disponibles, comme ce fut le cas pour les PTOM et GLI.

2.10. VIIRS/JPSS1 et JPSS2 :

Parce que VIIRS/NPP a été conçu comme la mission préparatoire pour le programme opérationnel, les leçons de VIIRS/NPP devraient être appliquées à VIIRS/JPSS1 pour assurer que les améliorations sont faites. Le capteur VIIRS sur la mission JPSS1 doit inclure un tableau de filtre amélioré pour éviter les problèmes de diaphonie associés à VIIRS sur NPP. Beaucoup de questions restent quant à la planification de mission globale et le design, en ce qui concerne le contrôle de stabilité, le calibrage principale basé sur une norme (un standard) MOBY (Marine Optical Buoy), la caractérisation du pré-lancement, la validation des données/calibrage et le traitement/retraitement.

D'après ce que nous avons appris à ce jour, toutes les recommandations de VIIRS sur NPP doivent être mises en œuvre pour VIIRS/JPSS1, en particulier:

- Surveillance de la stabilité;
- étalonnage principal basé sur une approche de type MOBY;
- caractérisation du Pré-lancement VIIRS / NPP appliquée à toutes les missions suivantes;
- traitement, retraitement et distribution ;

Si les problèmes avec VIIRS peuvent être évités au cours de la phase JPSS, les missions suivantes peuvent livrer des données couleur de l'océan de qualité climatique (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

2.11. PACE et ACE :

ACE est l'une des missions d'étude décennale de la NASA, elle doit inclure une capacité avancée pour servir la communauté de recherche dans le domaine de la couleur de l'océan. PACE a été annoncée en 2010 dans le cadre du climat de la NASA avec des exigences similaires à celles prévues pour ACE. Très peu d'informations à propos de l'APCE ou ACE étaient à la disposition. Basé sur un projet de document fourni par **CR McClain** (GSFC de la NASA). Les exigences sont strictes,

si elles sont respectées, l'APCE et ACE satisferaient un bon nombre des besoins couleur de l'océan de la communauté de recherche (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

3. Les quatre types de capteurs satellitaires nécessaires pour répondre aux besoins d'observation:

Tableau 1 : Les quatre types de capteurs satellitaires nécessaires pour répondre aux besoins d'observation (Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011):

Type	Description	exemples
1	Capteurs en orbites polaires avec une faible résolution spatiale (1Km) et 8(ou plus) bandes	SeaWiFS, MODIS, VIIRS, PACE/ACE
2	Capteurs en orbites polaires avec une résolution spatiale moyenne (250-300m) et plus de bandes pour fournir une vue synoptique globale permettant une meilleure performance dans les eaux côtières (mais avec plus de répétition pour une couverture mondiale)	MERIS, OCM-1, OCM-2,
3	Capteurs hyper-spectraux à haute résolution spatiale (~30-100m) en orbite polaire et répétez encore plusieurs fois	HypSPIRI
4	Capteurs hyper ou multi-spectraux avec haute résolution spatiale en orbite géostationnaire	GOCI, GOCI-II, GEOCAPE

4. Quelles sont les exigences pour obtenir des données couleur de l'océan de haute qualité? :

Les capteurs couleur de l'océan mesurent la radiance à différentes longueurs d'onde qui provient de la lumière du soleil et est rétrodiffusée par l'océan et l'atmosphère. L'action de tirer les petites composantes océanique de la radiance totale mesurée par des capteurs satellites est complexe, ceci se fait en plusieurs étapes et chaque étape est essentielle et doit être optimisée pour en arriver à des mesures précises et stables. En utilisant un ensemble d'algorithmes (en commençant par le retrait de la contribution de l'atmosphère qui constitue 90% du signal reçu par le capteur), la radiance au sommet de l'atmosphère est convertie à la radiance eau de mer seulement (L_w), et ensuite aux propriétés désirées comme l'abondance du phytoplancton et la productivité et la production primaire. Pour détecter à long terme les principales tendances de ces propriétés, des mesures doivent répondre aux exigences de précisions élevées. Les étapes suivantes sont nécessaires pour atteindre une haute précision :

