

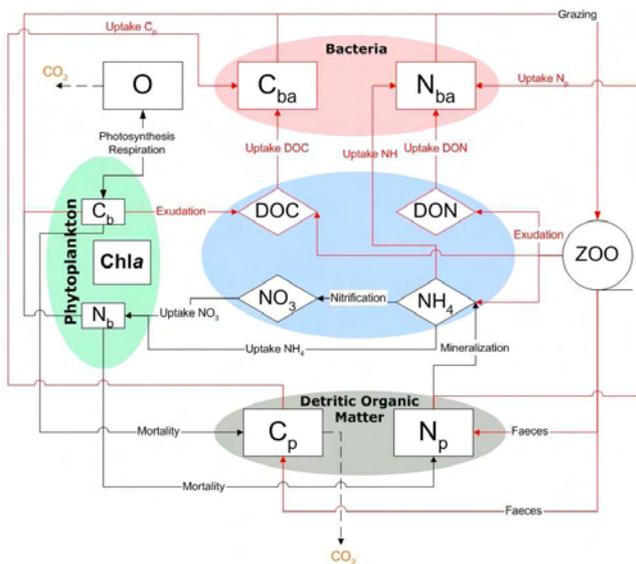
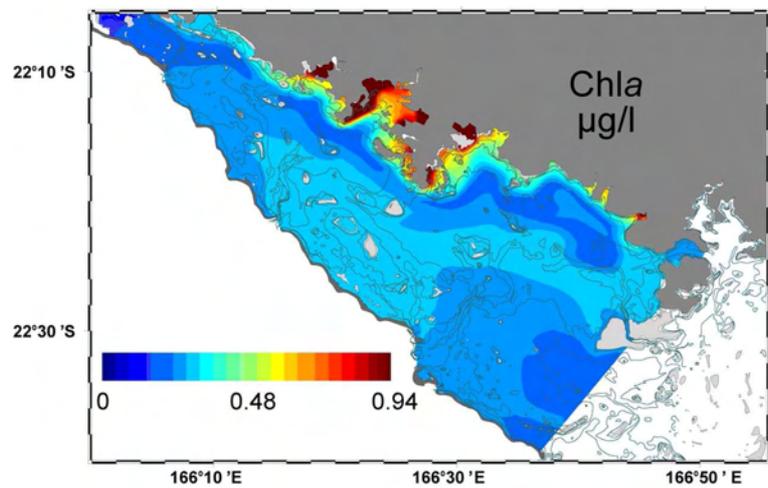
ZoNéCo

PROGRAMME D'ÉVALUATION DES RESSOURCES MARINES
DE LA ZONE ÉCONOMIQUE DE NOUVELLE-CALÉDONIE

Indicateurs de l'état physique, chimique et trophique des eaux du lagon Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie.

Rapport final

Jean-Pascal TORRETON^{1*}
 Vincent FAURE¹
 Séverine JACQUET¹
 Christel PINAZO²
 Sandrine CHIFFLET¹
 Philippe GERARD¹
 Jean-Yves PANCHE³



¹ : IRD, UR103 (CAMELIA), Centre IRD de Nouméa, 98 848 Nouméa Cedex, Nouvelle-Calédonie

² : UMR 6535, Centre d'Océanologie de Marseille, Station Marine d'Endoume, Chemin de la Batterie des Lions, F 13007 Marseille, France

³ : IRD US191 (IMAGO), Centre IRD de Nouméa, 98 848 Nouméa Cedex, Nouvelle-Calédonie

* : Adresse actuelle : IRD, UR103, ECOLAG, Case 093, 34095 Montpellier Cedex 05, France

SOMMAIRE

1	Introduction, objectifs	1
1.1	Les microorganismes, indicateurs précoces de l'état de l'environnement.....	1
1.2	Le lagon SW de Nouvelle-Calédonie : Un fonctionnement sous différents forçages.....	1
1.2.1	Apports terrigènes.....	1
1.2.2	Apports anthropiques.....	2
1.2.3	Apports benthiques.....	2
1.2.4	Courantologie.....	3
2	Démarche, méthodologie	6
2.1	Suivis du milieu.....	6
2.2	Echantillonnage.....	7
2.3	Analyses – méthodologies employées.....	7
2.3.1	Nutriments inorganiques et organiques dissous.....	7
2.3.2	Matériel organique particulaire.....	7
2.3.3	Phytoplancton.....	8
2.3.4	Bactérioplancton, biomasse et production.....	8
2.4	Modélisation 3D-couplée.....	10
2.4.1	Le modèle biogéochimique ECO3M-LAGON.....	10
2.4.2	Le modèle couplé.....	12
3	Résultats.....	14
3.1	Conditions de milieu dans le lagon Sud Ouest.....	14
3.1.1	Caractéristiques physico-chimiques et nutriments.....	14
3.1.2	Variables biologiques.....	14
3.2	Variations nyctémérales.....	18
3.3	Variations temporelles à court terme.....	19
3.4	Variations saisonnières.....	21
3.5	Validation du modèle.....	25
3.5.1	Mesures biologiques et physico-chimiques.....	25
3.5.2	Simulations réalistes.....	26
3.5.3	Comparaison simulation/données.....	35
4	Réalisation de scénarios.....	40
4.1	Introduction.....	40
4.2	Résultats des scénarios simulés.....	41
4.2.1	Vents stationnaires.....	41
4.2.2	Impact d'une crue.....	43
4.2.3	Augmentation des apports anthropiques.....	44
4.2.4	Impact d'un upwelling.....	46
4.2.5	Impact d'apports benthiques.....	48
4.3	Discussion.....	49
4.3.1	Le vent.....	49
4.3.2	Apports anthropiques ou terrigènes.....	49
4.3.3	Apports envisageables.....	50
4.3.4	Conclusion.....	50
5	Conclusion/perspectives.....	51
5.1	Apports de l'étude de modélisation.....	51
5.1.1	Caractérisation spatiale et temporelle.....	51
5.1.2	Nouvelles perceptions sur les forçages.....	51
6	Références citées.....	54
7	Annexe 1 - Production scientifique issue de l'opération.....	57
7.1	Publications parues.....	57
7.2	Publications soumises.....	57
7.3	Publications en préparation.....	57
7.4	Thèses.....	57
7.5	Présentations en séminaires et groupes de travail.....	57
7.6	Présentations en congrès nationaux.....	58
7.7	Présentations en congrès internationaux.....	58
8	Annexe 2 – Liste des données archivées et fournies à la SGVL.....	59
8.1	Septembre 2000.....	59
8.2	Juin 2003.....	59
8.3	Octobre 2004.....	59
8.4	Suivi temporel en M33 et N12.....	59
9	Annexe 3 – Coordonnées des stations échantillonnées.....	60

1 Introduction, objectifs

1.1 Les microorganismes, indicateurs précoces de l'état de l'environnement

Comme de nombreuses zones côtières tropicales, le lagon de Nouvelle-Calédonie, subit des perturbations environnementales d'origine anthropique. Parmi ces perturbations, les apports en éléments nutritifs sont susceptibles d'altérer profondément le fonctionnement de l'écosystème. Les effets majeurs de l'eutrophisation en milieu marin côtier ont suscité une abondante littérature scientifique. On cite généralement (Smith *et al* 1999) :

- L'accroissement de la biomasse phytoplanctonique et des algues épiphytiques.
- Des changements de la composition en espèce phytoplanctonique vers des taxons qui peuvent être toxiques ou nuisibles.
- L'accroissement des blooms nuisibles de zooplancton gélatineux.
- Des changements dans la production, la biomasse et la composition spécifique des macroalgues et des plantes vasculaires.
- La réduction de la transparence de l'eau.
- La mort et la disparition des coraux constructeurs de récifs.
- L'élévation du pH et la diminution de l'oxygène dissous dans la colonne d'eau.
- Des changements de composition vers les espèces animales les moins désirables.

La plupart de ces conséquences ne sont observables que lorsque l'écosystème est déjà très perturbé. L'étude des microorganismes, en tant qu'indicateurs des modifications des apports en nutriments, permet d'obtenir un index précoce des changements survenant dans l'environnement. En effet, les bactéries et le phytoplancton ont un taux de croissance potentiellement élevé et sont très liés aux cycles des nutriments. Ces caractéristiques en font des indicateurs directs et sensibles de l'état de l'écosystème et des variations qui surviennent au sein de celui-ci (Paerl *et al* 2002, 2003). Des changements au sein des populations microbiennes émergent souvent bien avant que des perturbations n'apparaissent dans les échelons trophiques supérieurs et permettent donc d'intervenir avant que les conséquences se transmettent à l'ensemble de l'écosystème.

1.2 Le lagon SW de Nouvelle-Calédonie : Un fonctionnement sous différents forçages

On peut considérer que les processus dans la colonne d'eau lagonaire subissent une quadruple influence : Les apports terrigènes, les apports anthropiques, les apports benthiques, la circulation des eaux lagonaires.

1.2.1 Apports terrigènes

Les apports terrigènes sont importants, mais irréguliers, et présentent une zone d'influence peu étendue sur le lagon. Le régime climatique se caractérise en effet par deux saisons principales séparées par deux intersaisons. La première, de Novembre à Avril, est la saison « chaude et humide », marquée par d'éventuels cyclones. La seconde, de Juin à Août, est la saison « fraîche » ; elle peut être marquée par des pluies fortes. Les pluies sur les bassins versants sont très variables tant au niveau mensuel qu'annuel : la variabilité interannuelle des précipitations peut varier du simple au quintuple, et l'irrégularité mensuelle est encore plus élevée. Le relief accidenté et l'imperméabilité des sols entraînent une forte liaison entre les débits des rivières et les chutes de pluies.

Les apports terrigènes du lagon Sud-Ouest s'effectuent principalement par l'influence de trois rivières: la Dumbéa, qui se jette dans la baie de Dumbéa ; la Coulée débouchant dans la baie de Boulari; la rivière des Pirogues, qui se jette dans la partie Sud de la grande terre. Les débits moyens de ces rivières sont faibles, de l'ordre de $5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ pour la Dumbéa. En

revanche, lors d'épisodes d'importantes pluies, ces débits peuvent rapidement atteindre plus de $300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Peu de données existent sur la composition des rivières. Seul [Trescases \(1975\)](#) a mesuré les concentrations en minéraux dissous sur la rivière Dumbéa. Les teneurs en silice y sont de l'ordre de $230 \mu\text{M}$ de SiO_2 , alors qu'elles sont en moyenne de $2 \mu\text{M}$ dans le chenal lagonaire et atteignent en moyenne $3,5$ à $5,8 \mu\text{M}$ selon les baies ([Jacquet et al 2006](#)). Cette source d'approvisionnement en silice dissoute par les rivières permet donc de supposer que cet élément ne sera pas limitant de la production autotrophe.

1.2.2 Apports anthropiques

En Nouvelle-Calédonie les apports anthropiques sont principalement liés à l'urbanisation croissante de la presqu'île de Nouméa, ainsi qu'à l'exploitation minière (nickel essentiellement) à ciel ouvert ([Labrosse et al 2000](#)). Le développement économique de l'île s'appuie en particulier sur le développement de projets d'exploitations minières. Ces exploitations minières ont pour conséquence initiale un accroissement de la déforestation, et donc de l'érosion des sols, entraînant un apport supplémentaire de particules au lagon. Ces particules en sédimentant, en particulier sur les récifs frangeants, perturbent les organismes tant pélagiques que benthiques. En outre, les apports en métaux provoquent une contamination des organismes marins ([Breau 2003](#), [Hédouin 2006](#), [Hédouin et al 2006](#)) et peuvent se traduire par des perturbations du fonctionnement des réseaux trophiques planctoniques ([Rochelle-Newall et al soumis](#)) ou benthiques ([Pringault et al 2007](#)).

Les apports anthropiques sont réguliers, en continuelle augmentation, et limités principalement aux baies les plus proches de l'agglomération de Nouméa. Les effluents domestiques issus de la ville de Nouméa (environ 146 000 habitants, [ISEE 2004](#)) ne sont en effet que partiellement traités avant rejet dans le milieu lagonaire, notamment dans la baie de Sainte-Marie, dans la Grande Rade et dans la baie de Koutio. On peut ainsi distinguer en fonction des apports anthropiques et terrigènes :

- La **baie de Boulari** essentiellement soumise aux apports terrigènes véhiculés par la rivière La Coulée et de manière plus indirecte par la rivière des Pirogues. Ces deux rivières drainent des bassins versants présentant des activités d'extraction minières passées et présentes importantes.
- La **baie de Dumbéa** soumise pour une large part aux apports terrigènes de la Dumbéa, et pour partie aux apports industriels de l'usine de traitement de minerai de nickel (Grande Rade).
- La **Grande Rade** caractérisée par la présence de l'usine pyrométallurgique de la SLN en fond de baie et qui reçoit en outre des eaux usées.
- La **baie de Sainte-Marie** sous forte influence anthropique en recevant les eaux usées non traitées du quartier de Sainte-Marie.
- Les autres zones lagonaires, plus éloignées des influences anthropiques et terrigènes sont *a priori* les zones les plus oligotrophes. En particulier la partie sud du lagon, directement sous l'influence des apports en eaux océaniques, est la plus oligotrophe

1.2.3 Apports benthiques

[Chardy et al \(1988\)](#) ont pu différencier les fonds sédimentaires du lagon en trois types en se basant sur des données sédimentologiques ([Debenay 1985](#)) et sur un regroupement biocénétique du benthos. Ces trois entités sont :

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

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

Leur répartition spatiale est respectivement de 35%, 50% et 15% sur l'ensemble du lagon Sud-Ouest (Chardy *et al* 1988, Clavier & Garrigue 1999), tandis que les constructions coralliennes ne représentent que 5% de la zone considérée. En terme de biomasse, les fonds meubles sont caractérisés par des populations de macrophytes, qui sont par contre absentes des fonds blancs ou envasés. En outre, le microphytobenthos représente une biomasse non négligeable dont la distribution spatiale suit un gradient décroissant du récif barrière vers la côte (Garrigue 1998).

Une étude des flux métaboliques dans les sédiments (Clavier & Garrigue 1999) a permis de mettre en évidence deux types de fonctionnement. Les fonds envasés, dans les baies, sont visiblement hétérotrophes, suggérant l'apport d'énergie extérieure par sédimentation du matériel particulaire de la colonne d'eau, ou des phénomènes de resuspension et dépôt. A l'inverse, les fonds blancs et gris sont autotrophes, et donc contrôlés principalement par la production primaire benthique.

Enfin, des mesures de flux de nutriments à l'interface benthopélagique ont pu être réalisées lors des campagnes Camecal 2 et 9 (C. Grenz, données non publiées). Elles mettent en évidence des flux positifs importants de nutriments vers la colonne d'eau (de l'ordre de 15 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ d'ammonium) aux stations côtières, ainsi qu'aux stations d'arrière récifs. On peut cependant s'attendre à une importante variabilité de ces flux sur les fonds autotrophes où les populations benthiques seront consommatrices de nutriments en phase de production. Ces flux suggèrent cependant de possibles interactions entre les compartiments benthiques et pélagiques.

1.2.4 *Courantologie*

La courantologie dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie est maintenant bien connue depuis la validation d'un modèle 2D (Douillet 1998) puis 3D (Douillet *et al* 2001). Les facteurs contrôlant la circulation des eaux du lagon sont la marée et surtout le vent. La direction du courant de surface est contrainte par les limites du lagon et contrôlée par la direction du vent (Douillet *et al* 2001).

Dans cette région du Pacifique Ouest, le vent est dominé par des flux d'alizés venant principalement de l'Est et du Sud Est. Les vents d'une orientation comprise entre 80 et 140° représentent presque 70 % de ceux observés en moyenne journalière sur l'année (Bujan 2000). Ces alizés (110°) sont présents l'essentiel de l'année, et ponctuellement entrecoupés de coups de vent d'ouest (270°), plus particulièrement en hiver. Lorsque le vent souffle au Sud-est (vitesse moyenne 8 m.s^{-1} , direction 110°), il pousse l'eau lagonaire de surface vers le Nord-Ouest (Figure 1) et les eaux océaniques oligotrophes du bassin de la Nouvelle-Calédonie entrent dans le lagon par le Sud puis s'évacuent par les passes. Le second régime de vent le plus fréquent, orienté à l'Ouest, est caractéristique de la saison hivernale ou des dépressions tropicales et des cyclones. La courantologie de surface induite par ces vents entraîne les eaux océaniques dans le lagon par les passes pour ensuite s'échapper par le lagon sud. Ce régime de vent confine les eaux côtières dans les baies et limite leur renouvellement, contrairement aux vents de Sud-est (Figure 1).

Temps de résidence des eaux

Les vents conditionnent donc largement le renouvellement et la circulation des eaux lagonaire. Différentes grandeurs peuvent être utilisées pour caractériser le temps de résidence des eaux en un point donné du lagon. Il est possible par exemple de définir le temps nécessaire à la parcelle d'eau correspondant à ce point pour quitter le lagon (Water Export

Time). Celui-ci est bien entendu très variable selon la zone lagunaire considérée (Figure 2). D'une manière générale, les valeurs minimales sont observées dans la partie sud du lagon sud-ouest, sous forte influence océanique, et les valeurs maximales se retrouvent dans les baies.

La régularité des vents autorise en moyenne une homogénéisation de la colonne d'eau, et impose un temps de renouvellement court, de l'ordre de 6,5 jours en moyenne sur le lagon Sud-Ouest (calculé dans le cas d'Alizés constant à 8 m.s^{-1} , Jouon *et al* 2006).

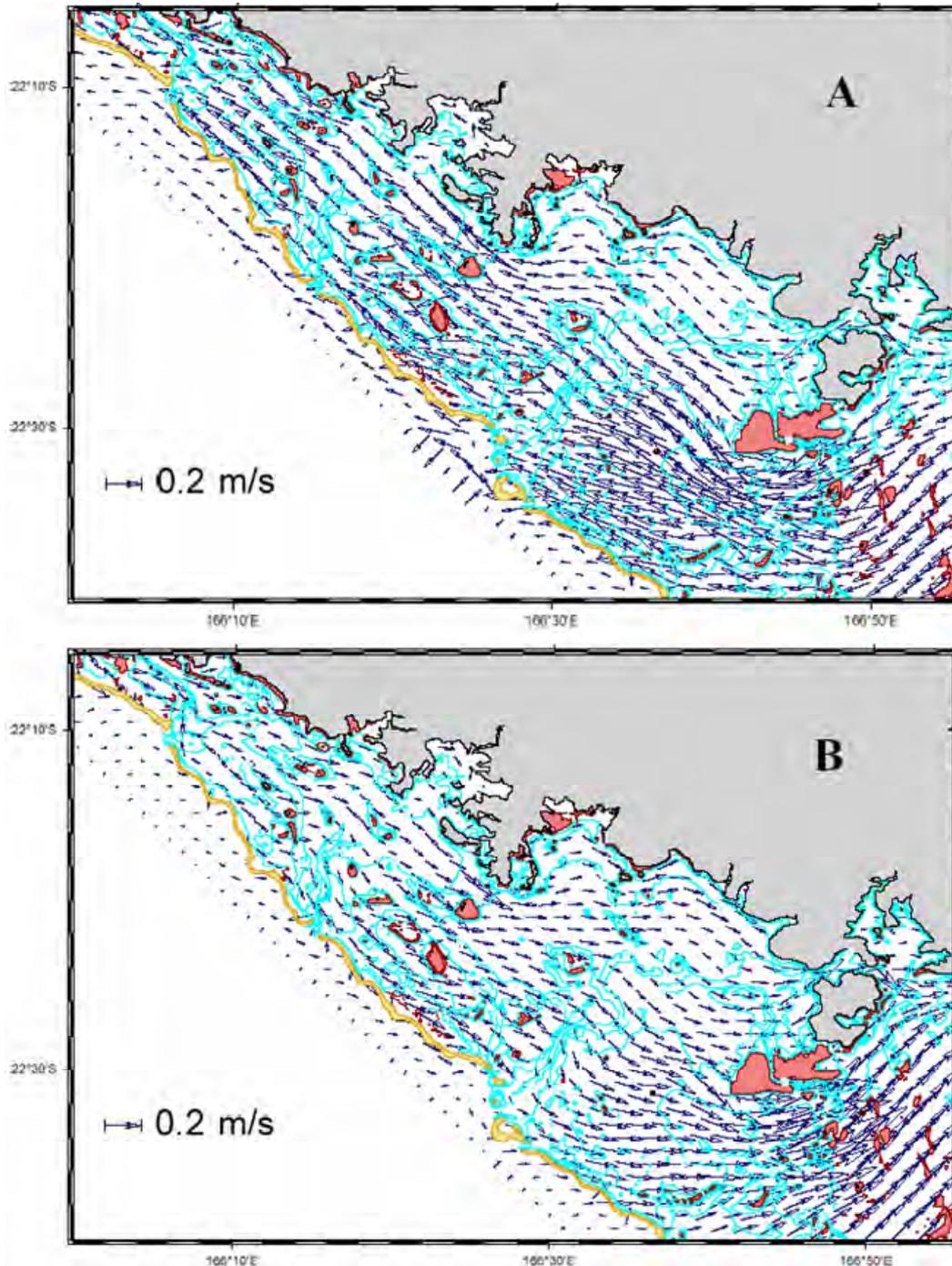


Figure 1 : Courants de surface modélisés induits par des Alizés (110°) de 8 m.s^{-1} (A), et par des vents d'Ouest de 8 m.s^{-1} (B) (modèle MARS3D).

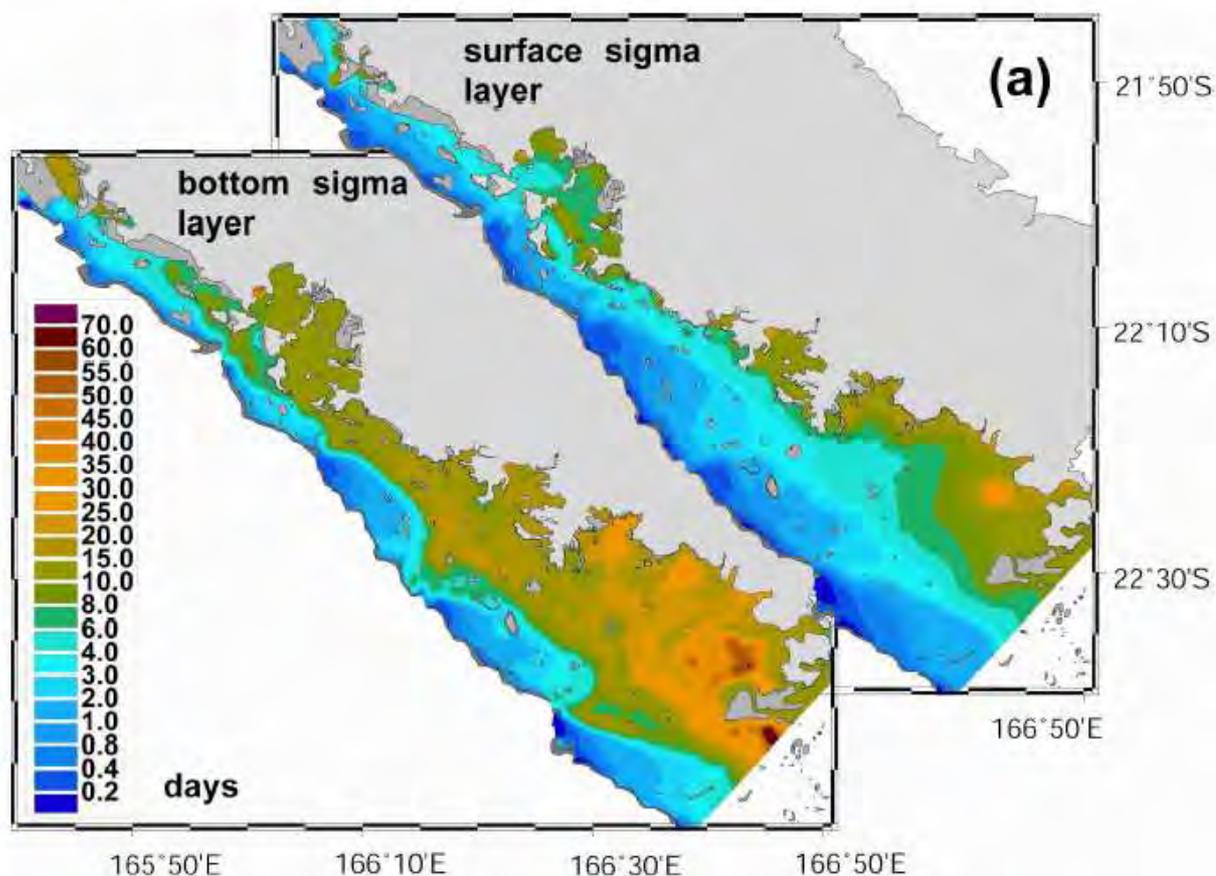


Figure 2 : Temps de résidence des eaux du lagon Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie (voir définition dans le texte), en surface et au fond. Carte extraite de Jouon et al (2006).

Cette quadruple influence sur les processus planctoniques montre qu'anticiper les conséquences des apports anthropiques sur le fonctionnement des communautés planctoniques nécessite (1) de décrire et comprendre le fonctionnement planctonique en relation avec la circulation des eaux lagunaires, (2) d'évaluer sa sensibilité aux apports, et (3) de synthétiser ces connaissances sous forme d'un outil permettant d'anticiper les effets des apports. Cet outil peut être fourni par la modélisation biogéochimique couplée à un modèle hydrodynamique. C'est l'objectif du travail présenté dans ce rapport.

Rattachement à d'autres programmes :

Ce travail a également été effectué avec le support financier de l'IRD (UR103, Camélia), du Programme National Environnement Côtier (PNEC) sur son Chantier Nouvelle-Calédonie, et du Ministère de l'Outre-Mer¹.

¹ Jacquet S, Torréton J-P, Delesalle B, Duran R, Blanchot J, Pringault O, Chifflet S (2005) Diversité planctonique et ses modifications par les apports anthropiques dans le lagon Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie. Rapport d'étude financée par le Ministère de l'Outre-Mer. 72 p.

Torréton J-P, Bouvier T, Pringault O, Mouquet N (2006) Diversité du bactérioplancton et modifications par les apports anthropiques dans le lagon Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie. Rapport d'étude financée par le Ministère de l'Outre-Mer. 37 pp.

2 Démarche, méthodologie

Décrire et comprendre le fonctionnement planctonique nécessite d'aborder les variations spatiales et temporelles des biomasses et activités. Cette exploration des variations à différentes échelles de temps et d'espace en relation avec les conditions environnementales permet également de comprendre la sensibilité de ces communautés aux apports. Ces aspects constituent ainsi le premier objectif de cette étude et correspond à un premier travail de thèse (Jacquet 2005, Paris VI).

Le développement, la validation et l'utilisation d'un modèle 3D couplé dynamique physique-biogéochimique du lagon Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie, en constituent le second objectif. Ce développement, correspondant à un second travail de thèse (Faure 2006, Université de la Méditerranée), avait pour but de caractériser la dynamique spatio-temporelle des flux de matière organique et de prédire son évolution sous différents scénarios de forçages physiques et d'apports anthropiques.

2.1 Suivis du milieu

Les opérations de terrain avaient pour objectif de décrire la distribution des variables à l'échelle du lagon Sud Ouest et d'évaluer leur variabilité temporelle. Quatre types d'échantillonnages ont ainsi été réalisés :

- 1) Une couverture spatiale du lagon sud-ouest comprenant un réseau de 87 stations réparties entre les limites formées par la ligne canal de la Havannah - passe de Mato à l'est et la ligne Anse longue - passe de Uitoé à l'ouest (Figure 3, Annexe 3). Cette couverture, qui a permis de définir les conditions initiales pour la modélisation, a été effectuée en 2 occasions² : en Juin 2003 lors de la campagne Camecal 5 à bord du N.O. Alis et en Octobre 2004 lors de la campagne Camecal 6 à bord du N.O. Louis Hénin
- 2) Des radiales de 10 stations (Figure 3) ont été échantillonnées 3 fois au cours d'une période de 6 semaines après ces campagnes pour valider la modélisation.
- 3) Un suivi temporel sur deux stations côtières (Baie de Sainte-Marie N12 et station lagonaire M33 près de l'îlot Maître, Figure 3) a été effectué d'avril 2002 à avril 2004 avec une fréquence de 7 à 14 jours pour évaluer l'importance de la variabilité temporelle.
- 4) Des suivis temporels sur des cycles jour-nuit (2 stations citées ci-dessus en 2 occasions) pour analyser l'importance de la variabilité du milieu à haute fréquence.

Les mesures effectuées ont porté sur les analyses suivantes :

- Profils verticaux par sonde multiparamètre de la température, la salinité, l'irradiance, la turbidité et la chlorophylle a
- Mesures sur des échantillons d'eau de subsurface des variables physico-chimiques et trophiques suivantes :
 - nutriments inorganiques dissous (N, P, Si) ;
 - matériel organique dissous (C, N et P),
 - matériel organique particulaire (C, N et P),
 - concentrations en chlorophyllides, production primaire,
 - biomasse et production bactériennes.

² Les données de la campagne de septembre 2000 ont été également mises à disposition du programme ZoNéCo.

2.2 Echantillonnage

A tous les prélèvements étaient associés des profils verticaux de température, salinité, fluorescence *in vivo* de la chlorophylle, et turbidité analysés dès le retour au laboratoire.

Les prélèvements correspondant à la **couverture spatiale** à large échelle ont été réalisés au cours de campagnes de courte durée (quelques jours) à bord de l'Alis ou du L Hénin. Les échantillons d'eau (~ 10 stations par jour) étaient collectés à 3 m de profondeur au moyen d'une bouteille Niskin et immédiatement analysés (productions planctoniques) ou conditionnés (biomasses, concentrations en éléments nutritifs) pour analyses ultérieures. Les profils CTD ont montré la très bonne représentativité de la colonne d'eau pour les prélèvements effectués à 3 m. Ces campagnes ont également permis l'étude des variations nyctémérales.

Les prélèvements correspondant aux **radiales de validation** étaient collectés à partir du Coris (embarcation rapide de 7 m) en 2 profondeurs au moyen d'une bouteille Niskin. Les échantillons d'eau étaient immédiatement conditionnés (biomasses et concentrations en éléments nutritifs) et placés dans des glacières pour analyses ultérieures. Les échantillons pour mesure de la production bactérienne (cf 2.3.4) étaient immédiatement incubés à bord de l'embarcation pour éviter les biais dus à un confinement trop long lors de ces sorties d'une demi-journée.

Les prélèvements correspondant au **cycle annuel** étaient effectués le matin (6h30-7h30) au moyen d'une embarcation rapide. Les échantillons d'eau étaient collectés en 5 profondeurs réparties le long de la colonne d'eau. Les échantillons étaient conservés dans les bouteilles Niskin de 5 litres jusqu'au retour au laboratoire dans les 2 heures où ils étaient mélangés avant les analyses.

2.3 Analyses – méthodologies employées

2.3.1 *Nutriments inorganiques et organiques dissous*

La concentration en **ammonium** (NH₄) était immédiatement déterminée par fluorimétrie selon la méthode fluorimétrique employant l'*o*-phthaldialdéhyde (Holmes *et al* 1999). Le conditionnement des échantillons à -20°C était effectué pour les mesures d'éléments nutritifs minéraux (**NO₃+NO₂**, **PO₄**, **Si**) et organiques (azote et phosphore organiques dissous : **NOD**, **POD**). Les nitrates étaient réduits en nitrites suivant Wood *et al* (1967), la somme des concentrations en nitrates et nitrites était déterminée d'après Raimbault *et al* (1990) à l'aide d'un autoanalyseur Bran+Luebbe (*Autoanalyzer III*). Les silicates dissous et colloïdaux étaient mesurés selon la méthode de Koroleff (1983) et analysés par colorimétrie en utilisant un autoanalyseur Bran+Luebbe (Mullin & Riley 1955). La matière organique était minéralisée par oxydation par voie humide (Raimbault *et al* 1999), puis les composés inorganiques étaient mesurés par colorimétrie. Les concentrations en NOD et POD étaient obtenues en retranchant les concentrations en nitrates et phosphate obtenues précédemment du total oxydé.

