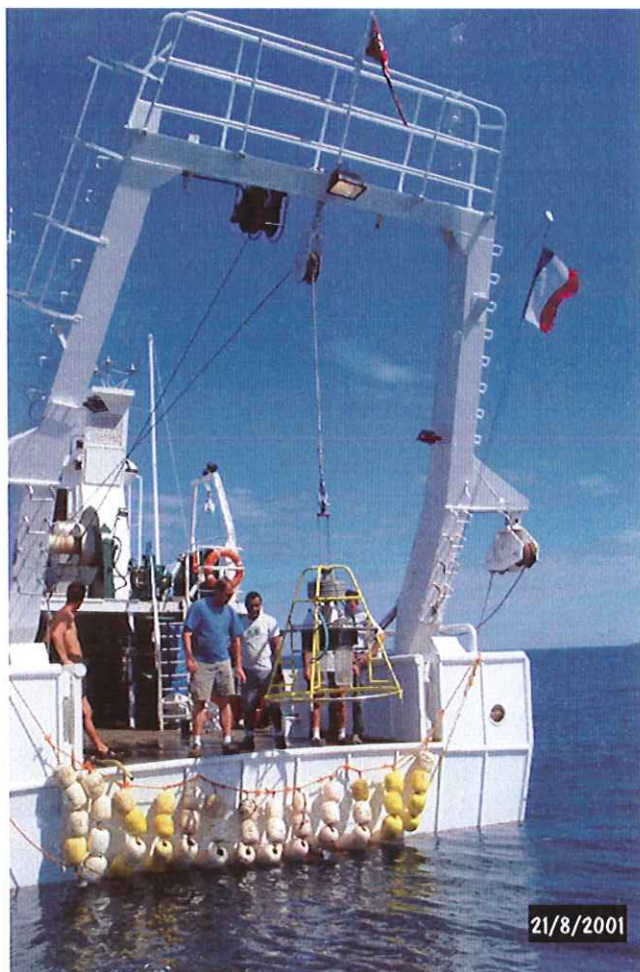


Rapport de contrat de Consultance IRD -SLN

L'environnement marin aux environs du site de Doniambo



II Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Décembre 2003

Rappel de l'objectif général

En Nouvelle-Calédonie, très peu de travaux ont été menés sur l'analyse des caractéristiques physico-chimiques des eaux lagunaires (Labrosse et al., 2000). Pourtant, face au développement écomonique et industriel, il apparaît absolument essentiel de pouvoir disposer d'informations qui permettent de décrire l'environnement marin côtier. Les lagons coralliens sont connus pour leurs niveaux de concentrations extrêmement faibles ; il est donc indispensable d'utiliser des techniques d'échantillonnage et d'analyse ultra précises. De plus les écosystèmes tropicaux comme le lagon de Nouvelle-Calédonie, sont soumis à des variations climatiques importantes qui se traduisent par de fortes variations des conditions de milieu (Bujan et al., 2000). Il apparaît donc également nécessaire, dans le but de disposer d'un état initial de l'environnement fiable et dans la perspective de l'établissement d'un suivi à long terme, de cerner l'importance de ces variations dans le temps. Le suivi régulier des caractéristiques physico-chimiques des eaux doit donc permettre :

- De préciser les niveaux de concentrations de différents éléments ou composés présents dans l'eau.
- De déterminer la distribution dans l'espace de ces éléments ou composés.
- De préciser l'importance de leur variabilité temporelle.
- De sélectionner les paramètres les plus informatifs (indicateurs) pour l'établissement d'un suivi environnemental.

Méthodologie

Les données disponibles actuellement à l'IRD ont été collectées dans le cadre du Programme Ecotrope (1997-2000) puis de l'Unité de Recherche Camélia (2001-2004) et sont issues de plusieurs campagnes de mesure qui couvrent la période 1997-2003. Les résultats présentés dans ce rapport sont issus de cette banque de données.

L'étude de la distribution verticale de certaines caractéristiques des eaux a été conduite avec une sonde multiparamètres Sea Bird SBE 19 équipée de capteur de salinité, température, irradiance, turbidité (évaluation de la charge solide) et fluorescence *in situ* (évaluation des concentrations en pigments chlorophylliens).

L'analyse des éléments nutritifs dissous et de la matière organique particulaire a été conduite au laboratoire de Chimie Marine du Centre IRD de Nouméa en utilisant des techniques adaptées à l'analyse des eaux récifo-lagonaires. Une description détaillée des techniques utilisées est disponible sous forme de rapport (Chifflet et al., 2003). Un article scientifique sur la distribution des caractéristiques physico-chimiques du lagon est en cours de rédaction (Fichez et al., 2004).

Résultats

Caractérisation spatiale

Distribution des éléments nutritifs dissous

Les composés organiques et inorganiques dissous constituent les principales sources de matière nutritive pour les producteurs primaires (micro et macro-algues). C'est pourquoi, il est important d'étudier la distribution de ces composés organiques et inorganiques dissous afin d'identifier l'origine géographique et la nature (régénérée, anthropique, terrigène, industriel, etc...) de ces apports.

Ammonium (NH_4)

La carte de distribution de l'ammonium pour septembre 2000 (Figure 1) montre que les concentrations sont en général inférieures à $0,2 \mu\text{M}$ dans la partie sud du lagon et entre $0,1$ et $0,3 \mu\text{M}$ dans la partie nord. Cette légère différence entre sud et nord du lagon est la conséquence combinée de situation géographique, physique et écologique. D'une part, le bassin nord est moins profond et moins grand que le bassin sud ; les effets de dilution sont donc moins importants. Le recyclage des nutriments dans les sédiments aura alors une influence plus significative sur les caractéristiques des eaux sus-jacentes. D'autre part, selon l'hydrodynamisme générale du lagon, le transport de matériel particulaire se fait du SE au NO. Les apports nouveaux (anthropiques, terrigènes, domestiques, industriels...) sont donc entraînés vers le bassin nord. A la côte, on observe un léger enrichissement des eaux au voisinage des principaux estuaires (Les pirogues, La Coulée et Dumbéa) avec des concentrations de l'ordre de $0,3$ à $0,4 \mu\text{M}$. Au contact direct de la zone urbaine de Nouméa on observe également 3 zones d'enrichissement en ammonium ($> 0,5 \mu\text{M}$) qui sont, par ordre d'importance : La Grande Rade, la Baie de Koutio et la Baie de Sainte Marie. Cet enrichissement ne peut être imputé à l'apport par les rivières et a de toute évidence une origine anthropique.

En mars 2001, la situation est nettement différente avec des concentrations inférieures à $0,1 \mu\text{M}$ dans tous le lagon, même au voisinage de la côte. Dans les zones habituellement extrêmement enrichies ($> 0,5-0,6 \mu\text{M}$), les concentrations atteignent modestement un maximum de $0,3 \mu\text{M}$ d'ammonium au fond de la baie de Sainte Marie et de $0,4 \mu\text{M}$ d'ammonium dans le fond de la Baie de Boulari et de la Grande Rade. Cette situation particulière correspond à une situation extrême qui de toute évidence semble imputable à l'événement climatique El Nino dont les répercussions à l'échelle locale semblent avoir des effets significatifs sur le cycle des éléments nutritifs.

L'ammonium (NH_4^+) constitue un traceur plus particulièrement lié à un enrichissement du milieu par les eaux usées. En effet, dans les eaux usées généralement pauvres en oxygène, les processus microbiens de dégradation de la matière organique conduisent à des formes réduites (NH_4) plutôt qu'oxydées (NO_3 et NO_2). De plus, les rejets domestiques sont en général très riches en urée ; un composé organique qui en se dégradant produira beaucoup d'ammonium. Dans les écosystèmes récifo-lagonaire, l'ammonium est la principale forme azotée produite par la dégradation de la matière organique. Elle constitue également la source préférentielle d'azote pour les producteurs primaires planctoniques (Torréton, 2000)

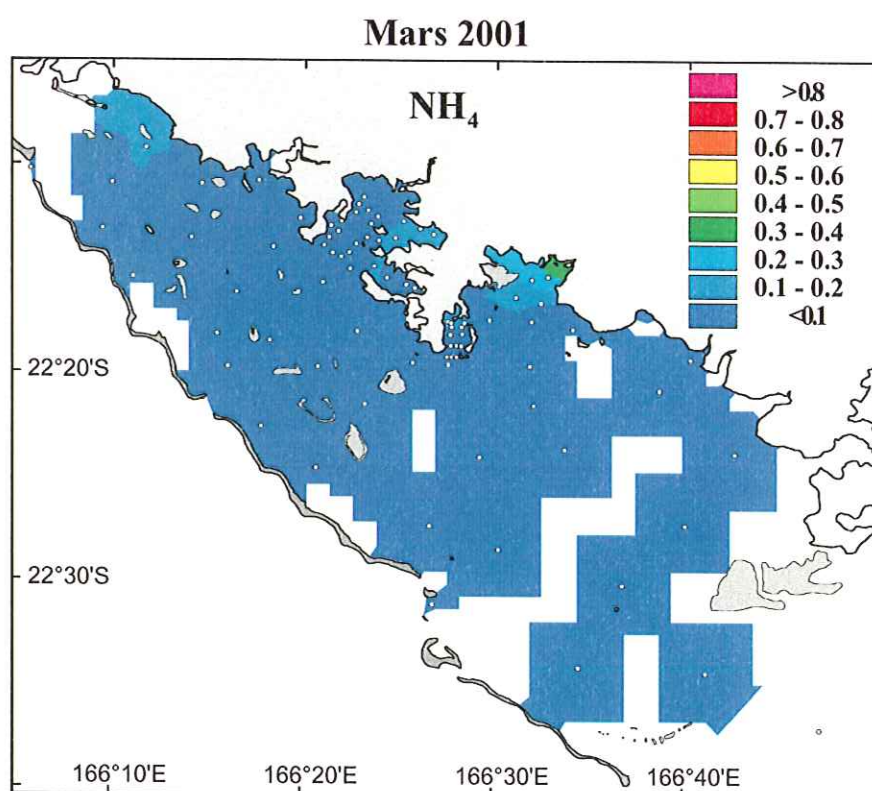
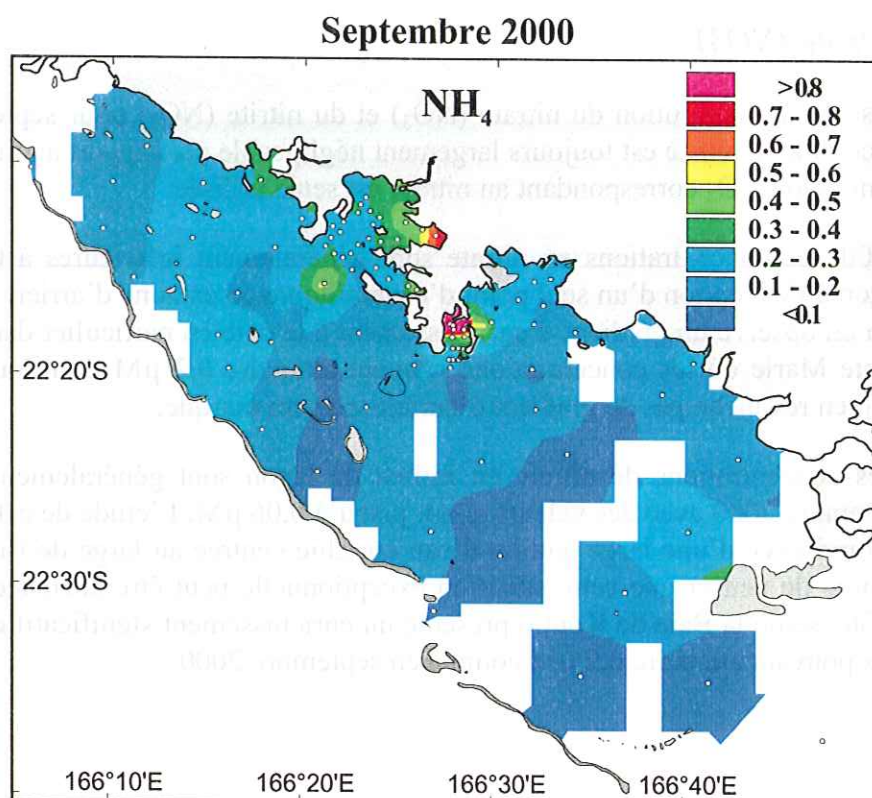


Figure 1 : Distribution des concentrations exprimées en μM pour l'ammonium (NH₄) en septembre 2000 et mars 2001 dans les eaux de surface du lagon sud ouest de Nouvelle-Calédonie.

Nitrate (NO_3)

La figure 2 représente la distribution du nitrate (NO_3) et du nitrite (NO_2) pour septembre 2000 et mars 2001. Mais comme le nitrite est toujours largement négligeable par rapport au nitrate, par abus de langage la formulation NO_3 correspondant au nitrate est seule utilisée.

En septembre 2000, les concentrations en nitrate sont généralement inférieures à $0,04 \mu\text{M}$ dans l'ensemble du lagon à l'exception d'un seul point d'échantillonnage en zone d'arrière récif. Comme pour l'ammonium on observe un gradient d'enrichissement à la côte en particulier dans les baies de Koutio et de Sainte Marie où les concentrations peuvent atteindre $0,2 \mu\text{M}$ de nitrate. La Grande Rade ne présentant en revanche pas de gradient d'enrichissement marqué.

En Mars 2001 les concentrations de nitrate en milieu de lagon sont généralement un peu plus élevées qu'en septembre 2000 avec des valeurs allant jusqu'à $0,06 \mu\text{M}$. L'étude de cette distribution spatiale montre la présence d'une large lentille d'eau enrichie centrée au large de l'îlot Maître. Là encore il est légitime de penser que cette situation exceptionnelle peut être attribuée à l'influence d'El Nino. A la côte, seule la Baie de Koutio présente un enrichissement significatif en nitrate avec des concentrations pouvant atteindre $0,2 \mu\text{M}$ comme en septembre 2000.