- 1) Le capteur doit être bien caractérisé et calibré avant le lancement ;
- 2) Après le lancement, l'étalonnage principal se fait à l'aide d' une bouée marine optiques (MOBY) utilisée comme approche avec des mesures in situ qui répondent aux normes strictes qui sont nécessaires pour définir les facteurs de gain du capteur ;

- 3) La stabilité du capteur et le taux de dégradation doivent être surveillés en utilisant des regards lunaire mensuellement ;
- 4) Au moins six mois de chevauchement de capteurs sont nécessaires pour transférer les capteurs spatiaux et produire des rapports de données climatiques continus;
- 5) La mission doit prendre en charge le développement continu et la validation des corrections atmosphériques, des algorithmes bio-optiques, et des produits couleur de l'océan ;
- 6) le retraitement périodique des données est nécessaire pendant la mission ;
- 7) Un système qui peut archiver, et distribuer rapidement et efficacement toutes les méta-données et les produits transformés à la large communauté nationale et internationale des utilisateurs ;
- 8) Des programmes de recherche actifs doivent accompagner la mission pour améliorer les algorithmes et les produits ;
- 9) La documentation de tous les aspects liés à la mission doit être accessible à la communauté d'utilisateurs ;
- 10) Les caractéristiques du capteur, doivent être équivalentes aux meilleurs attributs combinés de SeaWiFS et MODIS (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

5. Comment faire progresser la télédétection couleur de l'océan vers l'avenir ?

Les Observations couleur de l'océan par satellites sont le principal outil pour le suivi synoptique global des écosystèmes marins. Il est impératif que les observations de la couleur des océans soient maintenues et renforcées dans l'avenir. Ces observations servent les besoins croissants de la communauté des utilisateurs scientifiques qui cherchent à comprendre les tendances à long terme dans les écosystèmes marins et leurs interactions avec le cycle mondial du carbone et aux exigences croissantes des gestionnaires qui prennent ces compréhensions et les appliquent aux ressources marines estimées. Cela signifie que les futurs capteurs et les algorithmes doivent être renforcés pour soutenir un nombre croissant de produits diversifiés concernant la couleur de l'océan et leurs applications. Toutefois, la création de longues séries chronologiques demeure un défi majeur, celui qui n'est pas unique à la télédétection couleur de l'océan (**CNRC 2004b, 2008 in Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**). Les exigences clés comprennent la planification pour assurer la continuité et le chevauchement entre les capteurs, la construction et le maintien du capital humain pour traiter, retraiter et utiliser les produits couleur de l'océan pour la recherche, la coordination et la coopération internationales.

Il est important de noter que la continuité et les progrès de la science exigent tout simplement le soutien de SeaWiFS / MODIS comme type de mesure.

La stratégie de mise en œuvre nécessite un mélange de nouveaux capteurs, y compris: un imageur hyperspectrale mondiale comme prévu pour ACE et APCE ; un imageur multispectral de haute résolution spatiale similaire à l'imageur hyperspectrale infrarouge (HyspIRI) ; la capacité d'effectuer des mesures couleur de l'océan à partir d'une orbite géostationnaire pour se concentrer sur les processus côtiers et océaniques qui exigent des observations multiples pendant un seul jour pour résoudre les changements de courtes durées ; la détection et le rangement de lumière portée d'espace (LIDAR) pour la correction atmosphérique et l'amélioration des mesures océanographiques comme cela est également prévu pour ACE (**NASA, 2007**). Le programme de la NASA sur la Biologie d'Océan et la Biochimie (OBB) et le Conseil de Recherche national (NRC) des plans d'enquêtes décennales

décrivent le besoin d'un mélange de types de missions satellites sur la couleur de l'océan pour répondre aux questions scientifiques de haut niveau.

5.1. Radiomètre imageur hyperspectral Mondial :

Le projet de la NASA concernant l'APCE / ACE fournira certains de ces nouvelles fonctionnalités, y compris:

*des bandes Ultravioletes (UV) pour améliorer la séparation de la chlorophylle et la couleur de matière organique dissoute (CDOM) et donc une plus grande précision des deux produits.

* de courtes bandes infrarouges (SWIR) (1200-1700 nm) ont été démontrées par MODIS, qui, pour améliorer la correction atmosphérique sur les eaux côtières turbides par rapport à ce qui a été réalisé avec le SeaWiFS.

