

Camelia Télédétection de la chlorophylle de surface dans

RD

titut de recherche ur le développem

un système lagonaire tropical:

Validation de données MODIS couleur de l'eau du lagon Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie

Rapport de stage Master 2 Professionnel : Surveillance et Gestion de l'Environnement

> Par Tatiana SAVRANSKI Sous la direction de :Cécile DUPOUY

I.R.D – Centre de Nouméa 101, Promenade Roger Laroque - Anse Vata BP A5-98848 Nouméa Cedex Nouvelle Calédonie

22°S 12 24 36 483 167°E

Période de réalisation: du 22 février au 22 août 2010

166°E

Remerciements

Tout d'abord je remercie Cécile Dupouy pour son encadrement, son aide, sa confiance et son soutien.

Je remercie Jérôme Lefèvre pour son aide et ses conseils.

Je remercie Morgan Mangeas et Marc Despinoy pour leur accueil au sein de l'Unité Espace pendant ce stage et leur aide pour R et leurs conseils précieux en traitement d'images et statistiques.

Robert Frouin pour sa disponibilité et ses conseils pour le rapport.

Robert Le Borgne et Jérôme Lefèvre pour le site web : www.ird.nc/PNEC/Base_donnees/BD.html

La base de données CAMELIA initiée par Renaud Fichez, Sandrine Chifflet, Pascal Douillet et Sylvain Ouillon dès 1997 (webmaster Jérôme Lefevre) résulte de programmes qui se sont succédé au centre IRD de Noumea pilotés par l'équipe ECOTROPE puis CAMELIA (PNRCO 1997-1999 puis PNEC 2000-2002, ACI "Observation de la terre" en 2006, des campagnes océanographiques du CNRS et du Programme ZoNéCo (http://www.ird.nc/PNEC), impliquant tour à tour les UR de l' IRD Ecotrope, Camélia, Cyano, et Coreus, avec l'aide précieuse de l'US 25 (Imago). La base de données satellite résulte d'un projet IRD (DSI Spirales) VALHYSAT démarrée en 2007 et encore en cours en 2010 (Jérôme Lefèvre et SIL Nouméa).

Nous remercions les nombreux participants aux différents programmes, on peut citer Renaud Fichez, Pascal Douillet, Christian Grenz et Sandrine Chifflet, Philippe Gérard, Sylvain Ouillon, Severine Jacquet, Ben Moreton, Jean-Pascal Torreton, Christel Pinazo, Loic Charpy, Vincent Faure, Jacques Neveux, Marcio Tenorio, Christophe Menkes, Stéphane Calmant, etc... ainsi que les Capitaines du CORIS Sam Teretua Miguel Clarke Napoléon Colombani, de l'Alis Raymond Proner et les électroniciens Jean-Yves Panché et Francis Gallois, les Ingénieurs Chimistes Philippe Gérard et Sandrine Chifflet, les Techniciens Alain Lapetite Jean-Pierre Lamoureux. Financements : EC2CO-PNEC Chantier Nouvelle Calédonie, PNTS, CNRS, INSU, NSF-NASA, DSI-Spirales (IRD).

Je remercie le Centre IRD de Nouméa pour l'accueil, et l'ambiance agréable que j'y ai trouvée.

<u>Résumé</u>

L'observation par satellite de la couleur de l'océan, donc de la chlorophylle, est fondamentale pour comprendre les écosystèmes marins et le cycle de carbone, du lagon sud ouest de Nouvelle Calédonie. L'objectif est de valider les mesures satellites par comparaison de la chlorophylle estimée à l'aide des algorithmes OC3 et OC5 par le capteur MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) avec la chlorophylle totale *in-situ*.

La construction d'une base de données issues des différentes campagnes réalisées de 1997 à aujourd'hui a permis la recherche de coïncidences avec les mesures satellites. Plusieurs méthodes d'extraction de coïncidences ont été développées. Deux approches ont été envisagées : l'une globale $(\pm 5 \text{ jours, rayon 4 km, 895 coïncidences})$ et l'autre plus fine (le jour même, rayon 1,5km, 240 coïncidences). L'algorithme OC3 semble le mieux adapté pour notre zone d'étude avec quelques exceptions.

<u>Mots clés</u> : Lagon sud-ouest Nouvelle-Calédonie, Chlorophylle *in-situ*, MODIS, Algorithmes OC3 et OC5, coïncidences

Abstract

The satellite observation of ocean color, chlorophyll, is fundamental to understand marine ecosystems and the carbon cycle, in the southwest lagoon of New Caledonia. The objective is to validate the satellite measurements by comparing the chlorophyll estimated using OC3 and OC5 algorithms for MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) with total chlorophyll *insitu*.

Building a database from the various campaigns conducted between 1997 and today has allowed the search for coincidences with satellite measurements. Several extraction methods for math-ups have been developed. Two approaches were considered: one global (\pm 5 days, 4 km radius, 895 match-ups) and the other finer (the same day, radius 1.5 km, 240 match-ups). The OC3 algorithm seems best suited for our study area with a few exceptions.

Keywords: Southwest lagoon of New Caledonia, *in-situ* Chlorophyll, MODIS, OC3 and OC5 Algorithms, match-ups

I. INTRODUCTION	- 1 -
1.1 Cadre du stage	1 -
1.2 Projet VALHYBIO	1 -
1.3 Projet VALHYSAT-SPIRALES	1 -
1.4 Contexte général du stage	2 -
1.5 Objectifs	3 -
2. MATERIEL ET METHODES	4 -
2.1 Site d'étude: le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie	4 -
2.2 Contexte théorique	5 -
2.3 Base de données <i>in-situ</i>	7 -
2.3.1 Données de terrain	7 -
2.3.2 Elaboration de la base de données in-situ	7 -
2.3.3. Campagne Valhybio Suivi Mensuel (2008)	10 -
2.4 Données satellites	11 -
2.4.1 Données MODIS et leurs traitement	11 -
2.4.2. Architecture de la base satellitale MODIS Spirales VALHYSAT	12 -
2.4.3. Etude de l'influence de la résolution sur la recherche de pixel satellite	12 -
2.4.4 Technique de mesures de la chlorophylle et turbidité	14 -
2.4.4.1 Laboratoire	14 -
2.4.4.2 Les algorithmes SeaWiFS	15 -
2.4.4.3 L'algorithme MODIS	16 -
2.4.4 L'algorithme OC5	16 -
2.4.4.5 L'algorithme Turbidité	17 -
2.5 Développement des scripts	17 -
2.5.1 Approche globale	18 -
2.5.2 Approche plus fine	19 -
2.6 Match-Ups obtenus	21 -
3. RESULTATS ET ANALYSE	23 -
3.1. Approche globale (± 5 jours, un rayon de 4 km, paragraphe 2.5.1)	24 -
3.1.1 Pixel le plus proche	24 -
3.1.2 Moyennes pondérée et filtrée	26 -
3.2. Etude fine (même jour dans un rayon de 1.5 km, paragraphe 2.5.2)	28 -
3.2.1. Pixel le plus proche	28 -
3.2.2 Moyenne arithmétique	30 -
4.CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	32 -
BIBLIOGRAPHIE	34 -
Annexe 1 : Caractéristiques des capteurs	36 -
Annexe 2 : Bandes spectrales de MODIS	36 -
Annexe 3 : Descriptif d'un granule MODIS de la base MODIS DB	36 -

<u>Table des matières</u>

I. INTRODUCTION

1.1 Cadre du stage

Le stage s'est déroulé au sein de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) dans l'unité de Recherche 103, Caractérisation et Modélisation des Echanges dans les Lagons sous Influences terrigènes et Anthropiques (Camélia). En janvier 2010 Camélia a fusionné avec le LOPB (Laboratoire d'Océanographie Physique et Biologique)- Université de Marseille. Le stage rentre dans le cadre de projets financés VALHYBIO PNTS (Programme National de Télédétection Spatiale) et VALHYSAT (DSI-SPIRALES de l'IRD).

1.2 Projet VALHYBIO

Le projet VALHYBIO (2007-2010) (VAlidation HYperspectrale d'un modèle BIOgéochimique) est un Programme National de Télédétection Spatiale (PNTS). Il a pour objectif de déterminer l'impact des forçages sur la distribution de la chlorophylle par comparaison entre les simulations du modèle biogéochimique ECO3M (ECOlogical Mechanistic and Modular Modelling) (Baklouti et al., 2006) couplé au modèle hydrodynamique MARS3D développé par IFREMER (3D Model of Applications at the Regional Scale) adapté au lagon de Nouvelle Calédonie (Douillet et al., 2001) et la chlorophylle extraite des données satellites de la couleur de l'eau (MODIS). Ceci permettra un suivi spatio-temporel de la chlorophylle de surface dans le sud-ouest du lagon de Nouvelle Calédonie (NC). Dans le cadre de ce projet, une campagne en mer a été réalisée en 2008 sur le navire IRD Alis. Les données recueillies sont en cours d'archivage et de validation au SISMER à Brest.

1.3 Projet VALHYSAT-SPIRALES

Le projet VALHYSAT (VALidation HYperspectrale d'une chaine de traitement /fusion de données SATellitales à haute et moyenne résolutions) est le complément du projet VALHYBIO. Il a pour objectif de comparer les données *in-situ* issues du projet VALHYBIO ainsi que les données antérieures de Camélia avec les données satellites de la couleur de l'eau entre 1997 et 2010.

Le projet SPIRALES est un appel d'offre informatique interne d'IRD. Le projet a été accepté le 26 février 2008 et le continuum en 2010. Il permettra la construction de la base de données (B.D) satellites qui vont servir pour le projet VALHYSAT.

1.4 Contexte général du stage

La chlorophylle (C*a*), pigment du phytoplancton, influence la couleur de l'eau de l'océan. C'est un pigment absorbant la lumière dans les longueurs d'ondes rouge et bleue et la transmettant dans le vert, ce qui explique sa couleur. Grâce à la détection de la concentration de la C*a*, il est possible d'estimer la productivité primaire, c'est-à-dire la quantité de carbone intégré par les plantes sous forme de matière organique lors de la photosynthèse chlorophyllienne.

La C*a* permet d'estimer la biomasse du phytoplancton, premier maillon de la chaîne alimentaire marine; des changements dans sa répartition et/ou son abondance peuvent avoir un impact positif (enrichissements) ou négatif (diminution de l'éclairement) sur tout l'écosystème marin. La croissance du phytoplancton nécessite de la lumière solaire, de l'eau, du CO₂ et des nutriments (facteur limitant de la croissance du phytoplancton). Le phytoplancton produit l'oxygène en utilisant le CO₂ dissous dans l'eau (photosynthèse: $6CO_2 + 12H_2O +$ lumière $\rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O$). Plus les concentrations en phytoplancton sont élevées dans la couche éclairée, plus grande sera l'absorption du CO₂.

Les chercheurs du LOPB (futur MIO, Marseille Institut Océanographique) au sein de l'IRD Nouméa ont développé des modèles physiques et biogéochimiques du fonctionnement de l'écosystème du lagon sud-ouest de NC. Le modèle utilisé (Douillet et al., 2001) actuellement prend en compte le vent, la marée, la bathymétrie, la température et calcule l'élévation de surface, les coefficients de diffusion et les champs de courants. Il prend en compte les apports fluviaux et anthropiques, les échanges océan-atmosphère et l'évolution de la matière inorganique, la population biologique, leur physiologie (Baklouti et al., 2004 ; Faure et al., 2010).

La Ca est la principale variable utilisée pour la validation des modèles biogéochimiques, lorsqu'elle est estimée avec précision et est le principal paramètre pouvant être « détecté depuis l'espace ». Le modèle est validé par les mesures satellitales et *in-situ* de la Ca de surface (Valhybio) ; cette correction du modèle par les données satellitales est appelée technique d'assimilation (*cf: Technique de mesure de la chlorophylle*). Cependant, il présente certaines limites. Selon Dupouy et al., 2010, la Ca est raisonnablement calculée à partir d'une profondeur de plus de 20m. Cependant, en zone côtière, l'estimation par satellite apparaît plus complexe et imprécise et nécessite des algorithmes spécifiques.

Dans les zones côtières, les propriétés optiques inhérentes (IOP) des eaux sont fortement influencées par la proximité des fonds. La réflectance du fond peut influencer les valeurs de Rrs (sr⁻¹) (Remote Sensing Reflectance- la détection de la réflexion de l'océan à distance) (*cf* : *Contexte théorique*). Pour une mesure correcte de la *Ca* de surface dans un lagon peu turbide et peu profond par un satellite, il faut s'affranchir de la réflexion des fonds marins qui perturbe les mesures (Minghelli-Roman et al., 2010). Les fonds sédimentaires du lagon sont classés en trois types :

• Les fonds envasés, situés près des côtes et dans les canyons.

- Les fonds gris, qui couvrent la zone intermédiaire et sont constitués d'un sédiment hétérogène.
- Les fonds de sable blanc, situés dans la zone arrière du récif barrière.