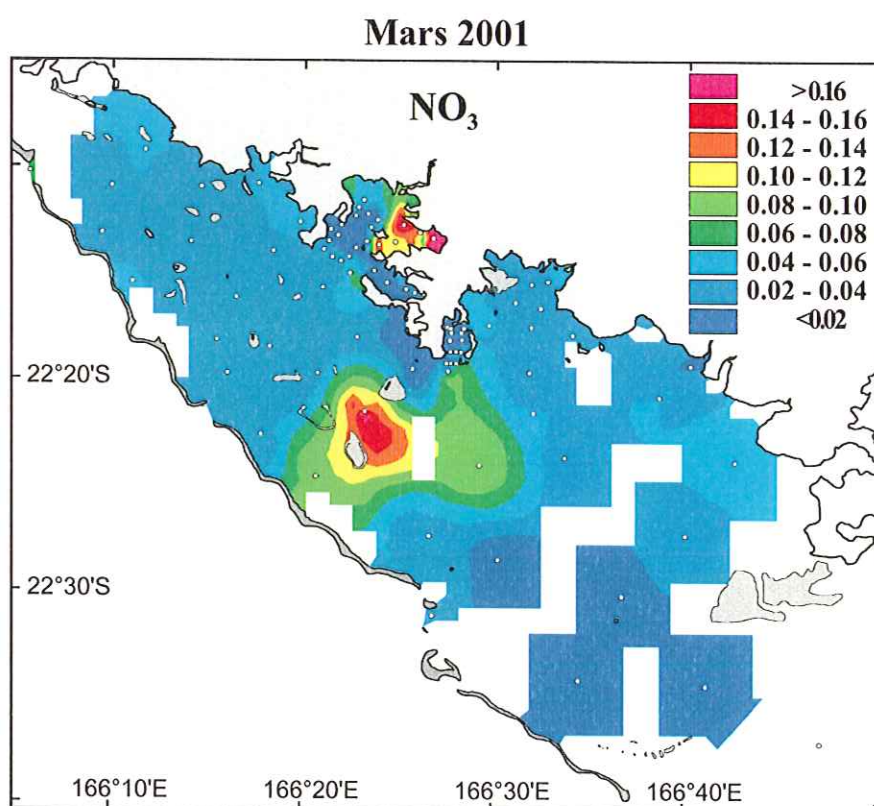
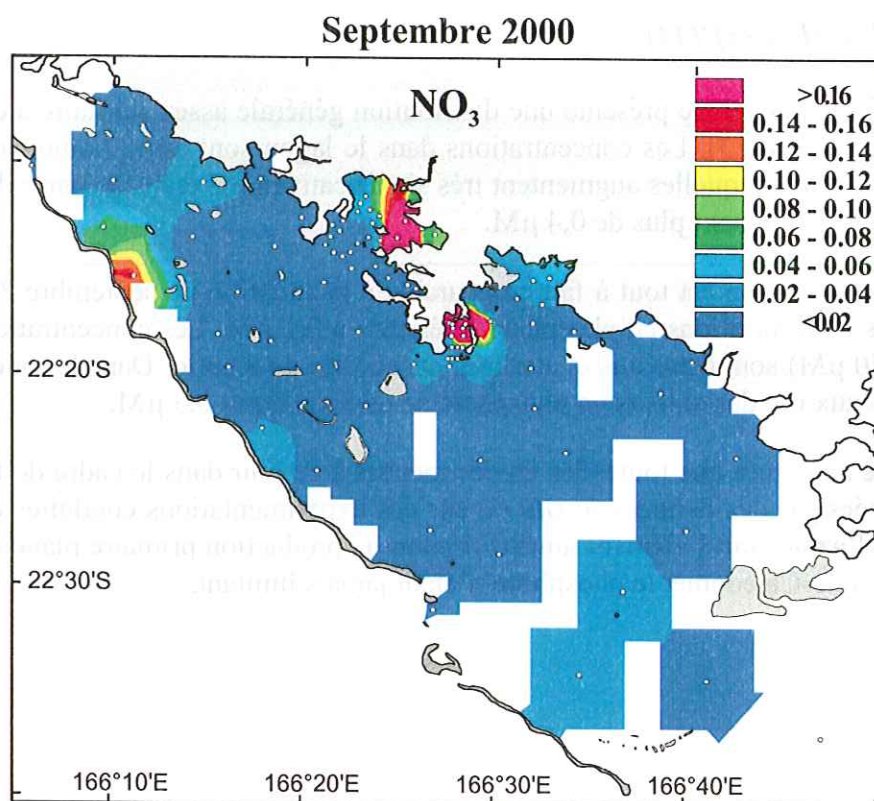


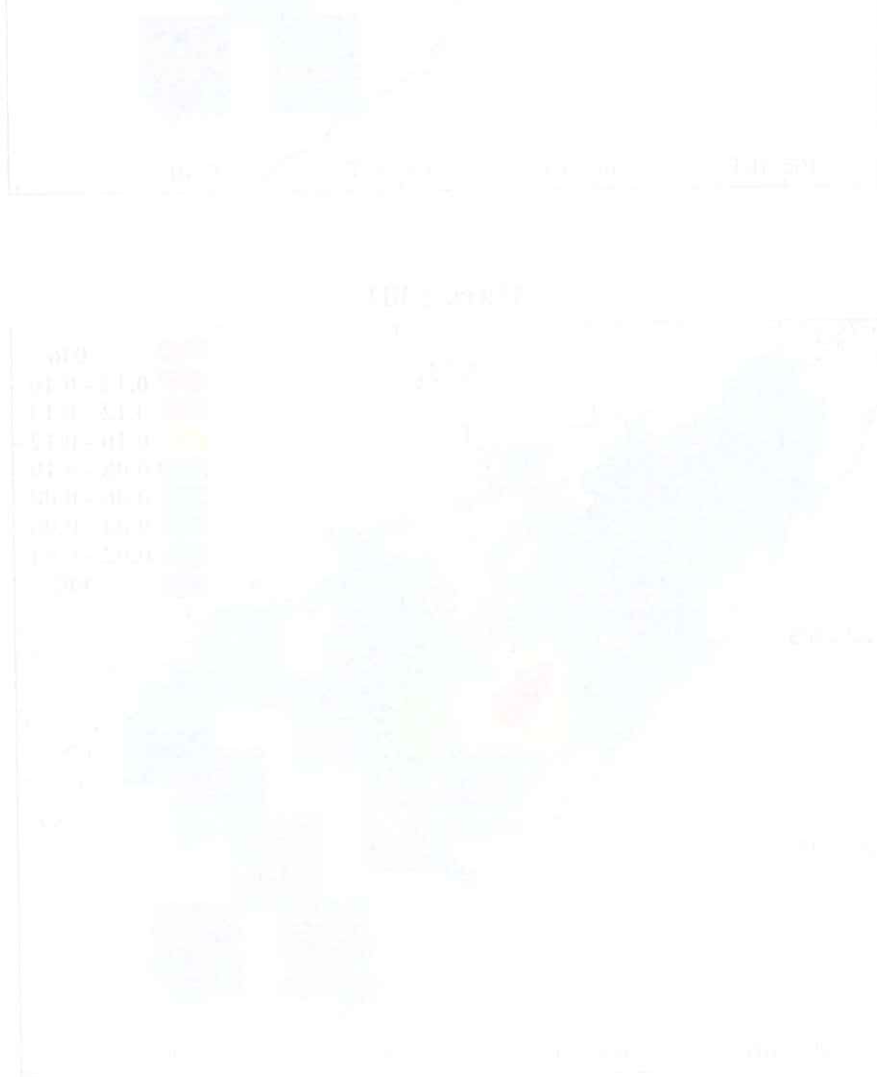
Figure 2 : Distribution des concentrations exprimées en μM pour la somme nitrate + nitrite (noté abusivement NO₃ car les concentrations en nitrite sont négligeables) en septembre 2000 et mars 2001 dans les eaux de surface du lagon sud ouest de Nouvelle-Calédonie.

Phosphate (PO_4)

En septembre 2000 le phosphate présente une distribution générale assez similaire à celle du nitrate ou de l'ammonium (Figure 3). Les concentrations dans le lagon sont assez homogènes et toujours inférieures à $0,15 \mu M$ alors qu'elles augmentent très significativement dans les baies de Koutio et de Sainte Marie où elles atteignent plus de $0,4 \mu M$.

En mars 2001 la distribution est tout à fait comparable à la situation de septembre 2000. Les eaux lagunaires ont des concentrations en phosphate inférieures à $0,1 \mu M$. Les concentrations maximales en phosphate ($0,40 \mu M$) sont cette fois-ci atteintes qu'en baie de Koutio. Dans le fond de la baie de Sainte Marie, les eaux ont des teneurs en phosphate ne dépassant pas $0,3 \mu M$.

Il est important de souligner que toutes les études menées à ce jour dans le cadre de l'UR Camélia, quelles soient basées sur des données *in situ* ou sur des expérimentations conduites en laboratoire, ont démontré que l'azote était l'élément nutritif limitant la production primaire planctonique dans le lagon sud de Nouvelle-Calédonie, le phosphore n'étant jamais limitant.



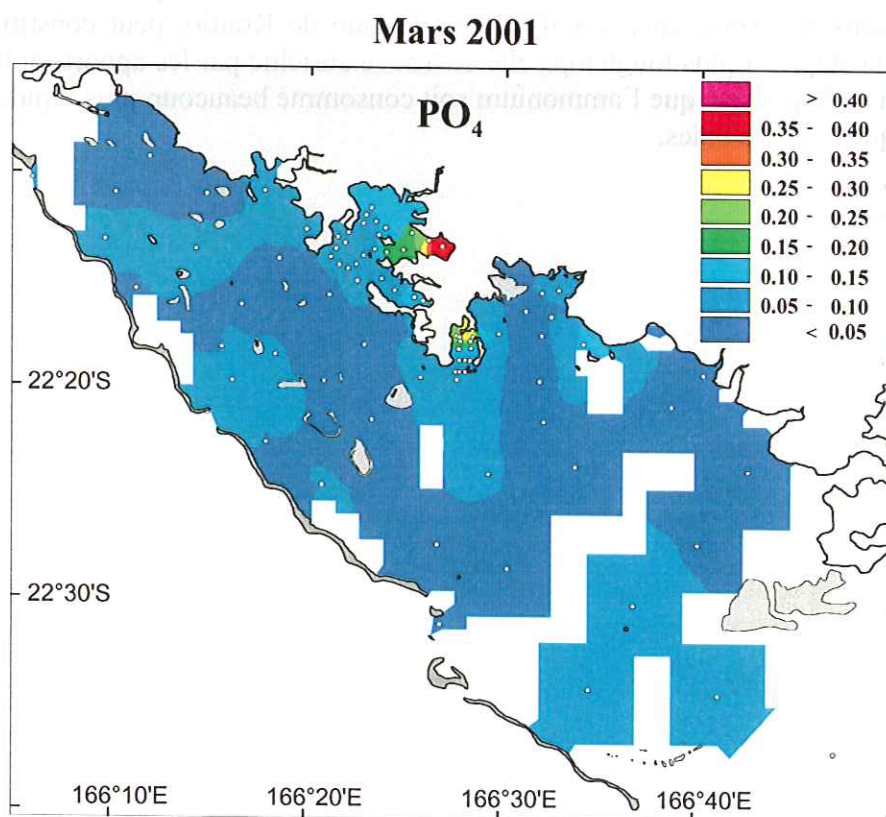
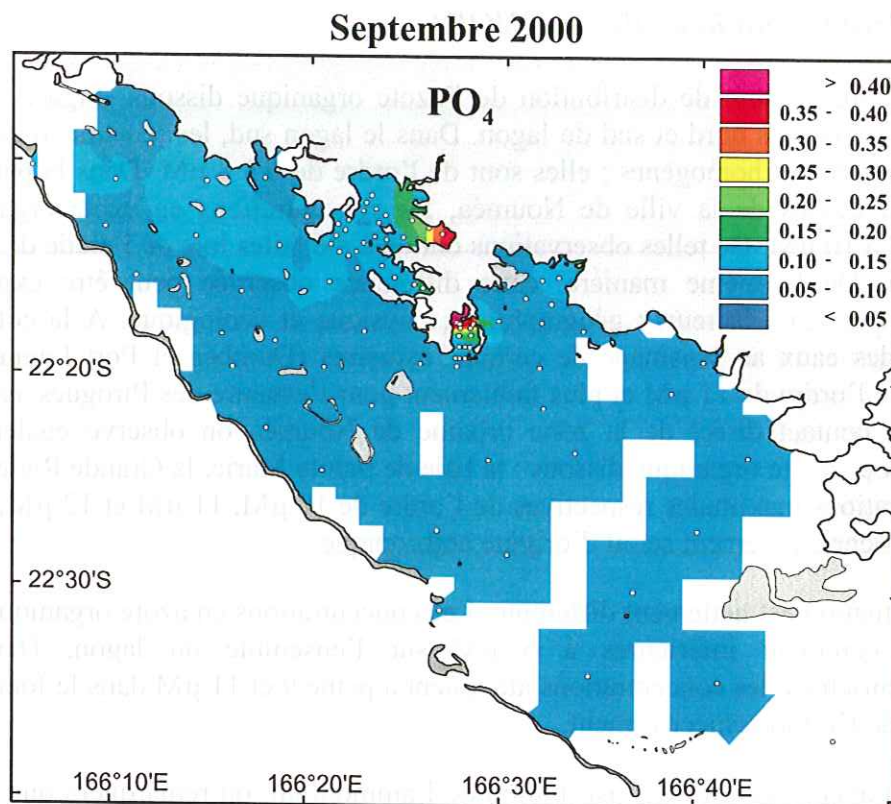