*Des bandes supplémentaires dans l'UV qui aideraient à la correction concernant les aérosols absorbants, une source importante de l'incertitude pour la génération actuelle des capteurs couleur de l'océan en particulier dans les eaux côtières, et une bande UV spécifique à 317,5 nm qui fournit des corrections d'ozone.

* Amélioration de la correction atmosphérique en déterminant l'altitude et le type des aérosols en utilisant un profilage LIDAR, polarimètre de pointe, ou les deux comme prévu pour l'ACE.

Grâce à ces fonctionnalités, il sera possible de séparer les groupes de phytoplancton fonctionnels tels que les exportateurs de carbone (diatomées), fixateurs d'azote (*Trichodesmium* sp.), les producteurs de carbonate de calcium (coccolithophores), et les organismes microbiens en boucle (*Prochlorococcus* sp.). Il sera également possible de permettre la dérivation et l'optimisation des récupérations de fluorescence, qui sont particulièrement bénéfiques dans la quantification de la biomasse de chlorophylle durant les proliférations de phytoplancton dans les eaux côtières (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

5.2. Des imageurs Multi-spectrales à Haute résolution spatiale :

De nombreuses applications côtières telles que la surveillance des efflorescences algales nuisibles (HAB), la gestion de la pêche et la recherche sur les habitats benthiques, y compris les récifs coralliens, les zones côtières et les zones humides, nécessitent une plus grande résolution spatiale et d'autres bandes spectrales qui ne sont pas actuellement disponibles dans la plupart des satellites pour résoudre les signaux optiques complexes que les eaux côtières produisent.

Ces mesures, ont été fabriquées à partir de capteurs aéroportés, généralement pilotés par des avions au-dessus d'une région particulière. Des observations hyperspectrales sont bien adaptés pour les études de routine des zones localisées (par exemple, les récifs coralliens, les herbiers marins) et pour des événements épisodiques (par exemple, HAB, marées noires) qui nécessitent une haute résolution spatiale ou la résolution spectrale, ou parfois répétées à la demande. La technologie a fait ses preuves pour la cartographie de la bathymétrie des eaux peu profondes et le type de fond (**Mobley et al, 2005**), la cartographie et la surveillance des récifs coralliens (**Hochberg et Atkinson, 2003; Lesser et Mobley, 2007**), et la détection des déversements d'hydrocarbures (**Lennon et al., 2006**).

5.3. Améliorer les Corrections atmosphériques, Algorithmes, et les produits couleur de l'océan :

La disponibilité de nouveaux satellites et des bandes spectrales supplémentaires exigera des améliorations d'algorithmes et corrections atmosphériques. De plus, la création d'un ensemble de données plus complet sur le terrain et l'utilisation des protocoles d'échantillonnage normalisés (standardisés) augmenterait significativement la qualité des produits de données (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

5.3.1. Corrections atmosphériques et développement d'algorithmes :

Les progrès des algorithmes bio-optiques et des corrections atmosphériques sont nécessaires pour tirer pleinement des données hyperspectrales désormais disponibles à partir des capteurs d'aéronef. Comme pour la correction atmosphérique, d'autres types de modèles bio-optiques inverses ont été développés par l'imagerie hyperspectrale aéroportée. Une large classe d'algorithmes utilise le spectre correspondant à la correction atmosphérique (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

La meilleure évaluation de la couleur de l'océan dans l'avenir peut provenir de la création des algorithmes avancés de la couleur des océans qui permet d'évaluer de façon indépendante les différents matériaux en suspension et dissouts qui absorbent et diffusent la lumière dans la mer.

De même, l'amélioration des procédures de correction atmosphérique peut être nécessaire en raison du changement climatique.

5.3.2. Validation :

Des ensembles de données océaniques et atmosphériques complets sont nécessaires pour :

- * le développement et la validation des modèles de la télédétection et d'algorithmes inverses ;
- * l'identification des faiblesses existantes dans les algorithmes et des orientations pour le développement et l'amélioration ;
- * la validation des modèles de couplage océanique et atmosphérique, qui sont à la base du développement des capteurs, des algorithmes et des modèles inverses, et constituent la base de la télédétection (**Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011**).