2.3.2 *Matériel organique particulaire*

Le **carbone et azote organique particulaire** était collecté par filtration (750 ml) sur des membranes Whatman GF/F (porosité nominale 0,7µm, diamètre 25 mm) préalablement calcinées à 450 °C pendant 2 heures. Les membranes pliées en deux puis placées sur une feuille d'aluminium épaisse préalablement calcinée étaient placées dans une étuve à 50°C. Après 24h, l'aluminium était plié et l'échantillon stocké dans un dessiccateur jusqu'à l'analyse. La méthode utilisée est la combustion de la matière organique par l'oxygène suivie

d'un dosage du dioxyde de carbone par un analyseur CHN Perkin Elmer 2400. Le **phosphore organique particulaire** était collecté par filtration (1000 ml) sur des membranes Whatman GF/F préalablement autoclavées. Le filtre était plié en deux, inséré dans une feuille d'aluminium épaisse préalablement calcinée et l'ensemble était placé à -20°C jusqu'à l'analyse. Le phosphore organique particulaire était alors complexé avec du molybdate d'ammonium pour former du phosphomolybdate d'ammonium, puis était réduit par l'acide ascorbique. Ce complexe était dosé par colorimétrie à l'autoanalyseur III Bran+Luebbe (Mullin & Riley 1955).

2.3.3 *Phytoplankton*

Les mesures des **biomasses et des productions phytoplanctoniques** ont été effectuées en 3 classes de taille (<2, 2-10 et >10 µm). La biomasse phytoplanctonique (concentration en chlorophylle *a*) était déterminée par fluorimétrie (Lorenzen 1965) par extraction au méthanol de la fraction retenue sur membranes Whatman GF/F (porosité nominale 0,7 µm). Les fractions >2 µm et > 10 µm étaient déterminées par filtration sur filtres Nuclepore de porosité 2 et 10 µm. Les productions phytoplanctoniques étaient estimées par l'incorporation de ¹⁴C-bicarbonate (Steeman-Nielsen 1951). Les fractions >2 µm et > 10 µm étaient déterminées par filtration de l'eau en fin d'incubation sur filtres Nuclepore de porosité 2 et 10 µm. Les **énumérations et identifications des nanoalgues** ont été effectuées sur des prélèvements (250 ml) immédiatement fixés (formol tamponné au Borax, 2% concentration finale) et stockés à l'obscurité jusqu'au comptage. Après concentration et sédimentation en cuve d'Utermöhl, les échantillons ont été comptés et identifiés jusqu'au genre et - si possible - l'espèce en microscopie inversée. Les principaux nanoflagellés, notamment les coccolithophorides, ont été identifiés en microscopie électronique à balayage. Les dénombrements et identifications ont été effectués à l'UMR 8046 EPHE-CNRS. Les **énumérations et identifications du picophytoplankton** ont été effectuées sur des prélèvements immédiatement fixés (glutaraldéhyde, 2% concentration finale) et après 10 minutes, cryogénisés dans l'azote liquide. Après décongélation, les dénombrements ont été effectués en cytométrie de flux (FacScan). *Synechococcus*, *Prochlorococcus* et picoplancton eucaryote ont été discriminés par diffraction aux petits angles et fluorescence.

2.3.4 *Bactérioplancton, biomasse et production*

L'**énumération des bactéries** a été effectuée par cytométrie en flux ou par microscopie à épifluorescence. Les échantillons pour la cytométrie en flux (2ml) étaient immédiatement fixés (glutaraldéhyde, 2% concentration finale) et après 10 minutes, cryogénisés dans l'azote liquide. Après décongélation, les bactéries étaient colorées au SYBR green (Marie *et al* 1997) et dénombrées. Les échantillons pour microscopie à épifluorescence (10 ml) étaient immédiatement fixés (formol tamponné, 2% concentration finale) et conservés à 4°C au maximum une journée. Après filtration sur membranes Nuclepore noires de porosité 0,2 µm, les bactéries étaient colorées au DAPI (4'6-diamidino-2-phenylindole, Porter & Feig 1980) et énumérées. La **production bactérienne de biomasse** était estimée par l'incorporation de [*methyl*-³H] thymidine (TdR) dans l'ADN (Fuhrman & Azam 1982). Les incubations étaient effectuées pendant 30 min à l'obscurité et à la température du milieu, en employant une concentration saturante en ³H-TdR (15 nM). L'incorporation était arrêtée au formol (tamponné, 2% concentration finale) et les macromolécules, précipitées au TCA, étaient recueillies par filtration sur membrane Nuclepore (porosité 0,2 µm), rincées 4 fois au TCA 5%, et disposées en fioles à scintillation. La radioactivité incorporée était déterminée par comptage en scintillation liquide et la quantité de TdR incorporée était convertie en production bactérienne en utilisant un facteur de conversion de 2,9 10¹⁸ cell.mol⁻¹TdR (Jacquet 2005) et 12,4 fgC.cellule⁻¹ (Fukuda *et al* 1998).

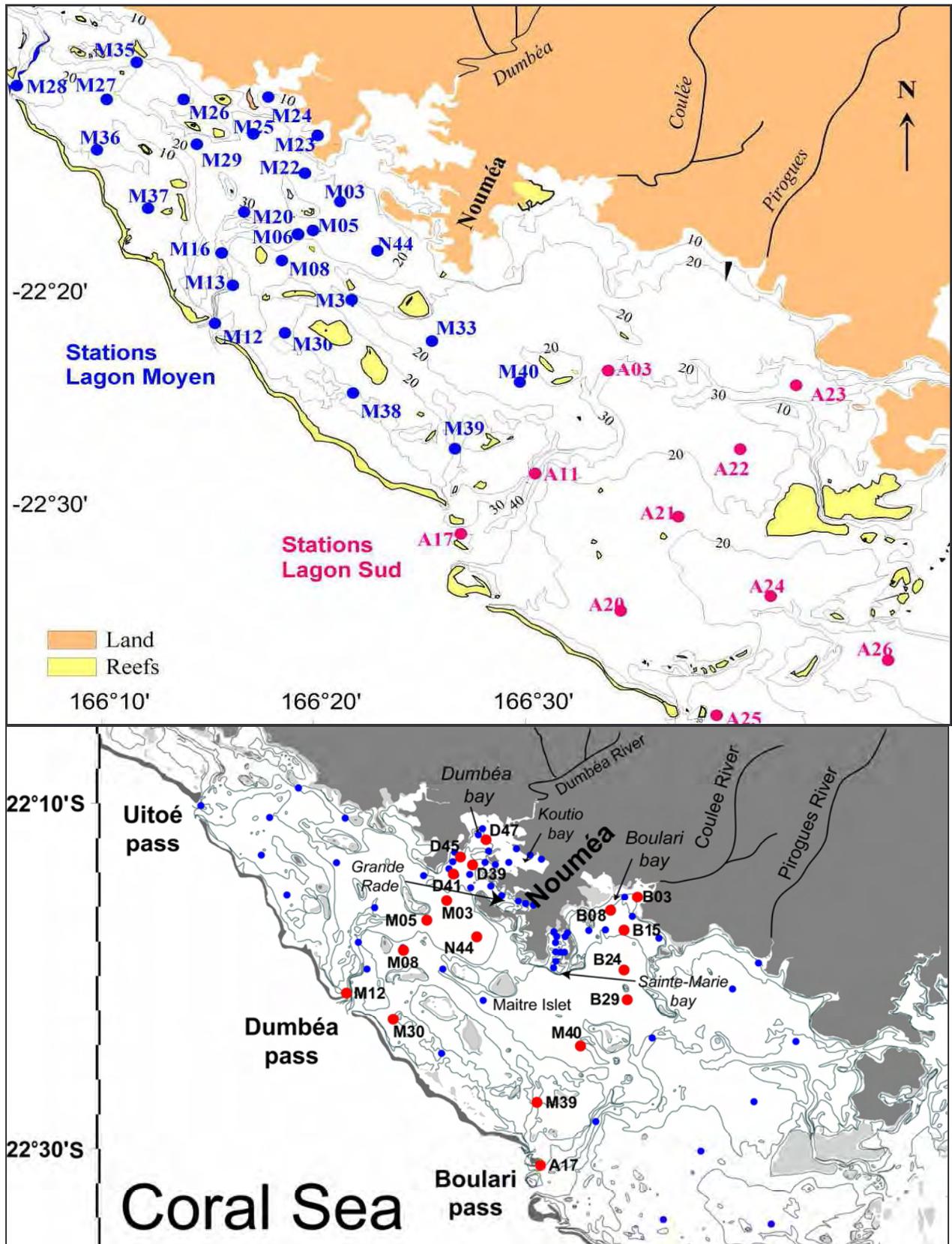


Figure 3 : Carte des stations de prélèvements dans le lagon Sud Ouest de Nouvelle-Calédonie. A : stations du chenal lagunaire Sud-Ouest. B : Détail des radiales en zone urbaine et lagunaire proches. Les cercles rouges représentent les stations des deux radiales Nord et Sud.

2.4 Modélisation 3D-couplée

La modélisation traitée dans cette étude se situe dans le champ disciplinaire de la « modélisation côtière ». Son but est de simuler la variabilité spatio-temporelle à court terme des flux de matière organique et de nutriments du lagon Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie. Le modèle utilisé dans cette étude est un modèle tridimensionnel couplé, comportant une partie biogéochimique et une partie hydrodynamique. Le modèle biogéochimique (ECO3M-LAGON) décrit schématiquement l'écosystème pélagique du lagon, et permet de calculer les concentrations de divers éléments. De son côté, le modèle hydrodynamique (MARS3D) simule les courants au sein du lagon.

2.4.1 Le modèle biogéochimique ECO3M-LAGON

2.4.1.1 Présentation du modèle

Le modèle biogéochimique à la base de ce travail a été présenté pour la première fois par Pinazo *et al* (1996), et appliqué au Nord-Ouest de la Méditerranée. Il a été appliqué au lagon Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie par Bujan (2000) puis Pinazo *et al* (2004). Le modèle actuel est présenté sur la Figure 4. La structure choisie est de la forme PZND (phytoplancton - zooplancton - nutriments - détritus). Il comprend 12 variables d'état (Tableau 1). Le zooplancton n'est pris en compte que sous la forme d'une population théorique, non différenciée et statique, et aucune variable d'état ne lui est associée. Le modèle décrit les cycles du carbone et de l'azote au sein de chaque compartiment, avec la particularité de considérer les rapports Carbone/Azote (C/N) variables. Cela permet, entre autres, d'utiliser la méthode du quota cellulaire (Droop 1968, Droop 1973, Tett 1987) pour la croissance phytoplanctonique. Celle-ci est déterminée par l'état nutritionnel des cellules à travers la comparaison de ce quota cellulaire phytoplanctonique avec le rapport de Redfield (1963). Cet état nutritionnel est alors pris en compte dans le calcul du taux de croissance, à travers le facteur de limitation par les nutriments. Il est repris dans le calcul du taux d'uptake d'ammonium et de nitrates, qui ne dépend donc pas seulement de la concentration des nutriments dans l'eau. Cette formulation en quota cellulaire a également été retenue dans le cas des processus bactériens (Thingstad 1987).

Tableau 1 : Variables d'état (exceptée la *Chl.a* qui est une variable diagnostique).

	Variables	Définition
1	C_B	Carbone phytoplanctonique
2	N_B	Azote phytoplanctonique
3	<i>Chl.a</i>	<i>Chlorophylle a</i>
4	C_{BA}	Carbone Bactérien
5	N_{BA}	Azote Bactrien
6	C_P	Carbone particulaire détritique
7	N_P	Azote particulaire détritique
8	DOC	Carbone organique dissous
9	DON	Azote organique dissous
10	NH₄	Ammonium
11	NO₃	Nitrates
12	O	Oxygène

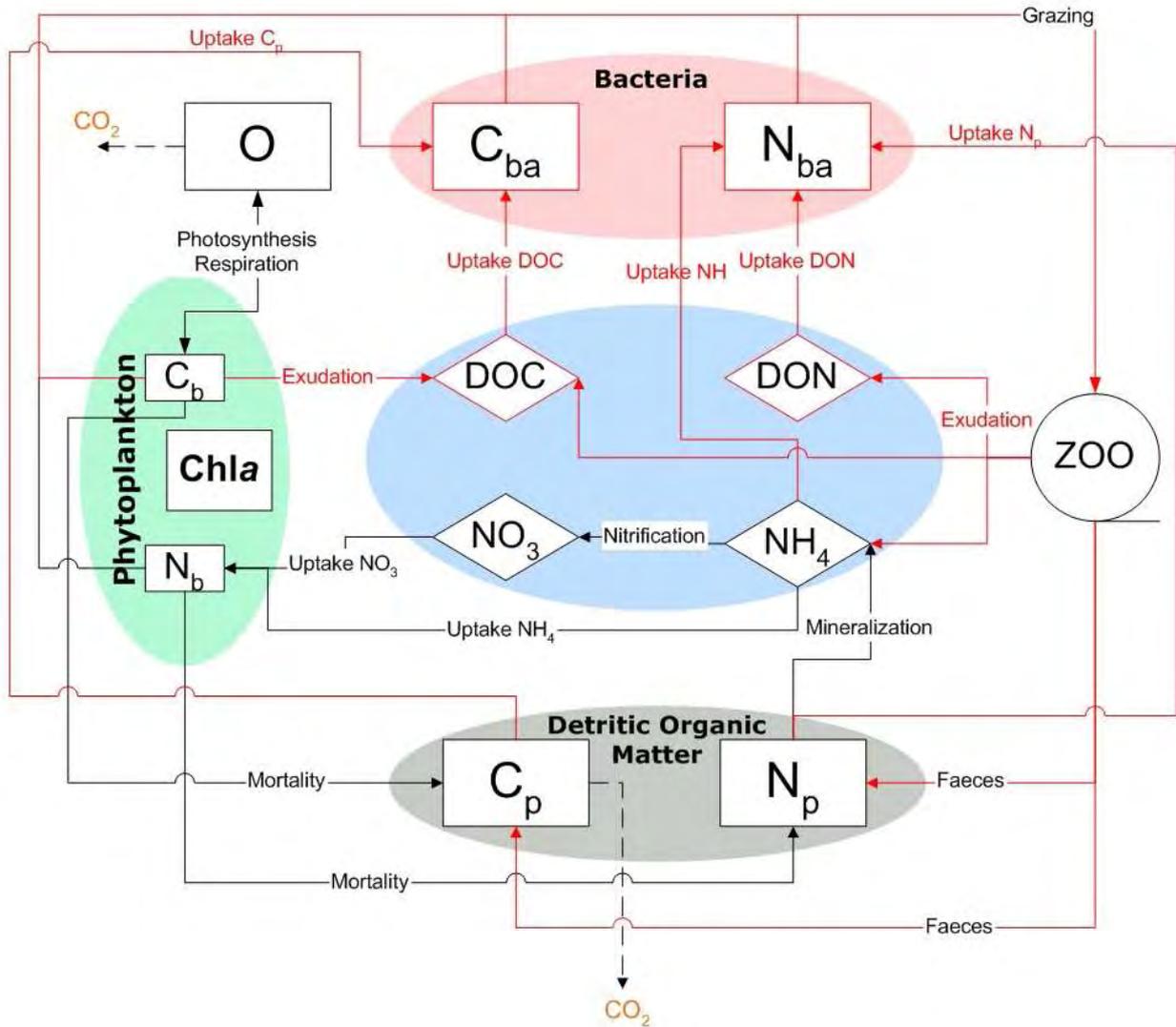


Figure 4 : Description du modèle biogéochimique (ECO3M-LAGON)

Au cours du travail réalisé dans le cadre de cette opération ZoNéCo, de nombreuses améliorations ont été apportées au modèle initial. Un effort a été accompli afin de mieux décrire les processus du réseau trophique microbien (ajout d'un compartiment bactérien, de la matière organique dissoute). En outre, l'ajout d'une variable spécifique pour la *Chl.a* dans le modèle a permis de mieux représenter une des variables clés pour l'écosystème.

2.4.1.2 Plateforme informatique Eco3M

Une plateforme informatique innovante, Eco3M (pour *Ecological Mechanistic and Modular Modelling*), a été développée en collaboration avec Melika Baklouti. Ce programme est destiné à la modélisation numérique et à la simulation de la dynamique d'écosystèmes marins représentés par des variables d'état définies par l'utilisateur. Comme son nom l'indique, ce programme est totalement modulaire de façon à laisser à l'utilisateur le choix (en nombre et nature) des variables d'état caractérisant l'écosystème qu'il souhaite modéliser, ainsi que le choix des modèles de processus biogéochimiques décrivant les relations dynamiques entre ces variables d'état. Ce programme a été conçu de façon à pouvoir gérer de façon naturelle des modèles multi-éléments et multi-espèces, ce qui permet d'envisager de considérer plusieurs groupes et/ou espèces de phytoplancton, de zooplancton ou d'autres

groupes fonctionnels, et ainsi de caractériser chacune de ces communautés par leurs concentrations en divers éléments (carbone, azote, phosphore, chlorophylle, silice, fer, etc.).

Le modèle global est constitué de l'ensemble des équations reliant les variables d'état entre-elles. Ces différents sous-modèles décrivant les processus biogéochimiques peuvent soit être choisis dans la bibliothèque du code Eco3M (qui est destinée à être enrichie en permanence par de nouveaux formalismes ou de nouveaux processus), soit être introduits par l'utilisateur si la bibliothèque ne contient pas le modèle de processus en question.

2.4.2 *Le modèle couplé*

2.4.2.1 Principe du couplage

ECO3M-LAGON a été couplé avec MARS3D, le modèle hydrodynamique, suivant le principe schématisé sur la [Figure 5](#).

Le couplage entre les deux modèles est dynamique, ou « *online* ». Le schéma d'advection-diffusion calcule l'évolution des variables biogéochimiques en parallèle de l'exécution du code physique, avec le même pas de temps de 50 s. Le modèle biogéochimique calcule le terme de tendance des variables avec un pas de temps de 20 min.

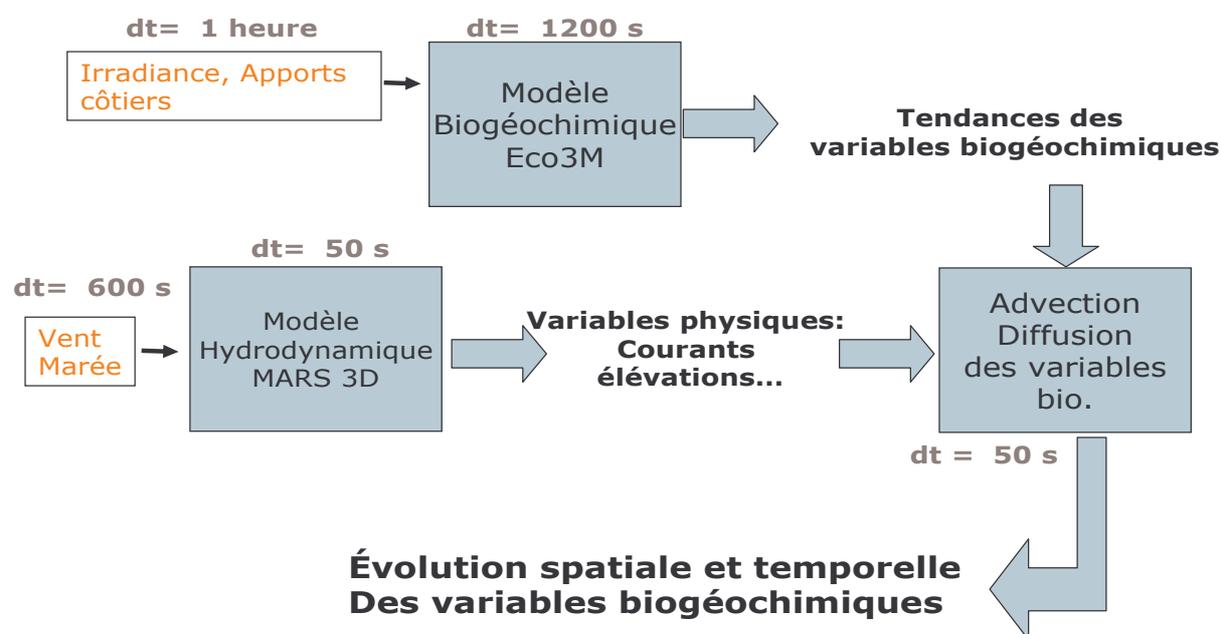


Figure 5 : Schéma conceptuel du modèle couplé tridimensionnel (ECO3M-LAGON + MARS3D)

Les calculs du modèle couplé s'effectuent sur zone de 145 km de longueur (Nord-Est au Sud-Ouest) sur 55 km de large (direction côte- récif barrière). La discrétisation est basée sur une grille de type Arakawa C modifiée (Lazure & Salomon 1991). Dans notre étude, la taille horizontale d'une maille est de $\Delta x = \Delta y = 500$ m, impliquant donc un maillage de 340 par 110 (cf. [Figure 6](#)). En outre, afin de diminuer les temps de calcul, le modèle biogéochimique est quant à lui structuré sur un maillage plus petit au sein du maillage physique: son maillage horizontal est de [110 :280] par [0 : 90]. Il y a donc 153 000 mailles au total.

2.4.2.2 Forçages

Le modèle hydrodynamique est forcé par la marée et par le vent en direction et en intensité. Le modèle biogéochimique est forcé par l'irradiance ainsi que par l'apport en

nutriments et en matière organique particulaire par les fleuves, les rejets anthropiques et les flux benthiques. Ces rejets anthropiques n'ont pas été mesurés directement, c'est la méthode d'*équivalent habitant* qui a été utilisée. Elle consiste à supposer qu'un habitant excrète 15 g d'azote par jour (valeur communément admise dans la littérature). Quatre point-sources de rejets ont été établis autour de Nouméa : au fond de la baie de Koutio, de la Grande Rade, de la baie de Sainte-Marie, ainsi que sur la partie Nord de la baie de Boulari. A partir de données démographiques par quartier de la ville de Nouméa, nous avons dénombré le nombre d'habitants susceptibles de participer aux rejets urbains à chaque point source. En outre, à partir de mesures effectuées devant l'émissaire principal de la baie de Sainte-Marie (données de R. Fichez, non publiées), nous avons calculé que 25% des rejets azotés sont sous forme de NH_4 et 75% sous forme de NOD. Enfin, en première approximation, ces rejets sont considérés constants et uniformes sur 24 h.

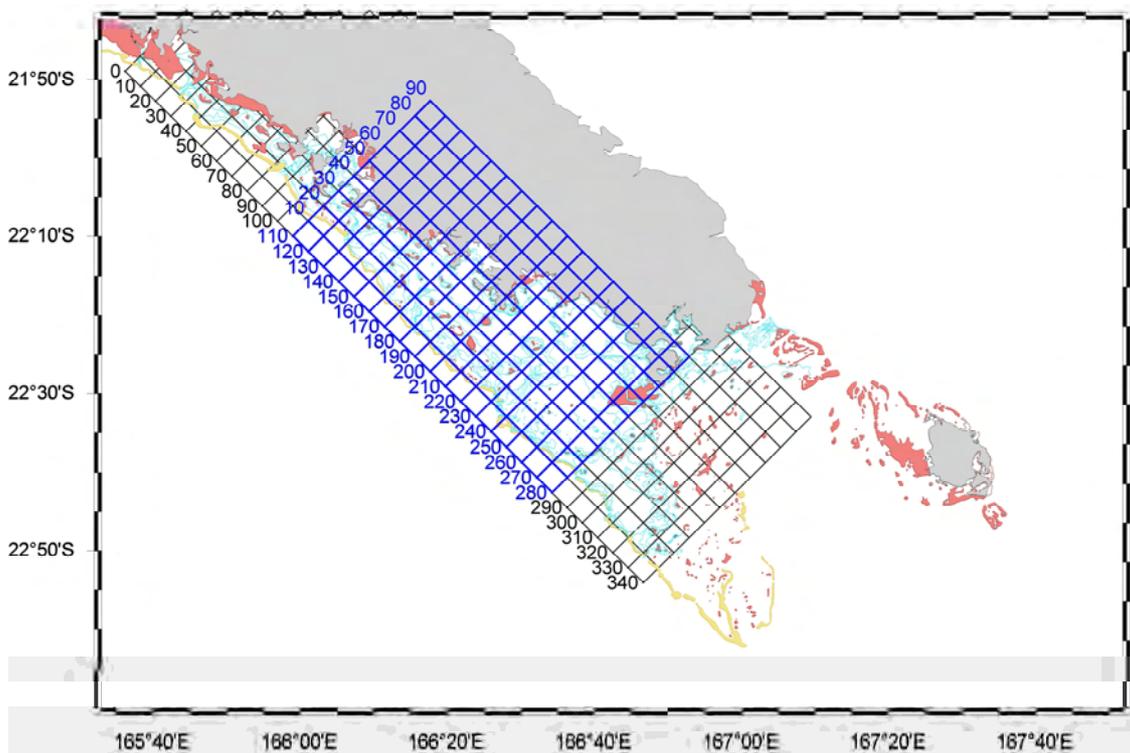


Figure 6 : Maillage horizontal du modèle physique (noir) et grille sur laquelle les calculs biogéochimiques sont réalisés (bleu). Une case contient 10x10 cellules de 500x500 m.

2.4.2.3 Code informatique

Le code informatique résultant du couplage de MARS3D avec Eco3M est en langage FORTRAN 77 et FORTRAN 90-95. L'exécutible est généré par le compilateur Intel Fortran Compiler[®] 8.1 sur un système Linux. En moyenne, une simulation de 30 jours s'effectue en un peu plus de 21h30 de temps machine (processeur à 3Ghz environ). Les fichiers de résultats sont au format libre NETCDF. Ce sont des fichiers binaires commentés développés par UNIDATA (<http://www.unidata.ucar.edu>) et dédiés à la représentation de données scientifiques. Ces fichiers sont libres de droits et peuvent être traités avec MATLAB grâce à la librairie Mexcdf (<http://mexcdf.sourceforge.net/downloads/>). Afin de visualiser les fichiers issus du modèle couplé, une application spécifique a été créée sous MATLAB.

3 Résultats

3.1 Conditions de milieu dans le lagon Sud Ouest³

3.1.1 *Caractéristiques physico-chimiques et nutriments*

La salinité varie peu et est en moyenne de 35,32 (34,19-35,57) et 35,90 (35,54-36,31) en Juin 2003 et Octobre 2004. La température varie également peu spatialement et est en moyenne de 22,7°C (gamme 22,1-23,5) et 23,3°C (gamme 22,5-25,0) en Juin 2003 et Octobre 2004.

Les concentrations en nutriments restent très faibles dans l'ensemble du lagon lors des deux campagnes mais varient assez largement selon les zones. D'une manière générale, les concentrations sont maximales en fonds des baies côtières proches de Nouméa et minimales en milieu de lagon. Le milieu de lagon se caractérise en effet par des concentrations en ammonium (NH₄) et en nitrate+nitrite (NO₃) respectivement inférieures à 0,04 µM et 0,05 µM. Proche de la côte, seule la baie de Koutio présente des valeurs très fortes (>1 µM en NH₄ ; >0,3 µM en NO₃) aux deux campagnes. Lors de Camecal 5, des valeurs élevées peuvent être également notées en baie de Boulari. La zone remarquable du lagon concerne l'arrière récif, le long de la barrière de corail. Les valeurs en nutriments y sont plus élevées qu'ailleurs (hormis les baies proches de Nouméa), particulièrement au Nord-Est de la passe de Boulari. L'ammonium y atteint 0,06 µM pour les deux campagnes. Lors de Camecal 5, NO₃ est proche des valeurs maximales observées de 0,3 µM.

Le Carbone Organique Particulaire présente des moyennes lagonaires de 9,1 µM (±0,79) pour Camecal 5 et 7,3 µM (±0,45) pour Camecal 6. Les gradients côte-large sont marqués, en particulier pour Camecal 5, mettant à nouveau en évidence l'hydrodynamisme faible lors de cette période.

Nous ne disposons de concentrations en Carbone Organique Dissous que pour Camecal 6. Sa variabilité spatiale est relativement faible avec une moyenne lagonaire de 62 µM, et un écart type de 9 µM. Les baies proches de Nouméa (hors baie de Boulari) présentent les valeurs les plus fortes.

3.1.2 *Variables biologiques*

Les cartes de concentration en Chl.*a* (Figure 7) montrent une répartition habituelle pour le lagon. La concentration en milieu de lagon est comprise entre 0,2 et 0,4 µg Chl.*a* l⁻¹; les larges baies proches de Nouméa (Boulari et Dumbéa) présentent des concentrations voisines de 0,5 µg Chl.*a* l⁻¹, tandis que les baies semi-fermées de Koutio et Sainte-Marie atteignent des concentrations proches de 1 µg Chl.*a* l⁻¹. Les moyennes pour l'ensemble des stations sont respectivement de 0,51 (±0,07) et 0,47 (±0,06) µg Chl.*a* l⁻¹ pour Camecal 5 et 6 (Tableau 2, Figure 7).

Les valeurs légèrement plus fortes dans la partie Sud-Ouest du lagon lors de Camecal 5 mettent en évidence une situation de faibles Alizés ; au contraire, les valeurs faibles lors de Camecal 6 dans cette partie, ainsi que dans la baie de Boulari, témoignent de l'importance des Alizés plus forts qui vidangent le lagon avec les eaux plus oligotrophes du Sud-Ouest.

La répartition des valeurs de production bactérienne de biomasse suit approximativement celle de la Chl.*a*. La moyenne spatiale est de 21 10⁶ cell l⁻¹h⁻¹ (±2,5) pour Camecal 5, et de 19 10⁶ cell l⁻¹h⁻¹ (±1,9) pour Camecal 6. Dans les baies fermées proches de

³ Ces données sont publiées dans Torréton *et al* (2007) *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. doi:10.1016/j.ecss.2007.05.018

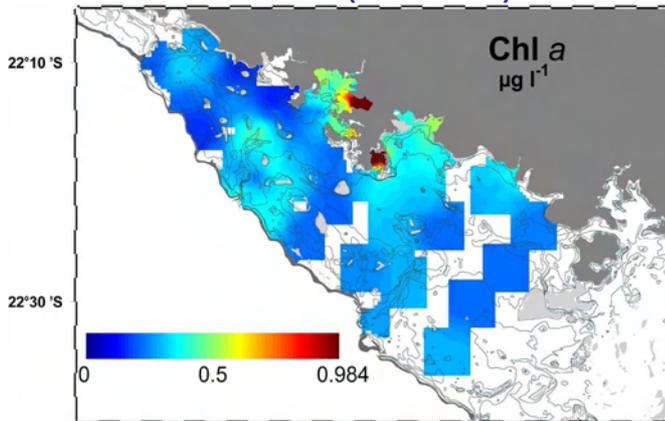
Nouméa et sous forte influence anthropique (Koutio, Grande Rade et Sainte-Marie), la production bactérienne de biomasse dépasse 10^8 cell l⁻¹h⁻¹ lors des deux campagnes, mais sa répartition spatiale présente des différences importantes. Lors de la campagne Camecal 5, des valeurs élevées ($>15 \cdot 10^6$ cell l⁻¹h⁻¹) sont observables dans une large zone de milieu de lagon ainsi qu'au Nord, tandis qu'au cours de la campagne Camecal 6, seule une zone allant de l'arrière récif à l'îlot Maître montre des fortes valeurs. Le gradient côte-large est marqué lors des deux campagnes pour la partie Sud-Ouest du lagon. En revanche pour la partie centrale et Nord, aucun gradient n'est mis en évidence lors des deux campagnes. La comparaison entre les deux campagnes à l'aide d'un test-t montre qu'il n'y a pas de différence significative pour la concentration en Chl.a et la production bactérienne de biomasse.

Tableau 2 : Comparaison des principales variables biogéochimiques entre les campagnes Camecal 5 et 6.