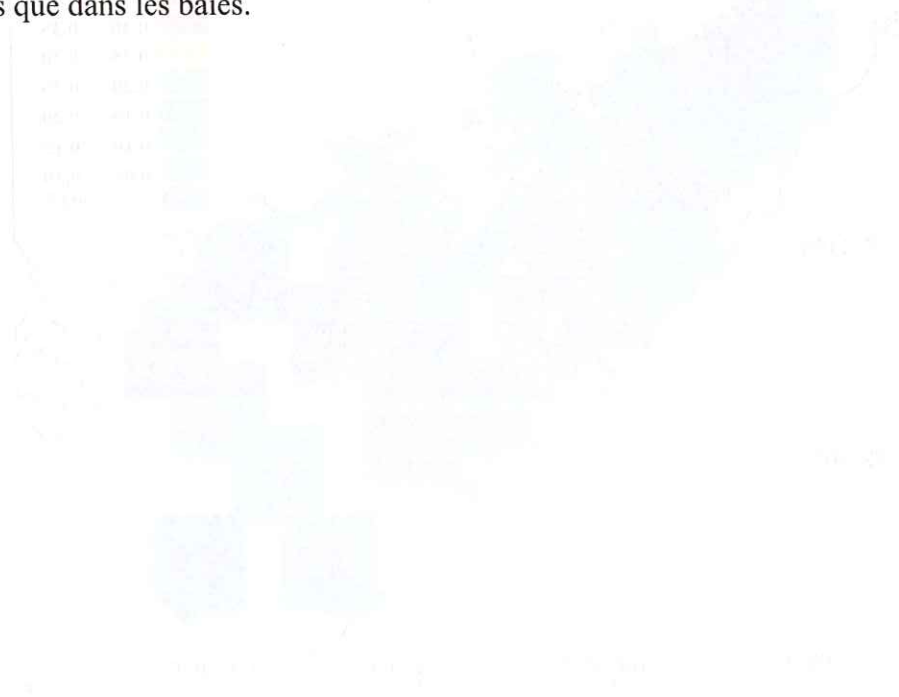
Figure 3 : Distribution des concentrations exprimées en μM pour les phosphates (PO₄) en septembre 2000 et mars 2001 dans les eaux de surface du lagon sud ouest de Nouvelle-Calédonie.

Azote organique dissous (NOD)

En septembre 2000, la carte de distribution de l'azote organique dissous (Figure 4) montre une différence entre les parties nord et sud du lagon. Dans le lagon sud, les teneurs en azote organique dissous sont relativement homogènes ; elles sont de l'ordre de 6 à 8 μM . Dans la partie nord de la zone étudiée, au dessus de la ville de Nouméa, les concentrations en azote organique dissous augmentent de 7 à 10 μM . De telles observations ont déjà été faites lors de l'étude de la distribution de l'ammonium. De la même manière, cette différence observée peut être expliquée par la combinaison de plusieurs facteurs : géographique, physique et écologique. A la côte, on note un enrichissement des eaux au voisinage de certains estuaires (Dumbéa et Port Laguerre) avec des concentrations de l'ordre de 11 μM et plus faiblement pour l'estuaire des Pirogues avec des teneurs de 7-8 μM . Au contact direct de la zone urbaine de Nouméa on observe également 3 zones d'enrichissement en azote organique dissous : la baie de Sainte Marie, la Grande Rade et Koutio qui ont des concentrations maximales respectives de l'ordre de 10 μM , 11 μM et 12 μM . Comme pour l'ammonium, cet enrichissement serait d'origine anthropique.

Mars 2001, la situation est nettement différente. Les concentrations en azote organique dissous sont généralement légèrement inférieures à 6 μM sur l'ensemble du lagon. Dans les zones habituellement enrichies, les concentrations atteignent à peine 9 et 11 μM dans le fond de la baie de Sainte Marie et de Koutio respectivement.

Par comparaison avec les cartes de distribution de l'ammonium, on remarquera que le gradient de concentration entre les fonds de baie et l'extrémité récifale varie d'un facteur 8 pour l'ammonium alors que celui de l'azote organique ne varie que d'un facteur 2. Le temps de renouvellement plus élevé des eaux dans les baies, en particulier dans la baie de Koutio, peut constituer un facteur "aggravant" ; l'eau stagnant plus longtemps elle se trouve enrichie par les apports anthropiques. On peut aussi apporter l'hypothèse que l'ammonium soit consommé beaucoup plus rapidement dans les eaux lagunaires que dans les baies.



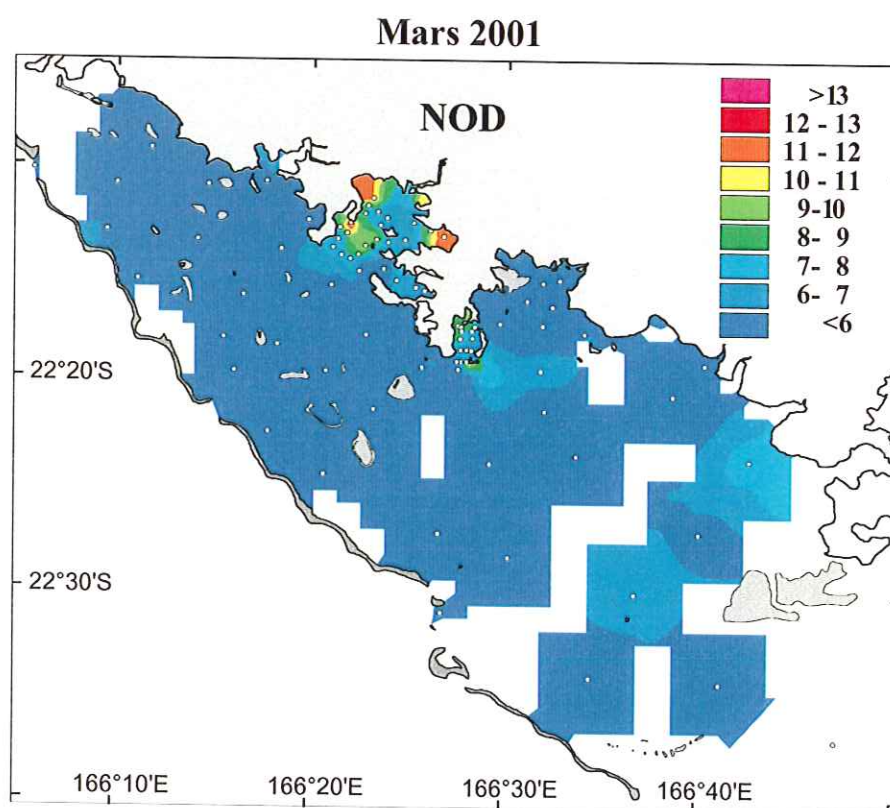
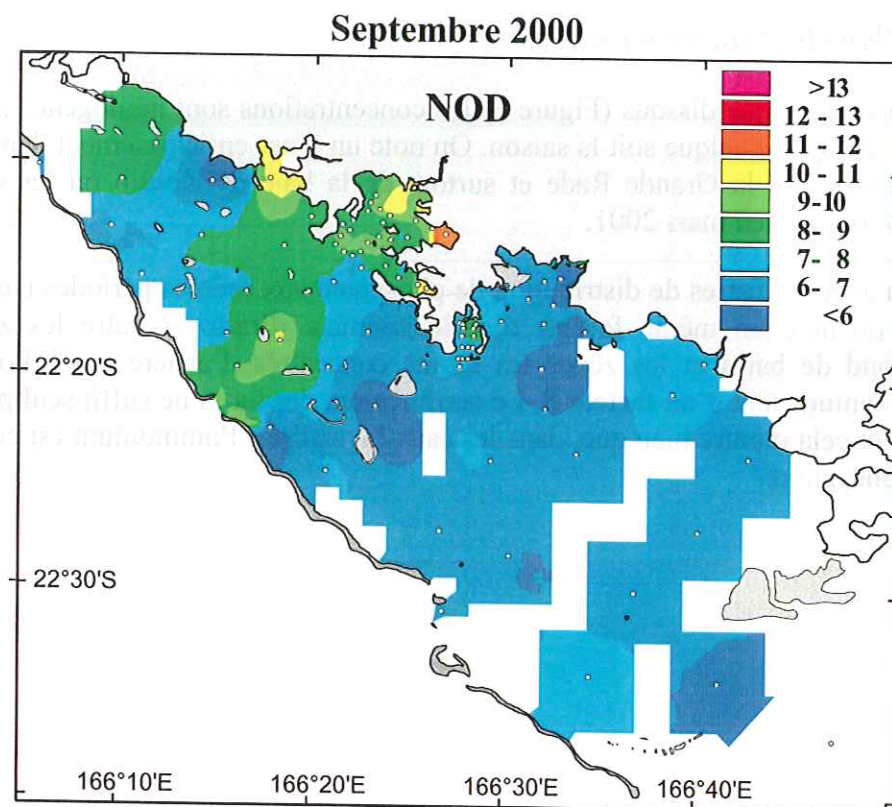
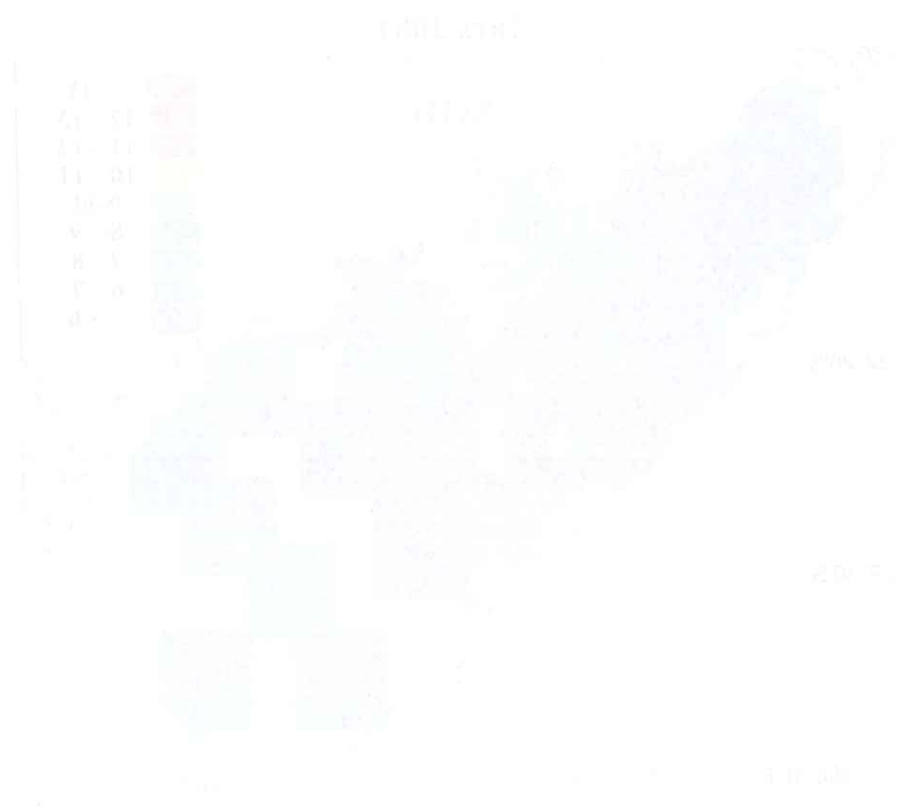
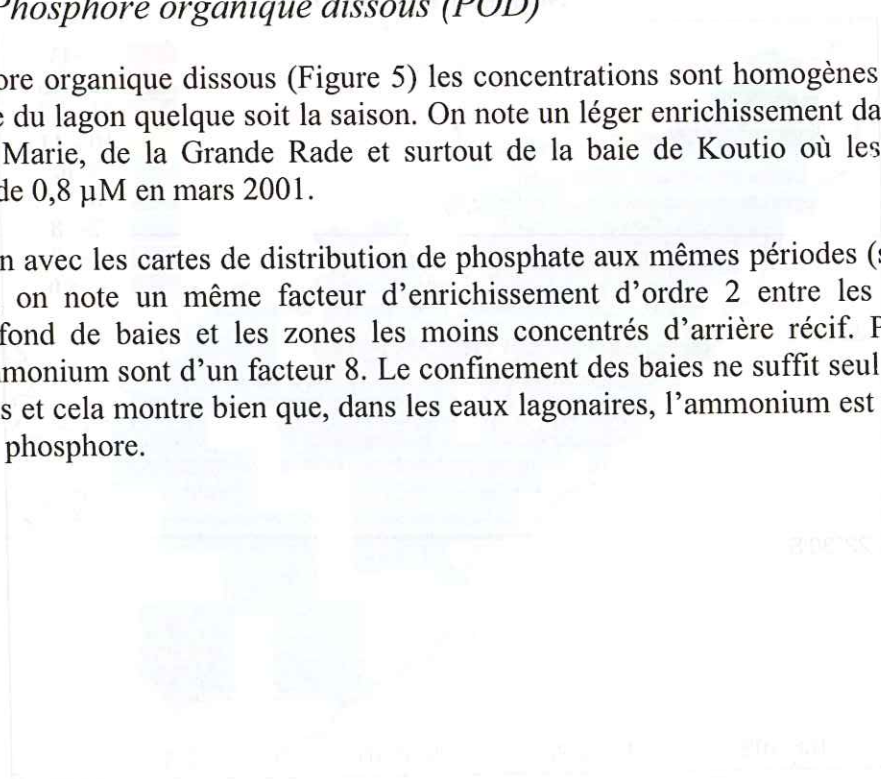


Figure 4 : Distribution des concentrations exprimées en μM pour l'azote organique dissous (NOD) en septembre 2000 et mars 2001 dans les eaux de surface du lagon sud ouest de Nouvelle-Calédonie.