5.3.3. Normes(Standards) des données du terrain et protocoles d'échantillonnage normalisés (standardisés) :

Toutefois, les utilisateurs d'instruments de terrain qui génèrent des données pour le développement d'algorithmes bio-optiques ou de validation ne respectent pas les protocoles recommandés ou utilisés pour les étalons.

Les mesures qui doivent être prises, et pour lesquelles des normes et protocoles doivent être élaborés et suivis, peuvent être résumées selon le **Committee on assessing requirements for sustained ocean color research and operations, 2011** comme suit:

5.3.3.1. Mesures atmosphériques:

- *pression du Niveau de la mer, température, humidité et vitesse du vent ;
- *Le conditionnement des nuages et l'état de la mer ;
- *Mesures des photomètres Solaires ;
- *L'incident direct et diffus d'irradiance spectrale sur la surface de la mer.

5.3.3.2. Mesures océaniques:

- *absorption spectrale, atténuation des faisceaux, et coefficients de rétrodiffusion ;
- *Mesures des caractéristiques spectrales de CDOM et de fluorescence ;
- *Les concentrations du carbone organique dissous (COD), et carbone inorganique particulaire (CIP) ;
- *la biomasse carbonée du phytoplancton et les concentrations en pigments ;
- *le taux carbonique d'exportation, la production primaire nette, la production nette des communautés ;
- *Fluorescence du phytoplancton, et rendements quantiques des fluorescences et des groupes taxonomiques ;
- *Distribution granulométrique ;
- *plan d'irradiance spectral des downwellings ;
- *la radiance spectrale des upwellings ;
- *la profondeur du fond et la réflectance spectrale dans les eaux peu profondes optiquement.

5.4. Extension de produits satellitaires couleur de l'océan à la dimension verticale :

La télédétection couleur de l'océan fournit uniquement des informations sur la surface de l'océan. La dimension verticale n'est que partiellement explorée, à partir de la surface à environ 15-20 m dans les eaux les plus claires, et à partir de la surface à quelques dizaines de centimètres dans les eaux turbides.

Cependant, le phytoplancton se développe tout au long de la couche supérieure éclairée de l'océan à des profondeurs de 100 mètres ou plus. Par conséquent, les capteurs de la couleur de l'océan manquent une grande partie de l'information d'intérêt.

La détermination de la quantité totale de biomasse ou la productivité primaire dans l'océan exige actuellement des hypothèses sur la façon dont les cellules phytoplanctoniques sont distribuées avec la profondeur. La structure verticale est actuellement reconstruite à l'aide des relations statistiques entre les valeurs obtenues par satellite et le profil vertical créé in situ (**Uitz et al, 2006**) ou en utilisant le concept des provinces biogéographiques pour lesquelles une forme donnée est affectée (**Longhurst, 1998**).

Conclusion

générale

Malgré l'immensité de l'océan, de nombreuses menaces pélagiques et côtières de l'environnement marin ont été reconnues grâce à la télédétection de la couleur de l'océan qui fournit des informations très importantes sur les phénomènes biologiques et biogéochimiques qui se réalisent à la surface de l'océan

Les observations spatiales ont transformé l'océanographie biologique et ont fait progresser notre connaissance sur les changements qui influent sur les cycles des éléments importants tels que ceux du carbone et d'azote, et nous ont montré comment et à quel point les processus biologiques de l'océan influencent le système climatique. En outre, la télédétection de la couleur de l'océan permet aux scientifiques d'évaluer les changements dans la production primaire, qui constitue la base de la chaîne alimentaire marine.

L'ajout des capteurs placés sur des orbites géostationnaires qui permettraient un échantillonnage fréquent et même une plus grande résolution spatiale augmenterait la valeur des produits couleur de l'océan pour les scientifiques du climat, la communauté des chercheurs des océans, et l'armée...etc. (NASA, 2006). Ces progrès permettent une meilleure caractérisation de l'environnement côtier, y compris les environnements benthiques et estuariens.

L'élargissement des observations couleur de l'océan à des profondeurs plus importantes, ainsi que l'amélioration des techniques concernant les corrections atmosphériques et le traitement des données, vont augmenter considérablement la précision de la biomasse végétale mondiale et l'estimation du carbone.