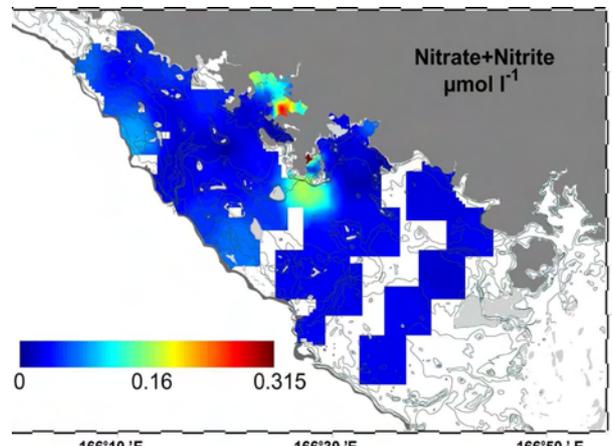
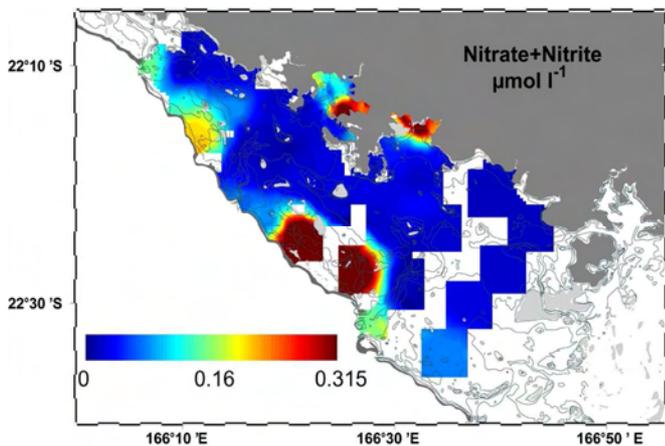
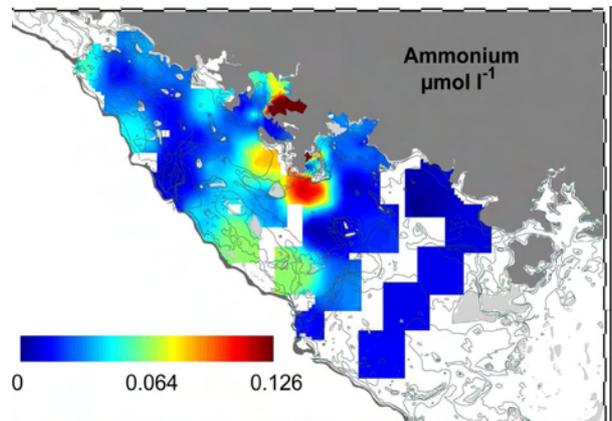
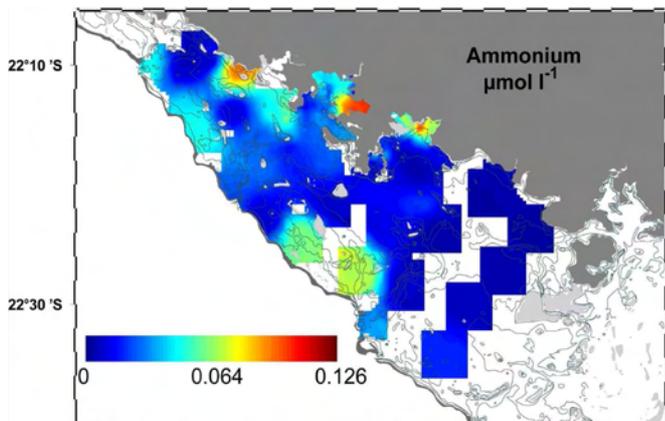
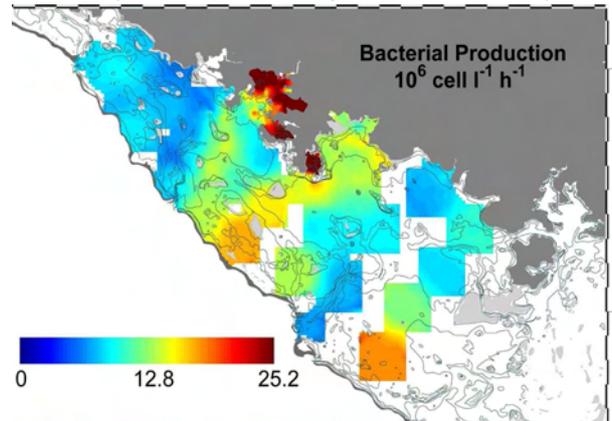
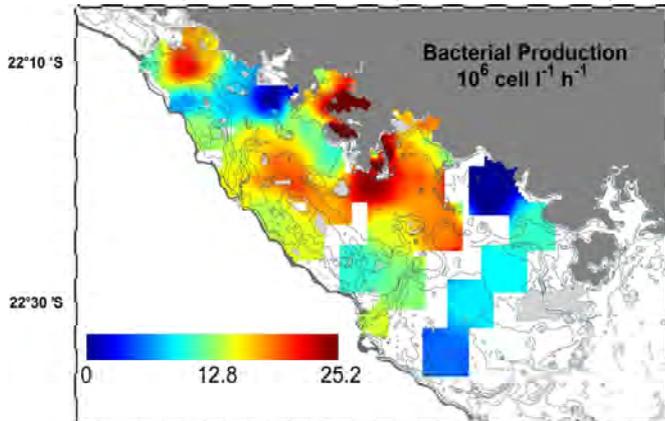
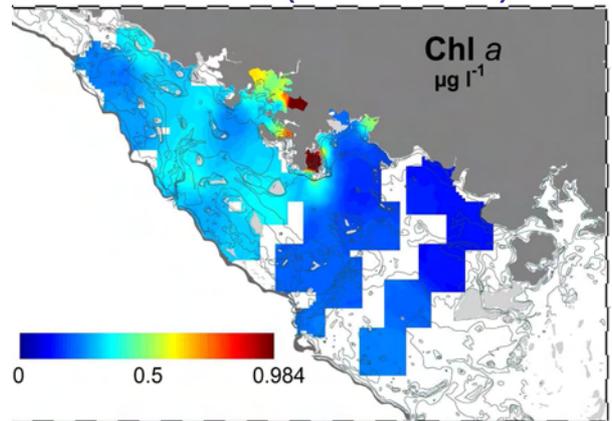
		Chl.a µg l ⁻¹	BP 10 ⁶ cell l ⁻¹ h ⁻¹	COP µM	NOP µM	NOD µM	NH ₄ µM	NO ₃ µM	PO ₄ µM
HIVER Camecal 5	<i>min</i>	0,135	1,429	2,647	0,280	1,010	0,001	0,002	0,002
	<i>max</i>	3,644	163,305	38,491	4,290	6,189	0,730	0,486	0,451
	<i>moy</i>	0,508	20,749	9,051	1,248	3,838	0,039	0,085	0,043
	<i>CV</i>	122%	110%	84%	70%	15%	209%	133%	146%
ETE Camecal 6	<i>min</i>	0,113	5,596	3,589	0,447	2,008	0,004	0,001	0,008
	<i>max</i>	3,541	119,706	24,315	2,745	7,085	0,286	0,357	0,662
	<i>moy</i>	0,473	18,673	7,306	0,966	3,888	0,045	0,052	0,056
	<i>CV</i>	110%	96%	55%	47%	20%	123%	110%	170%

Chl.a : Chlorophylle a, PB : Production bactérienne, COP & NOP : carbone et azote particulaires, NOD : azote organique dissous, NH₄ : ammonium, NO₃ : nitrates + nitrites, PO₄ : phosphate, min : valeur minimum ; max : valeur maximum ; moy : moyenne spatiale ; CV : coefficient de variation spatiale.

Camecal 5 (Jun 2003)



Camecal 6 (Octobre 2004)



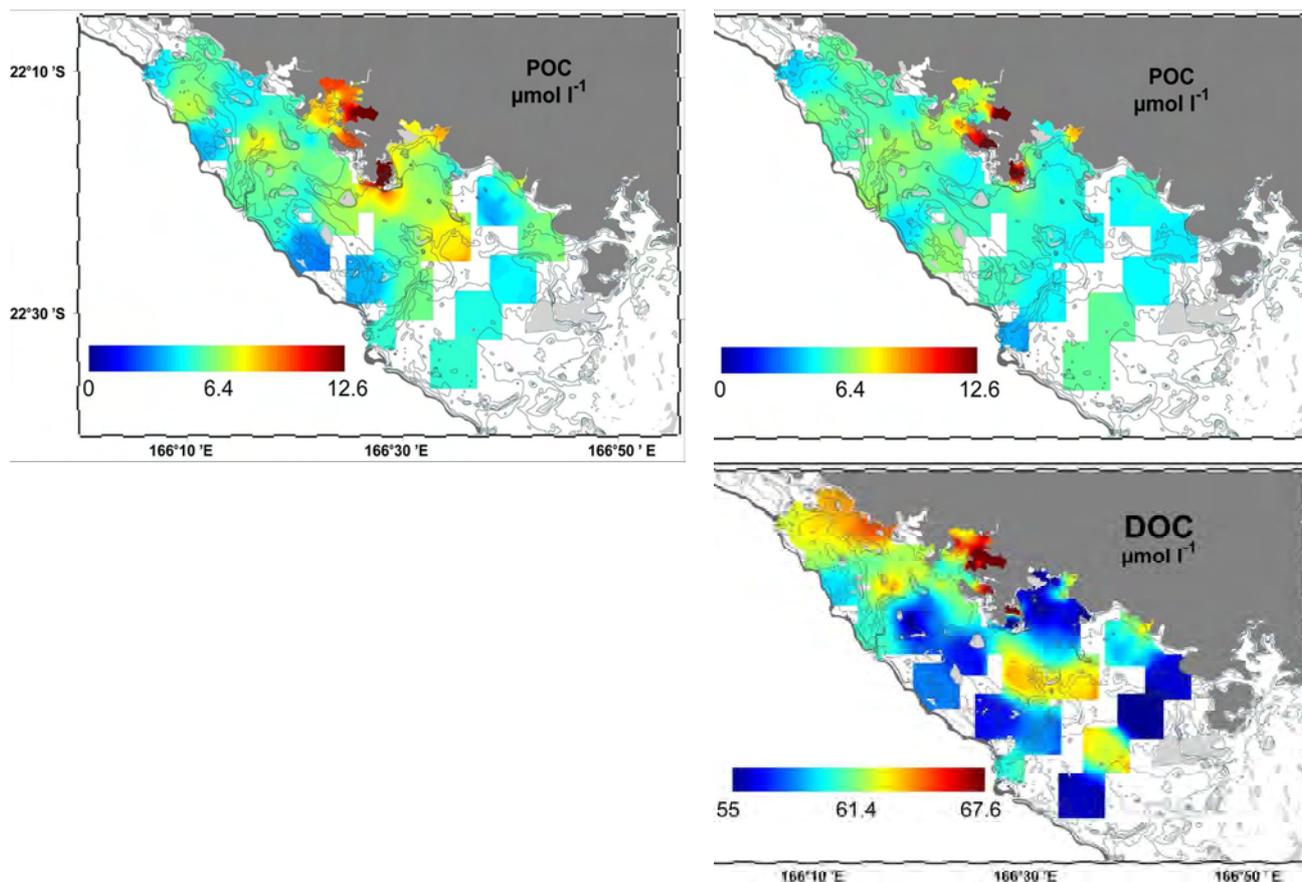


Figure 7 : Cartes 2D de la concentration en Chl.a ($\mu\text{g l}^{-1}$), de la production bactérienne (BP, $10^6 \text{ cell l}^{-1} \text{ h}^{-1}$), et des concentrations en ammonium ($\mu\text{mol l}^{-1}$), en nitrate+nitrite ($\mu\text{mol l}^{-1}$), en Carbone Organique Particulaire (POC, ($\mu\text{mol l}^{-1}$), et en Carbone Organique Dissous (DOC, ($\mu\text{mol l}^{-1}$) lors des campagnes Camecal 5 (18-25 Juin 2003) et Camecal 6 (19-27 Octobre 2004). Cartes interpolées à partir des 90 stations présentées Figure 3 (distance d'interpolation=500 m ; rayon d'interpolation=4000 m).

Les deux campagnes ne montrent des différences significatives ($P < 0,05$, test-t) que pour les valeurs de nitrates+nitrites et d'azote inorganique dissous (DIN, Figure 8), plus fortes lors de Camecal 5. Ces résultats sont en accord avec l'étude saisonnière (plus bas) montrant des maxima de DIN en hiver.

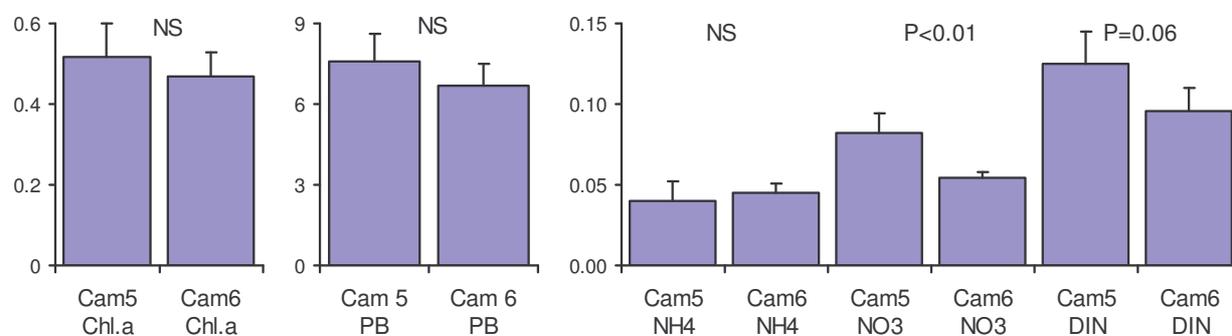


Figure 8 : Moyennes et erreurs standards (SE) au cours des campagnes Camecal 5 et 6. Chl.a ($\mu\text{g l}^{-1}$), PB (pM TdR h^{-1}), NH_4 , NO_3 , DIN (μM). Test-t apparié sur les différences : NS, différence entre Camecal 6 et 5 non significative. $\text{DIN} = \text{NH}_4 + \text{NO}_3$.

3.2 Variations nycthémérales

En conditions météorologiques stables (vent constant, pas de pluie) on peut observer des cycles nycthéméraux d'amplitude modeste mais significatifs. La Chl.*a* augmente de jour en raison de la production primaire (Figure 9), et la décroissance de nuit est vraisemblablement due à la prédation par le méso-zooplancton migrant dans la colonne d'eau la nuit sans exclure les variations nycthémérales de la prédation par les protistes (Christaki *et al* 2002, Neveux *et al* 2003, Tsai *et al* 2005). L'augmentation de la production bactérienne pendant la journée est en accord avec d'autres études nycthémérales (Gasol *et al* 1998, Kuipers *et al* 2000, Winter *et al* 2004) et suggère un couplage étroit entre production primaire et croissance des bactéries hétérotrophes.

La baisse des concentrations en nutriments (hormis les silicates, non montrés) pendant la journée peut être expliquée par leur consommation par les producteurs primaires et leur augmentation résulte vraisemblablement de la prédation et de l'excrétion nocturne par le zooplancton. Des variations significatives et cohérentes des concentrations en nutriments sur la journée peuvent suggérer des changements possibles de la limitation nutritive sur 24h (Shiah 1999, Kuipers *et al* 2000). Toutefois, l'utilisation des concentrations et ratios des nutriments comme indicateurs de la limitation nutritive potentielle (Dortch & Whitlege 1992, Justic *et al* 1995) montre que la limitation par l'azote prédomine toujours. Les échelles de variations nycthémérales montrent qu'une mesure effectuée à un moment quelconque de la journée est représentative de la moyenne journalière à $\pm 20\%$ en conditions stables.

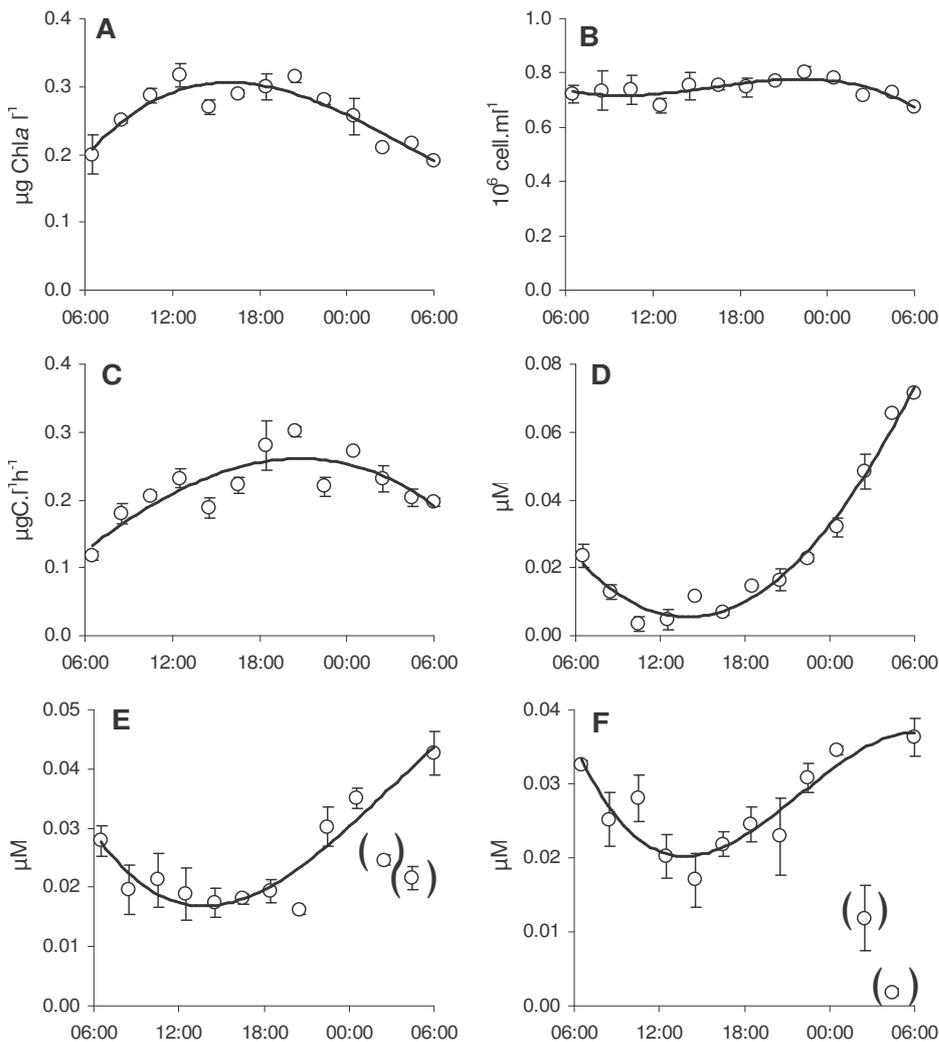


Figure 9 : (A) Chlorophylle a, (B) Abondance bactérienne, (C) production bactérienne, et concentrations en NH_4 (D), NO_3+NO_2 (E) et PO_4 (F) pendant un cycle nycthéméral en station M33 (Juin 2003). Les courbes représentent les ajustements polynomiaux. Les barres représentent l'erreur standard. Les points entre parenthèses sont exclus des régressions.

3.3 Variations temporelles à court terme

Pendant le suivi saisonnier, les variations entre prélèvements consécutifs (1-2 semaines) étaient semblables aux deux stations. Généralement les nutriments variaient d'un facteur 1,3-5,1 (médiane 2,7), les biomasses (du phytoplancton et des bactéries) d'un facteur 1,2-1,4 (médiane 1,3), et les productions (primaire et bactérienne) d'un facteur 1,5-2,5 (médiane 1,7) entre les prélèvements consécutifs (Figure 10). En accord avec cette étude, de grandes variations de la biomasse et la production du phytoplancton et de bactérioplancton ont été enregistrées dans un délai d'un mois en baie de Sainte-Marie (Renaud *et al* 2005), et Tenório *et al* (2005) ont montré des variations de jour en jour importantes de la biomasse et de la composition spécifique du phytoplancton en relation avec les apports terrigènes en baie de Ouinné (sud-est de la Nouvelle-Calédonie).

Les données météorologiques ont montré une variabilité importante au long de l'année à la même échelle de temps et ceci peut expliquer une partie des fluctuations à court terme des variables biologiques. Douillet *et al* (2001) ont en effet montré que la marée semi-diurne et, de manière plus importante, l'advection induite par le vent étaient les deux facteurs principaux déterminant l'hydrodynamisme dans le lagon Sud Ouest de Nouvelle-Calédonie. En particulier, les alizés de sud-est (direction moyenne 110°) qui prédominent la majeure partie de l'année induisent un renouvellement rapide de l'eau lagonaire par l'eau océanique. Afin d'analyser les relations avec les variables de la colonne de l'eau, l'effet du vent a été caractérisé par le carré de sa vitesse projetée sur l'axe 110° (la friction du vent est proportionnelle au carré de sa vitesse) et différents laps de temps ont été examinés. Nous n'avons observé aucune corrélation significative à la station N12. Par contre à la station M33, Chl.*a*, BP, et BP/PP sont négativement corrélés avec la force du vent moyenne au cours des 5 jours précédant le prélèvement ($p = 0,034$, $0,018$, et $0,012$, respectivement, Figure 11). Bien que ces relations ne démontrent pas une causalité, elles sont en accord avec les modèles suggérant que des conditions oligotrophes sont maintenues par le renouvellement des eaux lagonaires sous l'influence des alizés (Pinazo *et al* 2004), et avec le turn-over de l'eau lagonaire bien plus rapide en M33 qu'en N12. En effet, le *e*-flushing time, paramètre synthétique indiquant le temps requis pour une masse de traceur à une station (volume de contrôle) pour être réduit *e* fois par les eaux océaniques, est de 0,5 jour à M33 et de 12,5 jours à N12 (Jouon *et al* 2006).

En accord avec ceci, nous n'avons pas pu mettre en évidence d'effet significatif du cyclone qui a frappé le lagon SW le 14 mars 03. Notre premier prélèvement après le cyclone a été effectué le 25 mars 03 et nous n'avons observé aucun changement significatif sur les variables enregistrées avant et après le cyclone. Cependant, une augmentation d'un facteur 5-6 était observable 3 jours après le cyclone dans le lagon Sud Ouest (Neveux *et al*, soumis). Ceci montre, que quels que soient les changements des nutriments, de biomasse et de production planctoniques qui pourraient s'être produits dans la colonne de l'eau les jours suivant le cyclone, le retour aux conditions moyennes a été réalisé dans les 11 jours aux deux stations.

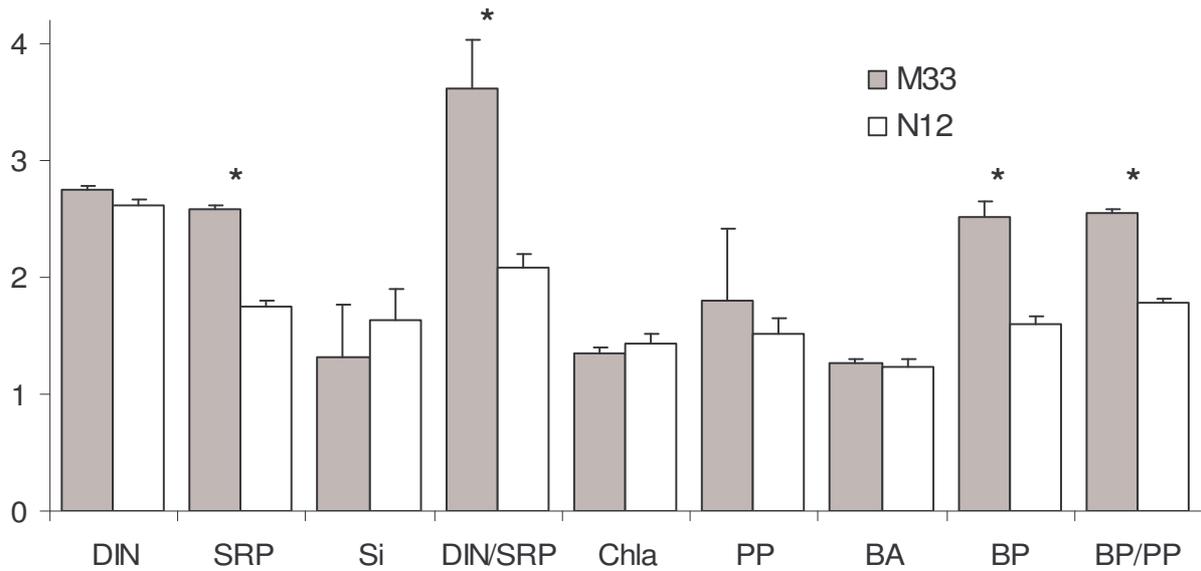


Figure 10 : Variations des nutriments et variables biologiques entre prélèvements successifs aux stations M33 et N12. Les variations sont les rapports moyens (maximum/minimum) entre prélèvements espacés de 1 à 2 semaines. DIN : Azote inorganique dissous, SRP : PO_4 , Si : silicates, PP: production primaire, BA : abondance bactérienne, BP : Production bactérienne. *: $P < 0,05$, autrement différence non significative.

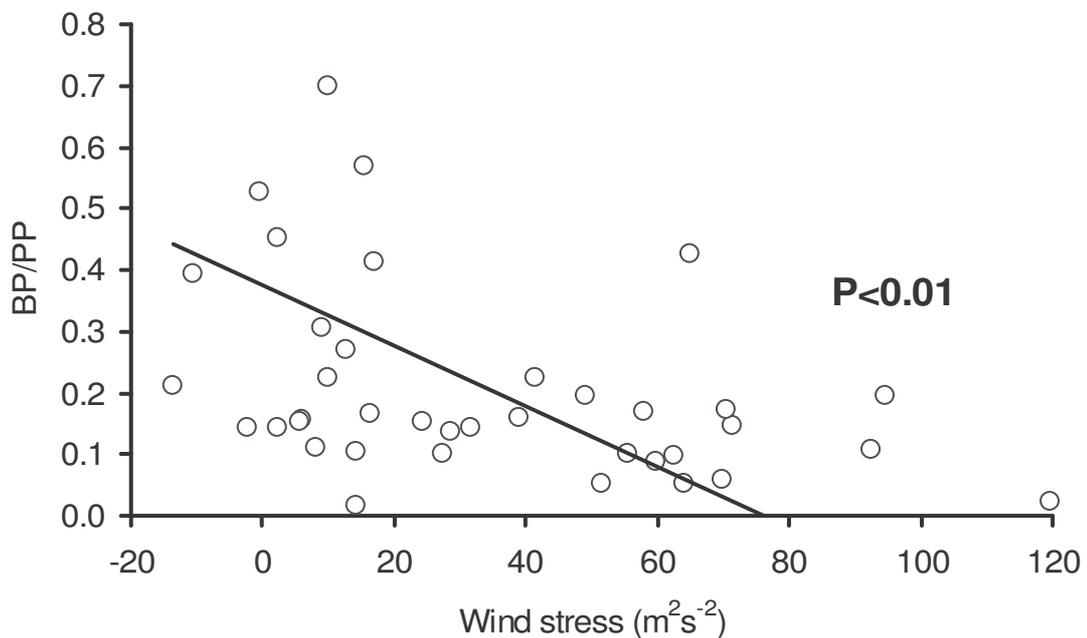


Figure 11 : Rapport production bactérienne/production primaire à la station M33 en fonction de la friction du vent (wind stress). La droite représente la régression de type II. La friction du vent est exprimée comme le carré de la vitesse projetée sur l'axe 110° (direction moyenne des alizés).

3.4 Variations saisonnières

Les profils acquis au moyen de la sonde CTD (Figure 12) montrent que la colonne d'eau est généralement bien homogène en station M33. En effet, la différence entre sub-surface (0,5m) et fond est faible : en moyenne 0,2°C pour la température et 0,06 pour la salinité. La turbidité et la chlorophylle *a* augmentent en moyenne de 16% et 7% respectivement dans la couche néphéloïde (18-24m). La station N12 montre des tendances verticales similaires mais plus prononcées. La différence moyenne entre sub-surface (0,5m) et fond est de 0,25°C pour la température et 0,5 pour la salinité. La turbidité et la chlorophylle *a* augmentent en moyenne de 77% et 9% respectivement dans la couche néphéloïde (10-14m). L'importance accrue du néphéloïde en N12 est due à la fois à la profondeur plus faible et au fond vaseux en N12 (composé de sables grossiers en M33). Le rapport entre fluorescence *in vivo* à 3 m et moyenne de la colonne d'eau n'est pas significativement différent de 1 aux 2 stations. Ceci indique que les prélèvements effectués à 3 m, sont en moyenne bien représentatifs de la colonne d'eau complète.

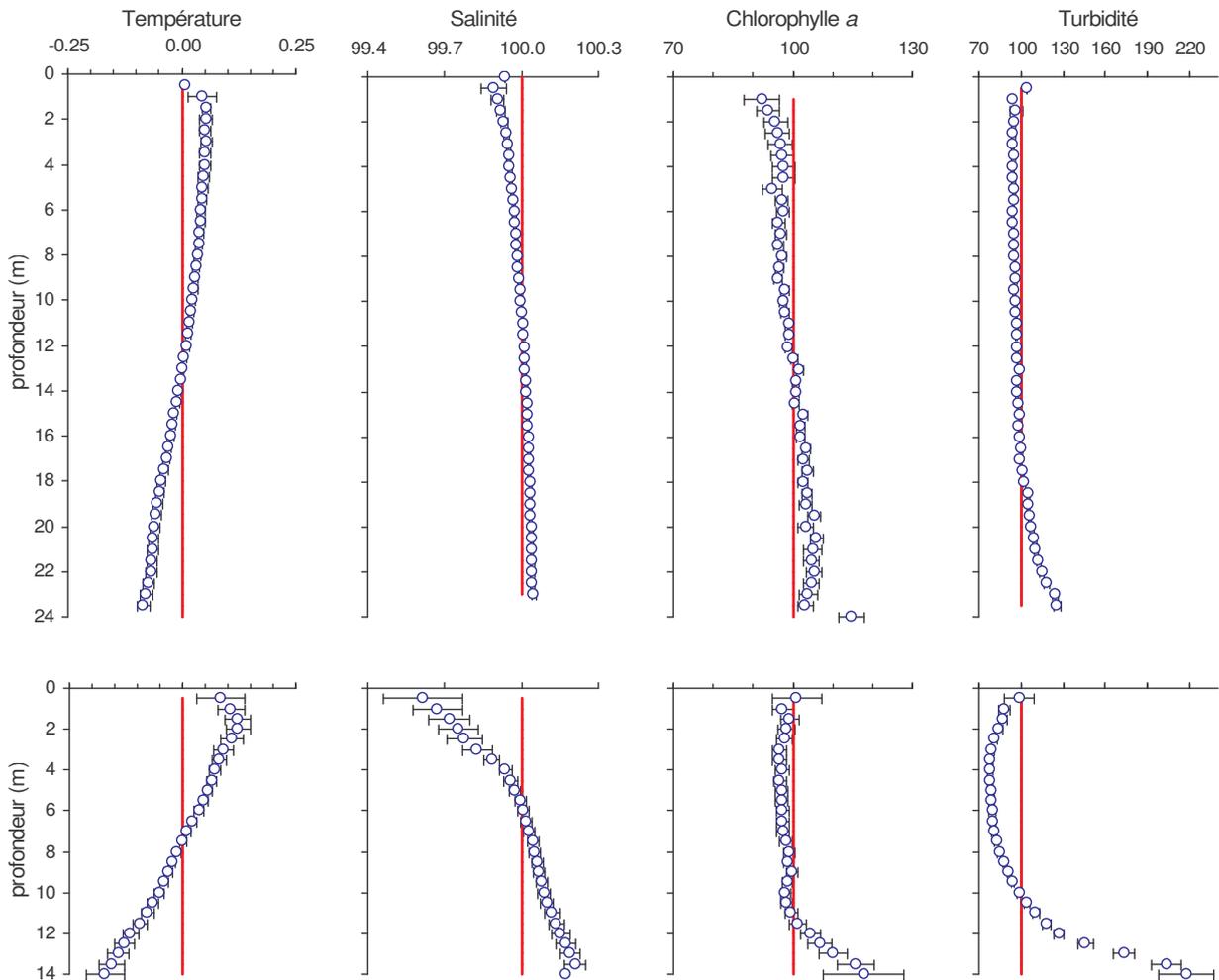


Figure 12 : Distribution verticale moyenne de la température, salinité, fluorescence *in vivo* (Chl.a) et turbidité entre avril 2002 et avril 2004 aux stations M33 (haut, 105 profils) et N12 (bas, 101 profils). Les valeurs ont été moyennées par tranches de 0,5 m et sont exprimées en écart à la moyenne de la colonne d'eau (température) ou en pourcentage de la moyenne de la colonne d'eau (autres données). Les barres indiquent l'erreur standard.

Le suivi en 2002-2003 a montré des variations modérées le long de l'année pour les nutriments avec des maxima de 3-5 fois pour le DIN et 3 fois pour PO₄ aux deux stations. Le silicate n'a montré de variations significatives qu'à la station N12 où les concentrations variaient en sens inverse de la salinité (c.-à-d. avec un maximum pendant la saison des pluies), en accord avec le fait que les silicates sont apportés par les eaux de rivières. En utilisant les rapports de Redfield et des valeurs seuil comme index de limitation potentielle (Dortch et Whitley 1992, Justic *et al* 1995) l'azote s'est avéré le premier facteur limitant dans la plus grande partie du lagon SW de Nouvelle-Calédonie pendant l'hiver (Jacquet *et al* 2006). En utilisant les mêmes critères, le silicate ne devrait pas limiter la croissance du phytoplancton aux sites étudiés et l'azote est probablement le facteur principal limitant la croissance de phytoplancton aux deux stations à de rares d'exceptions (Figure 13). Seules de courtes périodes caractérisées par des concentrations plus élevées en DIN à la station M33 indiquent en effet une limitation potentielle en P (Figure 13).