Phosphore organique dissous (POD)

Pour le phosphore organique dissous (Figure 5) les concentrations sont homogènes (0,1 à 0,3 μM) dans l'ensemble du lagon quelque soit la saison. On note un léger enrichissement dans le fond de la baie de Sainte Marie, de la Grande Rade et surtout de la baie de Koutio où les concentrations atteignent plus de 0,8 μM en mars 2001.

Par comparaison avec les cartes de distribution de phosphate aux mêmes périodes (septembre 2000 et mars 2001), on note un même facteur d'enrichissement d'ordre 2 entre les zones les plus concentrées en fond de baies et les zones les moins concentrées d'arrière récif. Pour rappel, les variations d'ammonium sont d'un facteur 8. Le confinement des baies ne suffit seul pas à expliquer ces observations et cela montre bien que, dans les eaux lagunaires, l'ammonium est consommé bien plus vite que le phosphore.



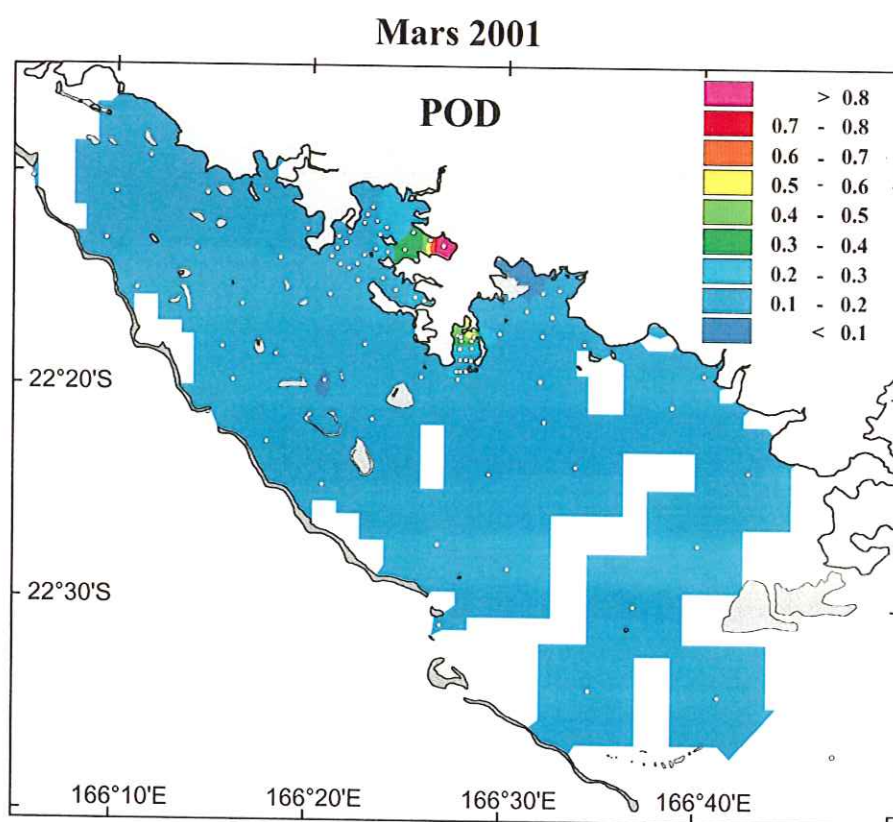
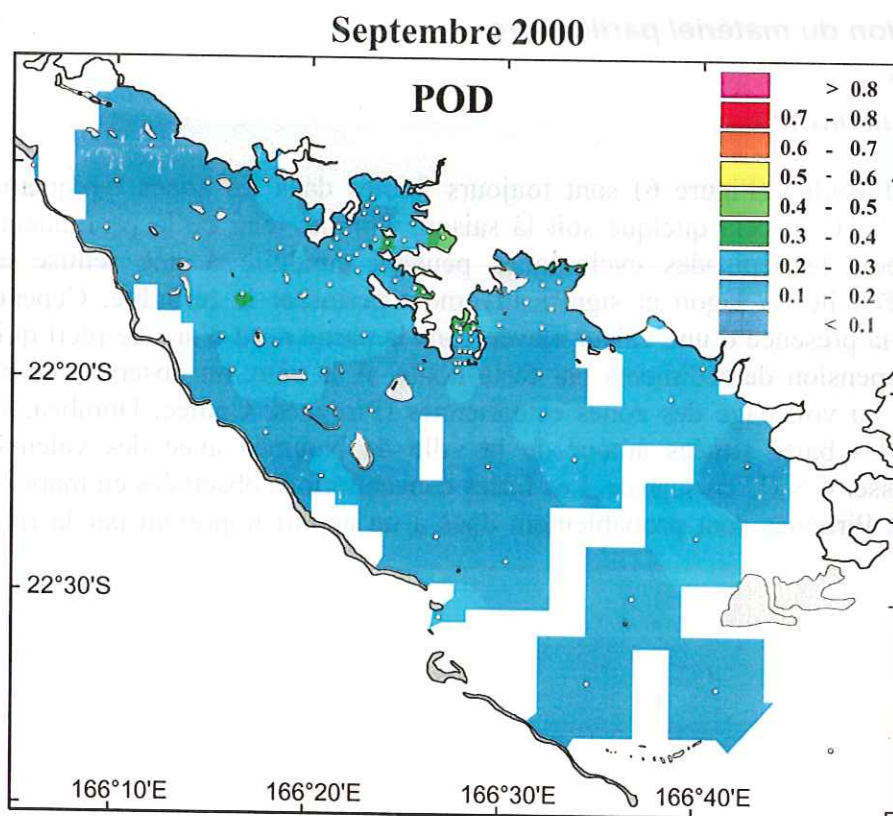
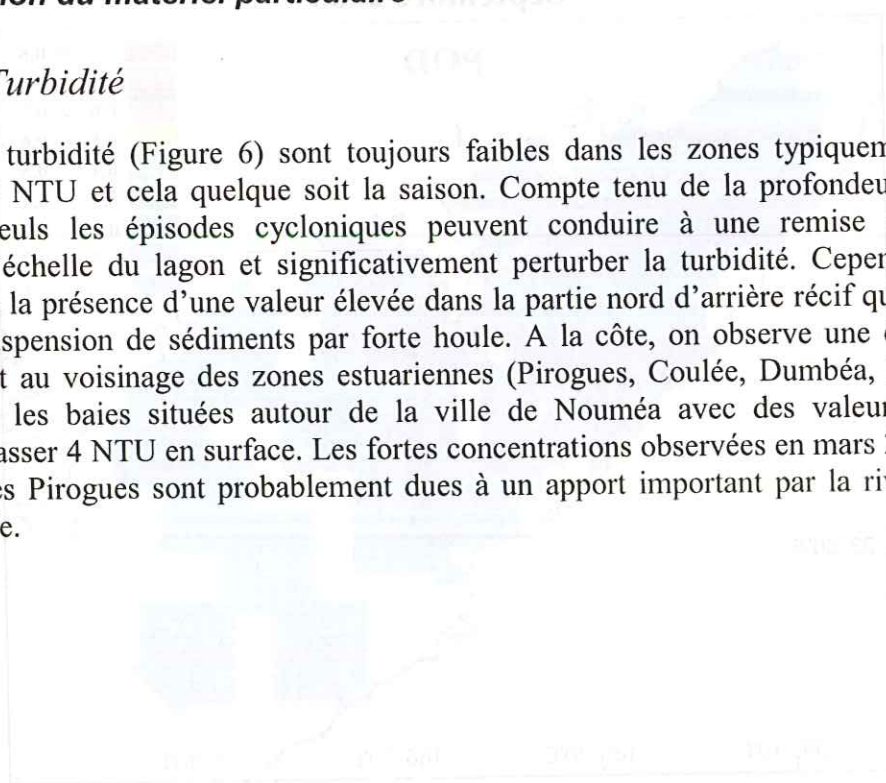


Figure 5 : Distribution des concentrations exprimées en μM pour le phosphore organique dissous (POD) en septembre 2000 et mars 2001 dans les eaux de surface du lagon sud ouest de Nouvelle-Calédonie.

Distribution du matériel particulaire

Turbidité

Les valeurs de turbidité (Figure 6) sont toujours faibles dans les zones typiquement lagonaire, inférieure à 0,5 NTU et cela quelque soit la saison. Compte tenu de la profondeur moyenne du lagon (20m) seuls les épisodes cycloniques peuvent conduire à une remise en suspension généralisée à l'échelle du lagon et significativement perturber la turbidité. Cependant, en mars 2001, on notera la présence d'une valeur élevée dans la partie nord d'arrière récif qui correspond à la remise en suspension de sédiments par forte houle. A la côte, on observe une élévation de la turbidité surtout au voisinage des zones estuariennes (Pirogues, Coulée, Dumbéa, Port Laguerre) ainsi que dans les baies situées autour de la ville de Nouméa avec des valeurs qui peuvent localement dépasser 4 NTU en surface. Les fortes concentrations observées en mars 2001 au niveau de la rivière des Pirogues sont probablement dues à un apport important par la rivière à la suite d'une forte pluie.



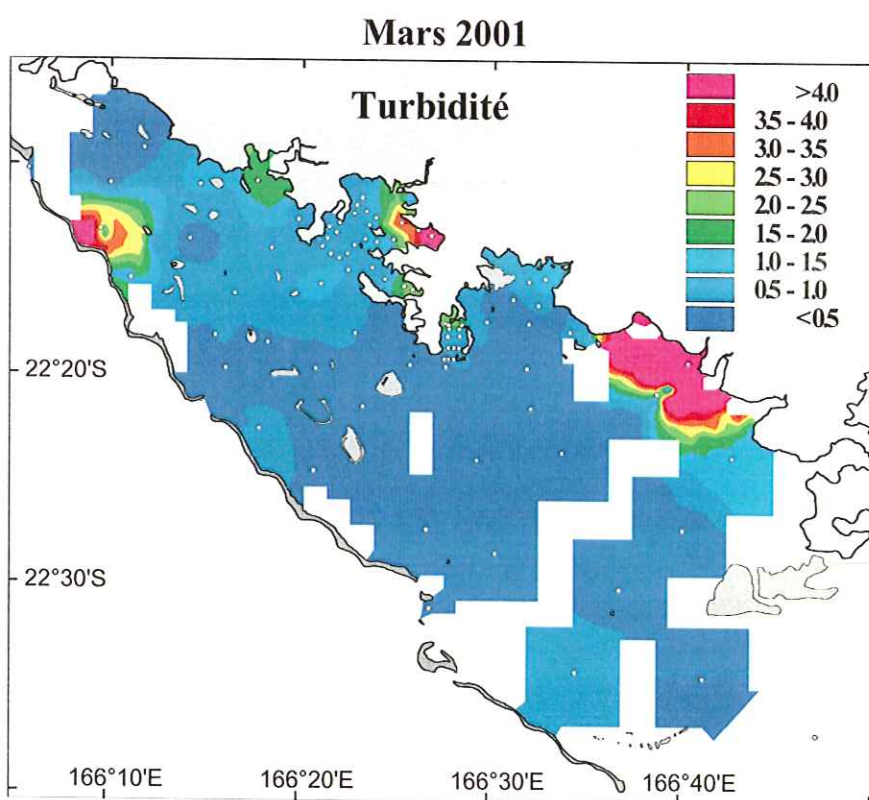
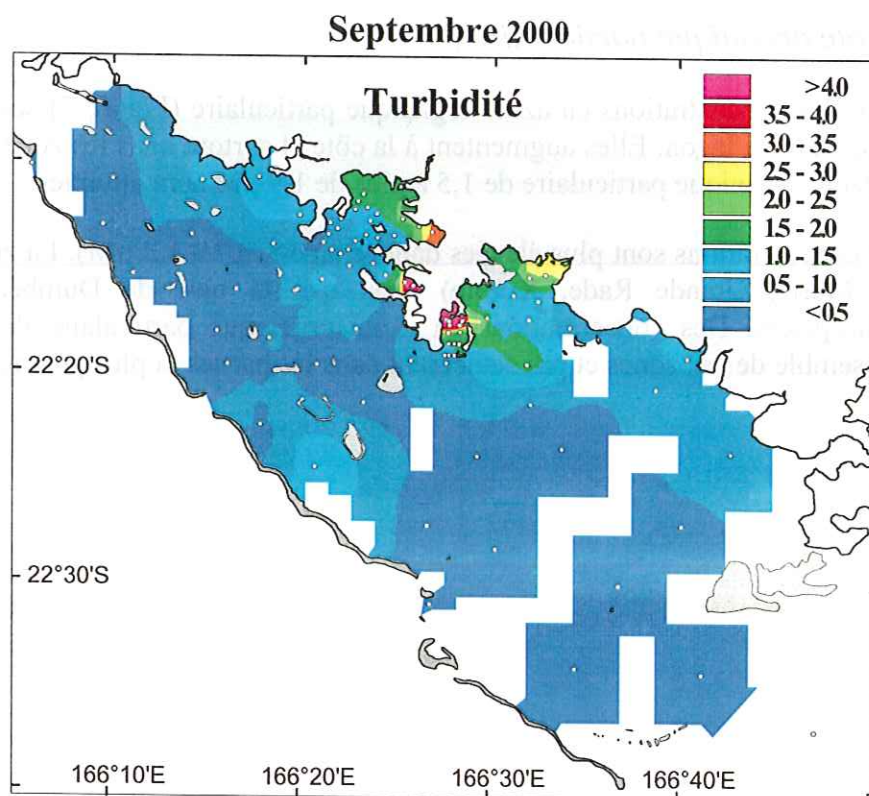
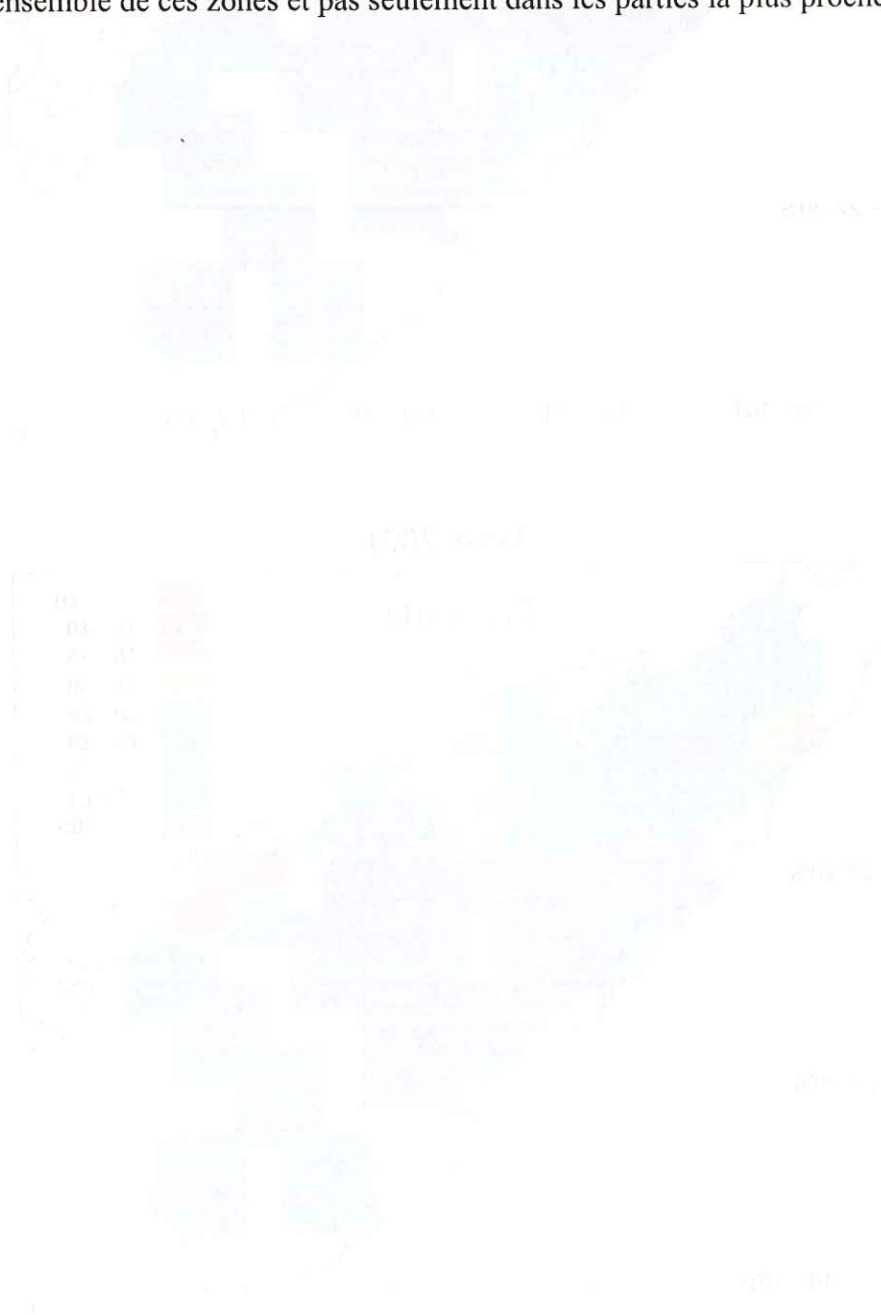