Bibliographie

ALAMO A. and BOUCHON M., 1987. Changes in the food and feeding of the sardine (*Sardinops sagax*) during the years 1980-1984 off the Peruvian coast. *Journal of Geophysical Research* 92(C13):14411-14415.

ANTOINE D., 1998. Apports de la télédétection spatiale de la « couleur de l'océan » à l'océanographie. Laboratoire de physique et chimie marines (LPCM). Université Pierre et Marie Curie, Paris. *Océanis* • vol. 24 no 2 • 1998 • p : 81-150.

BACHARI F., 2009. Modélisation et cartographie de la pollution marine et de la bathymétrie à partir de l'imagerie satellitaire. Thèse de Doctorat. Spécialité : Sciences de l'Univers et Environnement. Université du Val de Marne Paris XII. p : 50-92.

BECU G., 2004. Contribution à la vérification des observations spatiales de la couleur de l'océan à l'aide du réseau de radiomètres optiques SIMBADA. Thèse de Doctorat. Spécialité : lasers, molécules, rayonnement atmosphérique. Université des sciences et technologies de Lille. 199 p.

BEZY J.L., DELWART S., and RAST M., 2000. MERIS – A new generation of ocean-colour sensor onboard. *Envisat European Space Agency Bulletin* 103:1-9.

BOGRAD S., FOLEY D.G., SCHWING F.B., WILSON C., POLOVINA J.J., and HOWELL E.A., 2004. On the seasonal and interannual migrations of the Transition Zone Chlorophyll Front. *Geophysical Research Letters* 31(L17204):1-5.

BOUSSARSAR M. A., 2003. Application des réseaux de neurones en télédétection satellitaire: typologie des aérosols atmosphériques par cartes de kohonen probabilistes. Mémoire d'ingénieur en informatique. 72p.
Change. Cambridge University Press, Cambridge, England, United Kingdom.

CHAVEZ F.P., MESSI'E M., and PENNINGTON J.T., 2011. Marine primary production in relation to climate variability and change. *Annual Review of Marine Science* 3:227-260.

COMMITTEE ON ASSESSING REQUIREMENTS FOR SUSTAINED OCEAN COLOR RESEARCH AND OPERATIONS; NATIONAL RESEARCH COUNCIL., 2011. Assessing Requirements for Sustained Ocean Color Research and Operations. The national academies press Washington, d.c.126p.

DIOUF D., 2012. Méthode mixte d'inversion neuro-variationnelle d'images de la couleur de l'océan. Application aux signaux seawifs au large de l'Afrique de l'ouest. Thèse de Doctorat. Université Paris 6 et l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar. p : 1-52.

DUPOUY C., NEVEUX J., SUBRAMANIAM A., MULHOLLAND M.R., MONTOYA J.P., CAMPBELL L., CARPENTER E.J., and CAPONE D.G., 2000. Satellite captures *Trichodesmium* blooms in the southwestern tropical Pacific. *EOS Transcripts* 81(2):13-16.

DUPOUY C., PETIT M., and DANDONNEAU Y., 1998. Satellite detected cyanobacteria bloom in the southwestern tropical Pacific: Implication for oceanic nitrogen fixation. *International Journal of Remote Sensing* 9(3):389-396.

ESCRIBANO R., DANERI G., FARIAS L., GALLARDO V.A., GONZALEZ H.E., GUTIERREZ D., LANGE C.B., MORALES C.E., PIZARRO O., ULLOA O., and BRAUN M., 2004. Biological and chemical consequences of the 1997-1998 El Niño in the Chilean coastal upwelling system: A synthesis. *Deep-Sea Research II* 51(20-21):2389-2411.

EVANS R.H., and GORDON H.R., 1994. Coastal zone color scanner “system calibration”: A retrospective examination. *Journal of Geophysical Research* 99(C4):7293-7307.

FRANZ B.A., BAILEY S.W., WERDELL P.J., and MCCLAIN C.R., 2007. Sensor-independent approach to the vicarious calibration of satellite ocean color radiometry. *Applied Optics* 46(22):5068-5082.

GORDON H.R., and Morel A., 1983. Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery. Springer-Verlag, New York.

HOCHBERG E.J. and ATKINSON M.J., 2003. Capabilities of remote sensors to classify coral, algae, and sand as pure and mixed spectra. *Remote Sensing of the Environment* 85(2):174-189.