L'abondance bactérienne a montré des déviations mineures autour des valeurs moyennes aux deux stations tandis que la biomasse de phytoplancton a présenté 2 maxima en avril - juin (1,3-1,7 fois) et janvier (1,2-1,7 fois) aux deux stations. Les changements les plus significatifs ont été observés pour la production du bactérioplancton et du phytoplancton (Figure 13). La production primaire était maximale en avril - mai (1,3-1,6 fois) et décembre - janvier (1,5-2,2 fois) aux deux stations tandis que la production du bactérioplancton était maximale en janvier - février (3-4 fois) et mars (3 fois, seulement à N12). L'évolution de la biomasse et de la production de phytoplancton dans différentes classes de taille (<2, 2-10, et >10 µm) était pratiquement parallèle à celle des valeurs totales et aucun changement significatif de la distribution de taille n'a été observé entre les saisons.

Bien que les deux stations aient montré des variations saisonnières similaires, les variations étaient plus prononcées à la station N12, mésotrophe, qu'à la station M33, oligotrophe et située dans le chenal lagonaire. Une partie de cette différence peut être due aux différences de statut trophique. En effet, la station M33 montre des valeurs d'éléments nutritifs, d'abondance et de production bien inférieures à celles de la station N12 (Figure 15) et les nutriments en M33 sont souvent en très faibles concentrations comparés à la précision analytique. Une autre partie de cette différence est probablement due à l'hydrodynamique. Comme évoqué plus haut, le rinçage par les eaux océaniques est plus important à la station M33 et en effet, certaines des variables biologiques sont négativement corrélées avec la friction du vent. Par conséquent, la station M33 est plus probablement sous l'influence des forçages météorologiques à court terme que ne l'est la station N12.

Cette faible amplitude des variations saisonnières de BP et de PP est proche des variations d'un facteur 3 observées pour la respiration benthique et la production dans le même lagon (Clavier et Guarrigue 1999). Elle diffère des observations dans des écosystèmes plus tempérés où les nutriments, la biomasse et la production des premiers niveaux trophiques des réseaux trophiques planctoniques, varient en général d'un facteur 10-20 sur l'année (Umani et Beran 2003, Pinhassi *et al* 2006, Tsai *et al* 2005, Paoli *et al* 2006) et est en accord avec les variations saisonnières faibles ou non significatives observées dans d'autres écosystèmes coralliens montrant des variations modérées de la température, d'irradiance et de stratification tout au long de l'année (Furnas et Mitchell 1986, Burford *et al* 1995, Charpy 1996, Torréton et Dufour 1996, Gast *et al* 1999).

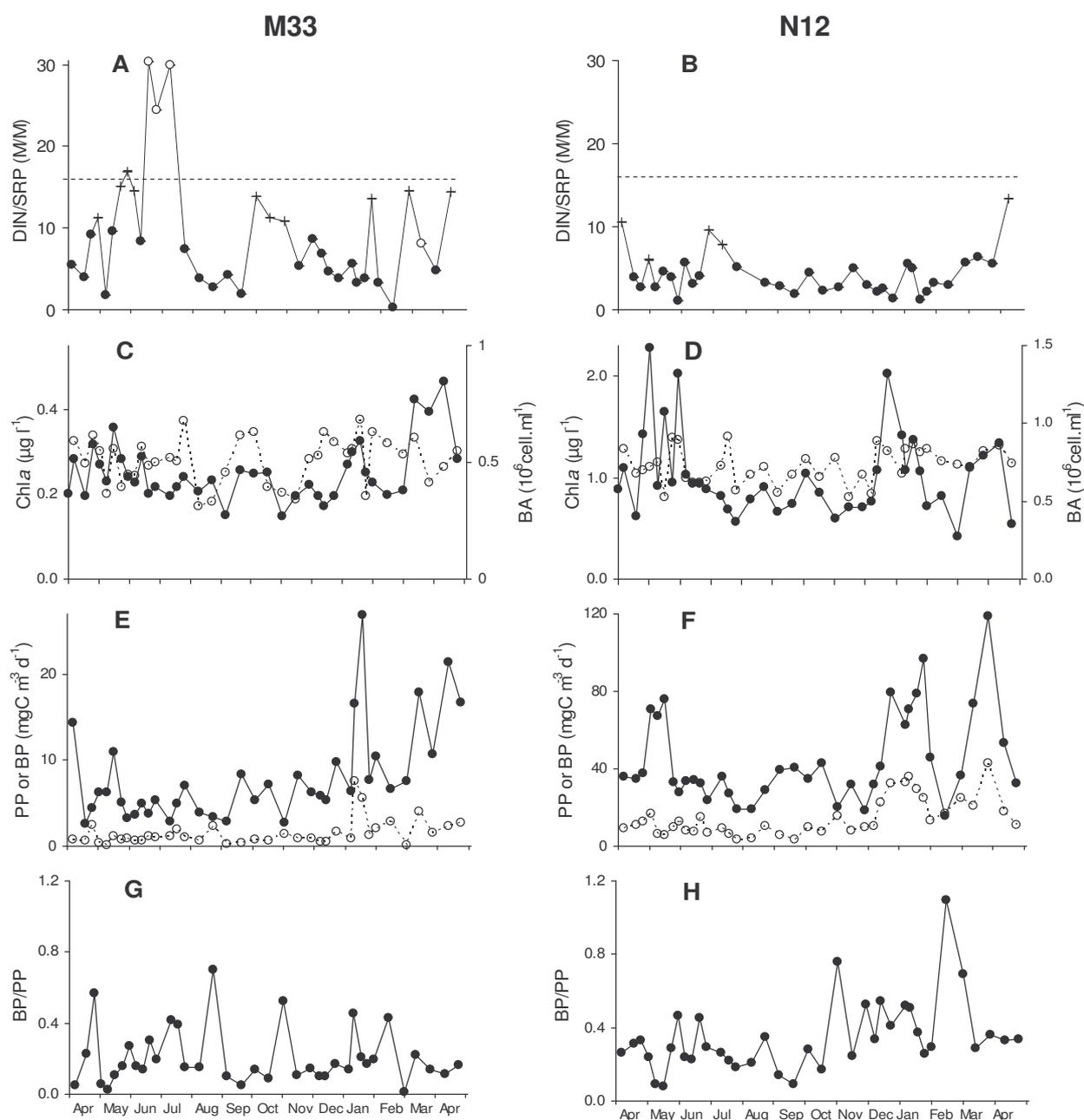


Figure 13 : Nutriments et variables biologiques en stations M33 et N12. **A, B** : rapports DIN/SRP ratios. Les symboles indiquent le facteur limitant probable selon Justic et al (1995), (○) P limitation ($Si:SRP > 22$, $DIN:SRP > 22$ et $SRP < 0,1 \mu M$), (●) N limitation ($DIN:SRP < 10$, $Si:DIN > 1$ et $DIN < 1 \mu M$), (+) ni N, ni P ni Si. Les lignes en pointillé indiquent $N/P = 16$; **C, D** : Chlorophylle a (○), abondance bactérienne (●); **E, F** : Productions primaire (●) et bactérienne (○); **G, H** : Rapports Production bactérienne/Production primaire. NB : SRP (Soluble reactive phosphorus) = PO_4 , DIN : Azote inorganique dissous

Les deux stations ont montré des variations temporelles comparables aux différentes échelles de temps examinées. En rassemblant les variations des nutriments, des biomasses et des productions aux deux stations on peut obtenir une vue synoptique des gammes relatives de variabilité (Figure 14). La biomasse du phytoplancton (Chl.a) et des bactéries (nombre de cellules) varie peu aux différentes échelles temporelles étudiées (~1,3 fois), avec la Chl.a

montrant les variations journalières les plus significatives. Les nutriments montrent des variations comparativement fortes à l'échelle nycthémérale (2,2 fois), « hebdomadaire » (2,7 fois) et saisonnière (3,1 fois). Enfin, les taux de production montrent les gammes de variations les plus fortes aux échelles nycthémérale, « hebdomadaire » et saisonnière (respectivement 1,5, 1,7 et 2,5 fois). Cette relative similitude dans la gamme des variations aux différentes échelles temporelles diffère des variations observées dans les systèmes tempérés où les tendances saisonnières sont grandes comparées aux variations à plus petites échelles de temps (Calvo-Diaz et Moran 2006, Pinhassi *et al* 2006).

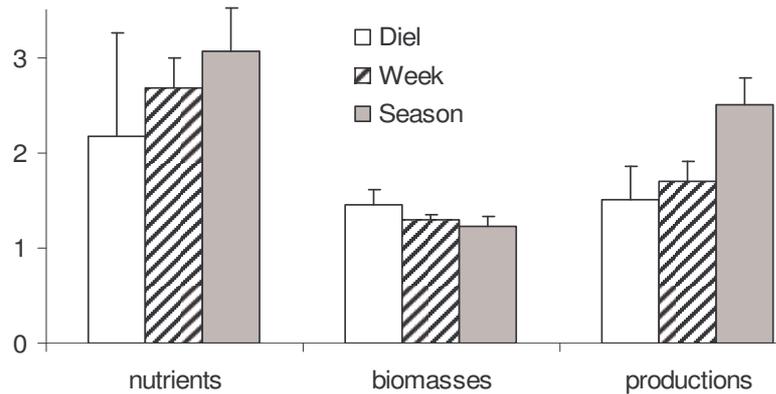


Figure 14 : Variations médianes à l'échelle de la journée, de la semaine et de l'année. Nutriments: DIN, PO₄, Si ; Biomasses : Chl.a et abondance bactérienne ; Productions : Productions primaire et bactérienne. Les barres représentent l'erreur standard. Diel: variations journalières maximum (maximum/minimum); Week: variations entre prélèvements successifs (1-2 semaine); Season: variations saisonnières.

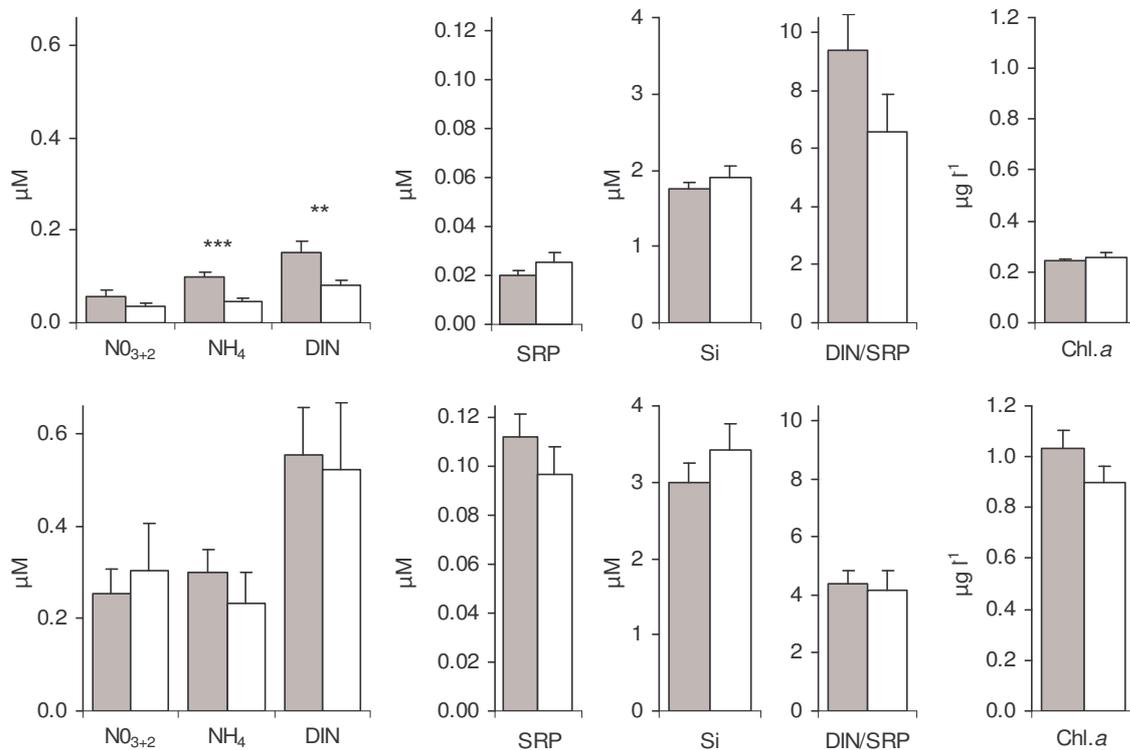


Figure 15 : Moyennes annuelles pour les variables physiques, les nutriments et la chlorophylle a. Gris: 2002-2003, Blanc: 2003-2004. En haut : M33, en bas : N12. Les barres représentent l'erreur standard. **: P < 0,01; ***: P < 0,001, autrement différence non significative entre 2002-2003 et 2003-2004.

3.5 Validation du modèle

3.5.1 Mesures biologiques et physico-chimiques

Dans le cadre de l'étude et de la validation du modèle couplé physique-biogéochimique, deux jeux de données ont été établis, en essayant d'appréhender à la fois la variabilité spatiale et temporelle du lagon Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie. Les deux ensembles de mesures sont présentés dans le **Tableau 3** : le premier, que l'on notera HIVER, a été réalisé durant les mois de Juin à Août 2003 ; le second, que l'on notera ETE, d'Octobre à Décembre 2004. Ces données caractérisent un état initial du milieu (campagnes Camecal 5 et 6) sur environ 90 stations réparties sur l'ensemble du lagon Sud-Ouest (**Figure 3**). Cette description de l'état initial a été suivie de trois échantillonnages effectués toutes les 2 semaines sur 2 radiales (« Nord » et « Sud »), couvrant une gamme importante de conditions trophiques. La radiale « Nord » comporte 10 stations de la passe de Dumbéa à la baie de Dumbéa. La radiale « Sud », allant de la passe de Boulari à la baie de Boulari, comporte 8 stations (**Figure 3**).

La colonne d'eau est en moyenne assez homogène (**Jacquet 2005, Figure 12**). Ainsi les prélèvements d'eau ont été réalisés à 3 m de profondeur, profondeur considérée comme représentative de la colonne d'eau (**Jacquet et al 2006**). Cependant, aux stations B08 et B15, une seconde profondeur à 2 m au dessus du fond a été également échantillonnée. Les variables ont été choisies pour décrire avec le meilleur rapport information/coût l'état trophique du système. Elles peuvent être réparties en deux groupes :

- Les variables biologiques : la biomasse phytoplanctonique par mesure de la concentration en Chlorophylle *a*, la production et l'abondance bactérienne.
- Les variables physico-chimiques qui comprennent les éléments minéraux dissous (ammonium, nitrates+nitrites, phosphates, silicates), et organiques (Carbone et Azote Organique Particulaire, Carbone et Azote Organique Dissous), ainsi que les données physiques collectées au moyen de la sonde SeaBird CTD (température, salinité, turbidité, fluorescence et *Photosynthetic Active Radiation* (PAR)).

Tableau 3 : Récapitulatif des campagnes de mesures effectuées sur le lagon Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie. BP : production bactérienne ; BA : abondance bactérienne ; Chl.a : concentration en Chlorophylle a ; NH₄ : ammonium ; NO₃ : nitrates+nitrites ; COP, NOP : Carbone et Azote Organiques Particulaires ; COD, NOD : Carbone et Azote Organiques Dissous ; variables CTD : température, salinité, turbidité, fluorescence in vivo de la Chl.a, PAR.

	Dates	Campagne	Variables mesurées	Prof.
HIVER	18-24 Juin 2003	<i>Camecal 5</i>	BP, BA, Chl.a, NH ₄ , NO ₃ , COP, NOP, NOD, variables CTD	3 m
	08/07/03 22/07/03 05/08/03	<i>Radiale Sud 1</i>	BP, BA, Chl.a, NH ₄ , NO ₃ , COP, NOP, NOD, variables CTD	3 m, fond (B15, B08)
	10/07/03 25/07/03 07/08/03	<i>Radiale Nord 1</i>	BP, BA, Chl.a, NH ₄ , NO ₃ , COP, NOP, NOD, variables CTD	3 m
ETE	18-27 Oct. 2004	<i>Camecal 6</i>	BP, BA, Chl.a, NH ₄ , NO ₃ , COP, NOP, COD, NOD, variables CTD	3 m
	09/11/04 23/11/04 07/12/04	<i>Radiale Nord 2</i>	BP, BA, Chl.a, NH ₄ , NO ₃ , COP, NOP, COD, NOD, variables CTD	3 m
	10/11/04 25/11/04 09/12/04	<i>Radiale Sud 2</i>	BP, BA, Chl.a, NH ₄ , NO ₃ , COP, NOP, COD, NOD, variables CTD	3 m, fond (B15, B08)

3.5.2 *Simulations réalistes*

3.5.2.1 Forçages, conditions aux limites et aux frontières

Afin de pouvoir effectuer la validation du modèle, des simulations réalistes ont été réalisées. Ces simulations utilisent des données mesurées pour les différents forçages météorologiques : irradiance, direction et intensité du vent, débit des rivières. Ces données sont présentées sur les figures 16 à 18.

Les concentrations utilisées pour les rivières sont résumées dans le Tableau 4 et les conditions aux limites du domaine sont résumées dans le Tableau 5. Les conditions initiales pour les variables biogéochimiques sont des interpolations sur l'ensemble du domaine étudié des données mesurées lors des campagnes Camecal 5 et 6.

Tableau 4 : Apports par les rivières. Concentrations en Ammonium, nitrates+nitrites, et Matière Organique Particulaire. A partir de données mesurées le 27/08/2003. DOC n'a pas été mesuré mais calculé suivant la relation $DOC/DON=3$

	NH₄ μmol l ⁻¹	NO₃ μmol l ⁻¹	C_P μmol l ⁻¹	N_P μmol l ⁻¹	DOC μmol l ⁻¹	DON μmol l ⁻¹
Coulée	0,146	8,895	7,204	1,042	4,32	1,44
Pirogue	0,065	1,143	4,628	0,584	0,75	0,25
Dumbéa	0,102	10,965	4,294	0,543	1,95	0,65

Tableau 5 : Conditions aux frontières des variables

	Chl.a μg l ⁻¹	C_{BA} μmol l ⁻¹	N_{BA} μmol l ⁻¹	C_P μmol l ⁻¹	N_P μmol l ⁻¹	DOC μmol l ⁻¹	DON μmol l ⁻¹	NH₄ μmol l ⁻¹	NO₃ μmol l ⁻¹	O μmol l ⁻¹
Conditions aux frontières	0,2	0,7	0,11	2,1	0,5	3	0,62	0,02	0,001	180

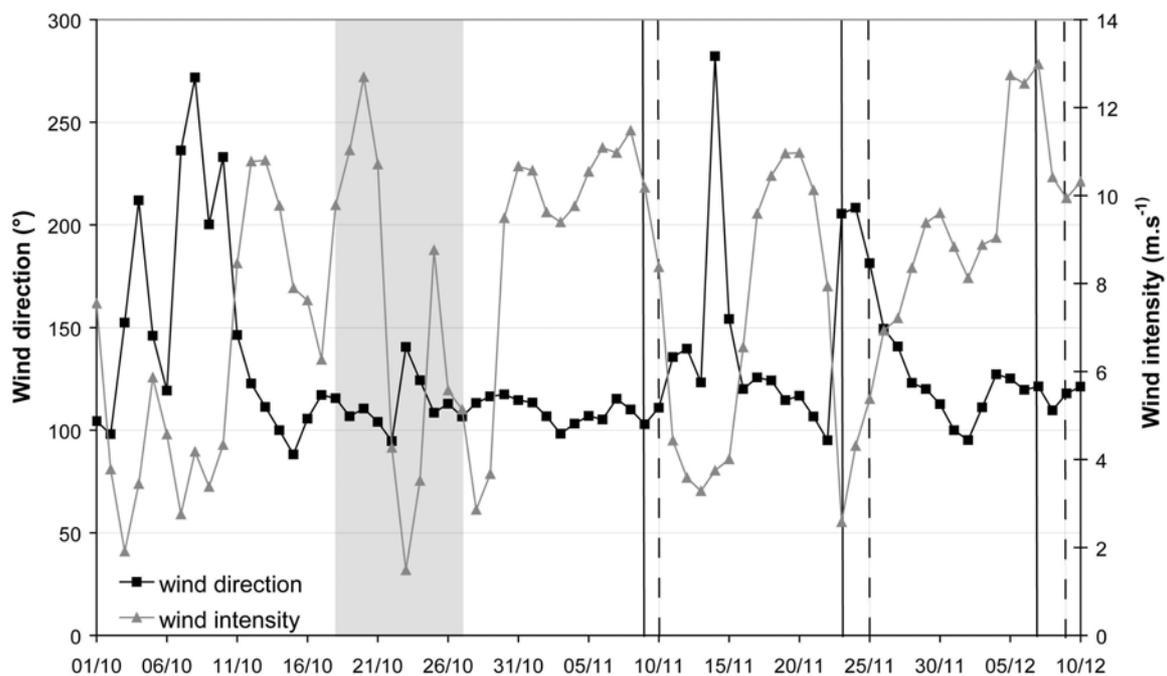
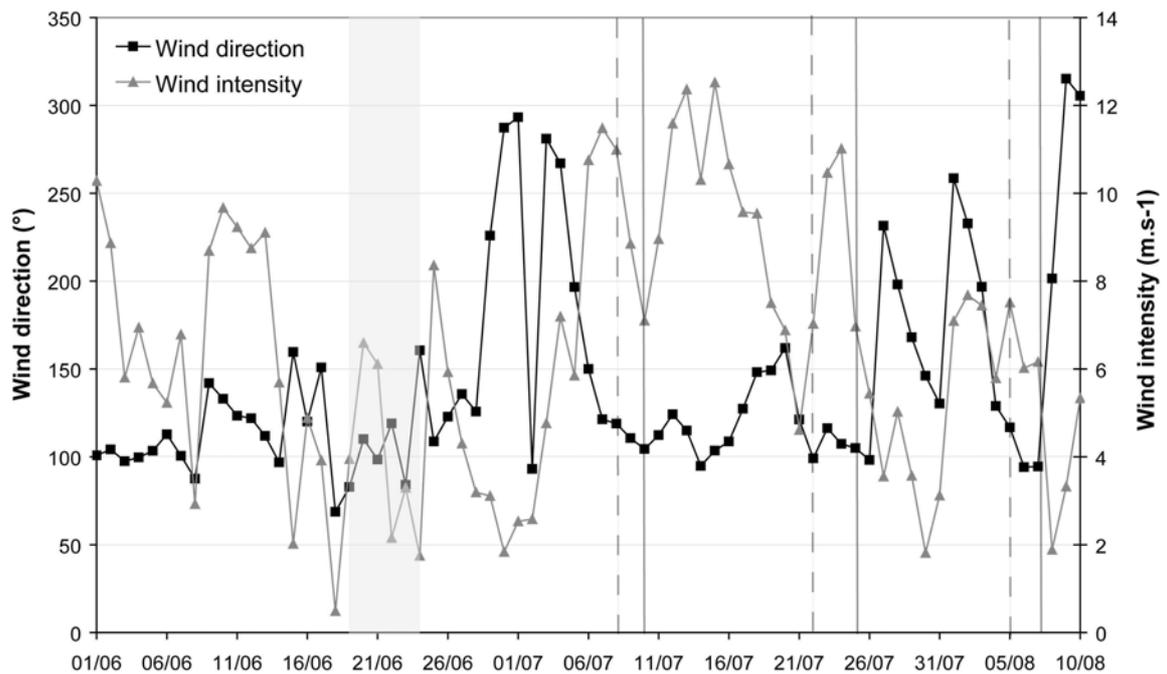


Figure 16 : Direction et intensité du vent mesuré à l'îlot Maître de Juin 2003 à Décembre 2004. En haut : Hiver ; en bas : été. Moyenne sur 24h de données mesurées toutes les 10min. Les bandes grises correspondent aux campagnes Camecal. Les lignes verticales correspondent aux jours d'échantillonnage du suivi temporel : lignes continues pour la radiale Nord et pointillées pour la radiale Sud.

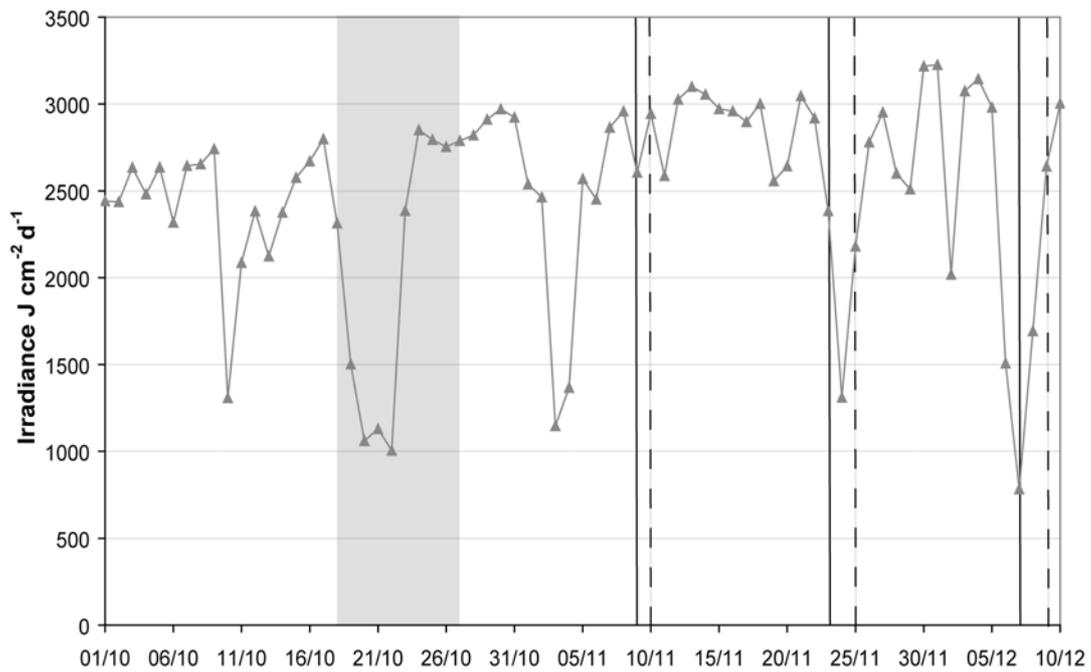
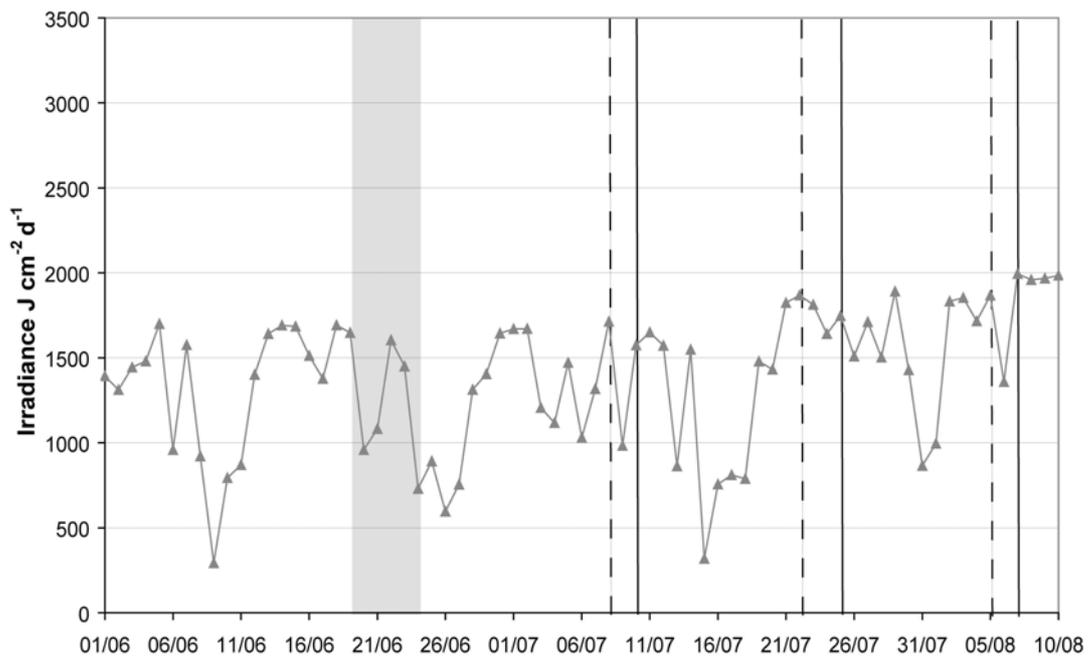


Figure 17 : Irradiance mesurée à Nouméa de Juin 2003 à Décembre 2004. En haut : Hiver : en bas : été. Moyenne sur 24h des données mesurées toutes les heures.

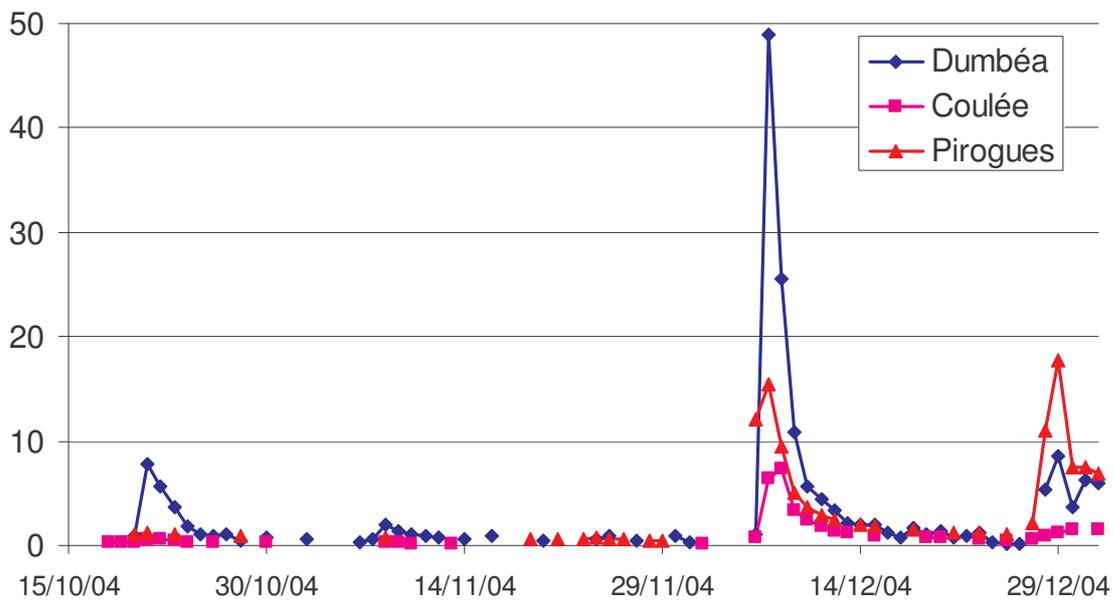
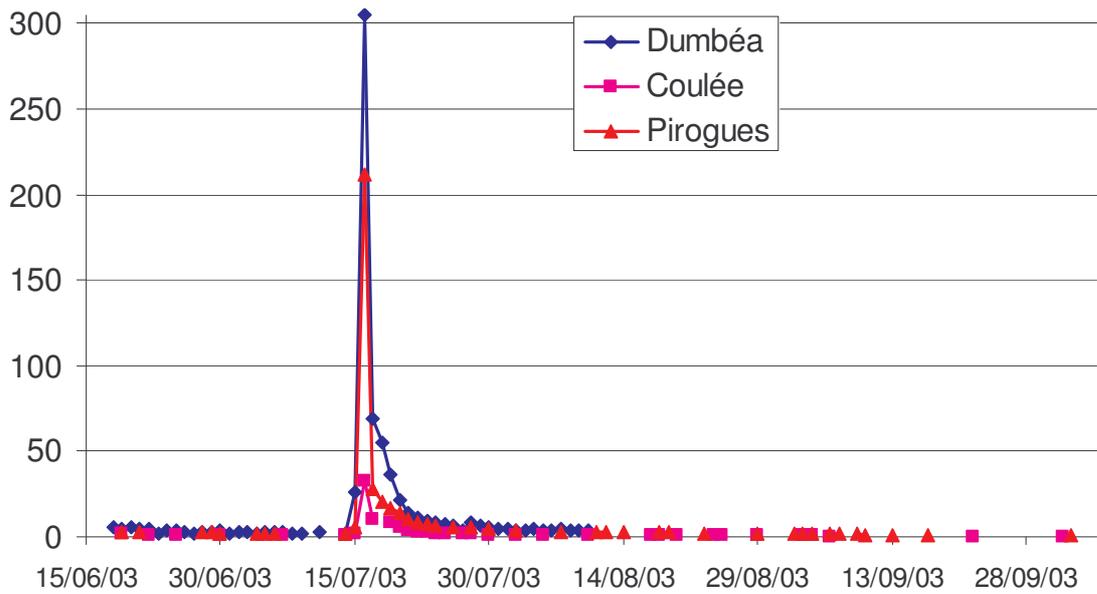


Figure 18 : Débits des rivières ($m^3 s^{-1}$, Dumbéa, Coulée, et Pirogues) de Juin 2003 à Décembre 2004 (En haut : Hiver ; en bas : été).