Figure 6 : Distribution de la turbidité (NTU) en septembre 2000 et mars 2001 dans les eaux de surface du lagon sud ouest de Nouvelle-Calédonie.

Azote organique particulaire (NOP)

En septembre 2000 les concentrations en azote organique particulaire (Figure 7) sont inférieures à $0,9 \mu\text{M}$ dans l'ensemble du lagon. Elles augmentent à la côte et surtout dans les zones péri-urbaines où des valeurs d'azote organique particulaire de $1,5$ à plus de $1,9 \mu\text{M}$ sont atteintes.

En Mars 2001 les concentrations sont plus élevées dans le lagon ($0,7$ à $1,3 \mu\text{M}$). La zone urbaine de Nouméa (Sainte Marie, Grande Rade, Koutio) ainsi que la baie de Dumbéa apparaissent extrêmement anthropisées. Des concentrations en azote organique particulaire de $1,9 \mu\text{M}$ sont observées sur l'ensemble de ces zones et pas seulement dans les parties la plus proche de la côte.



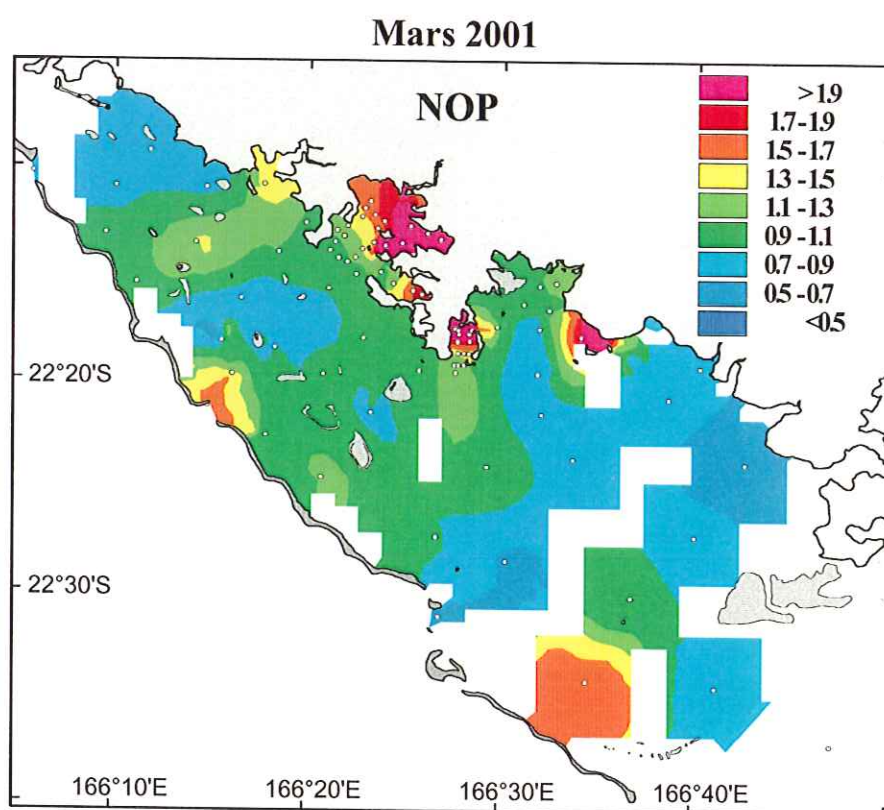
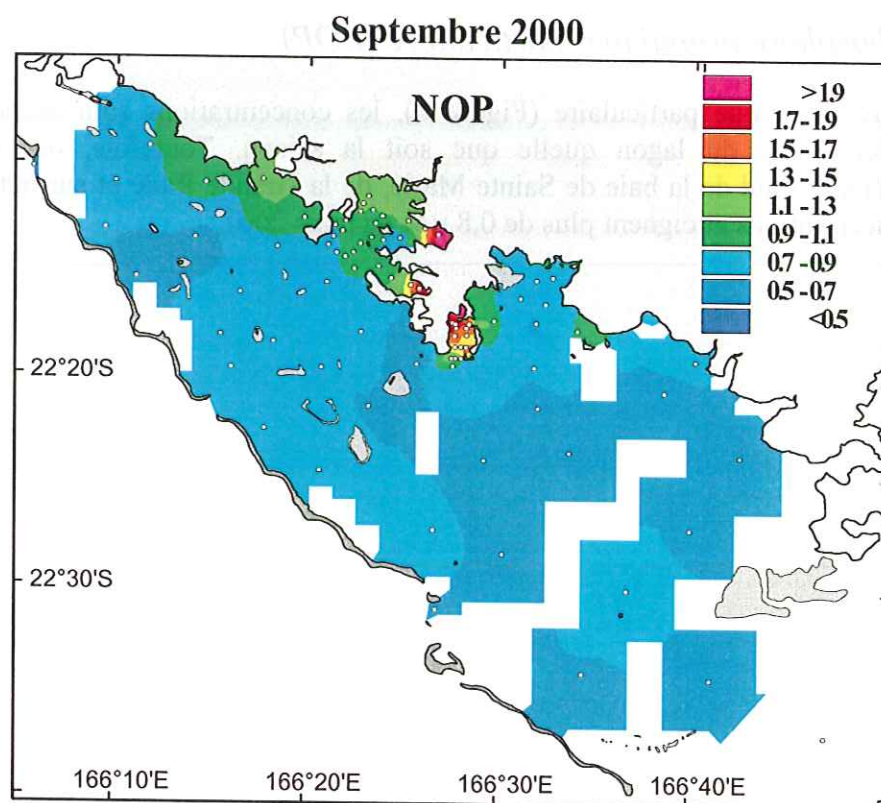
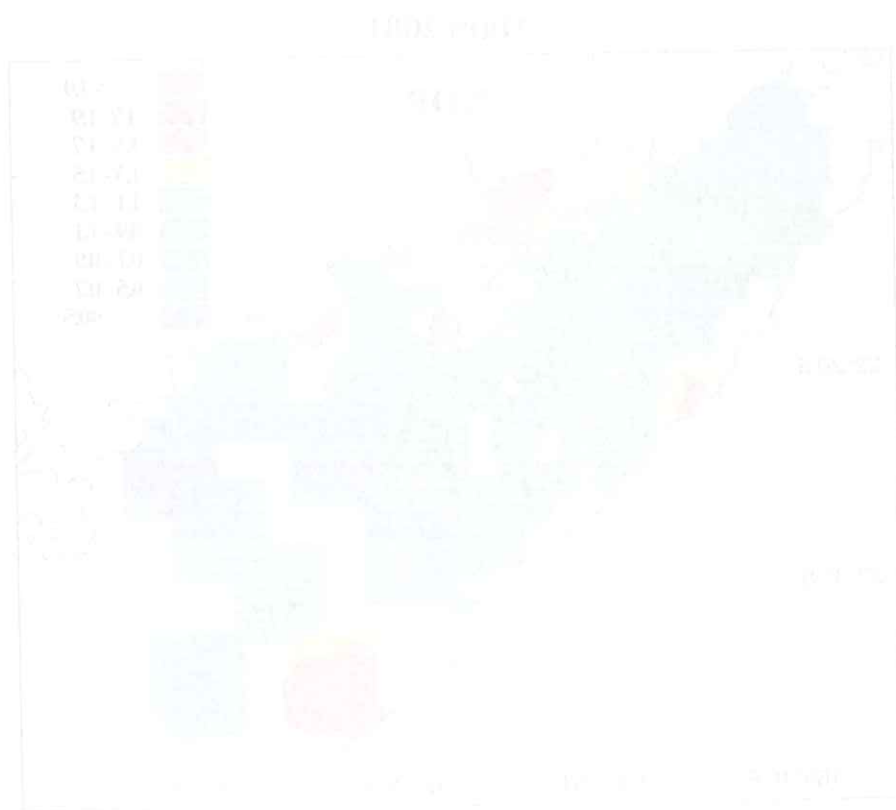
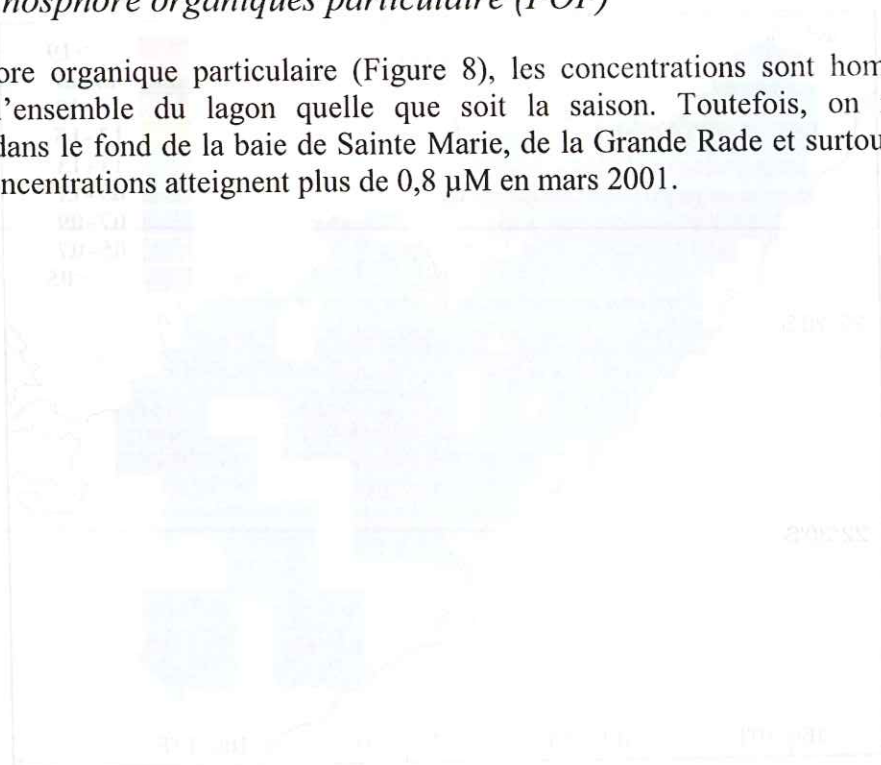