Les IOP des eaux sont aussi influencées par la présence de particules d'origine terrigène ou/et anthropique. A l'aide des mesures *in-situ*, il a été montré que la chlorophylle n'est pas homogène dans le lagon. Cette hétérogénéité n'est pas prise en compte pour l'instant par le modèle.

1.5 Objectifs

L'objectif est la validation des mesures satellitaires à l'aide des mesures *in-situ* (Bailey et Werdell, 2006 ; Murakami et al., 2006). En comparant et analysant des données, en comprenant les raisons pour lesquelles les mesures satellites ne sont pas corrélées avec les mesures *in-situ*, de nouveaux paramètres (forçages de modèles) seront intégrés dans le modèle afin de l'améliorer. Pour obtenir un modèle optimal, qui soit validé par les satellites, il faut d'abord s'assurer que les données satellitaires soient compatibles avec les données de terrains. Les donnés *in-situ* sont considérées comme « la vérité terrain », bien qu'étant rarement le cas (erreurs humaines, instruments...). Le but est d'avoir confiance dans les mesures satellitaires pour aboutir à l'océanographie opérationnelle de la couleur de l'eau. Les mesures satellitaires sont le seul moyen d'obtenir une description répétitive de la biomasse du phytoplancton et de son évolution temporelle (Dupouy et al., 2010).

Les buts de ce travail sont :

- D'abord, une construction de B.D *in-situ* homogène regroupant un maximum de mesures et sa description statistique.
- La recherche de coïncidences, « match-ups », entre les mesures satellite et *in-situ*.
 Préparation des fichiers finals qui regroupent tous les résultats de « match-ups ».
- 3) Tester différents produits de MODIS (*cf* : *Données MODIS et leurs traitement*)
- 4) La comparaison entre la chlorophylle totale *in-situ* (Tchl *a*) et la chlorophylle estimée à l'aide des algorithmes OC3 et OC5 issus des mesures satellite (*cf: Algorithmes MODIS*). La comparaison est effectuée selon plusieurs méthodes. (*cf : Devellopement de scripts*)
- 5) Tester statistiquement les problèmes de comparaison spatiale et temporelle satellites/*in situ*.

La connaissance de la répartition et des variations spatio-temporelles de la chlorophylle est cruciale pour comprendre les écosystèmes marins et le cycle océanique du carbone. La méthodologie employée est d'écrire des scripts sous le logiciel R. Ces scripts vont servir de base et vont préparer les fichiers qui seront utilisés pour la suite du stage pour une analyse plus complète.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1 Site d'étude: le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie

La NC est située entre 18° et 23° Sud, et 164° et 167° Est. Son lagon est l'un des plus grands du monde. Il est quasiment fermé par un récif corallien d'une longueur de 1600 km qui délimite un lagon de 24 000 km² d'une profondeur moyenne de 25 m. Les récifs se trouvent à des distances variant entre 1 km (au nord et à l'est) à plus de 30 km de la côte dans le lagon sud ouest (La profondeur moyenne du lagon sud-ouest est de 15 mètres).



Figure 1 : Les quatre stations

Les eaux environnantes de l'océan Pacifique sont « oligotrophes », en raison d'une stratification permanente de la colonne d'eau sous l'influence du réchauffement (thermocline entre 80 et 100 mètres) comparé aux autres océans (Antoine et al., 2006). A l'intérieur du lagon, le renouvellement rapide des eaux lagonaires par des apports d'eaux océaniques oligotrophes est soumis à l'influence du vent (Jouon et al., 2008). Ce lagon oligotrophe (Tchl $a \le 0.1 \text{ mg m}^{-3}$) à mésotrophe ($0.1 < \text{Tchl } a \le 1 \text{ mg m}^{-3}$) est situé dans la zone tropicale (Jacquet et al., 2006 ; Neveux et al., 2009). C'est un site d'étude spécialement intéressant et original qui nécessite une approche particulière adaptés aux conditions spécifiques du lagon.

La C*a* de surface varie principalement en fonction des conditions environnementales, des apports anthropiques et des apports terrigènes). Le lagon est soumis aux apports de nutriments anthropiques (l'usine de nickel et etc.) et d'effluents urbains. Il est soumis aux apports terrigènes principalement par trois rivières (la rivière Dumbéa, la rivière Coulée et la rivière des Pirogues). L'apport de nutriments par des rivières est faible sauf pendant les événements de forte pluie.

Pendant l'été austral (janvier - février) les valeurs de la chlorophylle sont plus élevées au cours de bloom de Trichodesmium (cyanobactéries marines qui utilisent l'azote d'origine atmosphérique) (Dupouy et al., 2008). Le lagon est influencé par les phénomènes climatiques El Nino et La Nina. Durant les phases El Niño (La Niña), les déplacements vers l'Est (Ouest) des eaux chaudes équatoriales modifient la localisation des zones de convergence atmosphérique ZCIT. Pour cela, durant El Niño, en NC, les précipitations ont tendance à diminuer et à augmenter durant la Niña. Pendant La Niña, il y a plus d'apport par les rivières qui rejettent plus de nutriments dans le lagon ce qui augmente la chlorophylle de la surface (Dupouy et al., 2010).

La circulation des eaux du lagon est contrôlée par le vent. (Douillet et al., 2001). Les alizés (70% de l'année) entraînent une entrée d'eau importante par le sud-ouest du lagon et poussent les eaux du lagon vers le Nord-Ouest. La concentration de chlorophylle est en relation avec la température de surface de l'eau (TSM) et souvent une forte concentration de chlorophylle est liée à une baisse de TSM.

De manière générale, les facteurs qui influencent la Ca de surface ne sont pas quantifiés avec précision, d'où l'intérêt d'utiliser la télédétection couleur de l'eau et d'effectuer des mesures soit sur une maille régulière (campagne de 3 semaines) soit par un suivi mensuel de quelques stations choisies (cf : Campagne Valhybio Suivi Mensuel).

2.2 Contexte théorique

La lumière en provenance du soleil est atténuée par l'atmosphère avant d'atteindre la surface de l'eau, soit un peu plus que le dixième du rayonnement initial. Dans le milieu marin, la lumière subit d'importantes modifications : l'absorption par l'eau et par les substances dissoutes ou en suspension, qui transforme la lumière en chaleur et la diffusion. La diffusion moléculaire et surtout la diffusion par les particules en suspension, qui disperse le rayonnement dans toutes les directions. Sous la surface de l'eau l'atténuation est considérable et due essentiellement à l'absorption.

Les eaux de mer peuvent être divisées en deux catégories :

- Cas 1 (Morel, 1977), Les eaux du large, non affectées par les apports fluviaux et plus généralement par toute influence de la côte ou du fond. En eau profonde, lorsque l'on regarde sous l'eau, la lumière que l'on voit est celle diffusée par les molécules d'eau. La diffusion étant plus importante pour les petites longueurs d'onde (bleu) que pour les grandes longueurs d'onde, l'eau parait bleue.
- Cas 2 Les eaux côtières n'ont pas les mêmes propriétés optiques que les eaux du large. Des matières en suspension (MES) ou des « substances jaunes » (CDOM) provenant du lessivage des terres ont une incidence sur la réflectance. Dans ces régions où la productivité biologique est importante, la chlorophylle contenue dans le phytoplancton absorbe la composante bleue et la lumière se décale vers le vert.

La télédétection de la couleur des océans se fonde sur la détection de signal lumineux qu'émet (réflexion et rétrodiffusion) la surface de l'eau et atteint un capteur à bord d'un satellite. Le signal emporte avec lui des informations sur les IOP, donne des informations quantitatives sur la teneur en éléments organiques et autres MES des couches de surface. Nous utilisons des données optiques de la couleur de l'eau pour examiner les relations entre les IOP et la chlorophylle de surface de l'eau.

Les mesures depuis les satellites fournissent des valeurs de luminances normalisées qui quitte l'eau $nL_w(\lambda)$ (radiances) exprimées en mW.cm⁻².µm⁻¹sr⁻¹.

$$nL_{w}(\lambda) = f_{0}(\lambda) (\rho_{w}(\lambda) / \pi) \quad \text{avec}: \qquad (Eq. 1)$$

- $\rho_w(\lambda)$ réflectance qui sort de la mer, est le rapport entre l'éclairement ascendant qui émerge juste sous la surface de l'eau $E_u(\lambda)$, à l'éclairement descendant $E_d(\lambda)$. $\rho_w(\lambda) = E_u(\lambda)/E_d(\lambda)$
- $f_0(\lambda) l$ 'éclairement solaire moyenne (irradiance) exprimée en W.cm⁻².µm⁻¹

Les valeurs de f₀ sont différentes selon le capteur et selon la longueur d'onde. Elles sont fournies avec les données. Pour les canaux MODIS les valeurs sont : $\lambda(412) \rightarrow 171.181$; $\lambda(443) \rightarrow 188.754$; $\lambda(488) \rightarrow 194.178$; $\lambda(531) \rightarrow 185.944$; $\lambda(555) \rightarrow 183.756$; $\lambda(667) \rightarrow 152.438$.

Les L_w pour chaque longueur d'onde visible par satellite, sont les radiances remontantes, du fond vers la surface et qui rétrodiffusées hors de l'eau se propagent ensuite dans la partie supérieure de l'atmosphère. Elles contiennent des informations sur les IOP (substances dissoutes, l'absorption de particules etc..). La concentration de chlorophylle est déduite.

Ce capteur mesure le signal de radiance avec trois résolutions : 250 m^2 (bandes 1,2) 500 m² (bandes 3 à 7) et 1 km² (bandes 8 à 36). (*c f : annexe 2 : Bandes spectrales de MODIS*)

Les Rrs sont égales à la luminance divisée par l'éclairement solaire incident. Ils sont liés aussi au coefficient d'absorption ($a \text{ m}^{-1}$) (Eq. 2), et au coefficient de rétrodiffusion ($b_b \text{ m}^{-1}$) (Eq. 3) qui redirige les photons qui plongent vers le haut et finissent par quitter la surface de l'eau. Quand les photons qui vont vers le haut sortent de l'eau, ils interagissent avec l'interface air- eau par la réfraction et la réflexion interne. Par conséquence Rrs peut être lié à b_b et à a (Eq. 5).

• Le coefficient d'absorption est le rapport du flux radiatif perdu par absorption sur le flux radiatif incident par unité de longueur :

$$a(\lambda) = a_{w}(\lambda) + a_{y}(\lambda) + a_{phy}(\lambda) + a_{d}(\lambda) + \dots$$
 (Eq. 2)

Tous les coefficients sont mesurés de façon *in-situ* (*cf* : *Technique de mesures de la chlorophylle et turbidité*), sauf le coefficient a_w qui est déterminé selon Morel et Maritorena (2001).

Le coefficient de rétrodiffusion est la partie de la diffusion qui retourne vers l'arrière (mesurée à 140° par l'Hydroscat-6).

$$b_{\rm b}(\lambda) = b_{\rm bw}(\lambda) + b_{\rm by}(\lambda) + b_{\rm bp}(\lambda) + b_{\rm bphy}(\lambda) + b_{\rm bd}(\lambda) + \dots$$
(Eq. 3)

w-eau de mer y-CDOM p-MOP phy-phytoplancton d-matière détritique (Morel, 1988 ; Bricaud et al. 1998)

La diffusion s'exprime par :

$$b(\lambda) = b_{\rm b}(\lambda) + b_{\rm f}(\lambda)$$
 (Eq. 4)

b-backward (vers l'arrière) et f - forward (vers l'avant)

Il existe deux façons à obtenir les Rrs : directement *in-situ* par un spectroradiomètre et modélisé à partir des mesures a et b_b *in-situ* (Eq.2 et Eq. 3).

Les mesures *in-situ* se font à l'aide du radiomètre TriOS (Optical Sensors) ou Ocean Optics. Quand ces mesures ne sont pas possibles, elles sont calculées comme ci-dessous :

$$Model(Rrs) = 0.564 \left[g1\left(\frac{b_{b}}{a+b_{b}}\right) + g2\left(\frac{b_{b}}{a+b_{b}}\right)^{2} \right]$$
(Eq. 5)

avec : $a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_p(\lambda)$; g1 et g2 sont des constantes (0.0949 et 0.0794, respectivement (Gordon et al., 1988)). La constante 0.564 signifie la transmission du signal entre l'interface mer-air (Froidefond et Ouillon, 2005).

2.3 Base de données in-situ

2.3.1 Données de terrain

La collecte de données de terrain est l'étape cruciale, ces données vont servir de référence pour l'analyse. Pour cela il est important d'utiliser des appareils de mesures bien calibrés pour avoir des données correctes. Les instruments qui sont utilisés sont :

- La CTD (Conductivity Temperature Depth) est une sonde qui permet de mesurer à l'aide de capteurs dans la colonne d'eau les différents paramètres physico-chimiques. Les paramètres sont la température, la conductivité (dont la salinité est déduite), la turbidité, l'oxygène dissous, la quantité de chlorophylle, l'éclairement disponible pour la photosynthèse, etc.
- Les bouteilles Niskin pour le prélèvement d'eau à la profondeur souhaitée. Après filtration de l'eau de mer, elles permettent de déterminer la chlorophylle (Tchl *a*) et le coefficient d'absorption, etc....
- L' Hydroscat-6 (Hobilabs) mesure des profils de rétrodiffusion aux mêmes longueurs d'onde que le satellite (442, 488, 510, 550, 620 et 670 nm => choisies pour correspondre aux canaux de SeaWiFS (Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor)).