3.5.2.2 Résultats de simulation

Les Figure 19 et Figure 20 présentent les résultats issus des simulations.

HIVER

La simulation est caractérisée par un gradient stable et marqué de Chl.*a* et de BP entre la côte et le récif barrière. A une station de milieu de lagon (M40), les valeurs de Chl.*a* et de BP moyennée sur l'ensemble de la simulation sont de $0,27 \pm 0,05 \mu\text{g Chl.}a \text{ l}^{-1}$ et $4,95 \pm 1,87 \cdot 10^6 \text{ cell l}^{-1} \text{ h}^{-1}$, alors qu'elles sont nettement plus élevées à la station D39, proche de Nouméa ($0,58 \pm 0,26 \mu\text{g Chl.}a \text{ l}^{-1}$ et $11,5 \pm 1,66 \cdot 10^6 \text{ cell l}^{-1} \text{ h}^{-1}$). Ces valeurs contrastées mettent en évidence les distributions de Chl.*a* et de BP de la Figure 19. Outre ces gradients côte-récif, on peut noter plusieurs structures spatiales sur l'ensemble du lagon. Une bande pauvre en Chl.*a* apparaît nettement le long de la côte le 22/07/03 (Figure 19), et des zones du lagon riches en Chl.*a* sont visibles sur chacune des cartes de la Figure 19. La production bactérienne montre également des variations spatiales, avec des structures mouvantes où BP est plus forte (Figure 19). Inversement, NH_4 ne suit pas la même distribution que ces variables biologiques. La valeur moyenne de NH_4 est de $0,023 \pm 0,010 \mu\text{mol l}^{-1}$ à M40 et $0,020 \pm 0,020 \mu\text{mol l}^{-1}$ à D29. Plus généralement, la distribution spatiale ne montre pas de gradient clairement défini. (Figure 19). Les fonds de baies autour de Nouméa présentent des valeurs de nutriments plus élevées ; cependant, spatialement, l'ensemble du lagon reste très variable, et semble principalement influencé par les eaux aux frontières entrant dans le lagon par le Sud-Ouest (Figure 19, 08/07/03), ou par les passes (Figure 19, 05/08/03).

Le gradient côte-large est également marqué pour les concentrations en Matière Organique Particulaire. Les valeurs moyennes pour le carbone sont respectivement de $2,18 \pm 0,77 \mu\text{mol l}^{-1}$ et $4,5 \pm 1,75$ à M40 et D39 ; à ces mêmes stations, pour l'azote, elles sont respectivement de $0,46 \pm 0,15 \mu\text{mol l}^{-1}$ et $0,79 \pm 0,32$. Cependant, de même que pour la Chl.*a* une bande le long de la côte, très pauvre en Matière Organique Particulaire, se développe durant la simulation.

Enfin, la Matière Organique Dissoute montre également un gradient côte-large : les valeurs moyennes pour le carbone sont respectivement de $9,37 \pm 4,00 \mu\text{mol l}^{-1}$ et $32,6 \pm 10,0$ aux stations M40 et D39. Pour l'azote, ces valeurs moyennes sont de $0,87 \pm 0,14 \mu\text{mol l}^{-1}$ et $1,99 \pm 0,54$, à ces 2 stations.

ETE

A l'instar de la simulation HIVER, la simulation ETE est caractérisée par un gradient côte-large marqué pour la Chl.*a* et BP. Les valeurs moyennes de Chl.*a* sur l'ensemble de la simulation sont de $0,26 \pm 0,02 \mu\text{g Chl.}a \text{ l}^{-1}$ et $0,44 \pm 0,27 \mu\text{g Chl.}a \text{ l}^{-1}$, respectivement, à M40 et D39, et celles de BP sont de $4,28 \pm 0,98 \cdot 10^6 \text{ cell l}^{-1} \text{ h}^{-1}$ et $12,8 \pm 1,46 \cdot 10^6 \text{ cell l}^{-1} \text{ h}^{-1}$ à ces mêmes stations. Encore une fois, NH_4 ne suit pas les mêmes distributions spatiales que les variables biologiques, illustré par des valeurs moyennes de $0,010 \pm 0,005 \mu\text{mol l}^{-1}$ et $0,007 \pm 0,008 \mu\text{mol l}^{-1}$, respectivement à M40 et D39.

Le gradient côte-large est à nouveau marqué pour les concentrations en Matière Organique Particulaire : les valeurs moyennes pour le carbone sont de $2,96 \pm 0,35 \mu\text{mol l}^{-1}$ et $4,93 \pm 1,86$ respectivement à M40 et D39. Pour l'azote, les valeurs sont de $0,54 \pm 0,06 \mu\text{mol l}^{-1}$ et $0,69 \pm 0,30$ à ces mêmes stations. Enfin, la Matière Organique Dissoute montre également un gradient marqué, avec des valeurs moyennes en carbone de $6,0 \pm 1,6 \mu\text{mol l}^{-1}$ et $27,6 \pm 3,9$ respectivement à M40 et D39. Pour l'azote, ces valeurs sont de $0,72 \pm 0,06 \mu\text{mol l}^{-1}$ et $1,48 \pm 0,21$ à ces mêmes stations.

Finalement, on peut remarquer qu'en moyenne il y a peu de différences entre les deux simulations HIVER et ETE, excepté pour NH_4 qui apparaît plus faible en ETE qu'en HIVER.

3.5.2.3 Impact des forçages

Quatre stations contrastées ont été choisies afin d'illustrer l'évolution temporelle d'un certain nombre de variables d'état. Elles sont localisées dans une passe du récif barrière (A17), en milieu de lagon (M40), dans une baie non influencée par les apports benthiques (D39), et enfin dans une baie recevant des apports benthiques (B03). Les évolutions temporelles en HIVER et en ETE sont représentées en [Figure 20](#) et en [Figure 21](#).

HIVER

Le faible vent au début de la simulation permet de fortes productions primaire et bactérienne, entraînant de faibles concentrations en nutriments sur l'ensemble du lagon ([Figure 20A](#)). Dans la partie centrale du lagon, cette situation induit également une diminution de la Matière Organique Détritique ([Figure 21A](#)). A partir du 05/07/03, l'impact d'un fort Alizé ([Figure 16](#)) provoque une diminution drastique de la $\text{Chl.}a$ (et dans une moindre mesure de la BP) dans les baies proches de Nouméa (D39 et B03). Cependant, comme vu précédemment, les masses d'eau entrant dans le lagon durant ce coup de vent entraînent une augmentation nette de NH_4 , ainsi que de la Matière Organique Particulaire, dans la partie centrale du lagon (M40) et dans les passes (A17) ([Figure 20A](#)). Cela s'explique par la forte reminéralisation associée à une faible consommation. La bascule vers un vent d'Ouest faible autour du 26/07/03 induit à nouveau une diminution de NH_4 à toutes les stations, excepté B03. En effet, à cette station, le vent d'Ouest déplace des masses d'eau riches situées à la côte, entraînant deux fortes augmentations de toutes les variables entre la fin Juillet et le 10/08/03 ([Figure 20A](#) et [Figure 21A](#)). Ces mouvements de masses d'eau se notent également en D39.

Les variations journalières sont importantes pour la $\text{Chl.}a$ et le NH_4 , particulièrement dans des conditions de vent (et d'hydrodynamisme) calme. Les influences de la marée et des courants de marée sont également remarquables, surtout dans les passes (A17).

L'impact des fortes pluies se produisant autour du 15/07/03 est observable uniquement aux stations proches des baies à l'embouchure des fleuves, entraînant une augmentation de NH_4 .

Les apports par les sédiments influencent nettement les concentrations de NH_4 à B03, comparé à D39.

ETE

L'amplitude des variations durant la simulation ETE est moins importante que durant celle d'HIVER. La période d'ETE est caractérisée par trois événements de forts Alizés et deux événements de vent d'Ouest faible. Cette séquence de vent provoque une succession de pics pour la $\text{Chl.}a$ et le NH_4 ([Figure 20B](#)). Comme en HIVER, les Alizés entraînent une diminution de la $\text{Chl.}a$ (surtout en D39 et B03) et une augmentation de NH_4 et de la Matière Organique Particulaire (surtout en M40 et A17). A l'inverse, le vent d'Ouest modéré induit une augmentation importante de la $\text{Chl.}a$ et une diminution de NH_4 dans les baies (D39 et B03).

Une fois encore, l'influence des apports benthiques en B03 est clairement visible sur l'évolution temporelle de NH_4 ([Figure 20B](#)), alors qu'en D39 les concentrations en NH_4 restent faibles et stables. L'impact des pluies autour du 07/12/04 reste faible et n'est pas visible en D39.

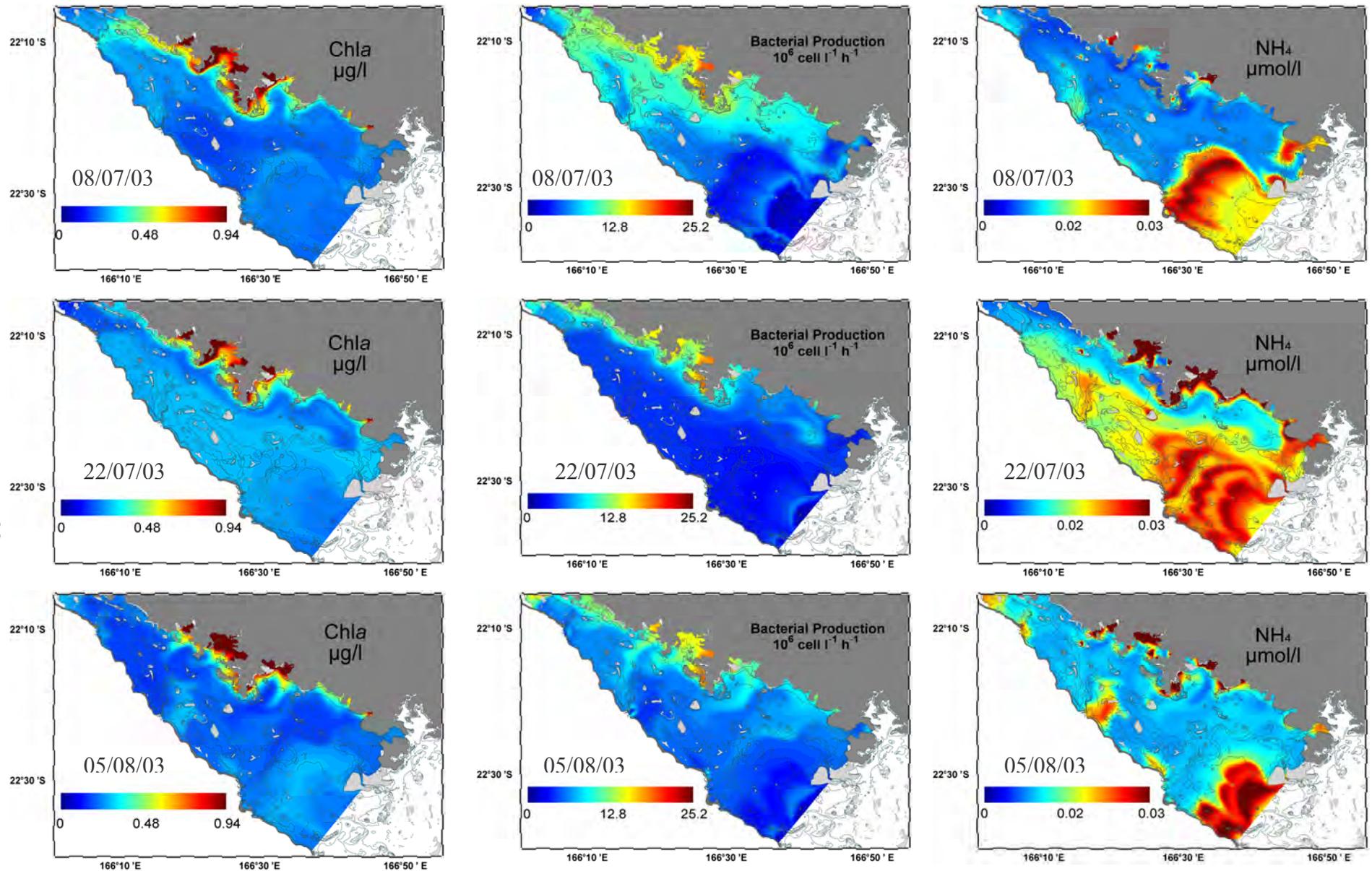


Figure 19 : Distribution spatiale des valeurs simulées (pour Hiver) : Chl.a ($\mu\text{g l}^{-1}$) et ammonium ($\mu\text{mol l}^{-1}$). Aux dates suivantes : 08/07/03, 22/07/03 et 05/08/03. Noter l'échelle de couleur utilisée pour l'ammonium, aux valeurs extrêmement faibles (0-0,03 μM).

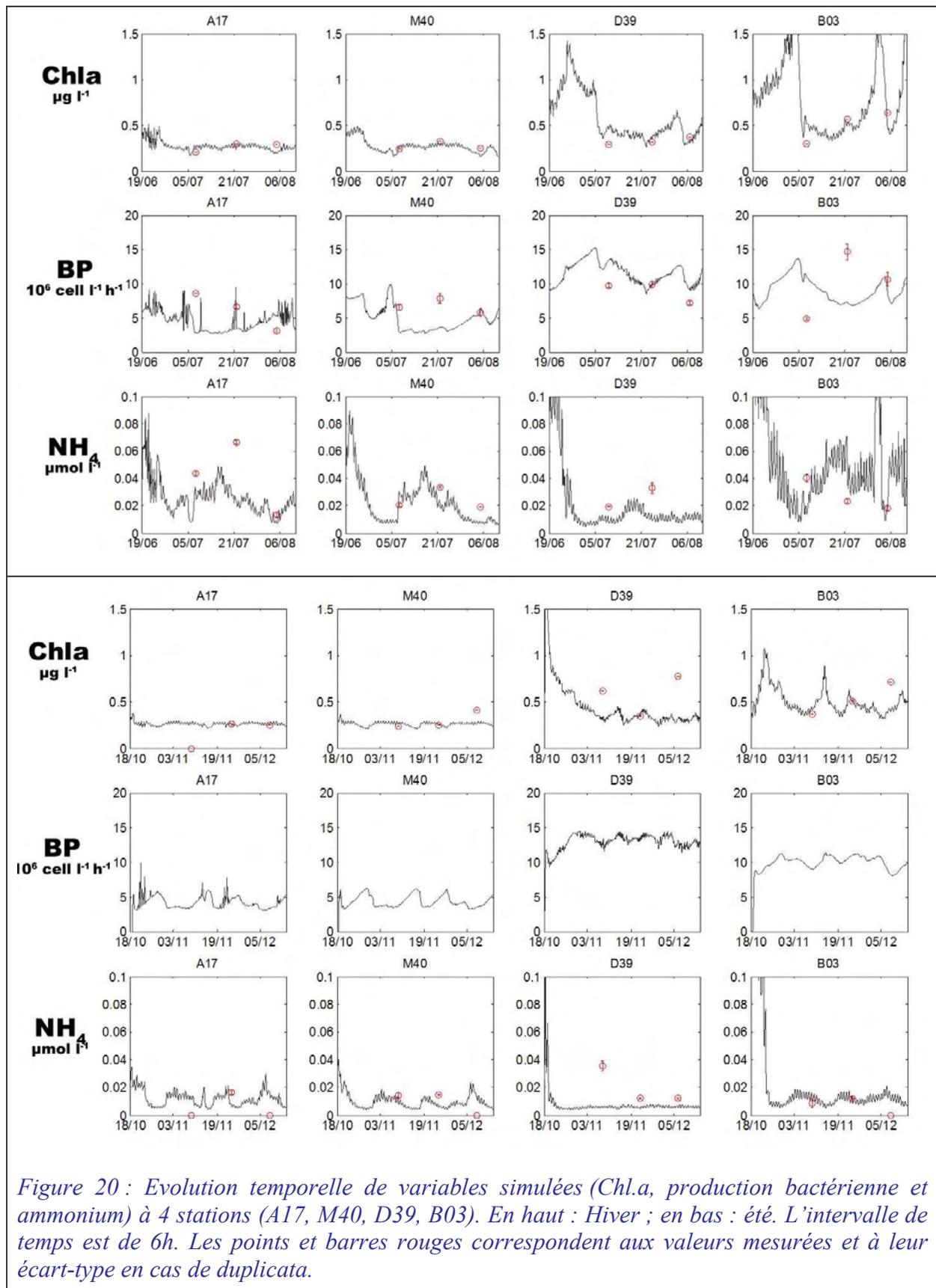


Figure 20 : Evolution temporelle de variables simulées (Chl.a, production bactérienne et ammonium) à 4 stations (A17, M40, D39, B03). En haut : Hiver ; en bas : été. L'intervalle de temps est de 6h. Les points et barres rouges correspondent aux valeurs mesurées et à leur écart-type en cas de duplicata.

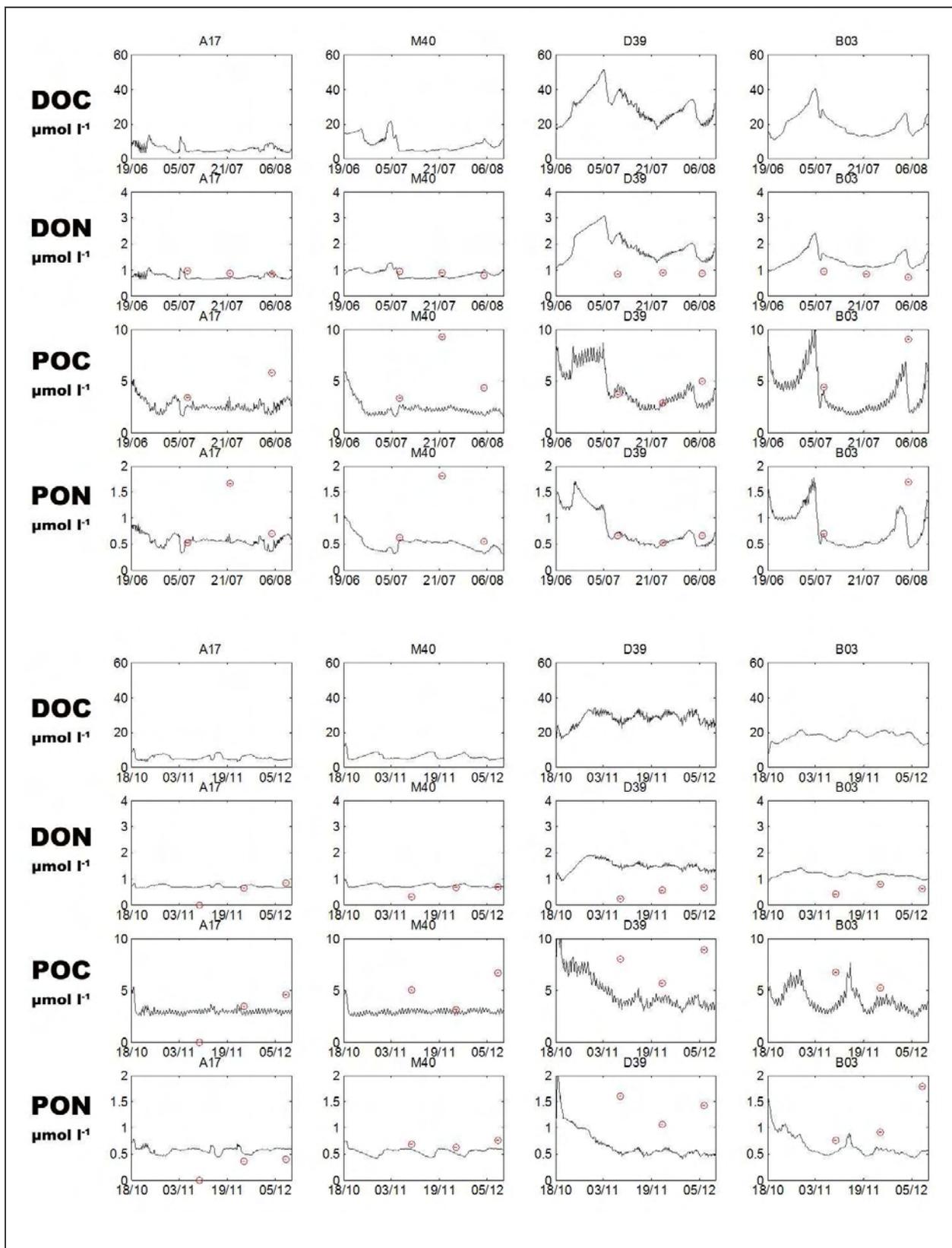


Figure 21 : Evolution temporelle de variables simulées (DOC, DON, POC et PON) à 4 stations (A17, M40, D39, B03). En haut : Hiver ; en bas : été. Les symboles sont les mêmes que pour la Figure 20.

3.5.3 Comparaison simulation/données

Les comparaisons entre les variables simulées et mesurées sont présentées sur la [Figure 20](#), la [Figure 21](#) (les points rouges représentent les valeurs mesurées), et sur les [Figure 22](#) à [Figure 24](#) (valeurs mesurées *versus* celles simulées). Le [Tableau 6](#) synthétise ces comparaisons.

Les valeurs simulées sont extraites à 11h00 chaque jour d'échantillonnage, et moyennées sur les huit cellules de la grille contenant la station considérée.

3.5.3.1 Variables biologiques

Les valeurs mesurées de Chl.*a* sont correctement reproduites par le modèle ([Figure 20](#) et [Figure 22](#)). En supprimant les valeurs extrêmes (2/51 stations, cerclées en rouge sur la [Figure 22](#)), la différence moyenne entre les valeurs simulées et mesurées en HIVER est de $0,09 \pm 0,01 \mu\text{g l}^{-1}$ pour des moyennes de $0,31 \pm 0,01$ et $0,29 \pm 0,02 \mu\text{g l}^{-1}$ respectivement pour les valeurs mesurées et simulées ([Tableau 6](#)). En été, certaines valeurs mesurées lors du dernier échantillonnage, en particulier dans les baies, sont beaucoup plus fortes que celles prédites : en enlevant ces valeurs (4/52 stations), la différence moyenne entre les valeurs simulées et mesurées en ETE est de nouveau $0,09 \pm 0,01 \mu\text{g l}^{-1}$ pour des moyennes de $0,32 \pm 0,02$ et $0,27 \pm 0,02 \mu\text{g l}^{-1}$ respectivement pour les valeurs mesurées et simulées ([Tableau 6](#)). Les différences normalisées, calculées en divisant la différence moyenne par la moyenne des moyennes des données et des valeurs simulées, sont de 30,8% en HIVER et de 32,9% en ETE. Ainsi, le modèle prédit les valeurs de Chl.*a* avec une erreur d'environ 30%.

Les valeurs obtenues en ETE étant aberrantes, seules les valeurs de BP en HIVER ont pu être utilisées. Une fois encore, les valeurs mesurées de BP sont plutôt bien reproduites par le modèle ([Figure 20A](#) & [Figure 23](#)), excepté à certaines stations dans les baies (D47, B03, B15...) ou derrière le récif barrière (M30) où les valeurs simulées semblent sous-estimées. En omettant ces valeurs extrêmes (9/54 stations, [Figure 23](#)), la différence moyenne est de $2,6 \pm 0,25 \cdot 10^6 \text{ cell l}^{-1} \text{ h}^{-1}$, avec des moyennes de $7,9 \pm 0,4$ et $7,8 \pm 0,5 \cdot 10^6 \text{ cell l}^{-1} \text{ h}^{-1}$, respectivement, pour les valeurs mesurées et simulées. La différence normalisée est de 30,1%.

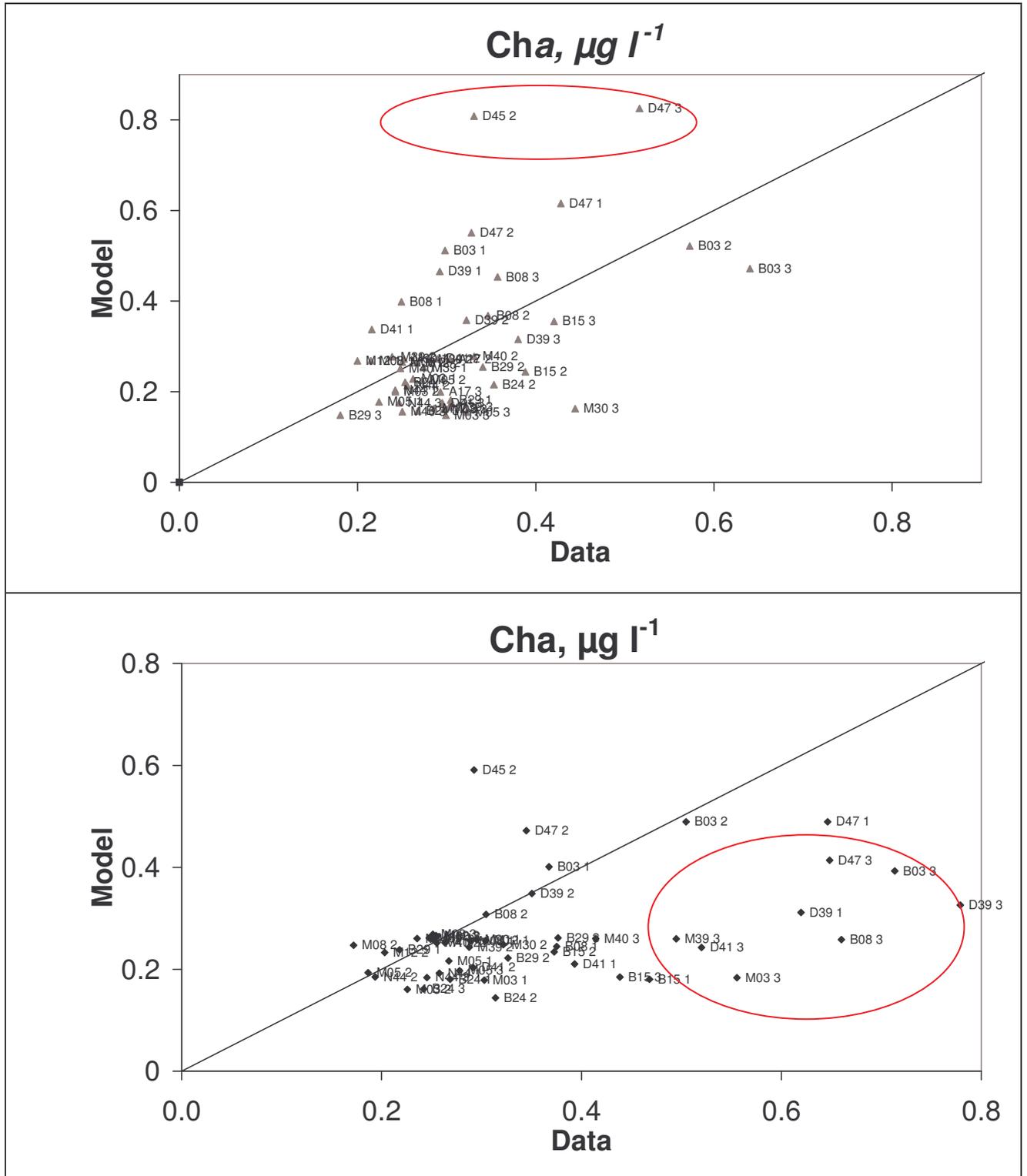


Figure 22 : Valeurs de Chl.a modélisées en fonction de celles mesurées pour 18 stations échantillonnées trois fois (1, 2, 3). En haut : HIVER ; en bas : ETE.

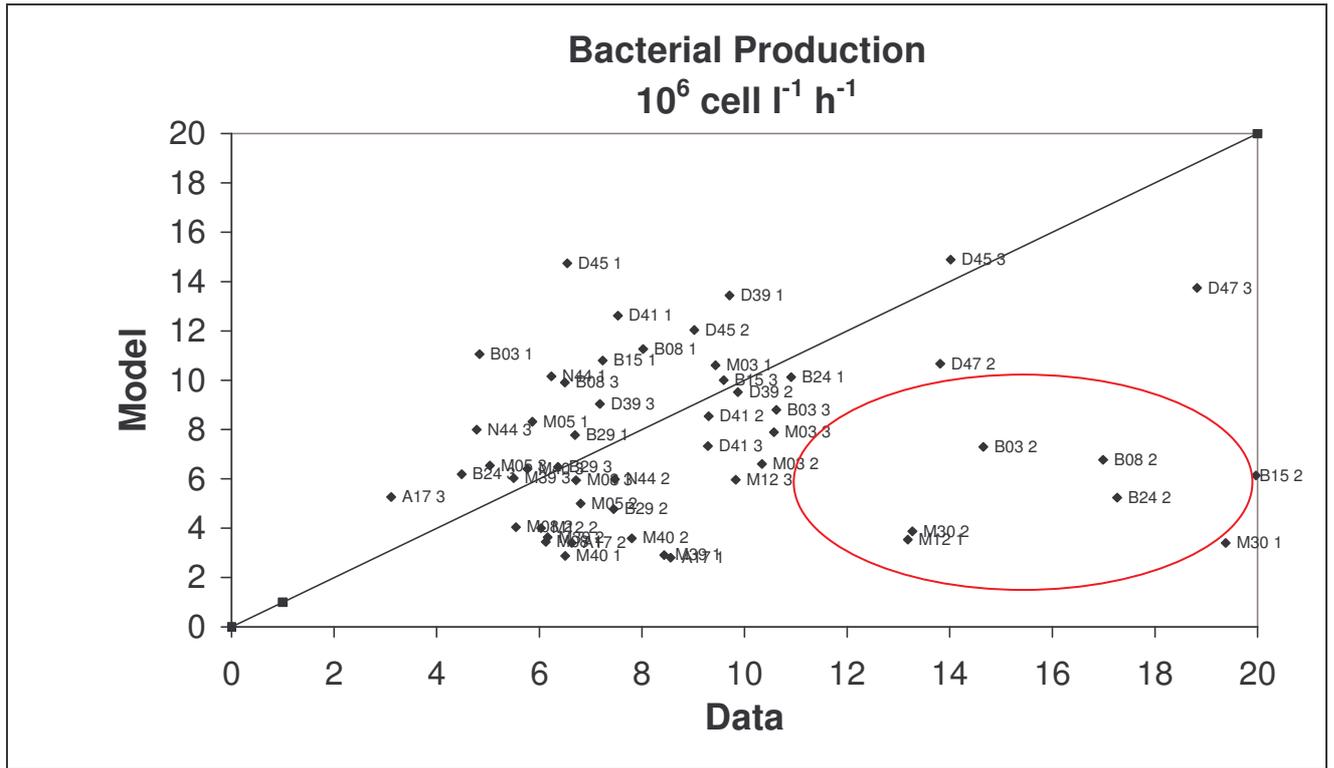


Figure 23 : Valeurs de production bactérienne modélisées en fonction de celles mesurées pour 18 stations échantillonnées trois fois (1, 2, 3), pour la simulation HIVER.