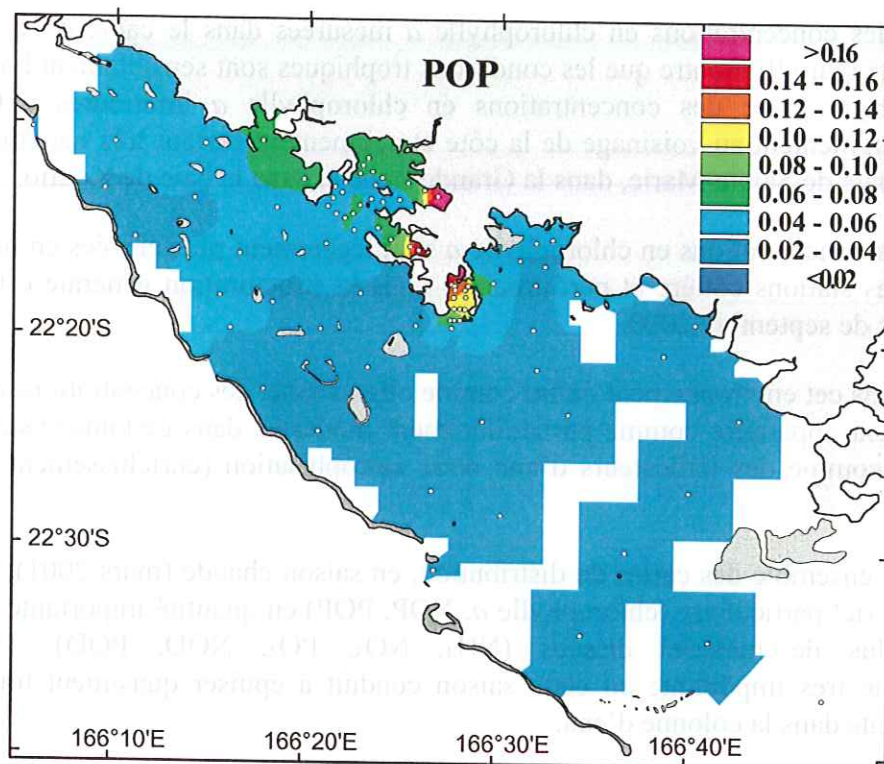
Figure 7 : Distribution de l'azote organique particulaire (μM) en septembre 2000 et mars 2001 dans les eaux de surface du lagon sud ouest de Nouvelle-Calédonie.

Phosphore organiques particulaire (POP)

Pour le phosphore organique particulaire (Figure 8), les concentrations sont homogènes (0,1 à 0,3 μM) dans l'ensemble du lagon quelle que soit la saison. Toutefois, on note un léger enrichissement dans le fond de la baie de Sainte Marie, de la Grande Rade et surtout de la baie de Koutio où les concentrations atteignent plus de 0,8 μM en mars 2001.



Septembre 2000



Mars 2001

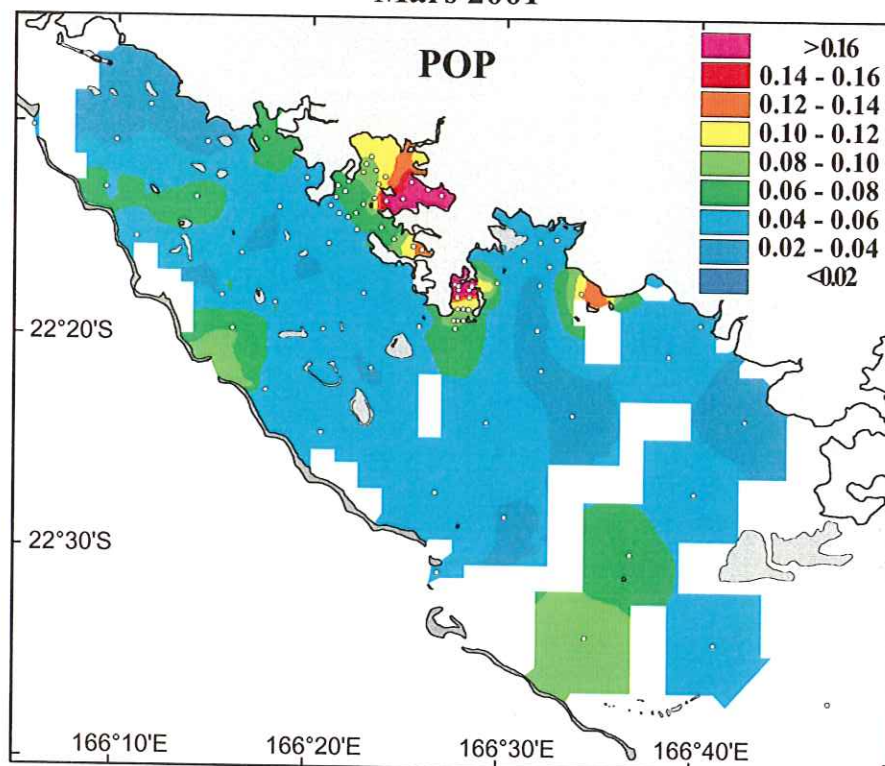


Figure 8 : Distribution du phosphore organique particulaire (μM) en septembre 2000 et mars 2001 dans les eaux de surface du lagon sud ouest de Nouvelle-Calédonie.

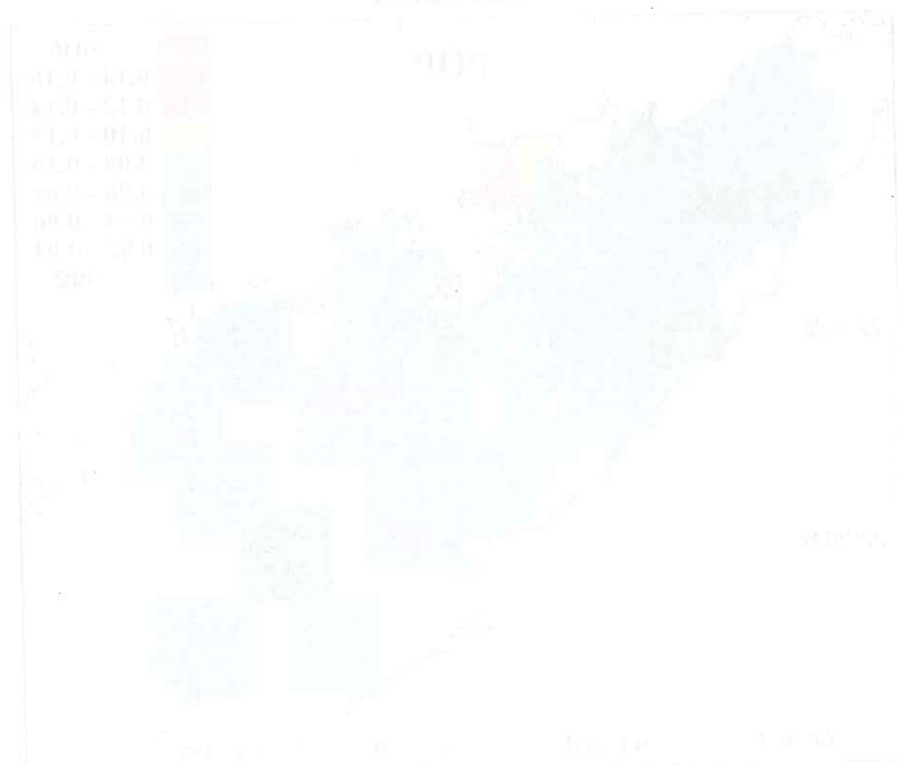
Chlorophylle a

La distribution des concentrations en chlorophylle *a* mesurées dans le cadre de la campagne de septembre 2000 (Figure 9) montre que les conditions trophiques sont sensiblement homogènes dans l'ensemble du lagon avec des concentrations en chlorophylle *a* inférieures à 0,3 µg/l. Les concentrations augmentent au voisinage de la côte et augmentent surtout très nettement au delà de 0,8 µg/l dans la baie de Sainte-Marie, dans la Grande Rade et dans la baie de Koutio.

En mars 2001 les concentrations en chlorophylle *a* sont légèrement plus élevées en milieu de lagon ainsi que dans les stations côtière et péri-urbaines mais la structuration générale est sensiblement identique à celles de septembre 2000.

On notera que dans cet environnement défini comme oligotrophe, des concentrations de l'ordre de 1 µg/l qui pourraient apparaître comme particulièrement modestes dans certains systèmes tempérés apparaissent ici comme des indicateurs d'une nette eutrophisation (enrichissement trophique) du milieu.

Après étude de l'ensemble des cartes de distribution, en saison chaude (mars 2001), on constate la présence de matériel particulaire (chlorophylle *a*, NOP, POP) en quantité importante alors qu'il y a pratiquement plus de matériel dissous (NH₄, NO₃, PO₄, NOD, POD). La dynamique phytoplanctonique très importante en cette saison conduit à épuiser quasiment tous le stock de nutriments présents dans la colonne d'eau.



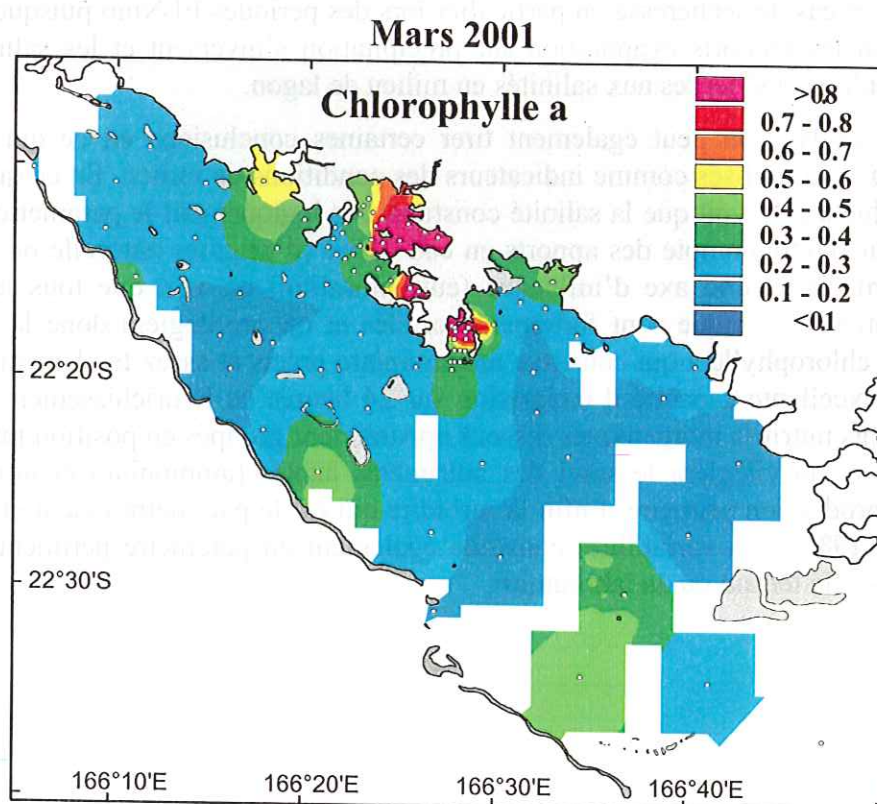
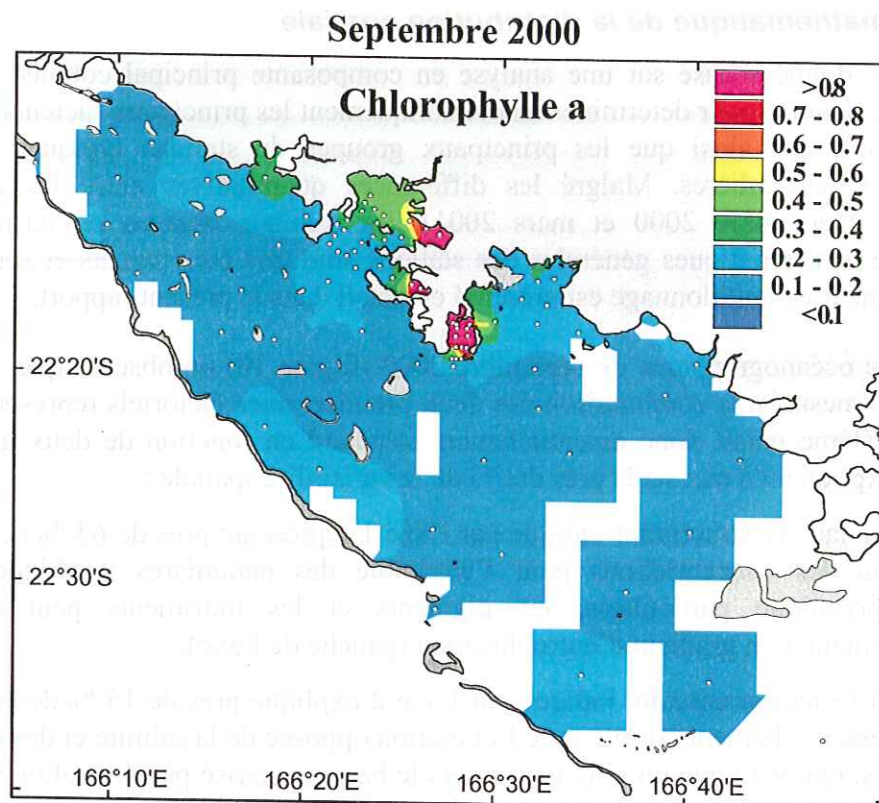


Figure 9 : Distribution de la chlorophylle *a* (µg/l) en septembre 2000 et mars 2001 dans le lagon sud ouest de Nouvelle-Calédonie.