Les coefficients de rétrodiffusion et d'absorption sont utilisés pour le calcul de Rrs quand les mesures *in-situ* ne sont pas disponibles (pas de spectroradiomètres *in-situ*).

2.3.2 Elaboration de la base de données in-situ

Notre travail a consisté à récupérer l'ensemble des données optiques et les données de chlorophylles récoltées dans le lagon de NC et d'en constituer une base homogène. En effet, il existait de nombreuses sous-bases pas forcement harmonisées du point de vue méthodes et stockage qu'il a fallu regrouper.

L'unité de recherche Camélia, possède une B.D CTD / CHIMIE / BIOLOGIE. La base rassemble sous forme de tables Access les enregistrements de surveillance des lagons sud-ouest de NC (années 1997 à 2006). La base que nous avons formée est une B.D rassemblant toutes les données *in-situ* issues des différentes campagnes de 1997 à aujourd'hui et créée sous Excel (Tab. 1). La base totale est composée des données 1997-2006 déjà archivées sous Access, et également de données d'autres campagnes réalisées aux mêmes périodes mais non encore archivées sous Access (TOPAZE, Transits sur bateaux d'opportunité ,Alis) provenant de plusieurs programmes financés par des appels d'offre nationaux dans le cadre du programme national d'Environnement Côtier (actuel EC2CO), ou telles les campagnes Diapalis 1-9 (2001-2003) dont certaines stations étaient réalisées dans le lagon, et enfin des campagnes postérieures couvrant des zones plus étendues résultant, Bissecote (2006) (ACI Ministère),Echolag (2007) (CNRS), Valhybio (2008) et suivi mensuel Coris.

Campagnes	Période	Zone d'étude
Suivi Camélia et Camecal 1	21/10/1997 - 27/06/2003	Lagon Sud Ouest
Diapalis (1-9)	23/10/2001 - 15/10/2003	Chenal des Loyauté / Lagon Ouinne
Topaze 1-29	26/04/2001 - 26/01/2004	Lagon sud ouest
Charpy	01/04/2003 - 10/04/2003	Lagon sud ouest
Timeseries	12/12/2001 - 22/04/2003	Lagon sud ouest
Camecal 5	19/06/2003 - 24/06/2003	Lagon Sud ouest
Transects	04/05/2002 - 29/02/2004	Lagon sud ouest
Radiale Sud 1et Nord 1	21/06/2003 - 07/08/2003	Lagon sud ouest
Radiale Sud 2et Nord 2	09/11/2004 - 09/12/2004	Lagon sud ouest
Bissecote	01/02/2006 - 14/02/2006	Lagon sud ouest
Echolag	14/02/2007 - 05/03/2007	Grand Lagon Sud
Zonalis	02/03/2008 - 14/03/2008	Sud Nouvelle Calédonie
Valhybio	22/03/2008 - 08/04/2008	LSO et GLS, stations au large
ValhybioSM	27/04/2008 - 21/07/10	Lagon et station OC1 au large

<u>Tableau 1</u>: Les campagnes réalisées, stockées dans la BASE CAMELIA Access depuis 1997 jusqu'à 2006, et non encore stockées sous Access (2006-2010)

La base a été homogénéisée et classée par campagne. A l'intérieur de chaque campagne, les données sont classées par ordre chronologique. Chaque mesure possède un ID, un nom, une date, la position en longitude et latitude, la Tchl a et un indice (1 ou 2) indiquant si les données optiques de reflectances (a, b_b , Rrs - en différents longueurs d'onde) existent ou non, et la bathymétrie *in-situ*.

Certaines mesures ont en plus une information sur l'heure de mesure, les conditions atmosphériques. Un travail d'homogéïsation et de complémentation se poursuit. Cette base présente certaines imperfections pour la comparaison avec les données satellites (une par jour). Pour améliorer la recherche des coïncidences, quelques changements ont été effectués:

• <u>Une date, une station, plusieurs mesures à heures différentes</u>

L'objectif de certaines campagnes, par exemple Diapalis a été d'étudier le spectre d'absorption ou les variations de concentrations en pigments journaliers. Le satellite passant vers 14h00, heure locale, seules les mesures les plus proches de cette heure là ont été retenues.

• Une date, une station, deux façons de mesurer

Toutes les stations qui ont des mesures de a et b_b permettent le calcul des Rrs par Eq. 5. Certaines stations ont également des mesures réelles avec des spectroradiomètres hyperspectraux « Ocean Optics » et « TRIOS » car l'objectif de Bissecotte, a été de justement comparer les reflectances Rrs. Il existe donc plusieurs stations qui ont deux jeux de spectres de Rrs. Dans ce cas, nous avons choisi les mesures calculées de façon à harmoniser la base, ne conservant les mesures réelles que dans le cas où il n'existe pas de valeurs mesurées de a et b_b (cas unique de la campagne Ocean Optics). L'essentiel de la base contient donc les valeurs calculées de Rrs,

• Une date, plusieurs stations très proches

L'objectif de certaines campagnes, par exemple Bissecote, a été d'étudier la variabilité des Rrs autour d'un îlot. Pour évaluer l'influence de la bathymétrie (très faible et variant rapidement en 100 mètres), nous avons échantillonné des séries volontairement très proches. Pour le satellite, la position géographique en longitude et latitude est considérée la même après le troisième chiffre après la virgule (précision de 100 m). De façon à minimiser ces problèmes de très petites bathymétries, la station *in-situ* avec la bathymétrie la plus grande et la plus proche des mesures SHOM (Service Hydrographique de la Marine) est choisie.

Campagne	NB mesures 1997-2010	NB jours uniques 1997-2010	NB stations uniques 1997-2010	NB mesures 2002-2010	NB jours uniques 2002-2010	NB stations uniques 2002-2010
Suivi Camelia	1040	132	134	369	50	86
Diapalis	72	48	70	32	21	30
Topaze	58	19	32	36	10	24
Charpy	12	7	9	12	7	9
Timeseries	55	28	2	30	15	2
Camecal5	71	6	71	71	6	71
Transects	82	27	82	75	24	75
Radiale Sud1	32	4	8	32	4	8
Radiale Sud2	23	3	10	23	3	10
Radiale Nord1	40	4	10	40	4	10
Radiale Nord2	30	3	11	30	3	11
Bissecote	93	12	68	93	12	68
Echolag	86	10	33	86	10	33
Zonalis	46	13	46	46	13	46
Valhybio	101	17	53	101	17	53
ValhybioSM	157	39	30	157	39	30
Totale	1998	349	428	1233	219	361

<u>Tableau 2</u>: Données in-situ de 1997 à aujourd'hui et l'extrait de ces données de 2002 à aujourd'hui, noms des campagnes, nombre des mesures, nombre de jours de réalisation de chaque campagne et nombre de stations mesurées

Le tableau 2, colonne de gauche, résume la B.D totale *in-situ* et correspond – aux campagnes, aux nombre de jours et au nombre de stations réalisées de 1997 à aujourd'hui avec les restrictions décrites plus haut (pour rappel, une seule heure par jour...). Elle est composée de 1998

mesures. Il y a 428 stations différentes (une station peut être mesurée au cours de plusieurs campagnes) et 349 jours de mesures uniques. Nous ne disposons d'images MODIS que depuis le 4 juillet 2002. Nous avons sélectionné les données *in-situ* à partir de cette date (colonnes de droite). Au total depuis 2002, il y a 1233 mesures qui correspondent à 361 stations et 219 jours différents. Seule la partie 2002-2010 sera considérée dans ce rapport, les données SeaWIFS seront exploitées ultérieurement avec les mêmes logiciels R.

2.3.3. Campagne Valhybio Suivi Mensuel (2008)

Depuis 2008, l'équipe de Cécile Dupouy, fait une sortie en mer tous les mois. Elle réalise une prise de mesures *in-situ* à cinq stations différentes (Fig. 1) se distinguant par la couleur de leur fond et leur bathymétrie Ce suivi mensuel va permettre d'enrichir la B.D et d'apprécier la variabilité saisonnière. Les mesures effectuées à bord sont les suivantes : réalisation d'un profil CTD, d'un profil Hydroscat-6, prélèvement de l'eau avec la bouteille Niskin. Lorsque la profondeur est importante le disque Secchi est descendu pour le calcul de visibilité. Les 4 stations sont :

- OC1 (166,2505 ; -22,4018) : A 4 kilomètres au large de la passe de Dumbéa. C'est un point de référence puisque situé au large dans l'océan, une zone où l'algorithme OC3 du satellite fonctionne de façon plus exacte que dans une zone côtière.
- G003 (166,339; -22,334): Aux récifs Crouy, dans le lagon avant le récif. Fond de type sable blanc.
- M33 (166,3905 ; -22,3538) : Au milieu du lagon, à proximité de l'ilot Maitre. Le milieu de lagon à faible temps de résidence, soumis aux apports du large et à bathymétrie variable avec un fond de type sable gris.
- G10 (166,3667 ; -22,2287) : En baie de Dumbéa soumise aux rejets miniers et peu profonde. Les baies à fort temps de résidence où les concentrations en chlorophylle sont statistiquement les plus élevées avec un fond vaseux typique des baies.
- Ilot Canard (166,434 ; -22,312) (3 mètres), depuis décembre 2009, en collaboration avec Aline Tribollet, (biodiversité du corail).

Trois stations dans la Baie de Boulari sont visitées de façon occasionnelle afin d'apprécier l'impact de la rivière La Coulée chargée de minerai latéritique orange (B50, B03 et B08) (Fig . 17 a,b). Elles permettent d'obtenir des données de turbidité et de chlorophylle d'un facteur supérieur à celles du lagon. Dans l'avenir, les mesures *in-situ* vont continuer. Dans le cadre de GOPS, il est prévu d'installer plusieurs bouées qui vont mesurer automatiquement les paramètres physico-chimiques.

2.4 Données satellites

2.4.1 Données MODIS et leurs traitement

Les données satellite avec lesquelles nous travaillons sont issues du capteur MODIS-AQUA (04/07/2002 – aujourd'hui) (*cf : annexe 1 : Caractéristiques des capteurs*). Elles sont placées dans la base locale « MODIS_DB ».

Il existe deux types de données :

MOD – issues de capteur TERRA, pour l'observation de la terre

MYD – issues de capteur AQUA, pour l'observation de l'océan.

Les scènes MODIS de niveau 1B (L1B - données calibrées et après correction atmosphérique) sont appelées "granules" et chaque granule contient les radiances collectées pendant 5 minutes. Nous extrayons une zone de 164.5E à 169 E et de 24.5S à 19.5S. Chaque granule a une clé d'identification (granule_id) de la scène MODIS, des métadonnées et des positions latitude/longitude des 4 coins de la scène. (*cf Annexe 3 : Descriptif d'un granule MODIS*). Les produits niveaux 2 (L2) sont générés à partir des fichiers L1B en utilisant MSL12 (Multi Sensor L1 à L2). Cette opération est effectuée à l'aide du logiciel SeaDAS (SeaWiFS Data Analysis System, logiciel complet pour le traitement d'image satellites et la production de produits dérivés) (Baith et al., 2001 ; McClain et al., 2004) et aboutit après correction atmosphérique à des réflectances marines calibrées directement comparables aux mesures ou aux calculs.

Les fichiers L2 au format HDF (Hierarchical Data Format), contiennent : nL_w , SST (Surface Sea Temperature), les produits OC3, OC5 et l'information sur l'angle de prise de l'image, les types d'aérosols, les flags (information sur la qualité de données), les réflectances etc. Chaque pixel a des cordonnées en longitude et latitude. La position correspond au milieu du pixel. Chaque pixel de satellite contient toutes les informations moyennées dans la résolution du pixel.

Masques contenus dans le produit L2 :

Les produits L2 que nous récupérons sont déjà calibrés. Ils nous parviennent avec des corrections atmosphériques et la terre est masquée. Les flags sont utilisés pour identifier des pixels masqués (Franz, 2005). La valeur manquante est égale à -15.534 (pour Rrs) et à -99 (pour OC3 et OC5). Ce masque a été conçu pour être utilisé dans toutes les régions du globe. Nous avons ajouté un masque plus adapté à notre zone d'étude.

Construction du masque dans la base MODIS_DB :

Les produits L2 sont fournis avec 32 masques (flags) pour chaque pixel. Avec SeaDAS, il a été possible de tester ces masques. Si nous employons tous les masques, nous n'aurions pratiquement pas de données exploitables. Toutefois, certains masques englobent les autres. Le but est de combiner les masques les plus importants. Nous avons choisi les masques suivants : GLINT, HIZEN,

TURB, CLOUD, LAND, BATHY, TOA, STRAY LIGTH et ICE. Le masque a une valeur 1 (la valeur est bonne) ou 0 (la valeur n'est pas bonne). Ce masque n'est pas parfait, il est possible qu'il soit égal à 1 pour une valeur manquante. Pour certaines observations, le masque est égal à zéro, mais la valeur est correcte.