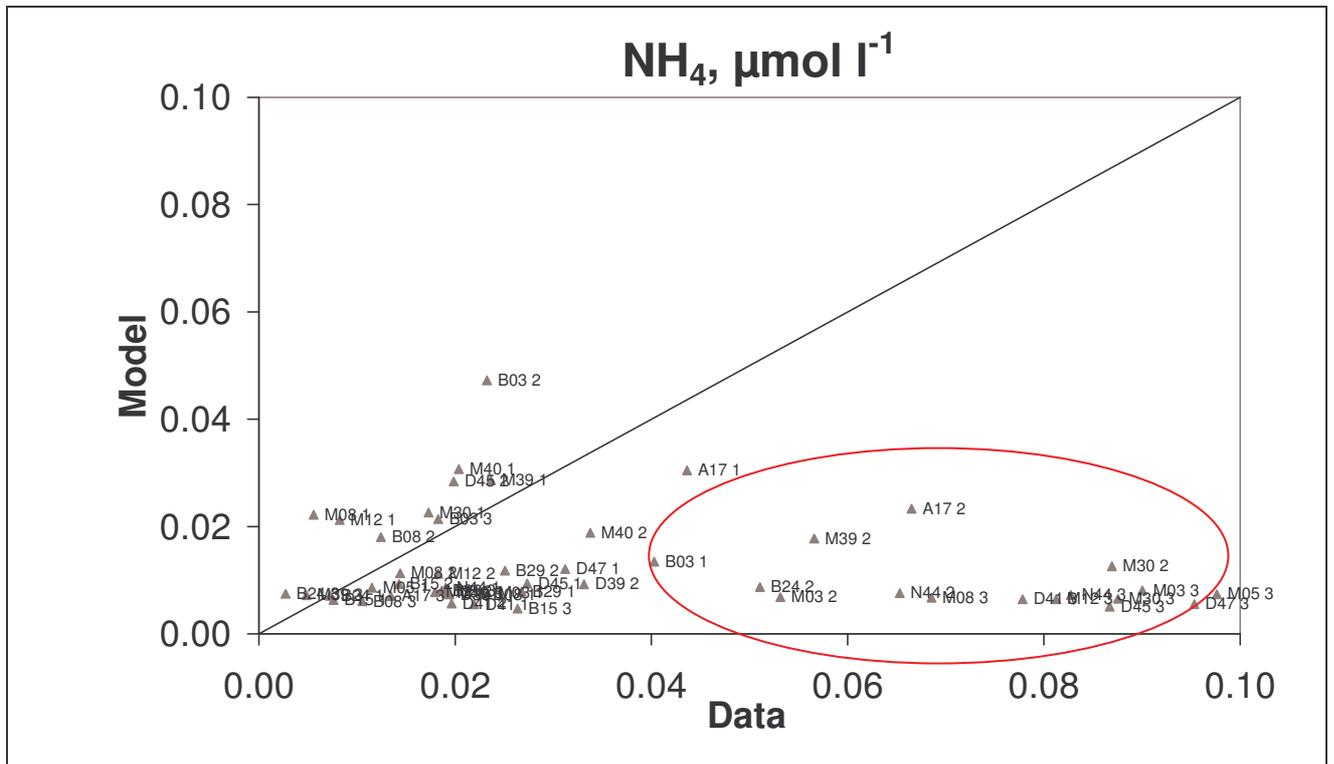


Tableau 6 : Comparaisons entre les valeurs mesurées et simulées, moyennées ($\pm SE$) sur les stations échantillonnées durant le suivi temporel. Quelques stations aux valeurs extrêmes ont été éliminées. La différence normalisée est calculée en divisant la différence moyenne par la moyenne de la valeur moyenne des données et de la valeur moyenne des valeurs simulées.

<i>HIVER</i>		Moyenne données	Moyenne modèle	Différence moyenne	% différence normalisée	stations rejetées/totales
Chl.a	$\mu\text{g l}^{-1}$	0,309	0,288	0,092	30,8	2/51
		$\pm 0,013$	$\pm 0,020$	$\pm 0,010$		
NH₄	μM	0,039	0,012	0,016	60,1	13/53
		$\pm 0,004$	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$		
BP	$10^6 \text{ cell l}^{-1} \text{ h}^{-1}$	7,935	7,863	2,653	33,6	9/54
		$\pm 0,422$	$\pm 0,507$	$\pm 0,257$		
DON	μM	0,861	1,078	0,292	30,1	6/53
		$\pm 0,011$	$\pm 0,046$	$\pm 0,034$		
POC	μM	4,272	3,028	1,762	48,3	11/51
		$\pm 0,152$	$\pm 0,247$	$\pm 0,200$		
PON	μM	0,739	0,524	0,253	40,1	11/54
		$\pm 0,040$	$\pm 0,033$	$\pm 0,038$		
<i>ETE</i>		Moyenne données	Moyenne modèle	Différence moyenne	% différence normalisée	stations rejetées/totales
Chl.a	$\mu\text{g l}^{-1}$	0,315	0,272	0,093	32,9	4/52
		$\pm 0,018$	$\pm 0,016$	$\pm 0,013$		
NH₄	μM	0,014	0,006	0,009	85,7	9/44
		$\pm 0,001$	$\pm 0,000$	$\pm 0,001$		
DON	μM	0,592	0,893	0,328	44,1	9/52
		$\pm 0,032$	$\pm 0,026$	$\pm 0,036$		
POC	μM	5,236	3,421	1,991	46,0	9/53
		$\pm 0,255$	$\pm 0,176$	$\pm 0,187$		
PON	μM	0,870	0,513	0,395	57,1	10/52
		$\pm 0,046$	$\pm 0,020$	$\pm 0,037$		

4 Réalisation de scénarios

4.1 Introduction

Le développement et la validation du modèle couplé physique-biogéochimique sur le lagon Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie nous permettent de disposer d'un outil d'aide à la compréhension de la dynamique spatio-temporelle des flux de matière organique et de nutriments. Une des applications possibles de cet outil est l'étude de scénarios caractéristiques, afin de déterminer les possibles réponses des variables biogéochimiques à des conditions de forçages définies. A grande échelle, la problématique de notre siècle est principalement le changement global du climat. Des approches utilisant la modélisation ont essayé d'en étudier les conséquences sur la température moyenne globale (Stott & Kettleborough 2002), ainsi que sur l'écosystème planctonique de l'océan global (Sarmiento *et al* 2004) ou de l'Océan Pacifique sub-arctique (Denman & Pena 2002).

Notre site d'étude est un site côtier, dont les principales perturbations proviennent de la variabilité à court terme des différents forçages. Cette caractéristique des écosystèmes côtiers nous conduit donc à nous concentrer sur l'étude de divers scénarios à petite échelle. Ces scénarios sont présentés en [Tableau 7](#).

En premier lieu, deux simulations types en condition de vent stationnaire sont réalisées pour chacun des vents les plus fréquemment observés au niveau du lagon Sud-Ouest : les Alizés de Sud-Est, et les vents d'Ouest. Des perturbations comme l'augmentation ponctuelle des concentrations en nutriments (crues, upwelling côtier) ou l'augmentation de la pression anthropique (augmentation de la population de Nouméa) sont ensuite étudiées. Ces simulations se basent sur les deux simulations de référence étudiées dans le Chapitre 3.5.2 (cf. [Tableau 7](#)) afin de pouvoir effectuer des comparaisons.

Tableau 7 : Présentation des différents scénarios en fonction des forçages (dans l'ordre vent, apports anthropiques, apports fluviaux, apports benthiques, conditions aux limites, conditions initiales). Les forçages utilisés correspondent soit à la simulation HIVER soit à la simulation ETE (cf. Chapitre 3.5.2).

Simulations	Vent	Apports anthropiques	Apports fluviaux	Apports benthiques	Cond. Limites	Cond. Initiales
ALIZES	stationnaire 110°, 8 m s ⁻¹	<i>HIVER</i>	<i>HIVER</i>	<i>HIVER</i>	<i>HIVER</i>	<i>HIVER</i>
OUEST	stationnaire 270°, 8 m s ⁻¹	<i>HIVER</i>	<i>HIVER</i>	<i>HIVER</i>	<i>HIVER</i>	<i>HIVER</i>
CRUE	<i>HIVER</i>	<i>HIVER</i>	350 m ³ s ⁻¹ pendant 10 jours	<i>HIVER</i>	<i>HIVER</i>	<i>HIVER</i>
ANTHRO	<i>ETE</i>	multiplié par 2	<i>ETE</i>	<i>ETE</i>	<i>ETE</i>	<i>ETE</i>
UPWELL	<i>ETE</i>	<i>ETE</i>	<i>ETE</i>	<i>ETE</i>	Valeurs au SW augmentées	<i>ETE</i>
SED	<i>ETE</i>	<i>ETE</i>	<i>ETE</i>	sur tout le lagon	<i>ETE</i>	<i>ETE</i>

4.2 Résultats des scénarios simulés

4.2.1 *Vents stationnaires*

4.2.1.1 Alizés

Les Alizés soufflent 70% de l'année sur le lagon Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie (Bujan 2000). En outre, ces vents conditionnent largement le renouvellement et la circulation des eaux lagunaires (Douillet 1998) par l'introduction dans le lagon, par sa partie Sud-Ouest, des eaux oligotrophes océaniques. L'étude des temps de résidence des masses d'eau dans le cas d'un Alizé (110°), de 8 m s^{-1} , a été réalisée par Jouon *et al* (2006) et montre qu'en moyenne sur le lagon, le temps de renouvellement des eaux est de 6,5 jours.

Une simulation a été réalisée en utilisant les mêmes forçages que la simulation HIVER (cf. Chapitre 3.5.2), mais en utilisant un vent stationnaire, de direction 110° , et de vitesse 8 m s^{-1} . Les sorties à l'issue de 50 jours de simulation sont présentées sur la Figure 25.

La distribution spatiale de la Chl.a montre le gradient classique entre les baies et le récif barrière, avec cependant une structure caractérisée par des concentrations plus faibles le long de la côte, correspondant à une zone tampon entre le milieu de lagon et les baies : cette zone où les eaux se trouvent confinée n'est ni influencée par les apports de la zone côtière, ni par les eaux pénétrant le lagon par le Sud-Ouest. On retrouve cette distribution pour l'ammonium. En outre, ces vents de Sud-Est entraînent l'accumulation des eaux plus riches vers les zones situées au Nord-Ouest des baies proches de Nouméa (baie de Sainte-Marie par exemple).

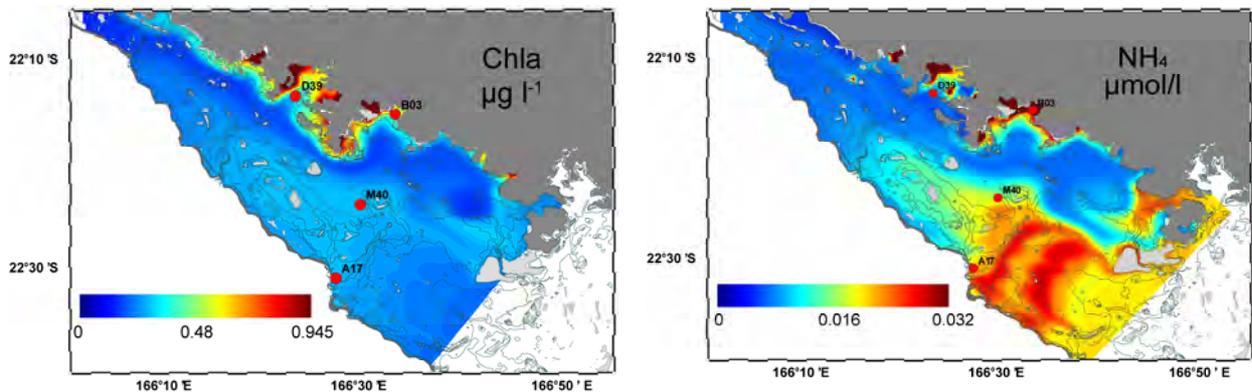


Figure 25 : Cartes de la concentration en Chl.a ($\mu\text{g l}^{-1}$) et en NH_4 ($\mu\text{mol l}^{-1}$) à l'issue du 50^{ème} jour de la simulation ALIZES.

4.2.1.2 Vent d'Ouest

Les vents d'Ouest sont moins fréquents que les Alizés, mais représentent la deuxième direction de vent la plus observée. En outre, ils sont souvent représentés par de violents coups de vent. Une simulation a été réalisée en utilisant les mêmes forçages que la simulation HIVER (cf. Chapitre 3.5.2), mais avec un vent stationnaire de direction 270° et de vitesse 8 m s^{-1} . Les sorties après 50 jours de simulation sont présentées sur la Figure 26. Le gradient côte - récif barrière est toujours apparent, et on observe une zone appauvrie en Chl.a dans la partie Sud du lagon. Les entrées d'eau s'effectuent au niveau des passes dans le récif barrière, générant des structures complexes et variées dans la partie centrale du lagon. En outre, ces vents d'Ouest entraînent l'accumulation des eaux plus riches vers les zones situées à l'Est des baies proches de Nouméa (baie de Koutio par exemple).

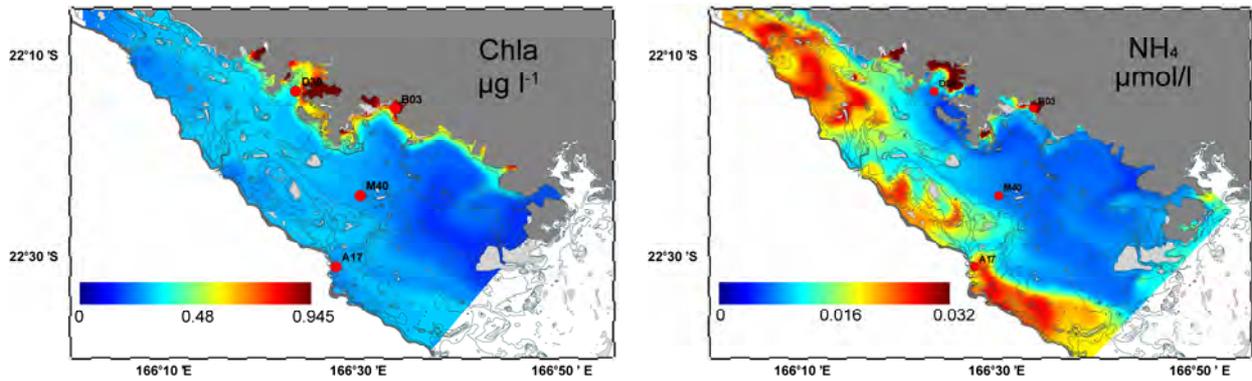


Figure 26 : Cartes des concentrations en Chl.a ($\mu\text{g l}^{-1}$) et en NH_4 ($\mu\text{mol l}^{-1}$) après le 50^{ème} jour de la simulation OUEST.

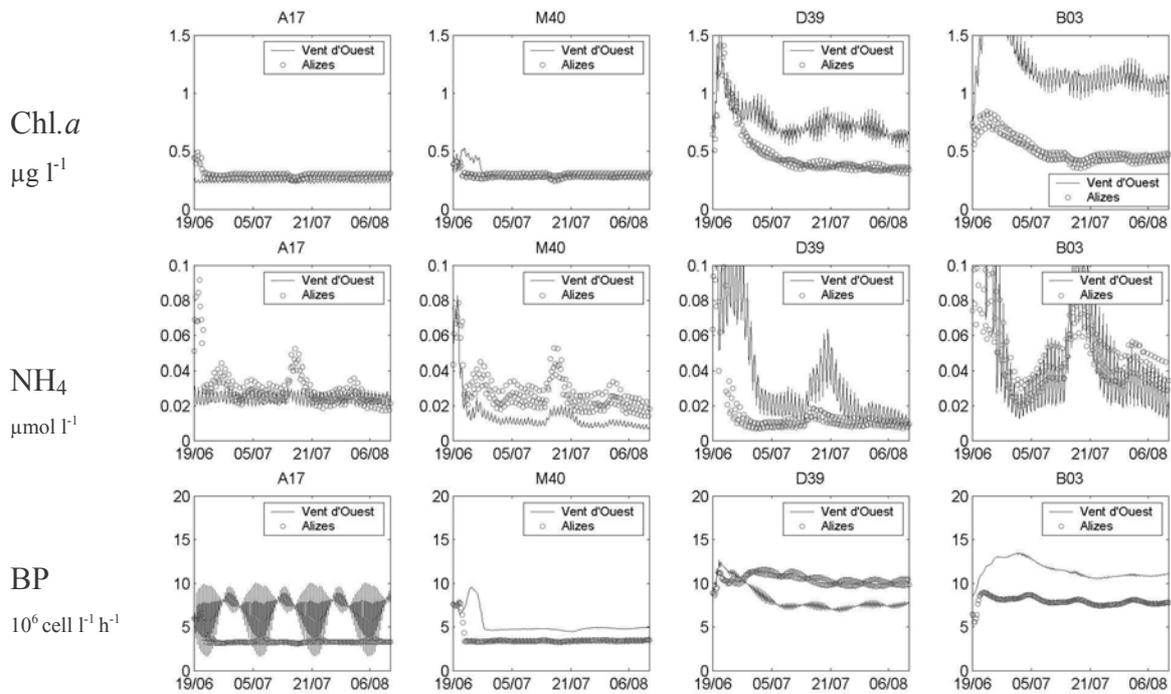


Figure 27 : Evolution au cours du temps (4 points par jour) de la Chl.a ($\mu\text{g l}^{-1}$), de NH_4 ($\mu\text{mol l}^{-1}$), et de la production bactérienne BP ($10^6 \text{ cell l}^{-1} \text{ h}^{-1}$) à 3 m de profondeur en 4 stations (A17, M40, D39 et B03). La courbe en trait continu correspond à la simulation OUEST et les ronds non reliés correspondent à la simulation ALIZES.

4.2.1.3 Comparaison

La Figure 27 présente une comparaison entre les deux simulations ALIZES et OUEST, en 4 stations réparties sur le lagon (cf. cartes précédentes). Les concentrations en Chl.a et en NH_4 simulées aux stations dans les baies (D39, B03) présentent des valeurs plus élevées pour la simulation OUEST. A la station M40, située en milieu de lagon, l'apport des eaux à la frontière Sud-Ouest dans la simulation ALIZES entraîne une concentration plus forte en NH_4 que pour la simulation OUEST ; en revanche, la différence au niveau de la Chl.a reste faible.

On peut également noter que la station A17 est fortement influencée par la marée dans le cas de la simulation OUEST, pour les variables liées à la production bactérienne.

4.2.2 *Impact d'une crue*

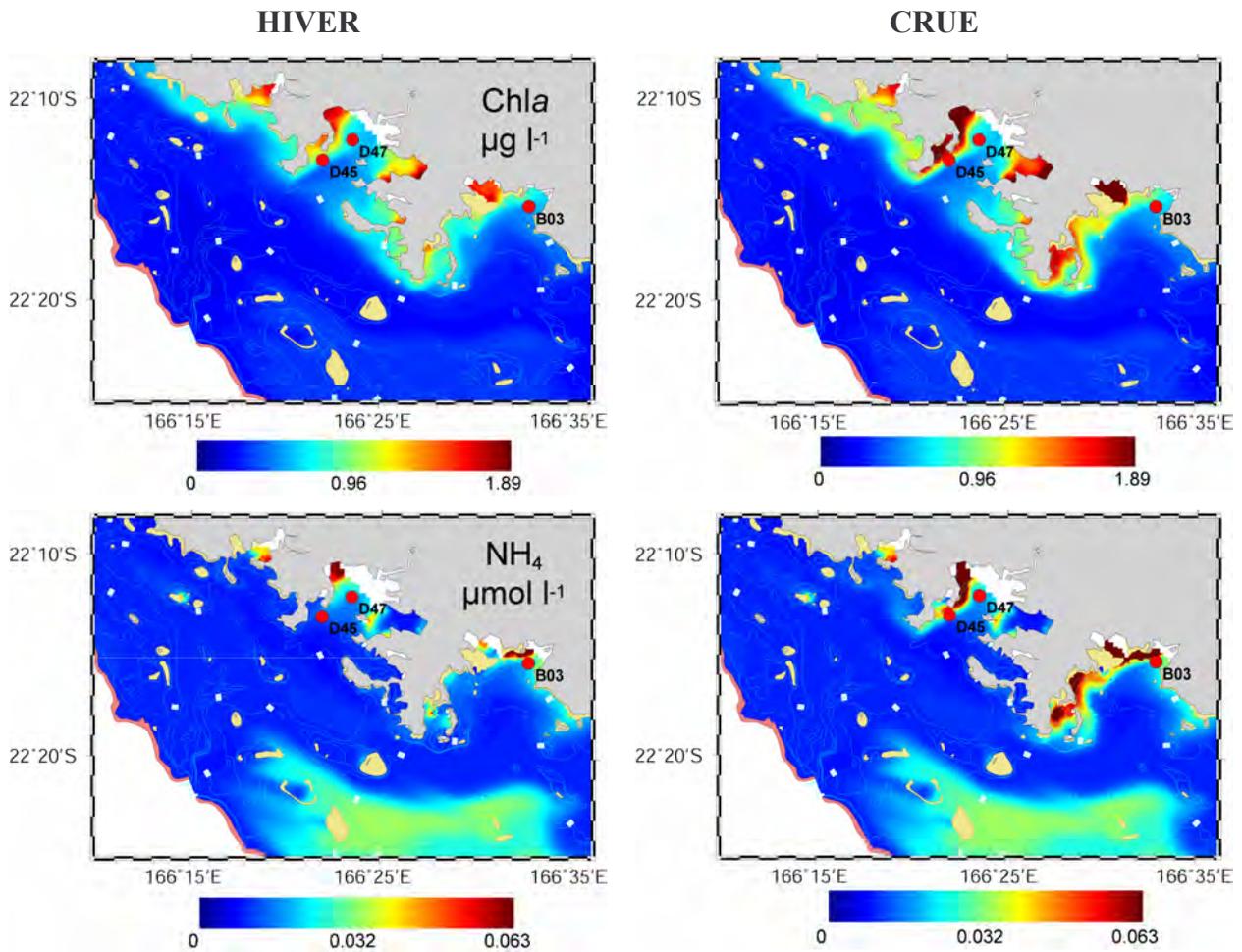


Figure 28 : Cartes simulées de la distribution de la concentration en Chl.a ($\mu\text{g l}^{-1}$) et en NH_4 ($\mu\text{mol l}^{-1}$), à 3 m de profondeur, le 08/07/2003. Les cartes sont centrées sur la presqu'île de Nouméa. Colonne de gauche : simulation de référence (HIVER) ; Colonne de droite : simulation CRUE (démarrée le 01/07/03).

Alors que le régime hydrologique des rivières se jetant dans le lagon est caractérisé par de très faibles débits de l'ordre de $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, les importantes précipitations tropicales provoquent ponctuellement des augmentations brusques du débit des rivières.

Une simulation (CRUE) a été réalisée en utilisant les mêmes forçages que la simulation HIVER (cf. Chapitre 3.5.2), mais les débits des trois rivières Dumbéa, Coulée, Pirogues ont été modifiés. Ils ont été considérés constants à $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ entre le 19/06/2003 et le 01/07/2006 à 08h00. A partir de cette date, le débit a été augmenté progressivement pour atteindre $350 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à 14h00, et a été maintenu ainsi pendant 10 jours, jusqu'au 10/07/2003 à 14h00. Durant la période de crue, le vent a été établi au Sud-Est (Alizés) à partir du 5 Septembre.

Les résultats présentés sur les Figure 28 et Figure 29 montrent que l'impact de la crue reste limité aux baies, entraînant une forte augmentation de la concentration en Chl.a ainsi

qu'en ammonium. Les zones touchées sont essentiellement les parties Nord-Ouest des baies, en raison des Alizés.

Cependant, il ne faut pas oublier une limitation importante du modèle hydrodynamique, qui ne simule pas les entrées d'eau douce dans le modèle : le panache important résultant de la crue n'est donc pas reproduit. L'apport des nutriments s'effectue donc en un seul point précis du maillage, et le transport de ces nutriments s'effectue ensuite par diffusion et advection des masses d'eau liées uniquement à l'entraînement par le vent.

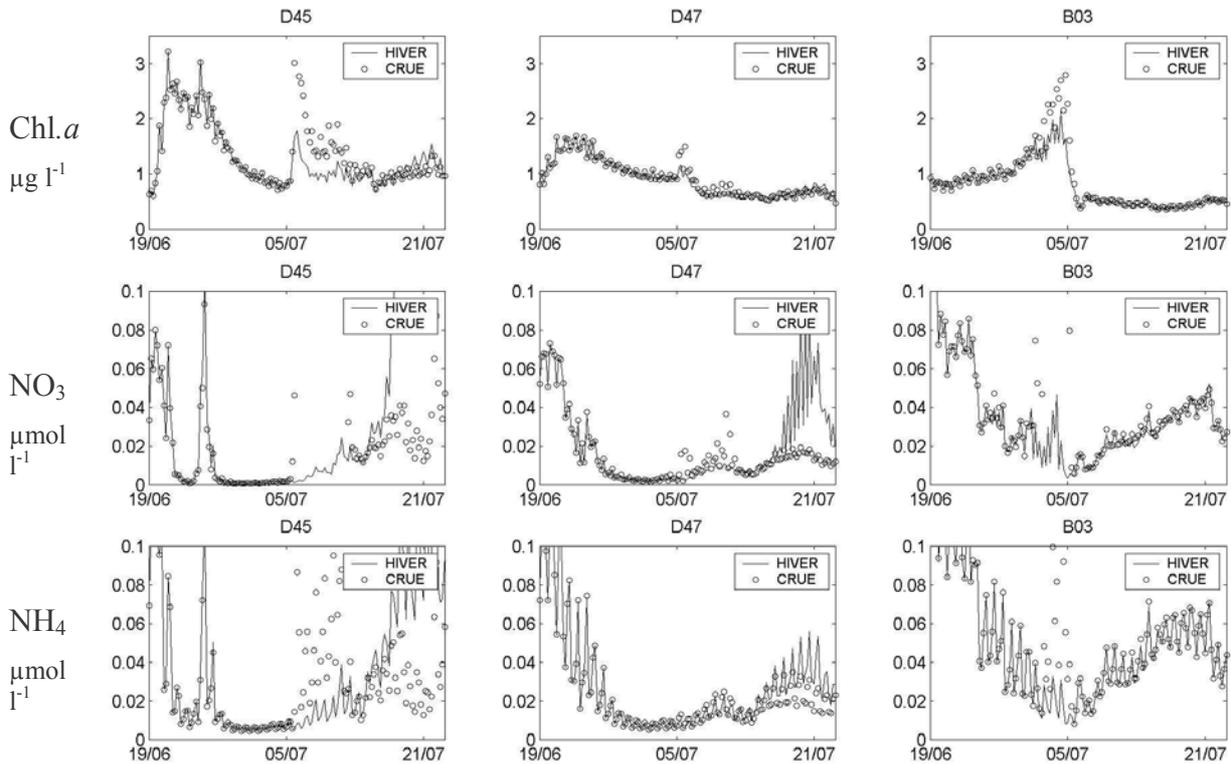


Figure 29 : Evolution au cours du temps (4 points par jour) de la Chl.a ($\mu\text{g l}^{-1}$), de NO_3 ($\mu\text{mol l}^{-1}$), et de NH_4 ($\mu\text{mol l}^{-1}$) à 3 m de profondeur en 3 stations proches de Nouméa (D45, D47 et B03). La courbe en trait continu correspond à la simulation de référence (HIVER) et les ronds non reliés correspondent à la simulation CRUE.

4.2.3 Augmentation des apports anthropiques

Les données sur les effluents urbains sont très limitées en Nouvelle-Calédonie. Nous disposons de quelques mesures (R. Fichez, données non publiées) que nous avons utilisées afin de caractériser la nature des flux d'azote vers le lagon, et nous avons ensuite évalué ces flux en fonction de la population présente sur chacun des bassins versants des baies considérées. Les apports anthropiques sont pris en compte dans le modèle au travers de trois points de rejet en nutriments : la baie de Koutio (D65), la Grande Rade (D01) et la baie de Sainte-Marie (N12). Ces points sont situés au fond de chacune de ces baies. Une simulation (ANTHRO) a été réalisée à partir des forçages de la simulation ETE, mais en doublant la population, et donc les apports anthropiques au niveau des points de rejet.

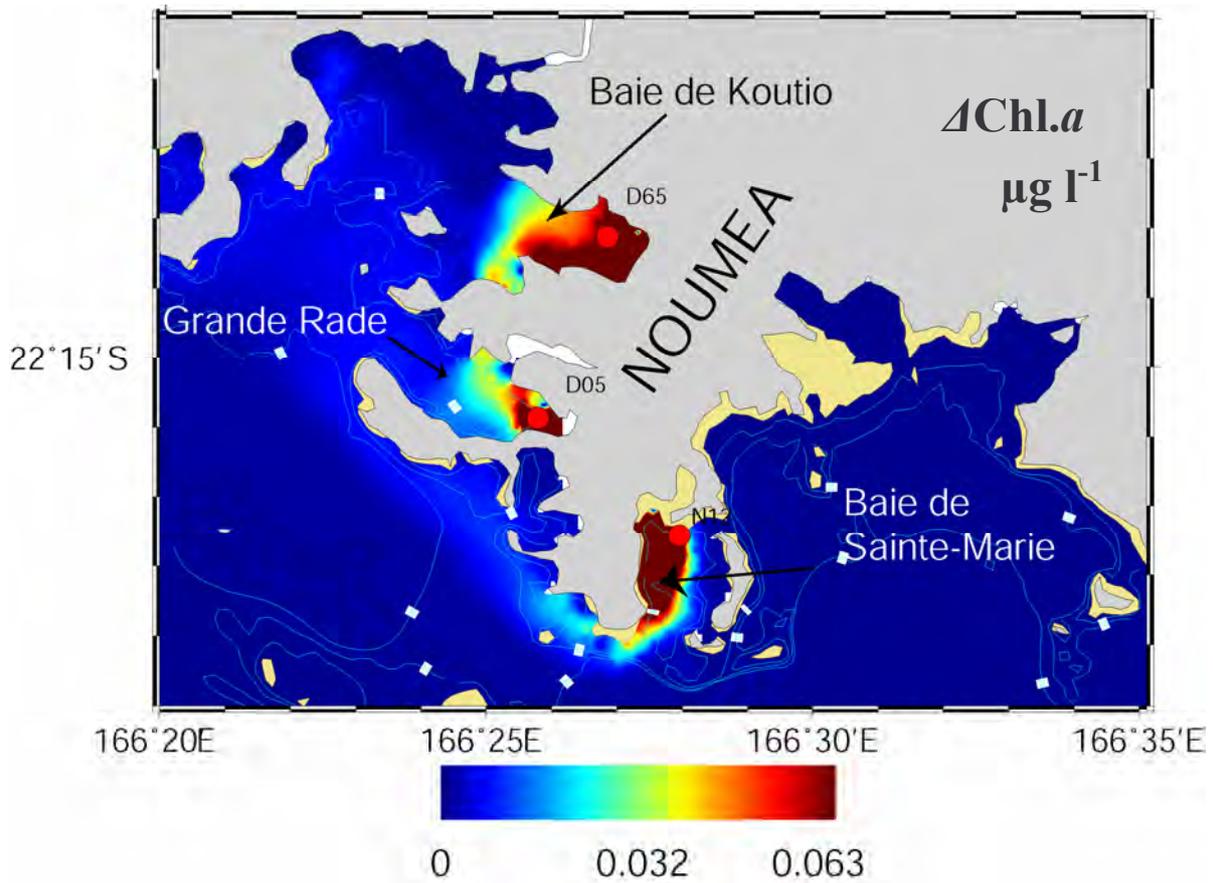


Figure 30 : Carte (centrée sur la presqu'île de Nouméa) de la différence de concentration en Chl.a (en $\mu\text{g l}^{-1}$) entre les simulations ANTHRO et ETE.

La Figure 30 montre la différence de la concentration en Chl.a entre les simulations ANTHRO et ETE. Elle met en évidence l'impact spatial de l'augmentation des apports. Dans la baie de Koutio et la Grande Rade, on observe que l'impact reste limité en fond de baie. La baie de Sainte-Marie présente de son côté une modification de la concentration en Chl.a spatialement plus étendue. On observe également une sortie d'eau plus riche vers le Nord-Ouest, le long de la presqu'île de Nouméa. La Figure 31 montre l'évolution au cours du temps de la Chl.a et du NH_4 en 3 stations chacune située dans les baies considérées. On peut noter que l'apport en nutriments entraîne une augmentation de la concentration en Chl.a, sans pour autant que l'augmentation en nutriments soit visible (D05 et D65).

La baie de Koutio et la Grande Rade sont les deux baies où l'on observe les temps de résidence des eaux les plus élevés (Jouon *et al* 2006), en raison du faible hydrodynamisme dû à leur orientation vers le Nord-Ouest, les protégeant ainsi des Alizés. Ainsi, les effluents injectés dans le modèle biogéochimique provoquent une perturbation limitée à la zone localisée autour des points de rejet. En revanche, la baie de Sainte-Marie, ouverte vers le Sud-Ouest, est le siège d'une circulation plus importante : l'impact du rejet n'est pas seulement limité à la baie, mais peut s'étendre le long de la côte, vers le Nord, en situation d'Alizés.