Analyse mathématique de la distribution spatiale

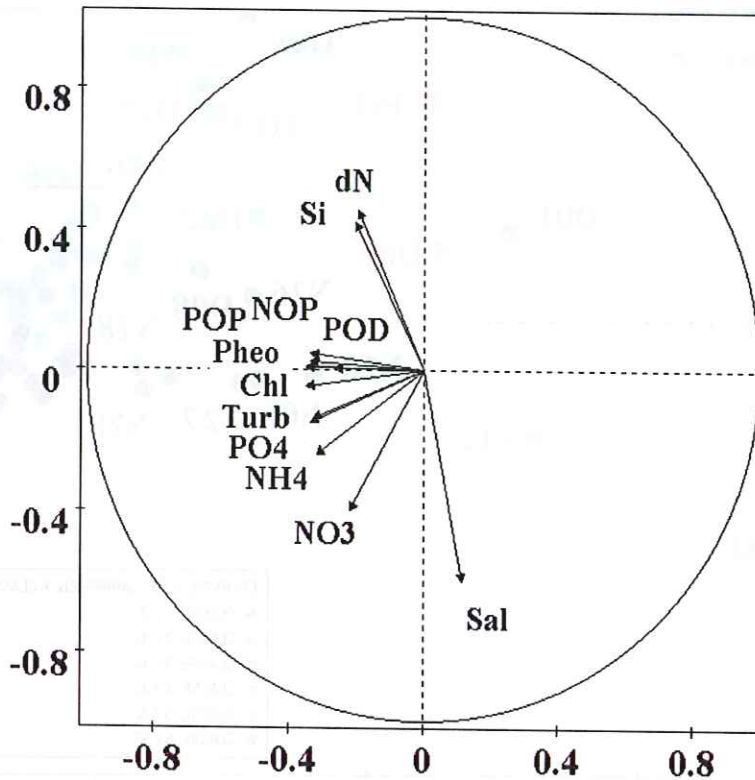
Le traitement des données basé sur une analyse en composante principal couplée à une analyse hiérarchique a été conduit pour déterminer mathématiquement les principaux facteurs structurant du milieu physico-chimique ainsi que les principaux groupes de stations typiques de conditions environnementales particulières. Malgré les différences quantitatives entre les deux périodes d'échantillonnage (septembre 2000 et mars 2001), les résultats obtenus en terme de facteurs structurants et de caractéristiques générales des stations sont très convergents et seul le cas de la première campagne d'échantillonnage est présenté en détail dans le présent rapport.

Pour la campagne océanographique de septembre 2000 (Figure 10) on observe que, sur la base du jeu de paramètres mesurés, la combinaison des deux premiers axes factoriels représente 74 % de la variabilité. Le système paraît donc essentiellement structuré en fonction de deux grands facteurs d'influence qui expliquent à eux seuls près des $\frac{3}{4}$ de la variabilité spatiale :

- Le premier facteur structurant indiqué par l'axe 1 représente près de 63 % de la variabilité. L'élévation des concentrations pour l'ensemble des paramètres trophiques incluant la matière organique particulaire, les pigments et les nutriments peut être attribuée essentiellement à un gradient d'eutrophisation (gauche de l'axe).
- Le second facteur structurant indiqué par l'axe 2 explique près de 15 % de la variabilité. Il peut être essentiellement corrélé avec l'évolution opposée de la salinité et des concentrations en silicates. On distingue un pôle marin vers le bas caractérisé par des salinités fortes et des concentrations en silicates faibles et un pôle côtier vers le haut caractérisé par une dessalure et une élévation des concentrations en silicates. On notera que le gradient de salinité peut s'inverser en cas de sécheresse en particulier lors des périodes El Nino puisque dans ce type de situation les rapports évaporation sur précipitation s'inversent et les salinités dans les baies sont alors supérieures aux salinités en milieu de lagon.

A partir de cette analyse on peut également tirer certaines conclusions en ce qui concerne les paramètres pouvant être utilisés comme indicateurs des conditions de milieu. En ce qui concerne le premier axe d'influence on voit que la salinité constitue très logiquement le paramètre indicateur le plus pertinent pour rendre compte des apports en eau douce (d'origines naturelle ou anthropique). En ce qui concerne le second axe d'influence (eutrophisation) on voit que tous les paramètres portant sur la matière organique sont fortement corrélés et on privilégiera donc la mesure de la concentrations en chlorophylle a qui constitue un paramètre précis et assez facilement mesurable et qui présente une excellente capacité d'intégration sur 24 heures de l'enrichissement trophique du milieu. Les éléments nutritifs inorganiques dissous apparaissent groupés en position intermédiaire et pour ces derniers on privilégiera le suivi des nutriments azotés (ammonium et nitrate) qui sont limitants pour la production primaire. Enfin la turbidité qui est le paramètre essentiel tirant l'axe 3 non représenté ici (9% de la variabilité) constitue également un paramètre pertinent relativement simple à mesurer sur le terrain ou au laboratoire.

Facteur 2 - 15.51 %



Facteur 1 - 62.92 %

Figure 10 : Projection des variables mesurées selon les deux premiers axes de l'analyse en composante principale.

Si l'on s'intéresse maintenant à la projection des stations dans l'espace factoriel 1-2 et à la classification hiérarchique on peut distinguer 6 groupes de stations (Figure 11).

- Le groupe 1, en bleu foncé regroupe 37 stations de milieu de lagon essentiellement localisées dans la moitié sud-est du lagon et donc plus proches de la source océanique.
- Le groupe 2 en bleu clair rassemble 29 stations essentiellement localisée dans la moitié nord-ouest du lagon ainsi qu'en entrée de baies ou dans une baie ouverte comme la baie de Boulari.
- Le groupe 4 en vert clair rassemble 6 stations exclusivement localisées dans la partie interne de la baie de Dumbéa

Ces trois groupes s'organisent donc selon un gradient diagonal aux 2 axes principaux qui correspond à une transition entre l'influence proprement marine et l'influence terrigène se traduisant conjointement par une faible décroissance de la salinité et un léger enrichissement trophique. L'expression maximum du pôle terrigène dans le fond de la baie de Dumbéa semble attribuable à l'existence d'une structure hydrologique particulière caractérisée par un temps de résidence élevé.

Facteur 2 - 15.51 %

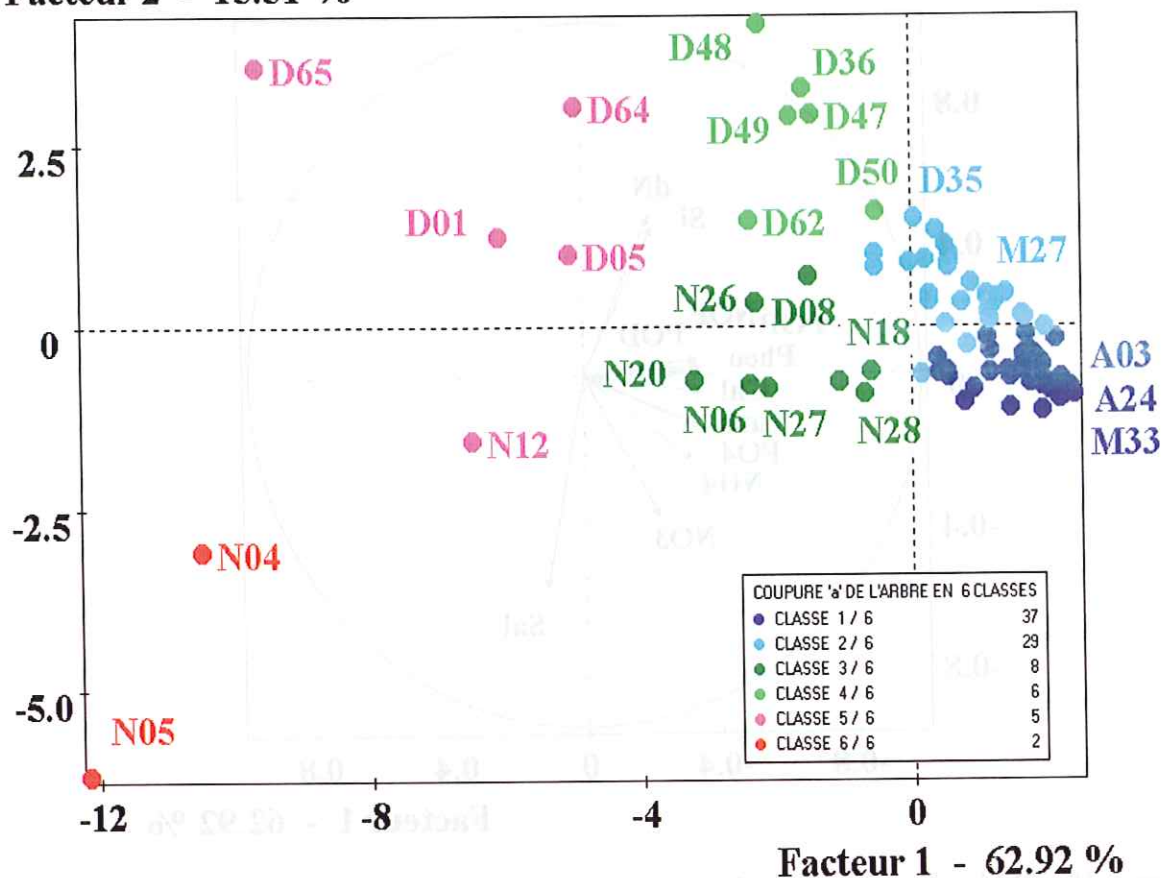


Figure 11 : Projection des stations de mesure et de leur classification hiérarchique selon les deux premiers axes de l'analyse en composante principale.

Les autres stations sont caractérisées par une divergence assez marquée par rapport à ce qui peut être considéré comme un gradient naturel d'influence terrigène.

- Le groupe 3 avec 8 stations et le groupe 6 avec 2 stations s'organisent selon un gradient d'enrichissement trophique indépendant d'une influence terrigène. Toutes les stations de ces deux groupes sont localisées soit dans la baie de Sainte Marie soit dans la Grande Rade et correspondent donc à un gradient d'eutrophisation artificiel liés aux apports en eau usées.
- Enfin le groupe 5 rassemble 4 stations qui se dispersent entre le pôle eutrophisé et le pôle sous influence terrigène. Ces stations sont localisées au milieu de la Baie de Sainte Marie et au fond de la Grande Rade et de la Baie de Koutio.

Pour ce qui a plus spécifiquement trait à la surveillance de la Grande rade on voit que 4 stations sont suffisantes pour rendre compte des 4 classes (classes 2, 3, 4 et 5) correspondant au gradient d'influence entre la zone la plus perturbée au fond de la baie (D01, classe 5) et des conditions lagunaires côtière sous influence terrigène naturelle (D33, classe 2). Ceci permet de fournir certaines recommandations spécifiques en terme de choix des éventuelles stations de surveillance (voir chapitre Conclusions-recommandations).

Structure verticale

En ce qui concerne la structure verticale des eaux, certains grands traits de l'environnement dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie peuvent être résumés en deux figures synthétiques. Une première figure représente les profils verticaux de salinité à la station A03 en milieu de lagon entre 1997 et 2000 (Figure 12 a). Pour pouvoir représenter l'ensemble des profils sur un seul et même graphique les données ont été exprimées sous la forme d'écarts à la moyenne exprimés en pourcentage. Globalement on observe que l'essentiel des données de salinité ne s'éloigne pas de plus de 0,2 % autour de la moyenne de chaque profil. Ceci tend donc à démontrer que la stratification verticale est pratiquement inexistante pour la salinité, les légers gradients de température étant pratiquement seuls responsables des légers gradients de densité observés.

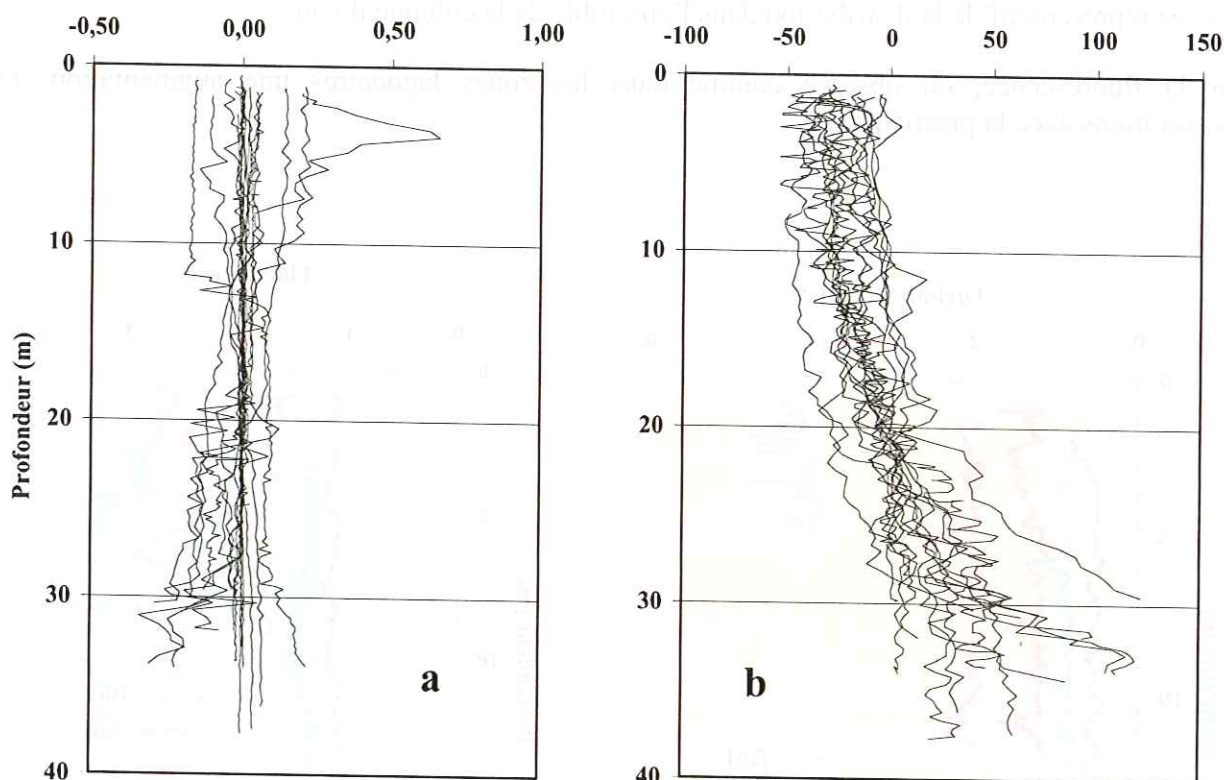


Figure 12 : Comparaison sur un an des profils verticaux de salinité (a) et fluorescence in situ (b) pour une station caractéristique de conditions de milieu de lagon. A fin de comparaison, chaque valeur (x) est exprimée par rapport à la moyenne des valeurs pour le profil correspondant selon la formule $x' = (x - \text{moyenne}) / \text{moyenne}$.