2.4.2. Architecture de la base satellitale MODIS Spirales VALHYSAT

J. LEFEVRE a développé sous PosgreSQL (PostgreSQL est un système de gestion de base de données relationnelle) une B.D locale au centre IRD de Nouméa « MODIS_DB ». Elle permet l'archivage des toutes les scènes MODIS au format HDF recoupant la NC, ce qui correspond à 9228 fichiers. Le nom de chaque fichier correspond à un jour julien. Cette B.D est une base élaborée à partir de la B.D de la NASA, permettant une recherche en ligne au site: *http://modis.gsfc.nasa.gov/*.

La diffusion des produits L2, sont extraits via le service de catalogage THREDDS (Thematic Realtime Environmental Distributed Data Services) sous le serveur OPeNDAP (Open – source Project for a Network Data Access Protocol). OPeNDAP est un logiciel libre permettant à un utilisateur d'accéder à des données via HTTP. Il est basé sur une architecture de type client-serveur dans laquelle le client adresse des requêtes au serveur Opendap lui permettant de ne télécharger que les données qui l'intéressent.

Dans le catalogue THREDDS il y a environ 50% moins de fichiers qu'en « MODIS_DB ». En effet, la zone du lagon sud-ouest présente une couverture nuageuse importante qui affecte le signal issu de l'océan. L'image présentant plus 50% de nuages n'est pas intégrée dans le catalogue. MODIS fournit des produits avec des résolutions différentes. Dans le catalogue à IRD Nouméa, il existe différents types de fichiers qui ont été testés:

- 1. Produits à 250 m², grille non régulière
- 2. Produits à 1 km², grille non régulière
- 3. Produits à 1 km², grille régulière
- 4. Produits à 500 m², grille régulière

2.4.3. Etude de l'influence de la résolution sur la recherche de pixel satellite

Les quatre types de fichiers satellites MODIS correspondant à quatre résolutions différentes. Ils ont été testés afin de choisir les types de données les mieux adaptées pour comparer aux données *insitu*.

D'abord, nous avons cherché les « match-ups » (Tab. 3) à l'aide des commandes sous le logiciel R (*cf : Développement de scripts*) et nous avons testé les différentes résolutions pour ces coïncidences.

1. Produits à 250 m², grille non régulière

Cette résolution n'existe pas avec les bandes utiles pour l'observation de la couleur de l'eau. Pour extrapoler cette résolution, nous allons appliquer une technique « sharpening » (Bryan et al., 2002) : avec l'aide du logiciel SeaDAS qui utilise à la fois les quatre fichiers (250 m² (QKM), 500m² (HKM), 1km² (1KM) et géo-localisation) sont combinés en un seul. L'image obtenue est le produit dérivé L2 en 250m² de résolution.

Pour cette résolution, la grille n'est pas régulière, c'est-à-dire que chaque granule est différent. La grille dépend surtout de l'angle avec lequel l'image est prise et de l'endroit à partir duquel l'image est prise. La taille de l'image est très grande puisqu'on crée 4 pixels au lieu d'un, donc la récupération de données est longue. Cette technique est expérimentale, il est possible qu'elle introduise des erreurs dans les données. Nous décidons de ne pas utiliser cette résolution pour l'analyse globale.

2. Produits à 1 km² et 500 m², grille régulière

L'image de 1 km² avec les bandes spectrales qui nous intéressent est récupérée directement sur le site NASA et mis sur OpenDap et donc accessible. SeaDAS permet l'interpolation des données sur la grille régulière, c'est-à-dire que toutes les images ont la même taille, les points ont la même longitude et latitude. Pour obtenir une image de 500 m², nous doublons des pixels voisins. Nous cherchons les longitudes et latitude de l'image la plus proche de la position *in-situ*.

Lorsqu'on interpole les données sur la grille régulière, il est possible que l'on prenne aussi les valeurs masquées. Pour l'image de 500 m², la variance entre les données est petite, mais cela ne correspond pas à la réalité. Pour cette raison, les données obtenues ne seront pas comparées aux données *in-situ*.

3. Produits à 1 km² grille non régulière

Comme recommandé par Bailey et Werdell, 2006, le travail de comparaison doit être le plus précis possible, et doit être le plus proche de la situation réelle. Afin que la résolution initiale du satellite soit conservée, les produits de résolution 1 km grille non régulière seront utilisés pour notre étude.

Pour ne pas perdre la résolution spatiale via OPeNDAP, nous récupérons toutes les longitudes et latitudes de l'image. A chaque pixel, la chaîne de traitement a ajouté une donnée de bathymétrie que nous récupérons également. Ces profondeurs sont des mesures *in-situ* provenant des campagnes réalisées par SHOM et interpolées sur la grille MODIS (J. Lefevre). Ces données de bathymétrie seront utiles pour le choix du pixel pour la comparaison.

La grille non régulière change selon l'image (Fig. 2). Le nombre de pixels n'est pas le même, la distance entre les points des grilles n'est pas exactement 1 km. L'image dépend de la prise de vue par le satellite. L'image prise en nadir est plus exacte, la distance entre les points de grille sera plus proche d'1 km. Il est possible que la même station *in-situ* n'ait pas la même position satellite d'une scène à l'autre. Le point rouge correspond à la station *in-situ*, le point en mauve à la mesure satellite. Il n'existe pas toujours de mesures satellites correspondant exactement aux longitudes latitudes du

point de mesure. Sur la figure **2 a** les pixels sont réguliers, il y a très peu de pixels flagués par le masque que nous avons défini. Il est possible de calculer la moyenne pondérée (MP). (*cf* : *Développement des scripts*). Sur la figure **2 b** il y a moins de pixels (24). Les vides sont des valeurs masquées qui sont fournies avec l'image (produits L2). Ces vides peuvent correspondre aux nuages ou à un autre problème de correction atmosphérique. Ce n'est pas suffisant pour calculer la MP.



<u>Figure 2</u>: a) La grille non régulière, prise de vue au nadir pour la station OC1, jour julien 2003083. b) La grille non régulière, prise avec un certain angle pour la station OC1, jour julien 2003038. Les points gris correspondent aux pixels non masqués, les points noirs aux pixels masqués.

Pour tester les différentes résolutions (3 résolutions), des scripts ont été écrit.

2.4.4 Technique de mesures de la chlorophylle et turbidité

Evaluation de la chlorophylle de surface par l'analyse laboratoire. Ces techniques permettent d'obtenir la Ca et la Tchl a. La chlorophylle OC3 satellite et la chlorophylle OC5 satellite sont comparées avec ces données.

2.4.4.1 Laboratoire

Après chaque sortie en mer, il faut prélever l'eau pour les sels nutritifs (NO₃⁻, Phosphates, Si...) et faire la filtration de l'eau pour obtenir : la Ca et les phéo-pigments, l'absorption, le carbone, l'hydrogène, l'azote, le poids sec, et le CDOM. Pour chaque élément, différentes filtrations (volumes, taille de filtre) sont effectuées. Les filtres sont ensuite placés en chambre froide ou à -80°C. Le dosage de la chlorophylle se fait par la fluorescence simple: éclairée par une lumière bleue, la chlorophylle émet une lumière rouge qu'on peut mesurer avec un fluorimètre, après avoir éliminé la lumière bleue réfléchie au moyen d'un filtre approprié. La quantité de lumière rouge émise est proportionnelle à la concentration en chlorophylle. On obtient également les « phéopigments », pigments de dégradation de la Ca et dans ce cas, on a Tchl a = Ca + phéopigments. Il peut aussi se faire par spectrofluorométrie, analyse du spectre 3D d'excitation et d'émission. Notez que par spectrofluorométrie, les « pheopigments » sont en fait la « divinyl-chl a ». Dans ce cas, on a Tchl a =

Ca + dv-Chl *a*. Les Tchl *a* obtenus par fluoro- et par spectrofluorométrie sont équivalentes (« Tchl »). Les scripts R permettent de comparer soit avec Tchl *a*, soit avec la seule C*a*. On considère que la précision des mesures de Tchl *a in-situ* est de 30% (protocole MODIS NASA)

D'autres échantillons obtenus après filtration d'eau de mer permettent de déterminer le coefficient d'absorption : un spectrophotomètre mesure la densité optique, directement proportionnelle à la quantité de matière retenue sur le filtre et à l'absorption. Avec ce coefficient d'absorption et avec le coefficient de rétrodiffusion mesuré par le profileur Hydroscat-6 (HobiLabs), nous calculons les Rrs (Eq. 5). Notons qu'à partir des Rrs *in-situ*, nous pouvons calculer une « chlorophylle OC3 *in-situ* » (voir plus loin, Eq. 7, paragraphe 2.4.4.3)

2.4.4.2 Les algorithmes SeaWiFS

O'Reilly et al. (1998 ; 2000) ont décrit les algorithmes OC2 (Océan Chlorophylle 2) et OC4 empiriques pour le capteur SeaWiFS (Seaviewing Wide Field-of-view Sensor). Ils estiment la chlorophylle à partir de rapports de reflectances. Ces algorithmes ont été établis en utilisant des données de terrain de concentration en chlorophylle provenant du monde entier et sont censés fonctionner dans toutes les régions du globe. L'algorithme OC2 à partir de rapports de reflectances utilise un ratio de Rrs en 490 nm et 555nm (Aiken et al. 1995) c'est à dire bleu sur vert-jaune pour estimer la concentration de la Ca de surface. Cet algorithme est très sensible aux petites variations à faible Rrs(490)/Rrs(555). Plus ce rapport est faible plus il y a de chlorophylle car la chlorophylle est verte).

L'algorithme OC4 est un polynôme de quatrième ordre. Il passe de Rrs_{443/555} à Rrs_{490/555} et/ou Rrs _{510/555} utilisant le « rapport de canaux » maximal. En bande côtière, le canal 443nm devient très faible car il y a beaucoup de chlorophylle. En plus, il n'y a pas que la chlorophylle qui absorbe à 443nm mais aussi le CDOM et les détritus. Le polynôme OC4 utilise le rapport de la plus forte Rrs parmi les Rrs 443, 490 et 510 sur la Rrs à 555.

L'OC4 donne la concentration en chlorophylle à partir du rapport R= 443/555 pour les faibles concentrations inférieures à 0.3 μ g/l, à partir du rapport R= 490/555 entre 0,3 et environ 1.5 μ g/l (ou mg.m⁻³) et à partir du rapport R=510/555 au dessus de ces concentrations. L'OC4 est l'algorithme "officiel" proposé par la NASA pour les eaux du large riches en chlorophylle et du Cas 1 (lorsque toutes les propriétés optiques dépendent de la chlorophylle).

$$(a_0+a_1\mathbf{R}+a_2\mathbf{R}^2+a_3\mathbf{R}^3)$$

OC_Chl=10 + a_4 (Eq. 6)

Pour OC2 : $R = \log_{10}(Rrs(490)/Rrs(555))$ et a = [0.341, -3.001, 2.811, -2.041, -0.04]Pour OC4 : $R = \log_{10}([Rrs443>Rrs 490>Rrs510]/Rrs555)$ et a = [0.47, -3.85, 4.53, -2.44, -0.0414]

2.4.4.3 L'algorithme MODIS

L'algorithme empirique OC3, polynôme de troisième ordre, est le prolongement de l'algorithme OC2 et OC4 qui sont développés pour SeaWifs et adaptés aux bandes spectrales de MODIS. Les canaux de MODIS à résolution de 1km² sont proches de ceux de SeaWiFS, la seule différence étant l'absence de canal a 510 et son remplacement par le canal a 531 nm. Cet algorithme est spécifiquement conçu pour les eaux optiquement complexes. Les mesures satellites n'arrivent pas toujours à distinguer entre les différents composants de l'eau. En effet, la chlorophylle, le CDOM et les détritus absorbe la lumière à la même longueur d'onde (le bleu, 440 nm). OC3 permet de les reconnaître. L'algorithme est surtout utilisé pour la chlorophylle supérieure à 2 mg.m⁻³, ce qui est typique pour la catégorie du Cas 2.

$$(a_0+a_1\mathbf{R}+a_2\mathbf{R}^2+a_3\mathbf{R}^3+a_4\mathbf{R}^4)$$

OC3_Chl=10 (Eq. 7)

avec $R = \log_{10}([Rrs443>Rrs488]/Rrs551)$ et a = [0.2830, -2.753, 1.457, 0.659, -1.403],valable pour la chlorophylle -a entre 0.015 et 64 mg.m⁻³

2.4.4.4 L'algorithme OC5

L'algorithme OC5 a été mis au point (Gohin & al, 2002). Il a été conçu pour le capteur SeaWiFS mais il est adaptable aussi pour MODIS. En effet, les algorithmes OC2 et OC4 préexistants fonctionnent bien pour des eaux du large. Ces algorithmes sont insuffisants dans le cas d'eaux du Cas 2 plus turbides. En effet, en zone côtière, la situation est complexe car les propriétés optiques de la mer peuvent être déterminées par des constituants variés, autres que la chlorophylle, par exemple CDOM et MES. La présence de MES ayant tendance à augmenter la réflectance à 555 nm, les rapports de réflectance bleu sur vert ont tendance à diminuer ; ce qui a pour effet d'augmenter la concentration estimée en chlorophylle. Certaines eaux côtières ont également une forte radiance à 412 (fort CDOM). Il n'y a donc plus de relation biunivoque entre les rapports de réflectance et la concentration en chlorophylle. En effet, ce n'est pas la réflectance qui est la valeur mesurée au niveau du capteur mais la radiance de l'ensemble mer-atmosphère. L'algorithme OC5 consiste en un ajustement de l'algorithme OC4 pour des eaux côtières; il n'est pas fondé sur de nouvelles techniques. Il se base sur un triplet de paramètres : le maximum des rapports de canaux (443/555, 490/555, 510/555), canaux déjà utilisés pour OC4, et les réflectances normalisées à 412 et 555 nm. Dans le cas des zones côtières bretonnes (l'algorithme a été conçu pour ces eaux), les concentrations en chlorophylle sont correctement estimées. Cet algorithme a été testé dans le lagon pensant qu'il pouvait s'appliquer aux zones réduites des baies turbides.