HOOKE S.B., ESAIAS W.E., FELDMAN G.C., GREGG W.W., and MCCLAIN C.R., 1992. An Overview of SeaWiFS and Ocean Color, Volume 1. NASA Technology Memorandum, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland.

HOVIS W.A., CLARK D.K., ANDERSON F., AUSTIN R.W., WILSON W.H., BAKER E.T., BALL D., GORDON H.R., MUELLER J.L., EL-SAYED S.Z., STURM B., WRIGLEY R.C., and YENTSCH C.S., 1980. Nimbus-7 coastal zone color scanner: System description and initial imagery. *Science* 210(4465):60-63.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2007. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

INTERNATIONAL OCEAN COLOR COORDINATING GROUP (IOCCG). 2008. IOCCG Report 7: Why ocean colour? The societal benefits of ocean-colour technology. In Reports and Monographs of the International Ocean-Colour Coordinating Group, Platt, T., N. Hoepffner, V. Stuart, and C. Brown (eds.). IOCCG, Dartmouth, Nova Scotia, Canada.
IOCCG., 2008. Why Ocean Colour? The Societal Benefits of Ocean-Colour Technology. Coll. « Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group ». Dartmouth, Canada: IOCCG.

LEI M., 2011. Simulation d’images d’un futur imageur multispectral géostationnaire dédié à la couleur de l’eau. Étude de l’influence des angles d’observation et d’éclairement sur la luminance mesurée et sur l’erreur d’estimation en chlorophylle. Thèse de Doctorat. Discipline: instrumentation et informatique de l’image. Université de bourgogne. p : 1-50.

LENNON M., BABICHENKO S., THOMAS N., MARIETTE V., MERCIER G., and LISIN A., 2006. Detection and mapping of oil slicks in the sea by combined use of hyperspectral imagery and laser induced fluorescence. *EARSeL eProceedings* 5(1):120-128.

LESSER M., and MOBLEY C.D., 2007. Bathymetry, water optical properties, and benthic classification of coral reefs using hyperspectral remote sensing imagery. *Coral Reefs* 26(4):819-829.

LONGHURST A.R., 2001. A major seasonal phytoplankton bloom in the Madagascar Basin. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 48(11):2413-2422.

MCCLAIN C.R., 2009. A decade of satellite ocean color observations. *Annual Review of Marine Science* 1:19-42.

MICHAELS A.F., KARL D.M., and CAPONE D.G., 2001. Element stoichiometry, new production and nitrogen fixation. *Oceanography* 14(4):68-77.

MOBLEY C.D., SUNDMAN L.K., DAVIS C.O., BOWLES J.H., DOWNES T.V., LEATHERS R.A., MONTES M.J., BISSETT W.P., KOHLER D.D.R., REID R.P., LOUCHARD E.M., and GLEASON A., 2005. Interpretation of hyperspectral remote-sensing imagery via spectrum matching and look-up tables. *Applied Optics* 44(17):3576-3592.

NASA., 2006. Earth's Living Ocean: The Unseen World. Goddard Space Flight Center, NASA, Greenbelt, Maryland.

NASA., 2007. Advanced Plan for the Ocean Biology and Biogeochemistry Program. Goddard Space Flight Center, NASA, Greenbelt, Maryland.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL., 2008. Ensuring the Climate Record from the NPOESS and GOES-R Spacecraft: Elements of a Strategy to Recover Measurement Capabilities Lost in Program Restructuring. The National Academies Press, Washington, DC.

RAST M., BEZY J.L., and BRUZZI S., 1999. The ESA Medium Resolution Imaging Spectrometer MERIS: A review of the instrument and its mission. *International Journal of Remote Sensing* 20(9):1681- 1702.

SAÑUDO-WILHELMY S.A., KUSTKA A.B., GOBLER C.J., HUTCHINS D.A., YANG M., LWIZA K., BURNS J., CAPONE D.G., RAVEN J.A., and CARPENTER E.J., 2001. Phosphorus limitation of nitrogen fixation by *Trichodesmium* in the Central Atlantic Ocean. *Nature* 411:66-69.