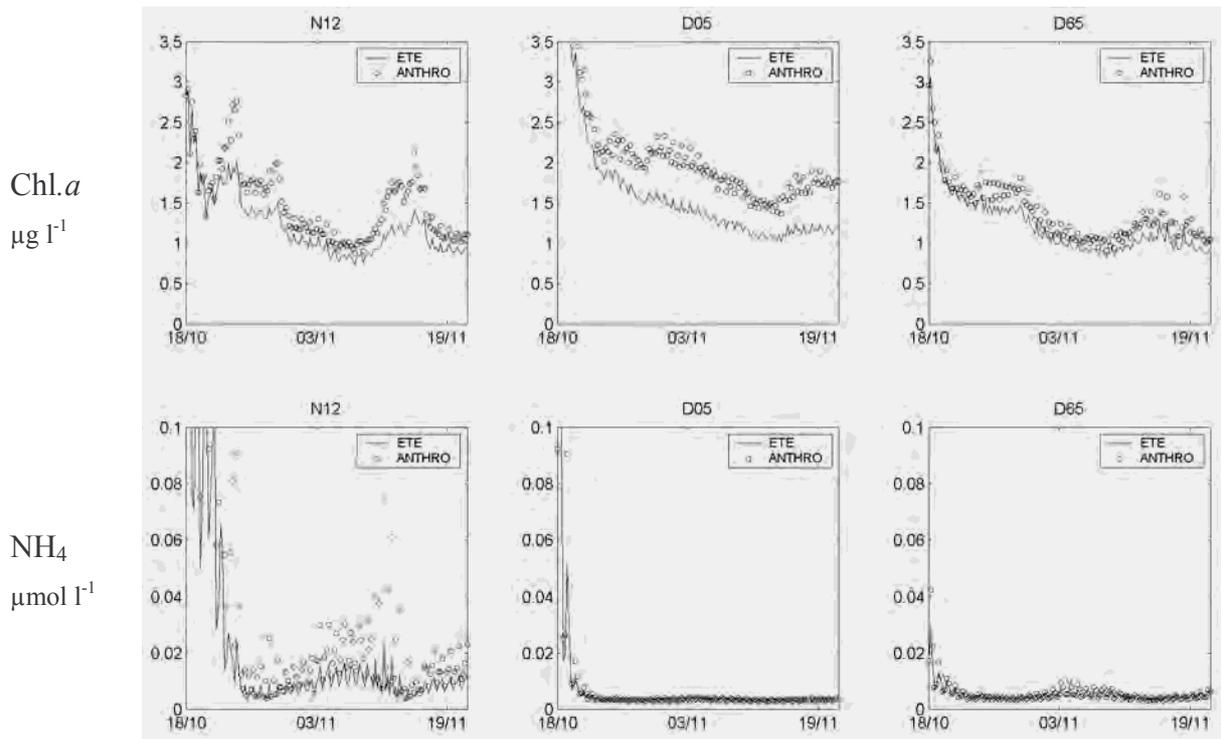


Figure 31 : Evolution au cours du temps (4 points par jour) de la Chl.a ($\mu\text{g l}^{-1}$) et de NH_4 ($\mu\text{mol l}^{-1}$) à 3 m de profondeur en 3 stations (N12, D05 et D65) chacune située dans 3 baies proches de Nouméa (Sainte-Marie, grande rade et Koutio). La courbe en trait continu correspond à la simulation de référence (ETE) et les ronds non reliés correspondent à la simulation ANTRHO.

4.2.4 Impact d'un upwelling

Alory *et al* (2006) ont mis en évidence un upwelling côtier le long de la barrière de corail. Cet upwelling peut avoir un impact non négligeable sur la composition des eaux à l'extérieur du lagon, derrière le récif. Alory *et al* (2006) rapportent en particulier la formation de cet upwelling lors du mois de Novembre 2004. Une simulation de 27 jours (UPWELL) a été réalisée en utilisant les mêmes forçages que pour la simulation ETE (cf. Chapitre 3.5.2). Toutefois, les conditions aux frontières, sur la partie Ouest du maillage, ont été modifiées en prenant en compte l'ordre de grandeur des concentrations en Chl.a, en ammonium et en nitrate des eaux océaniques immédiatement environnantes en situation d'upwelling, soit $0,4 \mu\text{g l}^{-1}$, $0,05 \mu\text{mol l}^{-1}$ et $0,1 \mu\text{mol l}^{-1}$, respectivement (Alory *et al* 2006).

La Figure 32 montre que les entrées d'eau provenant de l'extérieur du lagon s'effectuent uniquement lors de vents faibles (courant de marées) ou de vents d'Ouest, se produisant lors de courts épisodes au cours de la simulation. L'impact sur les concentrations en Chl.a est visible, avec des valeurs dépassant $0,5 \mu\text{g Chl.a l}^{-1}$. L'apport en nutriments associé à ces entrées d'eau correspond directement aux valeurs fixées pour l'upwelling. La Figure 33 indique que l'impact spatial lors de cette simulation est très limité : seules les zones proches des passes sont perturbées. La station d'arrière récif, M30, pour laquelle les mesures des variables biogéochimiques sont parmi les plus fortes, reste très faiblement touchée par l'apport de l'upwelling (Figure 32 et Figure 33).

Cette simulation suggère deux idées :

- la modification de la composition des eaux à l'extérieur du lagon peut avoir une influence sur les eaux dans le lagon, dans les zones proches des passes seulement, dans le cas de vent faible ou de vents d'Ouest.

- Le modèle ne simule pas d'entrée d'eau par-dessus la barrière. Les fortes valeurs mesurées habituellement en arrière récif (cf. Chapitre 3.1.1), et que l'on ne retrouve pas dans la simulation, pourraient en présence d'un upwelling, être expliquées par ce déferlement d'eau plus riche.

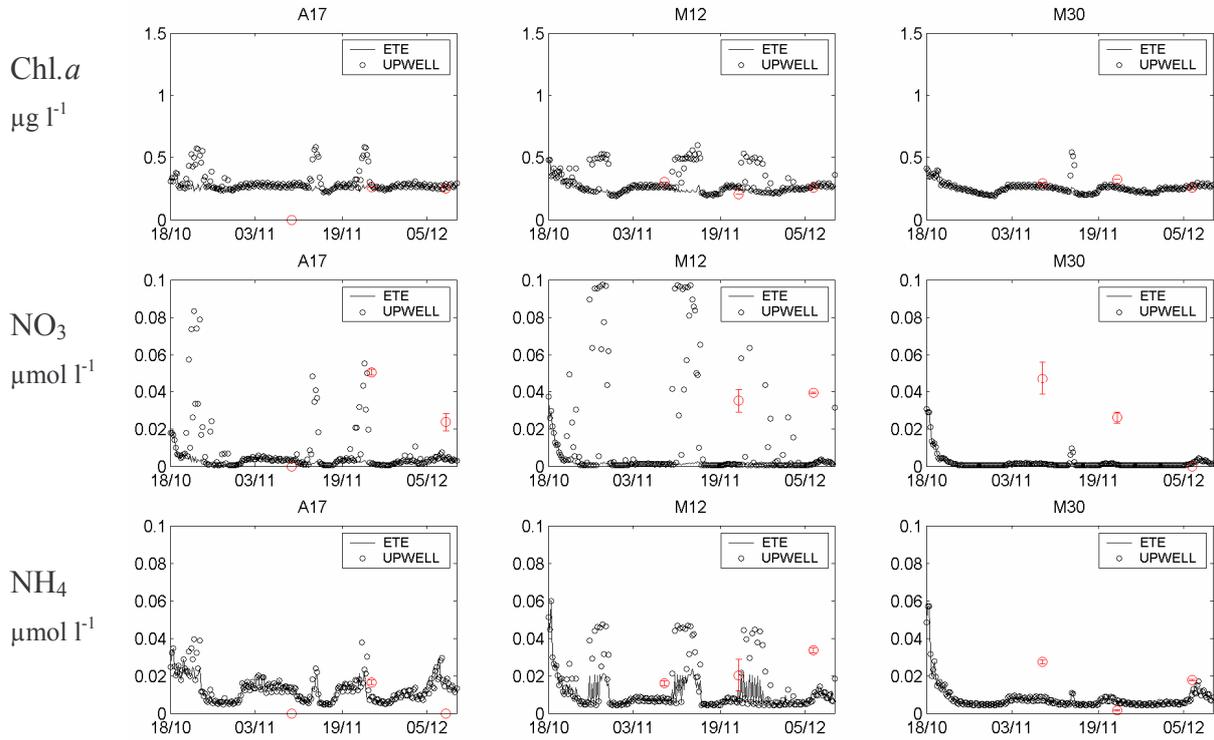


Figure 32 : Evolution au cours du temps (4 points par jour) de la Chl.a ($\mu\text{g l}^{-1}$), de NO_3 ($\mu\text{mol l}^{-1}$), et de NH_4 ($\mu\text{mol l}^{-1}$) à 3 m de profondeur en 3 stations proches des passes (A17, passe de Boulari ; M12, passe de Dumbéa ; et M30 passe de Uitoé). La courbe en trait continu correspond à la simulation de référence (ETE) et les ronds non reliés correspondent à la simulation UPWELL. Les ronds rouges plus larges correspondent aux valeurs mesurées à ces stations.

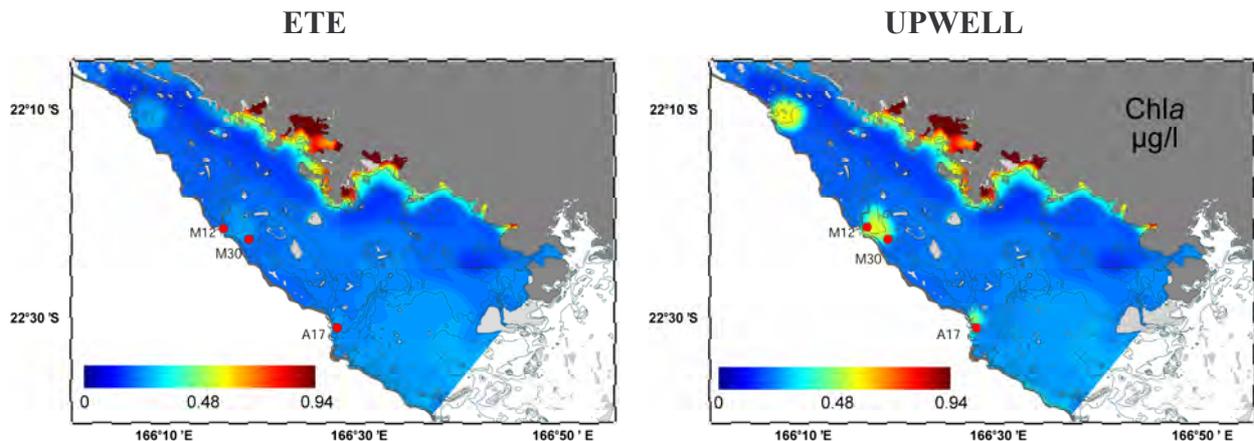


Figure 33 : Cartes simulées de la distribution spatiale de la concentration en Chl.a ($\mu\text{g l}^{-1}$), à 3m de profondeur, le 15/11/2004 (27^{ème} jour de simulation). Colonne de gauche : simulation de référence (ETE) ; colonne de droite : simulation UPWELL.

4.2.5 Impact d'apports benthiques

Afin d'évaluer l'impact d'un apport en azote par les sédiments sur l'ensemble du lagon, une simulation (SED) a été réalisée en imposant un flux d'ammonium et de nitrate du sédiment vers la colonne d'eau sur la totalité de la zone modélisée. Ce flux est pris constant à $15 \mu\text{mol m}^{-2}\text{h}^{-1}$ pour NH_4 et $5 \mu\text{mol m}^{-2}\text{h}^{-1}$ pour NO_3 (C. Grenz, données non publiées).

Les résultats montrent une augmentation générale de la concentration en Chl.*a* sur l'ensemble du lagon, de près de $0,2 \mu\text{g Chl.}a \text{ l}^{-1}$ (Figure 34; Figure 35), en particulier dans les zones peu profondes comme autour des îlots et en arrière récif (M30). En revanche, la concentration en NH_4 reste peu perturbée au cours de cette simulation, mettant en évidence une utilisation rapide de l'apport en sels nutritifs. La comparaison avec les mesures correspondant à la simulation ETE (Figure 34) montre que ces apports benthiques, considérés constants, uniformes, et réalisés sur l'ensemble du lagon, ne sont pas réalistes puisqu'ils entraînent une surestimation générale de la Chl.*a*.

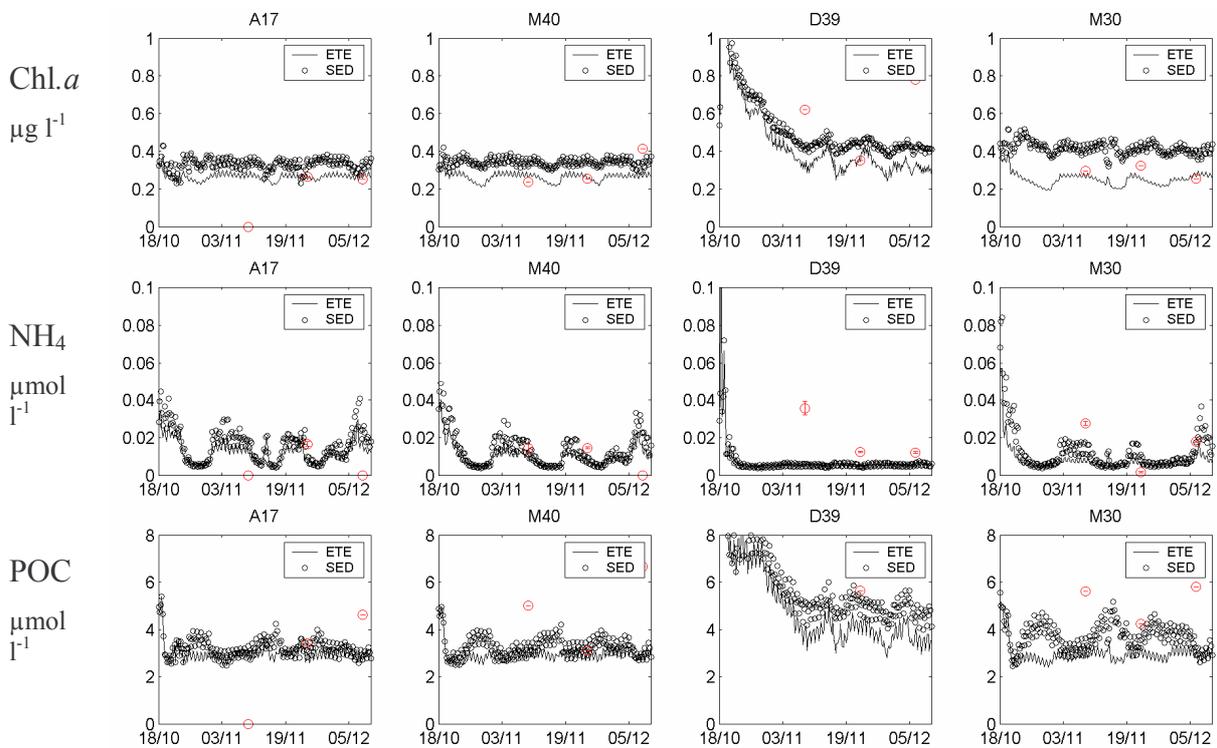


Figure 34 : Evolution au cours du temps (4 points par jour) de la Chl.*a* ($\mu\text{g l}^{-1}$), du NH_4 ($\mu\text{mol l}^{-1}$), et du Carbone Organique Particulaire ($\mu\text{mol l}^{-1}$) à 3 m de profondeur en 4 stations (A17, M40, D39 et B03). La courbe en trait continu correspond à la simulation de référence (ETE) et les ronds non reliés correspondent à la simulation SED. Les ronds rouges plus larges correspondent aux valeurs mesurées à ces stations.

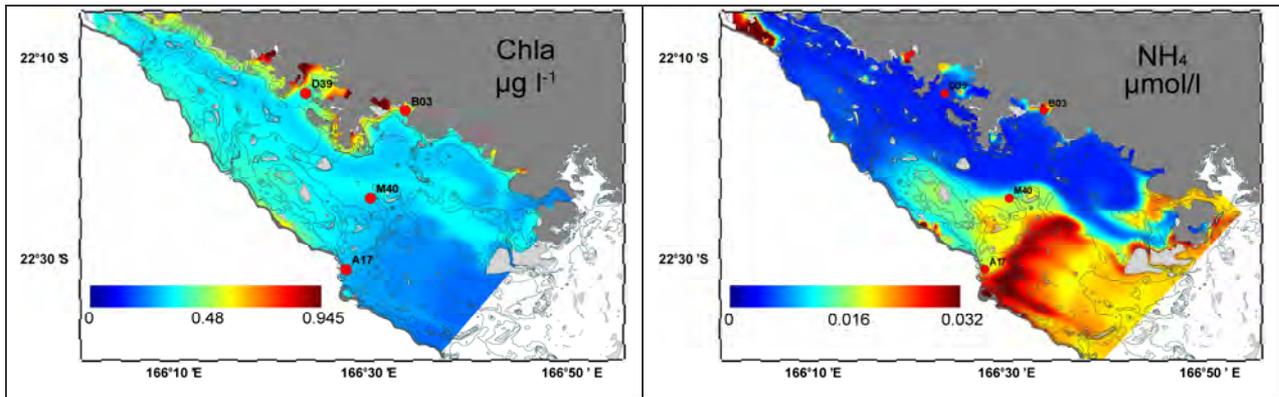


Figure 35 : Cartes de la concentration en Chl.a ($\mu\text{g l}^{-1}$) et en NH_4 ($\mu\text{mol l}^{-1}$) après le 50^{ème} jour de la simulation SED.

4.3 Discussion

4.3.1 *Le vent*

Les deux simulations de vent fort, Ouest ou Alizés, ont pu mettre en évidence le contrôle important de la zone du milieu de lagon par l'hydrodynamisme. Dans les deux cas, on observe un gradient de Chl.a de la côte vers le récif barrière. Cependant, la distribution spatiale fine de la Chl.a issue des deux situations de vent n'est pas la même. En milieu de lagon, et plus précisément entre les baies et le chenal lagonaire, les Alizés créent une zone de front. L'apport d'eau par le Sud-Ouest provoque un appauvrissement de la Chl.a dans cette zone, associé à une augmentation de l'ammonium. En situation de vent d'Ouest, cette zone de front disparaît, et le chenal lagonaire est plus riche en Chl.a, avec de fortes valeurs d'ammonium le long du récif barrière. Les zones appauvries se retrouvent dans la partie Sud, mais plus au Nord (proches de la côte) qu'en situation d'Alizés.

Dans la baie de Dumbéa, les vents d'Ouest déplacent les eaux enrichies par les apports de la rivière Dumbéa et provoquent un enrichissement de la partie Sud en Chl.a et NH_4 par rapport à la situation d'Alizés. On observe les mêmes caractéristiques dans la baie de Boulari. Les rives Nord de la baie, ainsi que la baie de Sainte-Marie, se trouvent moins enrichies lors de ces vents d'Ouest que lors des Alizés, en raison du déplacement des eaux provenant de la Coulée vers le Sud.

4.3.2 *Apports anthropiques ou terrigènes*

Les scénarios d'apports anthropiques ou terrigènes ont mis en évidence la limitation de leurs impacts aux zones proches des points de rejet.

Les perturbations d'origine anthropique sont ainsi remarquables uniquement dans les baies proches de la presqu'île de Nouméa. En raison du faible hydrodynamisme de la baie de Koutio et de la Grande Rade, les rejets entraînent de forts gradients entre les fonds des baies et leurs entrées. L'augmentation des rejets provoque donc une modification de l'écosystème spatialement très limitée. La baie de Sainte-Marie est en revanche caractérisée par une circulation plus importante des masses d'eau. Dans la simulation effectuée, on constate que l'augmentation des rejets urbains entraîne une augmentation forte de la Chl.a sur la partie Ouest de la baie et ces eaux enrichies parviennent à quitter la baie pour longer la côte Nord de Nouméa.

Au niveau quantitatif, le doublement du nombre d'habitants sur chacun des bassins versants a entraîné une augmentation de la Chl.a de 0,5 à 1 $\mu\text{g l}^{-1}$ au plus profond des baies. Cependant les concentrations dans ces baies restent comprises entre 1,5 et 3 $\mu\text{g l}^{-1}$. Bien que relativement élevées pour le lagon Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie, ces valeurs restent

modestes comparées à d'autres zones côtières coralliennes altérées (Szmant & Forrester 1996, Gast *et al* 1999, Van Duyl *et al* 2002). Ces résultats suggèrent que malgré l'anthropisation croissante du milieu autour de la ville de Nouméa, l'eutrophisation devrait rester limitée quantitativement et circonscrite au fond des baies urbaines.

4.3.3 *Apports envisageables*

Les deux simulations UPWELL et SED ont permis d'étudier la réponse du modèle à l'ajout de nouvelles sources de nutriments dont l'étude des simulations réalistes (Chapitre 3.5.2) avait montré la possible importance.

L'effet d'un enrichissement des eaux à la frontière Sud-Est dans la modélisation UPWELL est resté limité aux zones proches des passes, ce qui s'explique en partie par l'importance des Alizés pendant cette simulation. Dans une situation de vents d'Ouest, la perturbation aurait pu gagner plus en profondeur dans le lagon. En outre, comme évoqué précédemment, le fait que l'apport d'eau par-dessus la barrière ne soit pas pris en compte peut être une limitation à ce type d'étude. L'importance de ces apports est par déferlement au dessus de la barrière est désormais étudiée dans le cadre du chantier PNEC de Nouvelle-Calédonie (<http://www.ird.nc/UR103/PNEC/>).

Lors de la simulation SED, la mise en place d'un flux constant de nutriments par les sédiments dans l'ensemble du lagon a fortement modifié les sorties du modèle, en particulier en augmentant la concentration en Chl.*a* dans des proportions parfois trop importante par rapport aux données. En revanche, l'augmentation des concentrations en NH₄ a plutôt permis de se rapprocher des valeurs mesurées. Cette simulation a permis en particulier de mettre en évidence que l'homogénéisation de la colonne d'eau, par l'action du vent, permet de disperser des apports issus du sédiment dans la totalité de la colonne d'eau. Ces apports sont donc loin d'être négligeables pour le fonctionnement général de l'écosystème.

Il est évident que cette première tentative d'intégrer les efflux de nutriments depuis les sédiments est très grossière. Les différents types de fonds ne diffusent de toute évidence pas les nutriments aux mêmes rythmes. Intégrer ces apports benthiques devra à l'avenir prendre en compte les caractéristiques sédimentaires du lagon, ainsi que le possible couplage entre les compartiments pélagique et benthique.

4.3.4 *Conclusion*

Ces études de scénarios prédictifs doivent nécessairement être considérées avec précaution. On ne peut prétendre à ce que notre modèle intègre une description complète et parfaite de l'écosystème ; le Chapitre 3.5.2 a pu en exposer certaines insuffisances.

L'utilisation d'un tel modèle se justifie donc en premier lieu pour explorer des scénarios et ainsi identifier des voies de recherche pour affiner cet outil, comme par exemple la caractérisation des efflux benthiques, la modélisation des panaches fluviaux, et la caractérisation des eaux aux frontières (upwelling, déferlement).

En outre, avec les réserves émises précédemment, il peut être utilisé pour apporter des réponses concrètes et servir ainsi d'outil d'aide à la décision en matière d'aménagements côtiers (études d'impact), ou de mise en place de suivi de qualité des eaux.

5 Conclusion/perspectives

5.1 Apports de l'étude de modélisation

5.1.1 Caractérisation spatiale et temporelle

5.1.1.1 Caractérisation spatiale

Lors des simulations réalisées au cours de cette étude, nous avons pu mettre en évidence différentes zones aux comportements distincts. La première correspond à la partie centrale du lagon, ou chenal lagonaire, qui est soumise à l'entrée d'eau oligotrophe provenant du Sud-Ouest du lagon. Cette partie du lagon apparaît fortement contrôlée par les processus hydrodynamiques, et son statut trophique dépend donc fortement de la composition des eaux aux frontières du domaine étudié. La seconde zone correspond aux baies et à la bande côtière. Le faible impact hydrodynamique, associé aux différents apports (urbains, terrigènes, benthiques), entraîne un contrôle fort par les processus biogéochimiques, et ses eaux peuvent être qualifiées de mésotrophes à eutrophes. La dernière zone est une zone « tampon » entre le front des eaux issues de la première zone et celles de la deuxième. Le fonctionnement y résulte alors d'un équilibre entre les processus biogéochimiques et hydrodynamiques. Cette dernière zone s'établit principalement en situation d'Alizés, puis sa position et son étendue évoluent suivant les changements des conditions de vent.

Cette distinction spatiale est à considérer lors de l'établissement d'une stratégie d'échantillonnage, comme celle nécessitée par des études expérimentales ou celle à mettre en place pour un monitoring des eaux lagunaires.

5.1.1.2 Caractérisation temporelle

Les deux jeux de données *in situ*, pourtant établis à des saisons différentes, n'ont pas montré de différences significatives, rejoignant ainsi les conclusions de [Jacquet \(2005\)](#) sur les faibles variations saisonnières comparées aux variations à court terme. De la même façon, la comparaison des deux simulations réalistes du Chapitre 3.5.2 n'a pas pu mettre en évidence de différences significatives du comportement global de l'écosystème au cours de ces 2 saisons types, les variations majeures demeurant celles à court terme issues des forçages environnementaux. Au sein de chacune des zones identifiées précédemment, les évolutions temporelles des masses d'eau apparaissent principalement contrôlées par l'impact du vent et de ses modifications de vitesse et de direction. En outre, en période de vent calme, l'influence de la marée est loin d'être négligeable, en particulier au voisinage du récif barrière.

Les résultats montrent que certaines variables du modèle suivent un cycle nyctéméral important, en particulier les variables phytoplanctoniques. On observe ainsi les maxima de *Chl.a* en fin de journée (bilan positif de la production par rapport au broutage), associés aux minima des concentrations en nutriments. A l'inverse, durant la nuit, la concentration en *Chl.a* tend à diminuer, alors que les concentrations en nutriments augmentent (broutage excédant la production et bilan consommation/régénération des nutriments en faveur de la régénération). Ces variations seront d'autant plus fortes que les conditions hydrodynamiques seront faibles et que la zone considérée sera contrôlée par les processus biogéochimiques, comme dans les baies autour de Nouméa. Cette variabilité journalière sera également un élément à prendre en compte dans les stratégies d'échantillonnage.

5.1.2 Nouvelles perceptions sur les forçages

5.1.2.1 Les eaux aux frontières

La présence régulière de vents soutenus entraîne d'importantes entrées d'eau dans le lagon, provenant des frontières du domaine. On parle alors souvent de « rinçage » des eaux lagunaires, en particulier dans sa partie centrale. Cependant, l'étude des simulations a montré

que ce rinçage affectait principalement les variables biologiques, en particulier en raison des faibles concentrations en Chl.*a* des eaux aux frontières. En revanche, la situation est différente pour les autres variables simulées : en présence de vent faible, le chenal lagunaire s'appauvrit en nutriments et en matériel particulaire et les entrées d'eau entraînent alors un renouvellement des eaux du lagon en nutriments. Si cette interprétation issue de la modélisation peut être critiquable, elle pointe cependant du doigt l'importance que nous devons apporter à la composition des eaux à la frontière du domaine étudié.

Dans le modèle, nous considérons ces compositions constantes et uniformes aux quatre bordures du domaine. Les valeurs de Chl.*a* et de production bactérienne sur le bord Sud-Ouest apparaissent plutôt bien évaluées puisque le modèle reproduit particulièrement bien les valeurs mesurées en milieu de lagon. En revanche, on a pu constater un écart important de certaines valeurs dans les passes ou en arrière récif. La composition des eaux à l'Ouest de la barrière pourrait donc être mal évaluée, ou plutôt sa stabilité temporelle pourrait correspondre à une approximation trop importante. En effet, la présence d'un upwelling le long de la barrière de corail, à l'extérieur du lagon, a été mise en évidence dans certaines conditions météorologiques (Alory *et al* 2006). Cet upwelling pourrait ainsi modifier les valeurs de nutriments et de Chl.*a* à cette frontière et expliquer ces fortes valeurs mesurées. L'étude de ce scénario a été effectuée dans le Chapitre 4.2.4 : l'impact de la modification des eaux derrière la barrière de corail est resté limité aux zones près des passes (en situation d'Alizés).

5.1.2.2 Les apports anthropiques et terrigènes

L'impact des apports anthropiques et terrigènes a été étudié dans les simulations réalistes du Chapitre 3.5.2, ainsi que dans des scénarios du Chapitre 4.

Les apports anthropiques, situés au fond des baies autour de la presqu'île de Nouméa, ont un impact limité aux zones proches des points de rejet, en raison du faible hydrodynamisme de ces zones. Ils provoquent une augmentation conséquente des concentrations en Chl.*a* ainsi que de la production bactérienne, avec un fort gradient entre le fond et l'entrée des baies. On peut cependant noter que les eaux enrichies de la baie de Sainte-Marie, plus sensible à l'influence des Alizés, peuvent éventuellement sortir et longer la côte Nord de Nouméa. Quantitativement, le scénario de doublement des rejets urbains a montré que l'augmentation de la Chl.*a* était limitée à un maximum de $1 \mu\text{g l}^{-1}$ au plus profond des baies. Ces résultats suggèrent que malgré l'anthropisation croissante qui s'exerce sur le lagon Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie, l'eutrophisation reste limitée quantitativement et circonscrite au fond des baies autour de la ville de Nouméa.

L'impact des apports terrigènes, par les rivières se jetant dans le lagon, est également apparu limité spatialement. Hors période de fortes pluies, les débits sont particulièrement faibles et l'impact presque négligeable. Le scénario d'une crue importante a cependant montré une perturbation de l'écosystème, mais celle-ci demeure limitée aux baies recevant les apports, en particulier les côtes Nord de ces baies dans une situation d'Alizés.

5.1.2.3 Le manque d'apports en nutriments

L'étape de validation du modèle a montré un important écart entre les valeurs de nutriments mesurées et simulées. Si l'on considère que le modèle a tout de même un comportement cohérent, cette constatation permet de suggérer que nous n'avons pas pris en compte certains processus d'apports de nutriments potentiellement importants.

Nous avons déjà évoqué précédemment l'éventuel impact d'un upwelling sur la composition des eaux dans les passes et en arrière récif. De plus, il ne faut pas oublier que la zone que nous modélisons est une zone corallienne. La présence de nombreux récifs à l'intérieur du lagon, de platiers récifaux le long des côtes, ainsi que la longue barrière récifale, pourrait ainsi constituer une source non négligeable d'enrichissement de la colonne d'eau par

relargage de matière organique et inorganique (Crossland & Barnes 1983, Furnas *et al* 1990, Torréton & Dufour 1996, Gast *et al* 1999, Van Duyl *et al* 2002, Scheffers *et al* 2005). Dans le lagon SW de Nouvelle-Calédonie, le rapport de l'activité lipase à la production bactérienne augmente au voisinage des récifs (Bourguet *et al* 2003) ce qui plaide en faveur d'un lien trophique entre mucus corallien riche en lipides et bactérioplancton qui reste à documenter. Il apparaît nécessaire d'avoir conscience de ce type d'apport, en particulier lors de futures campagnes d'échantillonnage, afin de ne pas générer d'erreurs d'interprétation. Ceci en gardant à l'esprit que la prise en compte de ce type d'apports dans notre modèle apparaît cependant trop difficile à mettre en œuvre dans un futur proche.

On a pu voir que l'ajout d'un apport benthique de nutriments le long de la bande côtière a eu un impact significatif sur les valeurs simulées dans l'ensemble de la colonne d'eau, en augmentant significativement la Chl.*a* et la production bactérienne. Les valeurs mesurées aux stations influencées par ces apports sont particulièrement bien reproduites par le modèle. Ainsi le sédiment est une source vraisemblablement importante de nutriments pour la colonne d'eau à ne pas négliger dans les versions futures du modèle de fonctionnement biogéochimique.

Enfin, les processus de diazotrophie peuvent représenter une source d'azote nouveau importante dans les écosystèmes limités en azote (Karl *et al* 1997, Karl *et al* 2002, Capone *et al* 2005), ce qui est le cas du lagon Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie (Jacquet 2005, Jacquet *et al* 2006). Récemment, des mesures de la diazotrophie benthique ont montré que ce processus pouvait être significatif dans le lagon de Nouvelle-Calédonie. Des taux de fixation de $24,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ d'azote ont ainsi été mesurés (Charpy *et al* 2007). Dans le compartiment pélagique, des mesures en baie de Sainte-Marie ont montré que ce sont essentiellement les pico et nano cyanobactéries qui sont responsables de la quasi-totalité de la diazotrophie, et que les développements de *Trichodesmium erythraeum* se font indépendamment de la diazotrophie (Rodier & Le Borgne, soumis). Dans le lagon Sud-Ouest, la diazotrophie apparaît significative dans la fraction inférieure à $10 \mu\text{m}$ (P. Raimbault, comm. pers.). Les premiers résultats de taux de fixation pour les nanocyanobactéries sont de l'ordre de $1,34 \text{ nmol l}^{-1} \text{ h}^{-1}$ d'azote, ce qui représente 4% des besoins en azote de la production phytoplanctonique et 40% de la production nouvelle (Charpy *et al* 2005). En outre, les développements de biologie moléculaire ont très récemment permis de mettre en évidence la présence du gène nifH (responsable de la nitrogénase) dans la fraction inférieure à $10 \mu\text{m}$ sur des échantillons du lagon Sud-Ouest (I. Biegala, comm. pers.). L'ensemble de ces travaux, menés dans le cadre du chantier PNEC Nouvelle-Calédonie, est toujours en cours de traitement, mais il apparaît que la diazotrophie pourrait être une voie potentiellement importante d'apports azotés à l'écosystème du lagon.