2.4.4.5 L'algorithme Turbidité

Ouillon et al., (2008) ont comparé différents algorithmes de calcul de la turbidité à peu près équivalents en terme d'erreur, soit rapports de canaux, soit canal simple. Pour notre zone étude, l'équation pour le calcul de la turbidité à partir de MODIS suivante a été utilisée :

90.647*[
$$\operatorname{Rrs645*Rrs678/Rrs412}$$
]^{0.594} (Eq. 8)

Cette formule utilisable pour MODIS à partir de la longueur d'onde 645 nm ne peut être appliquée à nos radiances calculées (le canal 645 nm n'existe pas *in-situ* (pas pour l'Hydroscat-6)). La turbidité est donc calculée avec l'autre formule (Eq. 9) qui utilise le canal de longueur d'onde 555 nm. Cette formule permet de comparer les valeurs *in-situ* avec les valeurs satellites à 1 km de résolution.

$$Turb = 0.1865 * exp(175.1 * Rrs555)$$
(Eq. 9)

Selon Dupouy et al. (2010), les mesures satellites de chlorophylle sont plus exactes pour TDT (Tchl *Depth/Turbidité) supérieur à 19. Afin d'interpréter les résultats selon ce critère, pour chaque point de la grille, la turbidité et le TDT sont calculés.

2.5 Développement des scripts

La comparaison des données satellitales de MODIS et *in-situ* et l'analyse des régressions entre les deux sources sont faites à l'aide de logiciels R afin de vérifier si MODIS est exploitable dans le lagon de NC et avec quelle précision en fonction des fonds et de la bathymétrie. Le langage R, est un environnement mathématique utilisé pour le traitement de données et l'analyse statistique. R peut lire des fichiers de différents formats. L'idée est d'accéder directement au catalogue THREDDS sous OPeNDAP et à la B.D *in-situ* sous Excel pour pouvoir récupérer uniquement : la longitude et la latitude, la bathymétrie SHOM, la turbidité, les données de chlorophylle OC3 et d'OC5, les Rrs pour chaque longueur d'onde et le masque. Cette information est valable pour chaque point de la grille. Pour tous les types de fichiers la procédure de récupération des données est la même. En connaissant la date de mesure *in-situ*, le granule_id, jour julien de chaque date, est récupéré de la base « MODIS_DB » avec les commandes SQL (Structured Query Language). C'est avec cette information que nous accédons au catalogue THREDDS.

Préparation de données dans le catalogue pour produits à 1 km de résolution, grille non régulière :

Pour chaque station, nous regardons si le jour existe dans le catalogue. Si le jour de la station n'existe pas dans le catalogue, les images sont alors traitées manuellement une par une, pour vérifier si la zone concernée est sans nuage. Dans le cas de l'étude de la zone très précise du lagon sud-ouest, il est possible d'avoir la zone qui nous intéresse sans nuages alors que la NC est couverte. Dans ce cas, ce fichier sera mis sur le serveur. Quand le catalogue est complet, nous pouvons accéder à la récupération de données avec le logiciel R exploitant la B.D *in-situ* et les métadonnées du serveur OpenDap. Les coïncidences sont extraites avec deux approches : globale et plus fine.

2.5.1 Approche globale

Le but de l'approche globale est de comparer le plus des mesures possibles (cas extrême). A combien de jour près peut-on comparer notre point *in- situ* avec le point satellite ? Pour cela, les données sont récupérées jusqu'à cinq jours près avec un rayon de quatre km autour de la station *in-situ*. En moyenne, la chlorophylle ne varie pas significativement pendant cinq jours. Ces intervalles de temps et de distance sont considérées comme raisonnables pour tester l'influence de la résolution spatiale et temporelle sur la moyenne (Robert Frouin, comm. pers.)

Coïncidence temporelle et Coïncidence spatiale :

Un programme permet de récupérer une image à 5 jours près. Pour chaque pixel, nous récupérons les informations des points de la grille qui sont dans un rayon de 4 km. Jusqu'à quelle distance du point *in-situ* peut-on aller pour tester l'aspect spatial ? Cette distance a été choisie pour avoir assez de pixels pour le calcul de MP (*cf* : *ci-dessous*). En même temps, il ne faut pas trop s'éloigner du point *in-situ* car dans le lagon la chlorophylle est très variable.

Résolution du problème du fauchée :

Il est possible que l'image existe dans le catalogue mais que la station ne soit pas dans la fauchée car l'image est prise par le satellite chaque fois avec un angle différent. On cherche une image à $J \pm 5$ jours près de la date *in-situ* qui soit dans le catalogue avec la station dans la fauchée. S'il n'y a aucune image qui correspond, nous marquons lon et lat.sat =0 dans le tableau final et nous passons à l'analyse de la station suivante.

Résolution du problème du masque :

Les scripts R ont pour objectif de contrôler les masques crées par SeaDAS (*cf* : *Construction du masque dans la base MODIS_DB*). Il est possible que l'image existe dans le catalogue et que la station soit dans la fauchée mais que tous les pixels soient masqués, c'est-à-dire qu'il n'y ait aucune valeur avec laquelle nous pouvons comparer notre mesure *in-situ*. Dans ce cas, nous cherchons une autre image dans notre intervalle de 5 jours. Si aucune image n'est trouvée (à \pm 5 jours près), nous marquons bat.shom=0 dans le tableau final et nous passons à l'analyse de la station suivante.

Quand toutes les données sont récupérées, elles sont comparées avec trois méthodes différentes :

Méthodes de comparaison pour les résultats de l'approche globale:

1) **Point le plus proche :** A partir du point *in-situ*, nous recherchons un point non masqué dans un rayon de 1 km avec la bathymétrie SHOM la plus proche de la bathymétrie *in-situ*. La distance entre le point *in-situ* et le point trouvé est notée dans le tableau final.

2) **Moyenne pondérée par la distance:** statistiquement, il est possible de calculer la moyenne pondérée s'il y au moins 30 pixels exploitables (Saporta, 1990). Les pixels, autour du point *in-situ* dans un rayon de quatre kilomètres, sont représentés dans les graphiques (Fig. 2). Chaque point est la moyenne d'un pixel, sa position est le centre du pixel. Comme nous recherchons les pixels dans une grille non régulière, le nombre de pixels exploitables est différent à chaque fois (au minimum <10 pixels et maximum 50 pixels), ce qui réduit beaucoup le nombre de comparaisons. Le poids de chaque point est défini par rapport à sa distance de la station *in-situ*. Pour une distance plus grande le poids est plus petit.

3) **Moyenne filtrée (MF)** : Comme Bailey et Werdell (2006), pour s'affranchir des points qui sont loin de la moyenne, la moyenne filtrée est calculée (Eq. 10). La mesure satellite est prise dans le calcul si elle est dans les bornes.

$$MF = \sum_{i} (2^{*}\sigma - \overline{Y}) < Y_{i} < (2^{*}\sigma + \overline{Y})$$
(Eq. 10)

avec : Y – mesure satellite ; Y moyenne de mesure satellite, et σ – écart-type (stdev)

La MP et la MF ne peuvent pas être calculées pour toutes les mesures. Cela dépend du nombre de pixels et de leurs qualités. Pour ces méthodes utilisant la moyenne, la variance, l'écart type et la médiane sont calculés. L'organigramme (Fig. 4) présente une description des opérations employées pour cette approche.

2.5.2 Approche plus fine

Le but est de comparer les mesures de façon la plus juste possible c'est à dire avec la variabilité temporelle et spatiale la plus petite possible comme c'est recommandé par le protocole NASA (Bailey et Werdell, 2006). L'analyse est faite uniquement pour le jour même dans un rayon de 1.5 km pour n'englober que la surface concernant la station *in-situ*. Lorsque le jour de récupération n'est pas le même, lorsque le rayon de recherche de pixels est augmenté, la qualité des résultats diminue car la variabilité géophysique augmente.

Méthodes de comparaison pour les résultats de l'approche fine:

1) **Point le plus proche :** A partir du point *in-situ*, nous recherchons un point non masqué le plus proche. (Fig.3) Ce point est comparé avec la valeur du point *in-situ*.

2) **Moyenne arithmétique:** Si l'ensemble des pixels n'est pas masqué, la moyenne (exemple C*a*) est calculée et comparée avec la valeur (exemple C*a*) du point *in-situ*. (Fig.3)

Figure 3 : Approche fine. Les pixels autour du point in-situ (en rouge). En mauve le pixel satellite le plus proche du point in-situ. En gris les pixels satellite valide, en noir, les pixels masqués. Dans ce cas précis, pas de pixel masqué.



La figure 3 montre les pixels autour du point *in-situ* dans le rayon de 1.5 km. Sur la figure nous voyons comment est sélectionné le pixel le plus proche et la moyenne (cf : 3.2.2). L'organigramme (Fig. 5) présente une description des opérations employées pour cette approche.

Au final, pour les deux méthodes, les codes créent :

• Un tableau final qui réunit les données descriptives ainsi que les valeurs du pixel le plus proche (CL) pour les chlorophylles OC3, OC5 et les Rrs (avec les MP, MF, écart-types pour la méthode globale), les calculs de TDT. Voici un exemple d'enregistrement (méthode la plus proche) :

ID isodate joulien nam.stat cam.stat bat.ins bat.shom lon.ins lat.ins lon.sat lat.sat Distance moy Chl.ins Tchl.ins chl_oc3.ins chl_oc3.sat chl_oc3.satCL chl_oc5.sat chl_oc5.satCL Rrs_412.ins Rrs_412.sat Rrs_412.satCL Rrs_443.ins Rrs_443.sat Rrs_443.satCL Rrs_490.ins Rrs_488.sat Rrs_488.satCL Rrs_510.ins Rrs_531.sat Rrs_531.satCL Rrs_555.ins Rrs_555.sat Rrs_555.satCL Rrs_670.ins Rrs_667.sat Rrs_667.satCL turb.ins turb.sat turb.ouillon TDT.ins TDT.sat TDT.ouil

• Un fichier texte pour chaque paramètre. Pour chaque observation, il y a une présentation des pixels avec leurs informations et pour l'ensemble de ces pixels une analyse statistique (moyenne, variance, écart-type, médiane).

• Un fichier qui contient les jours juliens qui sont dans la base Excel et pas dans le catalogue.

Pour analyser les données du tableau final, plusieurs scripts R ont été développés. Ils permettent de tracer des régressions, les graphiques aux barreaux, les histogrammes et faire les calculs statistiques. Nous calculons tous les paramètres statistiques pour l'échantillon de population, il faut diviser par N-1. La médiane permet d'évaluer l'influence des valeurs extrêmes enregistrées lors de circonstances exceptionnelles. L'écart-type, dépendant du nombre d'observations, est difficilement analysable. Pour chaque régression, l'équation de la droite, le coefficient de détermination (R²), la moyenne, la médiane, l'écart-type, le coefficient de variation (CV) (Eq. 11). Le CV (mesure de dispersion des observations) ne dépend pas du nombre de mesures et est plus facile à interpréter, Pour qualifier une relative différence entre les mesures satellites et *in-situ*, on calcule le NMB (Normalised Mean Bias) (Eq.12) qui est un indicateur de l'erreur systématique. Les résultats sont parfaitement corrélés quand la pente (slope) et R² sont égales à 1.

$$CV = |\sigma/X| * 100$$
 (Eq. 11)

$$NMB = \underbrace{1}_{N-1} * \underbrace{\underbrace{\overline{Y} - \overline{X}}_{\overline{X}}} * 100$$
 (Eq. 12)

 \underline{Y} – moyenne de mesure satellite \overline{X} – moyenne de mesure *in-situ* σ – écart-type (stdev)

2.6 Match-Ups obtenus

Le tableau 3 représente toutes les coïncidences entre les jours *in-situ* et les images satellites. Pour les observations à \pm 5 jours, il y a 994 match-ups soit 80 % du nombre de mesures totales. Pour les observations pour le même jour, il y a 263 match-ups soit 21% du nombre de mesures totales. A \pm 5 jours, le nombre de jours récupérés 176 reste proche des valeurs de la B.D. initiale 219 (Tab. 2), soit 80%. Pour le jour même, le total est très réduit (66 jours soit 30%).