SIEGEL D., and YODER J., 2007. Community Letter to NASA and NOAA Regarding Concerns over NPOESS Preparatory Project VIIRS Sensor letter to M. Griffin and Adm. Lautenbacher. [Online]. Available: <http://www.spaceref.com/news/viewsr.html?pid=25593>. [2011, June 3].

SROKOSZ M.A., QUARTLY G.D., and BUCK J.J.H., 2004. A possible plankton wave in the Indian Ocean. *Geophysical Research Letters* 31(L13301):1-4.

SUBRAMANIAM A., BROWN C.W., HOOD R.R., CARPENTER E.J., and CAPONE D.G., 2002. Detecting *Trichodesmium* blooms in SeaWiFS imagery. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 49(1-3):107-121.

UITZ J., CLAUSTRE H., MOREL A., and HOOKER S.B., 2006. Vertical distribution of phytoplankton communities in open ocean: An assessment based on surface chlorophyll. *Journal of Geophysical Research* 111(C08005):1-23.

UZ B.M., 2007. What causes the sporadic phytoplankton bloom southeast of Madagascar? *Journal of Geophysical Research* 112(C09010):1-9.

WERDELL P.J., BAILEY S.W., FRANZ B.A., MOREL A., and MCCLAIN C.R., 2007. On-orbit vicarious calibration of ocean color sensors using an ocean surface reflectance model. *Applied Optics* 46(23):5649-5666.

WESTBERRY T.K. and SIEGEL D.A., 2006. Spatial and temporal distribution of *Trichodesmium* blooms in the world's oceans. *Global Biogeochemical Cycles* 20(4):1-14.

WESTBERRY T.K., SIEGEL D.A., and SUBRAMANIAM A., 2005. An improved bio-optical model for the remote sensing of *Trichodesmium* spp. blooms. *Journal of Geophysical Research* 110(C06012):1-11.

WILSON C. and ADAMEC D., 2001. Correlations between surface chlorophyll and sea surface height in the tropical Pacific during the 1997-1999 El Nino-Southern Oscillation event. *Journal of Geophysical Research* 106(C12):31175-31188.

WILSON C., 2003. Late summer chlorophyll blooms in the oligotrophic North Pacific subtropical gyre. *Geophysical Research Letters* 30(18):1-4.

WILSON C., VILLAREAL T.A., MAXIMENKO N., BOGRAD S.J., MONTOYA J.P., and SCHOENBAECHLER C.A., 2008. Biological and physical forcings of late summer chlorophyll blooms at 30°N in the oligotrophic Pacific. *Journal of Marine Systems* 69(3-4):164-176.

<http://aqt.phido.ca/index.php?p=145&l=fr>

<http://aqt.phido.ca/index.php?p=148&l=fr>

http://argonautica.jason.oceanobs.com/html/argonautica/tutorial/sensor_radiometer_optical_fr.html

<http://asterweb.jpl.nasa.gov>

<http://blog.mysciencework.com/2011/06/15/1%E2%80%99oceanographie-une-histoire-de-passion-de-technologies-et-de-plancton.html>

http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-07/010051674.pdf

http://regard-sur-la-terre.over-blog.com/photo-1931875-Algal-bloom---Envisat---Meris---09-04-2011--10h39_jpg.html

<http://science-edu.larc.nasa.gov/SCOOL/Francais/orbits-fr.html>

<http://svs.gsfc.nasa.gov>

<http://topex-www.jpl.nasa.gov>

<http://winds.jpl.nasa.gov>

http://www.cnes.fr/automne_modules_files/standard/public/p7774_9f5e71f0025c698de2ef82085d1c0e20big_3.pdf

http://www.cnes.fr/automne_modules_files/standard/public/p8673_8bc9c85cd0b55871de694493976159611_Terre_environnement_climat_Prospective_du_groupe_Ocean3.pdf

http://www.ec.gc.ca/scitech/4B40916E-16D3-4357-97EB-A6DF7005D1B3/inland_water_f.pdf

http://www.ec.gc.ca/scitech/4B40916E-16D3-4357-97EB-A6DF7005D1B3/inland_water_f.pdf

<http://www.esa.int>

<http://www.eurimage.com>

<http://www.geographie.ens.fr/IMG/file/kegomard/Teledetection/CTeledetection.pdf>

http://www.ioccg.org/sensors_ioccg.html

<http://www.mercator-ocean.fr/fre/>