6 Références citées

- Alory G, Vega A, Ganachaud A, Despinoy M (2006) Influence of upwelling, subsurface stratification, and heat fluxes on coastal sea surface temperature off southwestern New Caledonia. *Journal of Geophysical Research* 111: C07023, doi:10.1029/2005JC003401
- Bourguet N, Torréton J-P, Galy O, Arondel V, Goutx M (2003) Specific and sensitive radiometric assay for microbial lipase activities in marine water samples: application to samples from the lagoon of Nouméa. *Applied and Environmental Microbiology* 69(12): 7395–7400
- Breau L (2003) Etude de la bioaccumulation des métaux dans quelques espèces marines tropicales : recherche de bioindicateurs de contamination et application à la surveillance de l'environnement côtier dans le lagon sud-ouest de la Nouvelle-Calédonie. *Thèse Université de la Rochelle*, 282 pp.
- Bujan S (2000) Modélisation Biogéochimique du cycle du carbone et de l'azote dans les écosystèmes côtiers tropicaux sous influences terrigène et anthropique, application au lagon de Nouméa (Nouvelle-Calédonie). *Thèse Université d'Aix - Marseille II*, 204 pp.
- Burford MA, Rothlisberg PC, Wang Y (1995) Spatial and temporal distribution of tropical phytoplankton species and biomass in the Gulf of Carpentaria, Australia. *Marine Ecology - Progress Series* 118:255-266
- Calvo-Díaz A, Morán XAG (2006) Seasonal dynamics of picoplankton in shelf waters of the southern Bay of Biscay. *Aquatic Microbial Ecology* 42:159-174
- Capone DG, Burns JA, Montoya JP, Subramaniam A, Mahaffey C, Gunderson T, Michaels AF, Carpenter EJ (2005) Nitrogen fixation by *Trichodesmium* spp.: An important source of new nitrogen to the tropical and subtropical North Atlantic Ocean. *Global Biogeochemical Cycles* 19:GB2024. doi:10.1029/2004GB002331
- Chardy P, Chevillon C and Clavier J (1988) Major benthic communities of the south-west lagoon of New Caledonia. *Coral Reefs* 7(2): 69-75
- Charpy L (1996) Phytoplankton biomass and production in two Tuamotu atoll lagoons (French Polynesia). *Marine Ecology - Progress Series* 145:133-142
- Charpy L (2005) Rôle des cyanobactéries diazotrophes pélagiques et benthiques dans le fonctionnement biogéochimique du lagon Sud Ouest de Nouvelle Calédonie : 18 octobre 2005 – 5 novembre 2005. <http://www.ird.nc/PNEC/>
- Charpy L, Alliod R, Rodier M, Golubic S (2007) Benthic nitrogen fixation in the SW New Caledonia lagoon. *Aquatic Microbial Ecology* 47: 73–81
- Christaki U, Courties C, Karayanni H, Giannakourou A, Maravelias C, Kormas KAr, Lebaron P (2002) Dynamic characteristics of *Prochlorococcus* and *Synechococcus* consumption by bacterivorous nanoflagellates. *Microbial Ecology* 42: 341-352
- Clavier J, Garrigue C (1999) Annual sediment primary production and respiration in a large coral reef lagoon (SW New Caledonia). *Marine Ecology - Progress Series* 191: 79-89
- Crossland CJ, Barnes DJ (1983) Dissolved nutrients and organic particulates in water flowing over coral reefs at Lizard Island. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research* 34:835-844
- Debenay JP (1985) Recherches sur la sédimentation actuelle et les thanatocénoses des foraminifères de grande taille dans le lagon sud-ouest et sur la marge insulaire sud de Nouvelle-Calédonie. *Thèse d'Etat, Université d'Aix-Marseille*, 200 pp.
- Denman KL, Pena MA (2002) The response of two coupled one-dimensional mixed layer/planktonic ecosystem models to climate change in the NE subarctic Pacific Ocean. *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography* 49:5739-5757
- Dortch Q, Whitley TE (1992) Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plums and nearby regions? *Continental Shelf Research* 22: 1293-1309
- Douillet P (1998) Tidal dynamics of the south-west lagoon of New Caledonia: observations and 2D numerical modelling. *Oceanologica Acta* 21: 69-79
- Douillet P, Ouillon S, Cordier E (2001) A numerical model for fine suspended sediment transport in the southwest lagoon of New Caledonia. *Coral Reefs* 20: 361-372
- Droop MR (1968) Vitamin B12 and marine ecology. IV. The kinetics of uptake growth and inhibition in *Monochrysis lutheri*. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 48(3): 689–733
- Droop MR (1973) Some thoughts on nutrient limitation in algae. *Journal of Phycology* 9: 264-272
- Faure V (2006) Modélisation couplée physique-biogéochimique tridimensionnelle : étude de l'écosystème pélagique du lagon Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie. *Thèse Université de la Méditerranée*. 222 pp.
- Fuhrman JA, Azam F (1982) Thymidine incorporation as a measure of heterotrophic bacterioplankton production in marine surface waters: evaluation and field results. *Marine Biology* 66: 109-120
- Fukuda R, Ogawa H, Nagata T, Koike I (1998) Direct determination of carbon and nitrogen contents of natural bacterial assemblages in marine environments. *Applied and Environmental Microbiology* 64: 3352-3358
- Furnas MJ, Mitchell AW (1986) Phytoplankton dynamics in the central Great Barrier Reef. I. Seasonal changes in biomass and their relation to intrusive activity. *Continental Shelf Research* 6:363-384
- Furnas MJ, Mitchell AW, Gilmartin M, Revelante N (1990) Phytoplankton biomass and primary production in semi-enclosed reef lagoons of the central Great Barrier Reef, Australia. *Coral Reefs* 9:1-10

- Garrigue C (1998) Distribution and biomass of microphytes measured by benthic chlorophyll a in a tropical lagoon (New Caledonia, South Pacific). *Hydrobiologia* 385(1-3): 1-10
- Gasol JM, Doval MD, Pinhassi J, CalderonPaz JJ, GuixaBoixareu N, Vaque D, PedrosAlio C (1998) Diel variations in bacterial heterotrophic activity and growth in the northwestern Mediterranean Sea. *Marine Ecology - Progress Series* 164: 107-124
- Gast GJ, Jonkers PJ, van Duyl FC, Bak RPM (1999) Bacteria, flagellates and nutrients in island fringing coral reef waters: Influence of the ocean, the reef and eutrophication. *Bulletin of Marine Sciences* 65:523-538
- Gast GJ, Jonkers PJ, van Duyl FC, Bak RPM (1999) Bacteria, flagellates and nutrients in island fringing coral reef waters: Influence of the ocean, the reef and eutrophication. *Bulletin of Marine Science* 65:523-538
- Hédouin L (2006) Caractérisation d'espèces bioindicatrices pour la surveillance des activités minières et la gestion de l'environnement en milieu récifal et lagunaire: application au lagon de Nouvelle-Calédonie. *Thèse Université de La Rochelle*, 330 pp.
- Hedouin L, Metian M, Teyssie JL, Fowler SW, Fichez R, Warnau M (2006) Allometric relationships in the bioconcentration of heavy metals by the edible tropical clam *Gafrarium Tumidum*. *Science of the Total Environment* 366: 154-163
- Holmes MR, Aminot A, Kérouel R, Hooker BA, Peterson B.J. (1999) A simple and precise method for measuring ammonium in marine and freshwater ecosystems. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 56: 1801-1808
- Jacquet S (2005) Influence des nutriments sur le réseau trophique microbien planctonique dans le lagon SW de Nouvelle-Calédonie. *Thèse Université Pierre et Marie Curie - Paris 6*. 278 pp.
- Jacquet S, Delesalle B, Torrétion J-P, Blanchot J (2006) Responses of the phytoplankton communities to increased anthropogenic influences (Southwestern Lagoon, New Caledonia). *Marine Ecology - Progress Series* 320: 65-78
- Jouan A, Douillet P, Ouillon S, Fraunie P (2006) Calculations of Hydrodynamic Time Parameters in a Semi-Opened Coastal Zone Using a 3d Hydrodynamic Model. *Continental Shelf Research* 26: 1395-1415
- Justic D, Rabalais NN, Turner RE, Dortch Q (1995) Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters, stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 40: 339-356
- Karl D, Letelier R, Tupas L, Dore J, Christian J, Hebel D (1997) The role of nitrogen fixation in biogeochemical cycling in the subtropical North Pacific Ocean. *Nature* 388:533-538
- Karl D, Michaels A, Bergman B, Capone D, Carpenter E, Letelier R, Lipschultz F, Paerl H, Sigman D, Stal L (2002) Dinitrogen fixation in the world's oceans. *Biogeochemistry* 57-58:47-98
- Koroleff F (1983) Direct determination of silicon. In: *Methods of sea water analysis* (Grasshoff K, Ehrhardt M, Kremling K, eds), 2nd ed. Verlag Chemie GmbH, Weinheim, Germany. 419 p
- Kuipers B, vanNoort GJ, Vosjan J, Herndl GJ (2000) Diel periodicity of bacterioplankton in the euphotic zone of the subtropical Atlantic Ocean. *Marine Ecology - Progress Series* 201: 13-25
- Labrosse P, Fichez R, Farman R and Adams T (2000) Tropical South Pacific: New Caledonia oceanic environment, coral reefs and lagoons. In: Sheppard C. (Editor), *Seas et the Millenium, an environmental evaluation*. Elsevier, Amsterdam, pp. 723-736
- Lazure P, Salomon JC (1991) Coupled 2-D and 3-D modelling of coastal hydrodynamics. *Oceanologica Acta* 14(2): 173-180
- Lorenzen CJ (1967) Determination of chlorophyll and phaeo-pigments - spectrophotometric equations. *Limnology and Oceanography* 12 (2): 343-346
- Marie D, Partensky F, Jacquet S and Vaultot D (1997) Enumeration and cell cycle analysis of natural populations of marine picoplankton by flow cytometry using the nucleic acid stain SYBR Green I. *Applied and Environmental Microbiology* 63(1): 186-193
- Mullin JB, Riley JP (1955) The spectrophotometric determination of silicate-silicon in natural waters with special reference to sea water. *Analytica Chimica Acta* 12: 162-170
- Neveux Jacques, Dupouy Cecile, Blanchot J, Le Bouteiller A, Landry MR, Brown Susan L. (2003) Diel dynamics of chlorophylls in high-nutrient, low-chlorophyll waters of the equatorial Pacific (180°): Interactions of growth, grazing, physiological responses, and mixing. *Journal of Geophysical Research* 108: doi: 10.1029/2000JC000747
- Paerl HW, Dyble J, Moisaner PH, Noble RT, Piehler MF, Pinckney JL, Steppe TF, Twomey L, Valdes LM (2003) Microbial indicators of aquatic ecosystem change: current applications to eutrophication studies. *FEMS Microbiology Ecology* 46: 233-246
- Paerl HW, Dyble J, Twomey L, Pinckney JL, Nelson J, Kerkhof L (2002) Characterizing man-made and natural modifications of microbial diversity and activity in coastal ecosystems. *Antonie Van Leeuwenhoek International Journal of General and Molecular Microbiology* 81: 487-507
- Paoli A, Del Negro P, Umami SF (2006) Temporal variability in bacterioplanktonic abundance in coastal waters of the Northern Adriatic Sea. *Chemical Ecology* 22: 93-103
- Pinazo C, Bujan S, Douillet P, Fichez R, Grenz C and 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 three-dimensional biogeochemical modeling approach. *Coral Reefs* 23(2): 281-296
- Pinazo C, Marsaleix P, Millet B, Estournel C, Vehil R (1996) Spatial and temporal variability of phytoplankton biomass in upwelling areas of the northwestern Mediterranean: a coupled physical and biogeochemical modelling approach. *Journal of*

- Marine Systems* 7: 161-191
- Pinhassi J, Gomez-Consarnau L, Alonso-Saez L, Sala MM, Vidal M, Pedros-Alio C, Gasol JM (2006) Seasonal changes in bacterioplankton nutrient limitation and their effects on bacterial community composition in the NW Mediterranean Sea. *Aquatic Microbial Ecology* 44:241-252
- Porter KG, Feig YS (1980) The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Limnology and Oceanography* 25: 943-948
- Pringault O, Duran R, Jacquet S, Torrèton J-P (2007) Temporal variations of microbial activity and diversity in marine tropical sediments. *Microbial Ecology* DOI 10.1007/s00248-007-9272-8
- Raimbault P, Diaz F, Pouvesle W, Boudjellal B (1999) Simultaneous determination of particulate organic carbon, nitrogen and phosphorus collected on filters, using a semi-automatic wet-oxidation method. *Marine Ecology - Progress Series* 180: 289-295
- Raimbault P, Slawyk G, Coste B, Fry J (1990) Feasibility of measuring an automated colorimetric procedure for the determination of seawater nitrate in the 0 to 100nM range: examples from field and culture. *Marine Biology* 104: 347-351
- Redfield AC, Ketchum BH, Richards FA (1963) The influence of organisms on the composition of seawater. In: *The Sea*, Vol 2 (Hill MN, ed). John Wiley, New York 26-77
- Renaud F, Pringault O, Rochelle-Newall E (2005) Effects of the colonial cyanobacterium *Trichodesmium* spp. on bacterial activity. *Aquatic Microbial Ecology* 41:261-270
- Rochelle-Newall EJ, Torrèton J-P, Mari X, Pringault O (submitted) Phytoplankton-bacterioplankton coupling in the coastal sub-tropical South Pacific. Submitted to *Aquatic Microbial Ecology*
- Sarmiento JL, Slater R, Barber R, Bopp L, Doney SC, Hirst AC, Kleypas J, Matear R, Mikolajewicz U, Monfray P, Soldatov V, Spall SA, Stouffer R (2004) Response of ocean ecosystems to climate warming. *Global Biogeochemical Cycles* 18:GB3003 doi:10.1029/2003GB002134
- Scheffers SR, Bak RPM, Van Duyl FC (2005) Why is bacterioplankton growth in coral reef framework cavities enhanced? *Marine Ecology - Progress Series* 299:89-99
- Shiah FK (1999) Diel cycles of heterotrophic bacterioplankton abundance and production in the ocean surface waters. *Aquatic Microbial Ecology* 17: 239-246
- Smith VH, Tilman GD, Nekola JC (1999) Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution* 100: 179-196
- Steeman-Nielsen E (1951) Measurement of the production of the organic matter in the sea by mean of carbon 14. *Nature* 167: 684-685
- Stott PA, Kettleborough JA (2002) Origins and estimates of uncertainty in predictions of twenty-first century temperature rise. *Nature* 416:723-726
- Szmant AM, Forrester A (1996) Water column and sediment nitrogen and phosphorus distribution patterns in the Florida Keys, USA. *Coral Reefs* 15:21-41
- Tenório MMB, Le Borgne R, Rodier M, Neveux J (2005) The impact of terrigenous inputs on the Bay of Ouinné (New Caledonia) phytoplankton communities: A spectrofluorometric and microscopic approach. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 64:531-545
- Tett P (1987) Modelling the growth and distribution of marine microplankton. Proc. Society for General Microbiology Symposium, 'Ecology of Microbial Communities', Cambridge University Press, 41: 387-425
- Thingstad TF (1987) Utilization of N, P, and organic C by heterotrophic bacteria. 1 Outline of a chemostat theory with a consistent concept of "maintenance" metabolism. *Marine Ecology - Progress Series* 35: 99-109
- Torrèton J-P, Dufour P (1996) Temporal and spatial stability of bacterioplankton biomass and productivity in an atoll lagoon. *Aquatic Microbial Ecology* 11:251-261
- Trescases (1975) L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale-formation des gisements nickélicifères de Nouvelle-Calédonie. *Mémoires ORSTOM* 78, 288 pp.
- Tsai AY, Chiang KP, Chang J, Gong GC (2005) Seasonal diel variations of picoplankton and nanoplankton in a subtropical Western Pacific coastal ecosystem. *Limnology and Oceanography* 50: 1221-1231
- Umani SF, Beran A (2003) Seasonal variations in the dynamics of microbial plankton communities: First estimates from experiments in the Gulf of Trieste, Northern Adriatic Sea. *Marine Ecology - Progress Series* 247:1-16
- Van Duyl F, Gast G, Steinhoff W, Kloff S, Veldhuis M, Bak RPM (2002) Factors influencing the short-term variation in phytoplankton composition and biomass in coral reef waters. *Coral Reefs* 21:293-306
- Winter C, Herndl GJ, Weinbauer MG (2004) Diel cycles in viral infection of bacterioplankton in the North Sea. *Aquatic Microbial Ecology* 35: 207-216
- Wood ED, Armstrong FA, Richards FA (1967) Determination of nitrate in sea water by cadmium copper reduction to nitrite. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 47: 23-31

7 Annexe 1 - Production scientifique issue de l'opération

7.1 Publications parues

1. Briand E, Pringault O, Jacquet S, Torréton J-P (2004) The use of oxygen microprobes to measure bacterial respiration for determining bacterioplankton carbon growth efficiency along trophic gradients in a coral reef lagoon. *Limnology and Oceanography: Methods* 2: 406-416
2. Dolan JR, Jacquet S, Torréton JP (2006) Comparing taxonomic and morphological biodiversity of tintinnids (planktonic ciliates) of New Caledonia. *Limnology and Oceanography* 51(2): 950-958
3. Jacquet S, Delesalle B, Torréton J-P, Blanchot J (2006) Response of phytoplankton communities to increased anthropogenic influences (southwestern lagoon, New Caledonia). *Marine Ecology - Progress Series* 320: 65-78
4. Faure V, Pinazo C, Torréton J-P, Douillet P (2006) Relevance of various formulations of phytoplankton Chlorophyll *a*:Carbon ratio in a 3D marine ecosystem model. *Comptes Rendus Biologies* 329 (10): 813-822
5. 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 and Shelf Science*. doi:10.1016/j.ecss.2007.05.018

7.2 Publications soumises

6. Faure V, Pinazo C, Torréton J-P, Douillet P, Jacquet S (en révision). Revisited coupled ecosystem model of the SW lagoon of New Caledonia: importance of short term forcing variability and microbial loop recycling. En révision pour *Ecological Modelling*
7. Rochelle-Newall EJ, Torréton J-P, Mari X, Pringault O (submitted) Phytoplankton-bacterioplankton coupling in the coastal sub-tropical South Pacific. Submitted to *Aquatic Microbial Ecology*
8. Neveux J, Tenório MMB, Jacquet S, Torréton J-P, Douillet P, Ouillon S, Dupouy C (submitted) Spatio-temporal variations of chlorophylls and phycoerythrins in the southwest lagoon of New Caledonia and oceanic adjacent area. Submitted to *Coral Reefs*
9. Torréton J-P, Jacquet S, Faure V, Briand E, Pringault O (submitted) Temporal dynamics of planktonic communities in a coral reef lagoon, New Caledonia. Submitted to *Marine Biology*

7.3 Publications en préparation

10. Torréton J-P, Jacquet S, Duran R, Troussellier M (in prep.) Spatial and temporal variations of free living and particle-attached bacterioplankton community structure in relation to eutrophication in the SW lagoon of New-Caledonia. En préparation pour *Aquatic Microbial Ecology*
11. Faure V, Pinazo C, Torréton J-P, Douillet P (in prep.) Modelling the spatial and temporal variability of the SW lagoon of New Caledonia: realistic simulations compared with in situ data. En préparation pour *Coral Reefs*

7.4 Thèses

1. Jacquet S (2005) Influence des nutriments sur le réseau trophique microbien planctonique dans le lagon SW de Nouvelle-Calédonie. Thèse Université Pierre et Marie Curie - PARIS 6 soutenue le 30 mars 2005. Très honorable. 278 pp.
2. Faure V (2006) Modélisation couplée physique-biogéochimique tridimensionnelle : étude de l'écosystème pélagique du lagon Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie. Thèse Université de la Méditerranée. Spécialité Sciences de l'Environnement Marin. Soutenue le 26 septembre 2006. 222 p.

7.5 Présentations en séminaires et groupes de travail

1. Torréton J.-P., Jacquet S., Delesalle B, Blanchot J (2002) Effets des activités humaines sur le lagon de Nouméa : Interactions entre le milieu et peuplements planctoniques et benthiques. Journées de prospective du Programme National Environnement Côtier, Banyuls, 16-17 décembre 2002. Présentation orale.
2. Torréton J-P, Jacquet S, Delesalle B, Blanchot J, Duran R (2003) Réponses des communautés planctoniques aux changements de conditions trophiques dans le lagon Sud-Ouest de Nouvelle-Calédonie. Séminaire invité, Station Marine de Villefranche, Juillet 2003.
3. Jacquet S, Torréton J-P, Duran R, Troussellier M (2004) Structure spatiale et temporelle des communautés bactériennes en fonction de l'eutrophisation dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. Journée des Doctorants IRD Nouméa – 27 mai 2004. Présentation orale

4. Torréton J-P, Jacquet S (2005) Structure des communautés planctoniques lagunaires et influence des activités anthropiques sur leur fonctionnement. Atelier « Ecosystèmes et Crevetticulture en Nouvelle-Calédonie » organisé par IFREMER, Nouméa, 22-23 juin 2005. Oral.
5. Faure V, Torréton J-P, Jacquet S, Pinazo C, Douillet P (2006) Indicateurs de l'état physique, chimique et trophique des eaux du lagon SW de Nouvelle-Calédonie. Journée de restitution du programme ZoNéCo. 4 octobre 2006, Nouméa, Nouvelle-Calédonie. Oral.

7.6 Présentations en congrès nationaux

6. Fichez R, Breau L, Chevillon C, Chifflet S, Douillet P, Faure V, Hédouin L, Jacquet S, Ouillon S, Pringault O, Torréton J-P, Viret H, Warnau M (2003) Origine, transport et devenir des apports terrigènes et anthropiques dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. *Congrès Union des Océanographes de France*, Marseille, 8-10 septembre 2003. Oral.
7. Torréton J-P. (2004) Fonctionnement des communautés lagunaires planctoniques : influence des activités anthropiques. *Assises de la Recherche Française dans le Pacifique* - Nouméa 24 - 27 Août 2004. Conférence plénière invitée.
8. Jacquet S, Torréton J-P, Delesalle B, Blanchot J, Van-Den-Broeck N (2003) Réponses des communautés planctoniques le long de gradients d'enrichissements en milieu oligotrophe sub-tropical (lagon SW de Nouvelle-Calédonie). Colloque d'Ecologie Microbienne, 25 - 28 mai 2003, Carry-Le-Rouet, France. Présentation orale.
9. Jacquet S., Blanchot J., Delesalle B., Duran R., Torréton J-P. (2004) Réponses des communautés planctoniques aux influences anthropiques dans le Lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. *Assises de la Recherche Française dans le Pacifique* - Nouméa 24 - 27 Août 2004. Thème 1 Ecosystèmes Marins : Biodiversité et valorisation des ressources. Poster. 1^{er} prix des doctorants.

7.7 Présentations en congrès internationaux

10. Dolan, J. R., Jacquet, S., Torréton, J.P. (2004) Temporal variability of diversity among marine planktonic microorganisms (tintinnid ciliates) in temperate and tropical sites. *European Geosciences Union*, 1st General Assembly, Nice 25-30 April 2004. Oral.
11. Jacquet S., Duran, R., Torréton J.-P., Troussellier M. (2004) Spatial and temporal bacterial community structure in relation to eutrophication in the SW lagoon of New-Caledonia. *ASLO Summer meeting*, Savannah, Georgia, USA, 13 - 18 June 2004. Oral.
12. Jacquet S., Delesalle B., Torréton J.-P., Blanchot J. (2004) Spatial phytoplankton composition in relation to eutrophication in the SW lagoon of New-Caledonia. 10th *International Coral Reef Symposium (ICRS)*, Okinawa, Japan, 28 June - 2 July 2004. Oral.
13. Faure V., Pinazo C., Torréton J-P., Douillet P. (2004) A 3D-coupled physical-biogeochemical model to simulate Biogeochemical recycling in a pelagic ecosystem in the south-west lagoon of New Caledonia. 10th *International Coral Reef Symposium (ICRS)*, Okinawa, Japan, 28 June - 2 July 2004. Oral.
14. Dolan JR, Jacquet S, Torréton J-P (2005) Taxonomic and morphological diversity of tintinnids (planktonic ciliates): relationships with chlorophyll and primary production in New Caledonia. *ASLO*, 19-25 June 2005, Spain. Oral.
15. Faure V, Pinazo C, Torréton J-P, Douillet P (2005) A study of the role of physical processes on biogeochemical recycling using a 3D-coupled model: case of the South-West lagoon of New Caledonia. *ASLO*, 19-25 June 2005, Spain. Oral.
16. Torréton J-P, Jacquet S, Delesalle B, Duran R, Blanchot J (2005) Response of phytoplankton and bacterioplankton communities to nutrient inputs in the South West lagoon of New Caledonia. *Dynamic Planet Conference*, Cairns, 22-26 August 2005. Oral.
17. Torréton, Mari, Pringault, Rochelle-Newall, Jacquet, Delesalle, Duran (2006) Effects of nutrient and metal inputs on the lowest levels of food webs in the SW lagoon of New Caledonia. *Marcuba'2006. 7th Congress on Marine Sciences*, 4-8 December 2006, Havana, Cuba. Oral.

8 Annexe 2 – Liste des données archivées et fournies à la SGVL

8.1 Septembre 2000

Campagne spatiale : 90 stations pour la chimie, dont 70 stations comprennent abondance et production bactérienne. Pas de production primaire.

Deux cycles de 24 h en sub-surface (3 m) et au fond (3 m au dessus du fond). Seule la station A24 comprend production et abondance bactérienne (toutes les 2 h, alors que la chimie est faite toutes les heures).

8.2 Juin 2003

Campagne spatiale Camecal 5 : 91 stations pour la chimie, l'abondance et la production bactérienne. Pas de production primaire.

Cycle de 24 h en sub-surface (3 m) et au fond (3 m au dessus du fond) en M33 le 26/6/03.

8.3 Octobre 2004

Campagne spatiale Camecal 6 : 83 stations pour la chimie, l'abondance et la production bactérienne. Production primaire en 10 stations. Carbone organique total en X stations.

8.4 Suivi temporel en M33 et N12

04/04/02 au 04/04/03 : Toutes les 1 à 2 semaines, valeurs intégrées sur la colonne d'eau des nutriments, chlorophylle *a* & production primaire (total, >2 µm, >10 µm), abondance bactérienne, production bactérienne, CTD, vent, irradiance.

04/04/03 au 04/04/04 : Toutes les semaines CTD, toutes les 2 semaines nutriments et chlorophylle *a*

9 Annexe 3 – Coordonnées des stations échantillonnées

	Station	Latitude	Longitude	Prof (m)		Station	Latitude	Longitude	Prof (m)
1	A03	22° 23.32' S	166° 33.87' E	34	57	M03	22° 15.41' S	166° 21.17' E	23
2	A11	22° 28.17' S	166° 30.46' E	65	58	M05	22° 16.78' S	166° 19.94' E	31
3	A17	22° 30.84' S	166° 27.03' E	64	59	M08	22° 18.22' S	166° 18.45' E	14
4	A20	22° 33.83' S	166° 34.69' E	15	60	M12	22° 21.00' S	166° 15.00' E	70
5	A21	22° 29.83' S	166° 36.95' E	19	61	M13	22° 19.48' S	166° 16.25' E	60
6	A22	22° 26.93' S	166° 40.19' E	30	62	M16	22° 17.93' S	166° 15.71' E	40
7	A23	22° 23.43' S	166° 42.74' E	38	63	M20	22° 15.93' S	166° 16.69' E	35
8	A24	22° 34.03' S	166° 41.34' E	29	64	M22	22° 14.03' S	166° 19.69' E	22
9	A25	22° 39.82' S	166° 38.40' E	40	65	M23	22° 12.29' S	166° 20.18' E	13
10	A26	22° 36.68' S	166° 48.29' E	35	66	M24	22° 10.51' S	166° 17.79' E	15
11	A27	22° 29.40' S	166° 50.56' E	61	67	M25	22° 13.73' S	166° 18.59' E	14
12	A28	22° 24.03' S	166° 57.44' E	50	68	M26	22° 10.73' S	166° 14.84' E	16
13	A29	22° 22.43' S	166° 59.19' E	40	69	M27	22° 10.73' S	166° 10.19' E	15
14	A30	22° 21.52' S	166° 00.89' E	36	70	M28	22° 10.08' S	166° 05.94' E	50
15	A31	22° 24.82' S	166° 53.90' E	56	71	M29	22° 13.33' S	166° 14.32' E	23
16	A32	22° 23.55' S	166° 52.07' E	45	72	M30	22° 22.36' S	166° 18.00' E	15
17	A33	22° 22.22' S	166° 50.89' E	48	73	M33	22° 21.23' S	166° 23.43' E	23
18	A34	22° 22.37' S	166° 52.39' E	42	74	M34	22° 19.45' S	166° 20.94' E	20
19	A35	22° 21.43' S	166° 51.33' E	41	75	M35	22° 09.03' S	166° 11.94' E	24
20	A36	22° 21.32' S	166° 52.88' E	46	76	M36	22° 12.93' S	166° 09.69' E	12
21	A37	22° 20.32' S	166° 52.19' E	41	77	M37	22° 15.23' S	166° 11.29' E	11
					78	M38	22° 24.35' S	166° 20.82' E	12
22	B03	22° 15.03' S	166° 32.92' E	7	79	M39	22° 27.1' S	166° 26.78' E	23
23	B05	22° 15.48' S	166° 32.00' E	12	80	M40	22° 23.73' S	166° 29.44' E	36
24	B08	22° 16.03' S	166° 31.26' E	18					
25	B09	22° 16.29' S	166° 32.58' E	15	81	N04	22° 17.22' S	166° 27.76' E	10
26	B13	22° 17.53' S	166° 34.23' E	16	82	N08	22° 17.28' S	166° 28.58' E	10
27	B15	22° 17.20' S	166° 32.08' E	22	83	N10	22° 17.48' S	166° 28.44' E	10
28	B16	22° 17.07' S	166° 30.92' E	20	84	N12	22° 17.49' S	166° 27.93' E	12
29	B17	22° 17.13' S	166° 29.90' E	18	85	N18	22° 17.82' S	166° 28.48' E	10
30	B24	22° 19.32' S	166° 32.02' E	26	86	N20	22° 17.84' S	166° 27.86' E	13
31	B29	22° 21.23' S	166° 32.24' E	28	87	N26	22° 18.39' S	166° 28.42' E	14
32	B31	22° 15.18' S	166° 32.15' E	12	88	N27	22° 18.38' S	166° 28.17' E	10
					89	N28	22° 18.37' S	166° 27.89' E	10
33	D01	22° 15.70' S	166° 26.48' E	4	90	N33	22° 18.92' S	166° 27.89' E	13
34	D05	22° 15.62' S	166° 25.99' E	12	91	N40	22° 19.3' S	166° 27.76' E	24
35	D08	22° 15.47' S	166° 25.55' E	12	92	N43	22° 19.23' S	166° 25.89' E	21
36	D16	22° 15.15' S	166° 24.52' E	16	93	N44	22° 17.73' S	166° 22.99' E	23
37	D22	22° 14.60' S	166° 23.85' E	18					
38	D26	22° 14.72' S	166° 22.60' E	22	94	P04	22° 18.92' S	166° 40.38' E	16
39	D29	22° 13.36' S	166° 24.10' E	16	95	P12	22° 20.43' S	166° 38.79' E	29
40	D33	22° 13.95' S	166° 22.53' E	18					
41	D34	22° 13.53' S	166° 22.91' E	16					
42	D35	22° 13.23' S	166° 23.47' E	16					
43	D37	22° 12.57' S	166° 23.68' E	15					
44	D41	22° 13.98' S	166° 21.67' E	20					
45	D42	22° 13.62' S	166° 21.24' E	18					
46	D43	22° 13.22' S	166° 21.49' E	15					
47	D45	22° 12.94' S	166° 21.96' E	21					
48	D47	22° 11.92' S	166° 23.53' E	10					
49	D48	22° 11.27' S	166° 23.30' E	8					
50	D49	22° 11.62' S	166° 23.04' E	11					
51	D51	22° 12.47' S	166° 22.13' E	13					
52	D52	22° 12.67' S	166° 21.59' E	14					
53	D62	22° 13.42' S	166° 25.39' E	3					
54	D63	22° 13.23' S	166° 24.96' E	4					
55	D64	22° 12.78' S	166° 26.24' E	6					
56	D65	22° 13.31' S	166° 26.97' E	7					