Le graphe à barreaux résumant les quatre sous-B.D. (Tab. 2 et Tab. 3) illustre la répartition temporelle des mesures, l'influence saisonnière sur le nombre de sorties terrain, les coïncidences. Pour réaliser le graphe à barreaux de représentation des données in situ (Fig. 6) nous avons commencé par inclure la B.D totale (1997-2010), les barreaux rouges. Les images MODIS commençant à partir de juillet 2002, nous avons extrait de la base totale les données à partir du 04 juillet 2002, les barreaux bleus (au début du lancement du satellite, l'acquisition des images n'a pas été régulière). Les barreaux jaunes (match-ups de MODIS ±5 jours) et verts (match-ups à 1 jour) complètent le graphique.

Campagnes	NB match-ups 2002-2010 ± 5 jours	NB jours uniques 2002-2010	NB stations uniques 2002-2010	NB match-ups 2002-2010 Même jour	NB jours uniques 2002-2010	NB stations uniques 2002-2010
SCamelia	288	42	79	100	18	50
Diapalis	26	16	24	11	6	9
Topaze	32	10	21	15	5	10
Charpy	12	7	9	2	2	2
Timeseries	21	11	2	7	5	2
Camecal5	71	6	71	16	1	16
Transects	16	6	16	3	2	3
Radiale Sud1	32	4	8	4	1	4
Radiale Sud2	23	3	10	2	1	2
Radiale Nord1	40	4	10	-	-	-
Radiale Nord2	20	2	10	-	-	-
Bissecote	85	11	65	20	5	19
Echolag	81	10	33	19	5	17
Zonalis	22	7	22	9	3	9
Valhybio	99	17	53	16	4	10
ValhybioSM	126	29	30	39	12	9
Totale	994	176	270	263	66	126

<u>Tableau 3 :</u> Coïncidences entre les jours *in-situ* et les images satellites. Colonne de gauche approche globale, à \pm 5 jours, colonne de droite, approche fine, pour le jour même.



Figure 4 : L'organigramme pour l'approche globale



<u>Figure 5</u> : L'organigramme pour l'approche plus fine



<u>Figure 6 :</u> Graphe représentant la répartition temporelle des données *in-situ* (partie de la base depuis 2002 pour comparaison avec MODIS)

3. RESULTATS ET ANALYSE

Les concentrations en chlorophylle satellite issues des algorithmes OC3 et OC5 sont comparées avec la Tchl a. Les résultats sont analysés selon les deux approches décrites plus haut : globale, où pour rappel nous regardons à ± 5 jours près et dans un rayon de 4 km (paragraphe 2.5.1) et fine, où nous regardons les coïncidences pour le jour même dans un rayon de 1.5 km (paragraphe 2.5.2). Les histogrammes des valeurs de Chlorophylle OC3 (chl_oc3), Chlorophylle OC5 (chl_oc5) et Tchl pour la méthode du pixel le plus proche, ainsi que les régressions des Chlorophylle OC3 (chl_oc3) et Chlorophylle OC5 (chl_oc5) en fonction de Tchl, sont présentées. Les concentrations (mg.m⁻³) sont représentées en log₁₀, pour rendre la série plus linéaire. Il est évident que du fait du choix de la grille non régulière à 1 km² de résolution, les données de terrain étant ponctuelles alors que les valeurs du satellite représentent une moyenne dans un carré de 1 km, nous pouvons avoir plusieurs positions in-situ pour un seul pixel MODIS (doublons en rouge sur les graphes). Pour les stations qui sont contenues dans le même pixel MODIS, seule celle dont la distance est la plus proche a été conservée. Les résultats statistiques détaillés sont réunis dans le tableau 5 pour l'approche globale et dans le tableau 7 pour l'approche plus fine. Le code R fournit un fichier texte pour chaque paramètre (chl_oc3, oc5, et Rrs) (cf: développement des scripts) ce qui permet d'avoir une information précise pour chaque pixel.

3.1. Approche globale (± 5 jours, un rayon de 4 km, paragraphe 2.5.1)

Pour chaque algorithme (OC3 ou OC5), les trois méthodes (pixel le plus proche, moyenne pondérée, et moyenne filtrée, voir 2.5.1 ; 1), 2) et 3)) sont présentées successivement.

3.1.1 Pixel le plus proche

La carte (Fig.7) représente les positions géographiques de toutes les stations pour le pixel le plus proche. Au total il y a 270 stations distinctes, la plupart mesurées plusieurs fois. La majorité des stations se situent autour de Nouméa afin de valider l'algorithme dans les zones côtières, les stations du large servant de référence (l'algorithme est approuvé dans cette zone, Dupouy et al., 2010).

<u>Figure 7</u> : Carte de synthèse de toutes les stations où il existe une coïncidence entre satellite et mesure *in-situ* (base extraite à partir de 2002).

Les histogrammes des valeurs de chl_oc3, de chl_oc5



et de Tchl *a* sont présentées dans les graphiques Figure 8 (**TCHL A, CHL OC3, CHL 0C5**). D'une façon générale, les chlorophylles OC3, OC5 et Tchl *a* sont réparties de la même façon. La répartition est la suivante : entre 3 et 13% eaux oligotrophes (< =0.1), entre 75 et 91% eaux mésotrophes (0.1<Ca < =1) et enfin entre 5 et 19% eaux eutrophes (>1). Ces classes ont été définies par Antoine et al (1996). Les régressions des chl_oc3 et chl_oc5 en fonction de Tchl *a in-situ* en Figure 9 (**a,b,c,d**) (figurées en log₁₀).

Algorithme OC3 :

Pour OC3, il n'y a que 991 (838 +153) mesures (Fig. 9 **a**). In fine, sans les doublons, il y a 895 mesures (Fig. 9 **b**). La médiane (0.5 mg.m⁻³) des mesures satellites OC3 est inférieure à sa moyenne (1.14 mg.m⁻³) c'est-à-dire qu'il y a des valeurs extrêmes qui tirent la moyenne vers le haut. Les données OC3 sont très dispersées par rapport à leur moyenne (CV= 288,33%), ceci surtout à cause de l'influence des valeurs extrêmes. La médiane OC3 est très proche de la médiane des Tchl *a in-situ* ce qui montre une concordance entre les deux (Fig. 8 **a** et **b** et Tab. 5).

On observe qu'en moyenne les mesures satellites OC3 sont surestimées par rapport aux mesures *in-situ* (NMB >0, pente =1.747 ; R²=0.12). Le faible R² s'explique par quelques valeurs extrêmes : pour la date du 17/03/03 à la station D47 (voir plus loin Fig. 17ab) de la campagne Suivi Camélia, Tchl est égale à 5,92 mg.m⁻³ et l'OC3 MODIS est égale à 60,15 mg.m⁻³. Cette station a une profondeur inférieure à 20 m et elle se trouve dans la Baie de Dumbéa (problème de masque MODIS). A l'inverse, les mesures satellites peuvent être sous-estimées. Par exemple GD1 (voir plus loin (Fig. 17 **a,b**) pour la date du 14/02/06 de la campagne Bissecote Tchl=6,744 et OC3= 0,174

(mg.m⁻³⁾. Cette station se trouve très proche d'un ilot (bathy *in-situ* égal à 4m) et le point satellite (bathy SHOM est supérieure à 20 m) avec lequel la comparaison est faite se trouve à plus de trois kilomètres du point *in-situ*. Les différences peuvent s'expliquer par la grande distance et une bathymétrie très changeante entre les deux points comparés.

Algorithme OC5 :

Pour OC5, il n'y a que 966 (693 +145) mesures (Fig. 9 c). Pour certaines valeurs calculées par OC3, l'algorithme OC5 masque les données (en général, les valeurs fortes > 1 mg.m⁻³). Le même travail de suppression des doublons est effectué pour OC5 (au total il y a 145 doublons), in fine il ne reste que 882 mesures (pente=0.397 ; R²=0.27 %) (Fig. 9 d). Notez que la pente est bien inférieure à celle obtenue pour OC3. La valeur MODIS minimale est de 0.1 mg.m⁻³ ce qui est bien visible sur l'histogramme (Fig. 8 CHL OC5) et sur le graphe (Fig. 9 c et d). Les estimations satellites OC5 sont toujours inférieures aux estimations OC3. OC5 sous-estime la chlorophylle *in-situ* (NMB < 0) pour toutes les stations, lagon et large. Cet algorithme ne s'applique donc probablement pas aux eaux peu turbides et peu absorbantes du lagon de NC.



Figure 8. (TCHL A, CHL OC3 et OC5) :

Distribution de chlorophylle selon les classes TCHL A : Histogramme de totale chlorophylle *in-situ*. CHL OC3, OC5 : Histogramme mesures de MODIS pour l'algorithme OC3 et OC5

Les lignes droites à 0.1 et 1 mg.m⁻³ séparent les données en zone d'eaux Oligotrophe, Mésotrophe et Eutrophe







<u>Figure 9</u> : Approche globale. Nuage de points de concentration de Tchl *a* et de Chlorophylle estimée par MODIS transformée en log. a- chlorophylle OC3 (en rouge les doublon). b- chlorophylle OC3 sans les doublons. c- chlorophylle OC5 (en rouge les doublons). d- chlorophylle OC5 sans les doublons

3.1.2 Moyennes pondérée et filtrée

Pour ces méthodes, le nombre de points de régressions est bien inférieur (N=170 environ) puisque nous ne calculons les MP et MF pour OC3 et OC5 que s'il y a plus que 30 pixels non masqués dans le rayon de 4 km (*cf : méthodes de comparaison pour les résultats de l'approche globale*). Par rapport à la méthode Pixel le plus proche, tous les paramètres statistiques s'améliorent (R² et la pente sont plus proche du 1 et les CV, NMB se réduisent) (Tab. 5 et Fig. 10). La comparaison des chl_oc3 et chl_oc5 avec la Tchl *a* dans le cas des MP et MF est meilleure. En effet, le bruit des mesures satellites se repartit sur tous les pixels et en conséquence se réduit (CV passe de 288% a 64%). Pour les MP et MF, la médiane est plus proche de la moyenne. Le meilleur résultat est obtenu pour OC3 avec une pente de 0.7, un CV de 64%, et un R² de 0.26 (Tab.5). Pour OC5 MF le R² est plus petit que pour OC3 mais le CV est meilleur (CV=53%), les écarts-type sont plus petits.



Figure 10 (a,b): Approche globale (±5 jours, dans un rayon de 4 km).

a- Nuage de points de chl_oc3 MF et de Tchl *in-situ* transformées en log. Les écart-types pour chaque pixel.

b

b- Nuage de points de concentration de chl_oc5 MF et de Tchl *in-situ* transformées en log. Les écart-types pour chaque pixel.

Algorithme	Méthode	Ν	Slope	Intercept	R²	Min	Max	Avg	Mediane	CV%	NMB%
OC3	Plus proche	895	1,747	0,306	0,12	0,05	60,15	1,147	0,501	288.33	138.37
	MP	180	0,668	-0,051	0,22	0,06	2,217	0,520	0,475	65.12	40.58
	MF	165	0,7	-0,053	0,26	0,08	2,172	0,497	0,455	64.54	34
OC5	Plus proche	882	0,397	0,277	0,27	0,1	9,557	0,498	0,282	155.07	-10.6
	MP	176	0,512	-0,361	0,2	0,1	1,025	0,285	0,258	56.33	-23,29
	MF	157	0,471	-0,387	0,18	0,1	1,013	0,279	0,253	53.63	-25.81

<u>Tableau 5 :</u> Relation globale. Résultats statistiques pour les chlorophylles OC3 ou OC5 pour différents méthodes de recherche de coïncidences développées en R dans les eaux des lagons et au large de la NC N - nombre de données; CV ; NMB; R^2

Etude des écarts-types MODIS OC3 MF :

Une étude des écarts types liés à la moyenne a été réalisée (uniquement pour OC3 MF). En effet, en regardant sur la figure 10, nous ne distinguons pas entre les petits et les grands écart-types. Aussi pour chaque pixel nous avons calculé le CV. Un CV très grand signifie que dans le rayon de 4 km les données sont très dispersées. Le tableau 6 montre le nombre de pixels dans chaque classe de CV. Il y a très peu de pixels avec de grands CV. Pour les grands CV, il est important de vérifier l'endroit géographique du pixel. Par exemple la station M12 (26/08/03) a un CV de 69%. Cette station se trouve dans la passe de Dumbéa et très proche de la barrière de corail. La variabilité de la profondeur est très grande dans le rayon de 4 km et donc des pixels de différentes caractéristiques rentrent dans le calcul de la moyenne.

En utilisant la MF (OC3), 32% des pixels ont un CV entre 21 et 30%. La Tchl *a in-situ* est elle-même entachée d'une erreur de mesure de 30%. Les CV « satellite » et « *in-situ* » sont finalement comparables pour la majorité des pixels.

Coefficient de variations (%)	NB de pixels	NB de pixels en %
CV [0-10]	24	14.5%
CV [11-20]	40	24.24%
CV [21-30]	53	32.12%
CV [31-40]	34	20.6%
CV [41-50]	9	5.45%
CV [51-50]	3	1.81%
CV [61-70]	2	1.21%

<u>Tableau 6 :</u> Répartition du nombre de pixels dans sept classes de coefficients de variations (Chl OC3, MF dans un rayon de 4 km)

3.2. Etude fine (même jour dans un rayon de 1.5 km, paragraphe 2.5.2)

On a choisi de ne présenter les résultats que pour OC3. Deux méthodes sont présentées successivement : pixel le plus proche et moyenne des pixels.

3.2.1. Pixel le plus proche

La carte (Fig. 11) représente les positions géographiques de toutes les stations pour le pixel le plus proche. Au total il y a 126 stations, moins que pour l'étude globale, car nous cherchons des coïncidences pour le jour même ce qui réduit le

nombre de pixels examinés.

<u>Figure 11</u> : Approche fine. Synthèse de toutes les stations où il existe une coïncidence le même jour entre satellite et mesure *in-situ* (base extraite à partir de 2002).

Pour l'étude plus fine (histogrammes non montrés), la répartition des chlorophylles OC3, OC5 et Tchl *a* est sensiblement la même que pour l'étude globale : entre 3 et 15% d'eaux oligotrophes, entre 75 et 91% d'eaux mésotrophes, entre 5 et 17% d'eaux eutrophes.



Algorithme OC3 :

En recherchant les images pour le même jour, sans les doublons, il n'y a que 249 coïncidences (Fig. 13 b), soit trois fois et demi moins de coïncidences. Les données OC3 sont très dispersées par rapport à la moyenne (CV= 344,42%, Tableau 7), c'est-à-dire que les écarts-types sont très importants. Les mesures satellites OC3 sont encore plus surestimées par rapport aux mesures *in-situ* que pour l'approche globale. Il y a moins d'observations donc les valeurs extrêmes ont une influence plus importante sur les résultats statistiques (pente=6.446). Par contre, le coefficient de détermination est plus grand (R^2 = 0.54) (au lieu de R^2 =0.26 pour l'approche globale) (Fig. 13 b et

Tab. 6). Pour cette approche du pixel le plus proche, il y a huit mesures pour lesquelles les mesures satellitales sont très supérieures aux mesures terrain. Parmi celles-ci, se trouvent des stations mesurées le 17 mars 2003. Pour ces stations (D12, D39, D47 et N20) (voir plus loin Fig. 17ab) les mesures satellitales sont 6.5 plus grandes que les mesures terrain (influence des pluies après la dépression tropicale ERICA). Pour les stations (D63 et D64) le 19 juin 2003 pendant Camecal5 (voir plus loin Fig. 17ab), les mesures satellitales sont 11.5 plus grandes que les mesures terrain (bathymétrie < 5 m). En enlevant ces observations, nous trouvons une pente proche de 1 (pente= 1.045) mais le R² diminue (Fig. 14).

Algorithme OC5 :

Pour OC5, sans les doublons, il n'y a que 246 coïncidences (Fig. 13 d). Au contraire d'OC3, les mesures satellites ne sont pas sur-estimées par rapport aux mesures *in-situ* (NMB < 0, Tableau 7). La régression linéaire est meilleure. En moyenne, les données satellites sont plus proches des données terrain pour cette approche que pour l'approche globale (pente=1.266 ; R²=0.726) (Fig. 13 d et Tab. 7). Mais le CV est très grand, l'écart-type est supérieur à la moyenne et la valeur de la médiane (0.273 mg.m⁻³) est plus petite que la moyenne (0.47 mg.m⁻³⁾. La différence entre la valeur minimale et maximale est plus petite que pour OC3 mais dans la série il y a beaucoup de données pour lesquelles OC5 est égale à 0.1 mg.m⁻³ (valeur minimale d'OC5) (idem paragraphe Méthode



Figure 13 : Approche fine. Nuage de points de Chlorophylle estimée par MODIS et de TCHL *a* transformée en log. a- chlorophylle OC3 (en rouge les doublons). b- chlorophylle OC3 sans les doublons. c- chlorophylle OC5 (en rouge les doublons). d- chlorophylle OC5 sans les doublons



Figure 14 : Approche fine. Pixel le plus proche. Nuage de points de concentration de Tchl *a* et de Chlorophylle OC3 estimée par MODIS transformée en log (sans les observations pour lesquelles les mesures satellites sont beaucoup plus grandes que les données terrain).

3.2.2 Moyenne arithmétique

Pour cette méthode (Fig. 3 et Fig. 15), le nombre de points de régression est bien inférieur (N=140 environ) puisque nous calculons la moyenne des pixels pour OC3 et OC5 seulement si l'ensemble des pixels est valide (aucun pixel masqué) (2.5.2) ce qui réduit de beaucoup le nombre de match-ups mais augmente la qualité des mesures. Les résultats des régressions sont réunis dans le tableau 7 et les droites de régression sont montrées seulement pour OC3 les pixels ayant été triés par leur bathymétrie (Fig. 15). La pente de la régression OC3 MODIS est beaucoup plus proche de 1 (pente= 0.827). Pour l'ensemble des mesures, l'algorithme OC3 surestime la concentration de la chlorophylle (NMB systématiquement positifs). En faisant la moyenne, le bruit des mesures satellite diminue (il est réparti sur tous les pixels). Les données sont plus centrées autour de la moyenne, il y a beaucoup moins de valeurs extrêmes (médiane= 0.41, moyenne=0.48 et CV=77.61 %) (Tab. 7). En revanche, le coefficient R² diminue par rapport à la méthode Pixel le plus proche de 0.54 à 0.37.

Les résultats des régressions pour les algorithmes OC3 et OC5, pour les pixels classés par leur bathymétrie (« Large » ; > 20m ; < 20m) sont réunis au tableau 8 (représentation des résultats de régression et analyse uniquement pour OC3). Figure 16, on voit qu'entre les mesures satellites et celles de terrain du large et celles obtenues sur des petits-fonds, le R² a diminué de =0.44 à 0.29. Ceci s'explique par le fait que le signal du satellite pénètre jusqu'au 20 m de profondeur, le signal réfléchi reçu par le satellite contient la reflectance de fond. La surestimation par OC3 s'observe pour les eaux du lagon, pour les profondeurs supérieures à 20m R²=0.35 et NMB=53% ou peu profondes (<20m) R²= 0.29 et NMB= 75% (Tab. 8), alors que pour le large le NMB est négatif, les mesures satellitales sont sous-estimées par rapport aux mesures *in-situ*.

Pour l'algorithme OC5 (Tab. 8) les résultats statistiques sont inférieurs à ceux obtenus pour la méthode le pixel le plus proche puisque pour la moyenne arithmétique, on obtient la pente=0.615 et R²=0.37. (Tab. 7). Il faudrait faire une analyse plus précise pour déterminer comment fonctionne l'algorithme OC5 qui, conçu pour bien détecter la chlorophylle dans les eaux très turbides, peut être

adapté dans certains cas dans le lagon (autour des îlots). Toutefois, on ne peut pas conclure qu'OC5 est mieux adapté (pente=0.216, R²=0.07) (Tab. 8) pour les eaux peu profondes (<20m) du lagon.

<u>Figure 15</u> : Approche fine. Moyenne arithmétique. Nuage de points de Chlorophylle OC3 estimée par MODIS en fonction de TCHL a transformée en log.

Bleu clair : eaux du large (profondeur >= 70 m) Bleu foncé : eaux du lagon avec une profondeur >= 20m Orange : eaux du lagon avec une profondeur < 20m



Algorithme	Méthode	Ν	Slope	Intercept	R²	Min	Max	Avg	Mediane	CV%	NMB%
OC3	Plus proche	249	6,446	-1,697	0,54	0,061	60,15	1,33	0,497	344 .42	183.11
	Moyenne	142	0,827	-0,007	0,37	0,076	2,229	0,48	0,411	77.61	35.02
OC5	Plus proche	246	1,266	-0,14	0,73	0,1	9,557	0,47	0,273	169.57	-2.48
	Moyenne	140	0,615	-0,764	0,37	0,1	0,961	0,26	0,236	60.92	-26.22

<u>Tableau 7 :</u> Résultats statistiques pour les chlorophylles OC3 ou OC5 pour différents méthodes de recherche de coïncidences développées en R dans les eaux des lagons et au large de la NC N - nombre de données; CV ; NMB; R^2



<u>Figure 16 (a,b,c)</u>: Approche fine. Nuage de points de Chlorophylle OC3 estimée par MODIS en fonction de TCHL *a* transformée en log. a- Les eaux du large (profondeur >= 70 m), bleu clair. b - Les eaux du lagon (profondeur >= 20m), bleu foncé. c- Les eaux du lagon (profondeur < 20m), orange.

OC3	Ν	Slope	Intercept	R²	Min	Max	Avg	Mediane	CV %	NMB %
Large	47	0,673	-0,34	0,44	0,08	1,3	0,241	0,15	104,36	-23,18
SUP 20m	74	0,644	0	0,35	0,09	2,02	0,55	0,47	59,27	53,04
INF 20m	21	0,514	0,059	0,29	0,37	2,22	0,79	0,68	57,3	75,17

OC5	Ν	Slope	Intercept	R²	Min	Max	Avg	Mediane	CV%	NMB%
Large	47	0,5	-0,56	0,39	0,1	0,78	0,166	0,1	84,13	-47,02
SUP 20m	73	0,591	-0,27	0,43	0,1	0,829	0,303	0,27	47,69	-15,4
INF 20m	20	0,216	-0,41	0,07	0,22	0,961	0,339	0,29	46,54	-23,46

<u>Tableau 8 :</u> Résultats statistiques pour chl_oc3 et chl_oc5. Les eaux sont séparées en trois catégories : large, bathymétrie > 20m et bathymétrie < 20m. N - nombre de données; CV ; NMB; R^2



<u>Figure 17</u>(a,b) : Récapitulatif des stations mentionnées lors de l'analyse a : toutes les stations b: Les stations pour lesquelles les chlorophylles OC3 ou OC5 sont hors des régressions lors de l'analyse Globale (en jaune) B – B08, B03, B50; M12 seulement le 26/08/2003, et GD1 le 14/02/06. Notons que ces mêmes stations ne posent pas de problème lorsqu'on choisit l'analyse fine à part D- D12, D39, D47 en Baie de Dumbéa qui seules sont hors régressions à partir de l'analyse fine.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La recherche de coïncidences entre les mesures du satellite MODIS et les mesures *in-situ* a été effectuée dans les eaux côtières du lagon tropical de NC et des eaux oligotrophes du large à partir de données collectées au cours de campagnes (de 1997 à aujourd'hui). La construction d'une base de données *in-situ* a permis de réunir dans un seul fichier toutes les informations existant à l'IRD de Nouméa. Une analyse statistique de cette base a permis de montrer que les moyennes *in-situ* et satellites étaient comparables.

Dans la zone d'étude du lagon sud-ouest de NC, la couverture nuageuse est très importante. De la base de données « MODIS_DB » seulement 50% des données ont été extraites pour constituer le catalogue d'images THREDDS et exploitables sous le serveur OPeNDAP grâce une sélection automatique des pixels clairs. Comme recommandé par Bailey et Werdell (2006), les produits MODIS à 1km de résolution, grille non régulière sont utilisés pour notre étude pour s'assurer qu'il n'y a aucun biais due à la résolution dans les données satellite d'origine.

La sélection des images MODIS pour la comparaison s'est faite selon le jour. La sélection des pixels se fait selon la latitude/longitude. La recherche d'une coïncidence de mesures (pixels dans

la fauchée et non masqués) a été retenue. Pour sélectionner les images correspondant aux mesures, deux approches ont été envisagées, une globale privilégiant le maximum de coïncidences et une plus fine pour des coïncidences plus précises, cette dernière étant utilisée par la NASA pour l'océan global. A chaque fois, deux méthodes ont été utilisées, pixel le plus proche, moyennes « pondérée », « filtrée » ou arithmétique dans un rayon prédéfini.

L'approche globale extrême (+/5 J, 4 km) donne des résultats d'ensemble satisfaisants (sauf dans certains cas) malgré le fait que, en principe, on doive regarder avec un intervalle de temps de 3 heures (Bailey et Werdell, 2006) ou 48h (Murakami et al., 2006 ; Minghelli-Roman et al., 2007). Cet élargissement de la fenêtre temporelle et spatiale a permis de trouver 994 match-ups (895 sans les doublons), soit 80% (72.5) des 1233 données possibles. C'est trois fois plus, que ce que l'on observe habituellement (analyse globale NASA, 1293 coïncidences). Le nombre de coïncidences avec l'approche plus fine n'est plus que de 249 match-ups, soit 20% des données de départ, ce qui est meilleur que ce qui est observé en général. Avec l'approche globale, le résultat de la régression entre chlorophylle MODIS OC3 et Tchl *a* est peu satisfaisant (N=895, pente=1.747, R²=0.12). En faisant la moyenne filtrée dans le rayon de 4 km, 70% des pixels présentent les coefficients de variation sur la chlorophylle MODIS OC3 inférieurs à 35 %, ce qui signifie que la valeur des pixels est proche de la moyenne. Cette méthode dépend de la région d'étude pour les coïncidences, de la variabilité à court terme de la chlorophylle de surface en fonction de la variabilité climatique (le lagon de Nouvelle Calédonie est une zone avec des paramètres physiques très variables avec de forts impacts du vent en fonction de la faible profondeur.

Pour l'approche fine, le résultat est excellent (N=241, pente=1.045, R²=0.483) si on enlève les valeurs extrêmes correspondant à des eaux de forte turbidité (dépression tropicale Erica) dans une baie fermée et proche de l'embouchure de la rivière le jour de la tempête ERICA. Ces régressions sont comparables à celles obtenues par d'autres auteurs (Bailey et Werdell, 2006; Murakami et al., 2006). Si on considère l'ensemble des pixels sans distinction d'origine (« large », « lagon »), l'algorithme OC3 surestime la concentration de la chlorophylle (NMB systématiquement positifs). La raison est que le signal satellite contient probablement aussi les réflectances des aérosols, MES, CDOM etc. Ceci est vrai pour les eaux du lagon, que les eaux soient « profondes « (> 20m), (R²=0.35, MNB=53%) ou peu profondes (<20m). Le satellite mesure probablement d'autres choses (aérosols, MES, CDOM...). Si on considère séparément les eaux du cas 1 (« large »), l'algorithme sous-estime les valeurs de la chlorophylle (R2=0.44, NMB=-23%). Globalement, l'algorithme OC3 est mieux adapté pour notre zone d'étude qu'OC5. L'algorithme OC5 est conçu pour des eaux très turbides avec des concentrations de chlorophylle importants (> 10mg.m⁻³). Dans notre base de données *in-situ*, nous n'avons que 5% d'eaux eutrophes (1-20 mg.m⁻³). Même pour les eaux peu profondes du lagon, OC5 n'est pas adapté. En conclusion, la méthode de recherche de coïncidences avec MODIS au cours du stage a permis de détecter la chlorophylle dans le lagon sauf pour certaines stations (autour d'îlots, avec bathymétries très petites). Les scripts développés sur logiciel R ont été réalisés de façon la plus générale possible afin de pouvoir poursuivre l'analyse. Notre étude a considéré un ordre de grandeur de chlorophylles très faible car le lagon est oligotrophe à mésotrophe (très peu d'eaux eutrophes) donc il était attendu d'observer des R² faibles.

PERSPECTIVES

- En établissant des variogrammes, on pourra déterminer les meilleures fenêtres pour la sélection des images dans le temps et également pour la sélection du rayon de recherche des pixels. Une étude spatialisée des erreurs (« carte des erreurs ») du satellite pourrait être établie.
- Les algorithmes OC3 ou OC5 utilisent des rapports de Rrs pour évaluer la chlorophylle de la surface. Il reste à finaliser l'étude des radiances qui a été ébauchée (une première comparaison entre les Rrs *in-situ* et les Rrs satellite a donné des résultats satisfaisants pour le canal 490nm).
- La bathymétrie n'est pas seule à influencer les mesures satellites : il y a aussi le coefficient TDT (indice mélangeant la turbidité, la profondeur et la Tchla), et la couleur des fonds pour les petites profondeurs. Pour l'assimilation des chlorophylles satellites dans le modèle, il faudra tenir compte de ces paramètres et développer un algorithme pour cette zone très spéciale.
- Afin de récupérer les valeurs des pixels même quand il y a des nuages, il faudra tester des algorithmes qui le permettent, en cours de développement.
- L'algorithme OC5 marche bien pour certaines régions. Une étude doit être faite autour des îlots.
 Il reste à définir un polynôme proche d'OC3 qui corresponde exactement à notre jeu de données.

BIBLIOGRAPHIE

- Antoine, D., André, J.M. and A. Morel 1996. Oceanic primary production : II. Estimation at global scale from satellite (Coastal Zone Color Scanner) chlorophyll, Global Biogeochemical Cycles, 10, 57-69.
- Baklouti M., Faure V., Pawlowski, L., Sciandra, A., 2006. Investigation and sensitivity analysis of a mechanistic phytoplankton model implemented in a new modular numerical tool (Eco3M) dedicated to biogeochemical modelling. Progr. Oceanogr., 71(1): 34-58.
- Bailey, S.W. and Werdell, P.J., 2006. A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products, Rem. Sens. Environ., 102, 12-23.
- Douillet P., Ouilon, S. et E. Cordier, 2001. A numerical model for fine suspended sediment transport in the Southwestern lagoon of New Caledonia. Coral Reefs, 20, 361-372
- Dupouy, C., Neveux, J., Dirberg, G., Röttgers, R., Tenório, M. M. B., Ouillon, S. 2008. Bio-optical properties of the marine cyanobacteria Trichodesmium spp., Journal of Applied Remote Sensing, 2, 1-17, doi:10.1117/1.2839036.
- Dupouy C., Neveux J., Ouillon S., Frouin, R., Murakami H. Hochard S., Dirberg, G., 2010. Inherent optical properties and satellite retrieval of chlorophyll concentration in the lagoon and open ocean waters of New Caledonia, Marine Pollution Bulletin, 61, 503-518, doi:10.1016/j.marpolbul.2010.06.039.

- Faure V., Pinazo C., Torréton J-P., P. Douillet, ss p. Modelling the spatial and temporal variability of the SW lagoon of New Cal. II: 3D realistic simulations compared with in situ data. Marine Pollution Bulletin.
- Jouon A., Ouillon S., Douillet P., Lefebvre J.P., Fernandez J.M., Mari X., 2008. Spatio-temporal variability in Suspended Particulate Matter concentration and size distribution in a coral reef lagoon. Marine Geology, 256: 36-48.
- Gohin, F., Druon, J. N., Lampert, L., 2002. A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by Seadas in coastal waters. Int. J. Remote Sens. 23, 1639-1661.
- Gordon, H. R., Brown, O. B., Evans, R. H., Brown, J. W., Smith, R. C., Baker, K. S., D. K. Clark, 1988. A semianalytic radiance model of ocean color. J. Geophys. Res. 93(D9), 10909-10924.
- Jacquet S., Delesalle, B., Torréton, J.P., Blanchot[,] J., 2006. Response of phytoplankton communities to increased anthropogenic influences (southwestern lagoon, New Cal.). Mar. Ecol. Progr. Ser., 320, 65-78.
- Jouon, A., Ouillon, S., Douillet, P., Lefebvre, J.P., Fernandez, J.M., Mari, X., Froidefond, J.M., Spatiotemporal variability in suspended particulate matter concentration and the role of aggregation on size distribution in a coral reef lagoon. Mar. Geol., in press.
- Minghelli-Roman, A., Polidori, L., Mathieu-Blanc, S., Loubersac, L., Cauneau, F., 2007. Bathymetric estimation using MeRIS images in coastal sea waters. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1-17.
- Morel, A., Maritorena, S., 2001, Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal. J. Geophys. Res. 106, 7163-7180.
- Murakami, H., et al., 2006. Validation of ADEOS2GLI ocean color products using in situ observations. J. Oceanography, 62, 373-393.
- Neveux J., Tenório M.M.B., Jacquet S., Torreton J.P., Douillet P., Ouillon S., Dupouy C., (2009) Chlorophylls and phycoerythrins as markers of environmental forcings including cyclone Erica effect (March 2003) on phytoplankton in the southwest lagoon of New Caledonia and oceanic adjacent area. Int. J. Oceanography, Article ID 232513, 19.
- Ouillon S., Douillet P., Fichez R., Panché, J.Y., 2005. Enhancement of regional variations in salinity and temperature in a coral reef lagoon, New Caledonia. C.R. Geoscience, 337, 1509-1517.
- Ouillon, S., Douillet, P., Petrenko, A., Neveux, J., Dupouy, C., Froidefond, J.-M., Andréfouët, S., Muñoz-Caravaca, A., 2008. Optical algorithms at satellite wavelengths for total suspended matter in tropical coastal waters. Sensors 8, 4165-4185.
- O'Reilly, J. E., Maritorena, S., Siegel, D., O'Brien, M. C., Toole, D., Mitchell, B. G., et al., 2000. Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. In S. B. Hooker, & E. R. Firestone (Eds.), SeaWiFS postlaunch technical report series. SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses: Part 3, vol. 11 (pp. 9-23).
- Pinazo C., Bujan S., Douillet P., Fichez R., Grenz, C., Maurin, A., 2004. Impact of wind and freshwater inputs on phytoplankton biomass in the coral reef lagoon of New Caledonia during the summer cyclonic period : a coupled 3D biogeochemical modelling approach. Coral Reefs, 23, 281-296.
- Saporta, G., 1990. Probabilités et analyse de données et statistique. Editions Technip. 493 pp.
- Torréton J-P., Rochelle-Newall E., Jouon, A., Faure, V., Jacquet, S., Douillet P., 2007. Correspondence between the distribution of hydrodynamic time parameters and the distribution of biological and chemical variables in a semi-enclosed coral reef lagoon. Estuarine Coastal Shelf Sci., 74, 667-677.

Site de la NASA pour les informations concernant SeaWIFS, MODIS et la couleur de l'eau www.oceancolor.gsfc.nasa.gov/

ANNEXE Annexe 1 : Caractéristiques des capteurs

Radiomètre	MODIS
Largeur de fauchée	±55°
Longueur des fauchées	2 330 km
Résolution au nadir	0.25 km ^(a) , 0.5 km ^(b) , 1 km ^(c)
Bandes spectrales	36 (405-14 385 nm)
Date de première acquisition	24-feb-2000 (Terra) 24-jun-2002 (Aqua)

(a) Bandes 1-2; (b) Bandes 3-7; (c) Bandes 8-36

Annexe 2 : Bandes spectrales de MODIS

Primary Use	Band No.	Bandwidth (nm)	Spectral Radiance	Required SNR
Land/Cloud	1**	620-670	21.8	128
Boundaries	2**	841-876	24.7	201
Land/Cloud	3*	459-479	35.3	243
Properties	4*	545-565	29.0	228
	5*	1230-1250	5.4	74
	6*	1628-1652	7.3	275
	7*	2105-2155	1.0	110
Ocean Color/	8	405-420	44.9	880
Phytoplankton/	9	438-448	41.9	838
Biogeochemistry	10	483-493	32.1	802
,	11	526-536	27.9	754
	12	546-556	21.0	750
	13	662-672	9.5	910
	14	673-683	8.7	1087
	15	743-753	10.2	586
	16	862-877	6.2	516
Atmospheric	17	890-920	10.0	167
Water Vapor	18	931-941	3.6	57
	19	915-965	15.0	250

- 250 m², bandes 1,2 : • dédiées aux signaux terrestres, 645 puisse être utile pour la zone très côtière
- 500 m², bandes 3 à 7: seules les bandes 469 et 555 utiles pour les signaux marins
- 1 km², bandes 8 à • 36 : seuls les bandes : 412, 443, 488, 531, 551, 667 utiles pour l'observation de la couleur de l'eau.

Annexe 3 : Descriptif d'un granule MODIS de la base MODIS DB

Colonne	Туре			
fid	integer	+ not null		Clé
granule id	character(17)	not null		d'identification
platform	character(3)	1		d Identification
orbit	integer	l i		
daynightflag	character(2)	l i		
begin_gmtdate	timestamp without time zone	not null		
end_gmtdate	timestamp without time zone	not null		
year	character(4)	not null		Métadonnées
julianday	character(3)	not null		
hourminute	character(4)	not null		
collection	numeric(3,1)	l i	J	
process_gmtdate	timestamp without time zone	not null		
source_url	integer	L .		
insert_gmtdate	date	l i	-	
geofilename	character varying(60)	not null)	D 1 4 1
gringpointlongitude1	numeric(15,12)	not null		Position des 4 coins de
gringpointlongitude2	numeric(15,12)	not null		la scène
gringpointlongitude3	numeric(15,12)	not null		iu seene
gringpointlongitude4	numeric(15,12)	not null		
gringpointlatitude1	numeric(15,12)	not null		
gringpointlatitude2	numeric(15,12)	not null		
gringpointlatitude3	numeric(15,12)	not null		
gringpointlatitude4	numeric(15,12)	not null		
gpolygon	geometry	1	\mathcal{I}	- 36