La seconde figure (Figure 12 b) représente l'évolution verticale de la fluorescence toujours rapporté à la moyenne de chaque profil. Contrairement à la salinité, on observe une augmentation des concentrations avec la profondeur dans une tendance sensiblement exponentielle. Compte tenu de la relative homogénéité des masses d'eau liée à l'hydrodynamique il semble que cet enrichissement de l'ordre de 40 % à 30 m, soit 1,3 % par m, puisse être imputable à un relargage d'éléments nutritifs recyclés dans les sédiments, le phytoplancton pouvant bénéficier de cet apport dans la mesure où la lumière n'est pas limitante à de telles profondeurs et dans ce type d'environnement. Cette hypothèse

est compatible avec les résultats obtenus sur les mesures de métabolisme benthique et de flux à l'interface eau-sédiment. Les premiers résultats de modélisation biogéochimique concluent également à un contrôle significatif de la production phytoplanctonique par le compartiment benthique. Cette caractéristique montre l'importance des interactions qui peuvent lier le compartiment pélagique (eau) et le compartiment benthique (fond).

En ce qui concerne la Grande Rade et la baie de Dumbéa, sur les 5 stations types caractérisant l'environnement côtier, on observe une évolution nette des profils de turbidité et de fluorescence qui correspond bien évidemment aux gradients spatiaux déjà mis en évidence plus haut (Figure 13). En terme de structuration verticale on observe généralement des profils de turbidité relativement homogènes pour une station donnée ce qui permet de considérer qu'un prélèvement de sub-surface est assez représentatif de la distribution dans l'ensemble de la colonne d'eau.

Pour la fluorescence, on observe comme dans les zones lagunaires une augmentation des concentrations avec la profondeur.

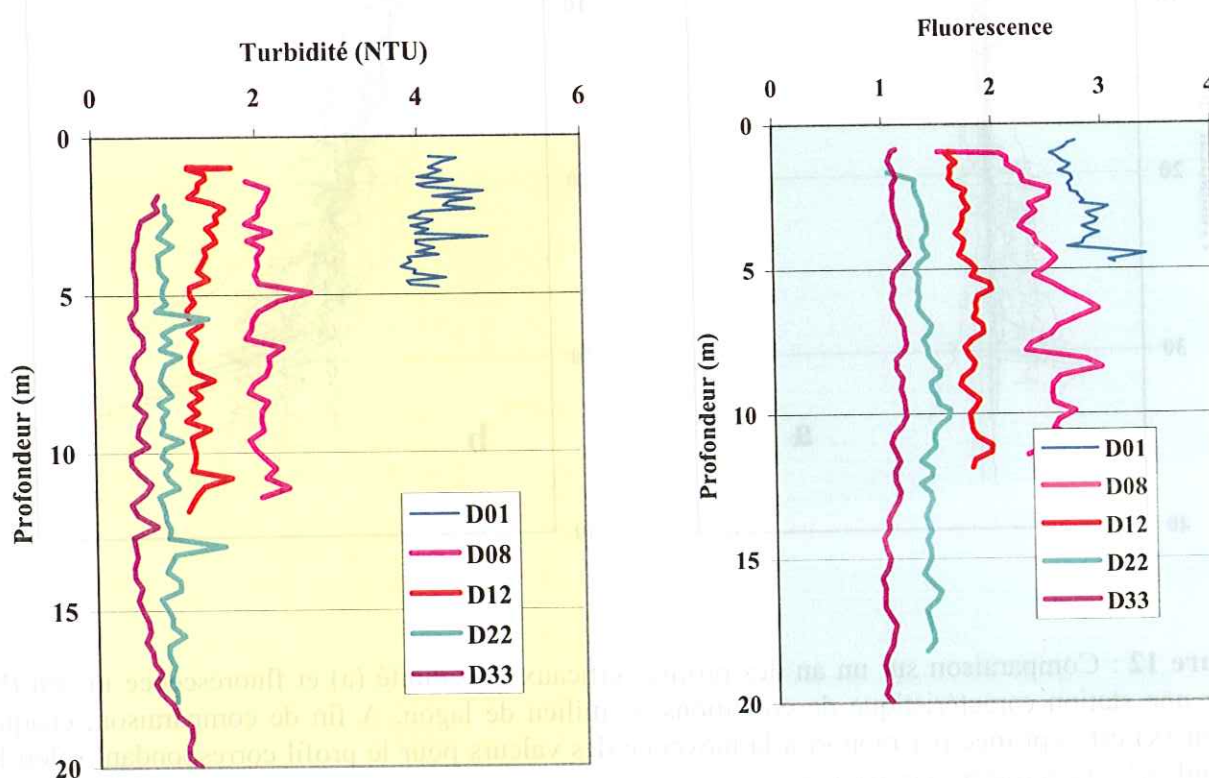


Figure 13 : Exemple d'évolution des profils de turbidité (NTU) et de fluorescence (unité arbitraire) le long d'une radiale entre le fond de la Grande Rade (station D01) et le milieu de la baie de Dumbéa (station D33) en août 1999.

Variabilité temporelle

La variabilité temporelle des conditions de milieu constitue un paramètre essentiel à évaluer pour pouvoir envisager de pouvoir mener une opération de surveillance de l'environnement marin. Certaines informations extraites de données acquises à différentes échelles de temps sont présentées ici de façon à établir l'importance de cette variabilité.

Variabilité temporelle à court terme

Des analyses ont été conduites à des échelles de temps de l'ordre de 24 heures à quelques jours avec des pas d'échantillonnage de 10 à 30 minutes. Cette approche permet de comparer la variabilité inter-sites à haute fréquence de certains paramètres physico-chimiques fondamentaux tels que ceux identifiés préalablement.

Chlorophylle *a*

Une série de mesure a été obtenue en utilisant une bouée instrumentée équipée d'un capteur de fluorescence *in situ*, qui rend compte de la charge en chlorophylle *a* et donc de la concentration en phytoplancton. Les mesures ont été obtenues à une profondeur de 3 m avec un pas de temps de 10 minutes (Figure 14). Une série de mesures faites sur une station de milieu de lagon (îlot signal), a montré qu'en présence de conditions climatiques homogènes, la variabilité en milieu de lagon d'un paramètre relativement intégrateur comme la chlorophylle *a* est faible. Elle augmente en revanche très nettement dans les baies et en particulier dans les baies anthropisées. Dans la baie de Dumbéa, on voit que la fluorescence et donc la concentration en chlorophylle *a* peut varier énormément. Cette caractéristique est liée à la nature très localisée des sites de perturbation et au déplacement de masses d'eau présentant une forte hétérogénéité.

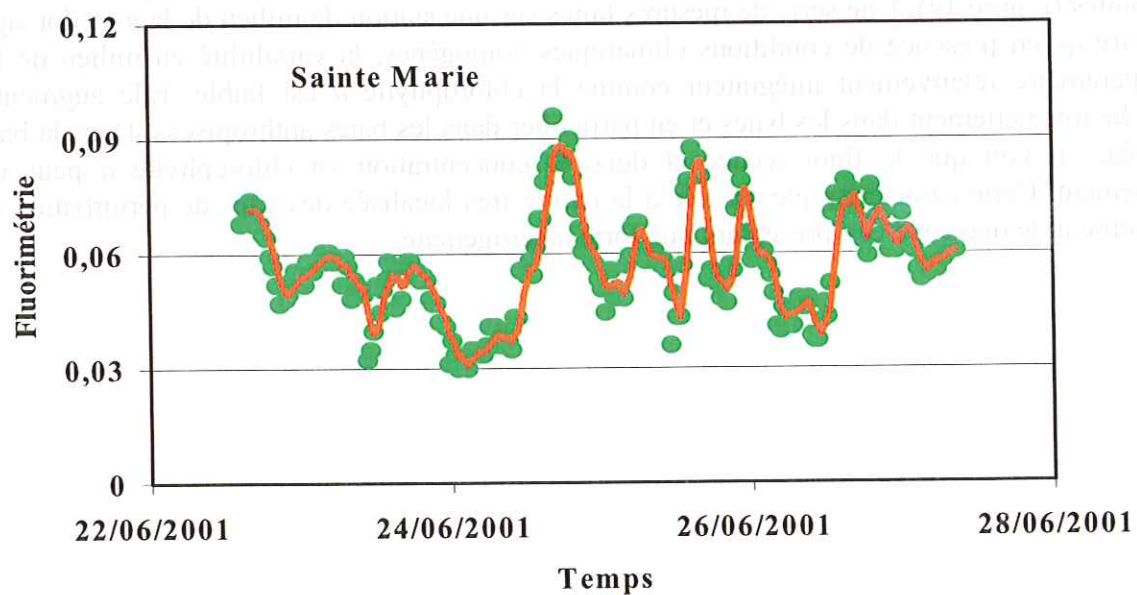
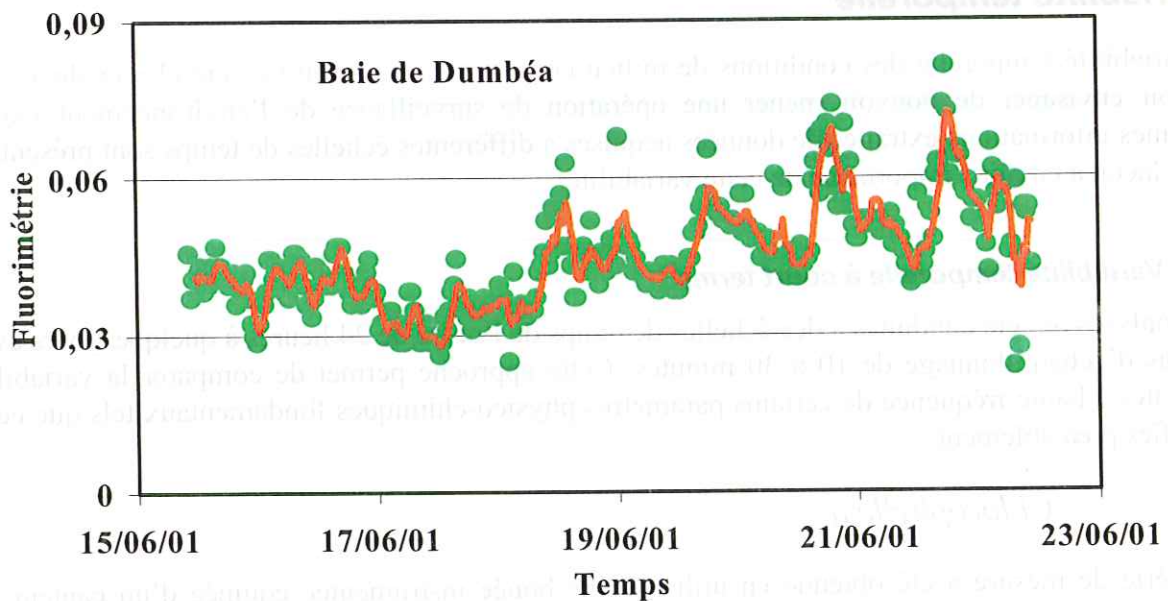


Figure 14: Variabilité sur quelques jours de la fluorescence dans le milieu de la baie de Dumbéa (station D46) et le milieu de la baie de Sainte Marie (station N20). Les données discrètes sont représentés par les points et la courbe correspond à un lissage sur 5 points consécutifs.

Eléments nutritifs

La variabilité des concentrations en éléments nutritifs dissous est beaucoup moins structurée. Les nitrates et les phosphates varient de façon essentiellement erratique et aucune tendance saisonnière ne peut être distinguée au sein de la forte variabilité enregistrée. Seules les concentrations en ammonium semblent montrer une saisonnalité un tant soit peu marquée au moins en ce qui concerne les stations typiques de lagon. On observe globalement un maximum en période chaude et un minimum en période froide mais la variabilité à courte échelle de temps l'emporte souvent sur cette saisonnalité mal affirmée et qui mérite d'être affinée.

Dans les zones côtières et encore plus particulièrement dans les baies eutrophisées telles que la Baie de Sainte-Marie, la Baie de Koutio ou la Grande Rade, les éléments nutritifs dissous et en particulier l'ammonium qui est largement fourni par les eaux usées, présentent également une variabilité forte à très courte échelle de temps. Un exemple de l'évolution des concentrations en ammonium sur 24 heures (Figure 15) montre que dans la baie de Dumbéa, les concentrations durant une période relativement stable fluctuent en bruit de fond dans une gamme de $\pm 23\%$; le changement du régime de vent se traduisant par une diminution des concentrations de 0,3 à 0,05 μM en 8 heures. Dans la Baie de Sainte Marie, la variabilité est encore plus importante sous l'influence de certains facteurs comme la marée, le régime de vent et le rythme circadien des rejets urbains.

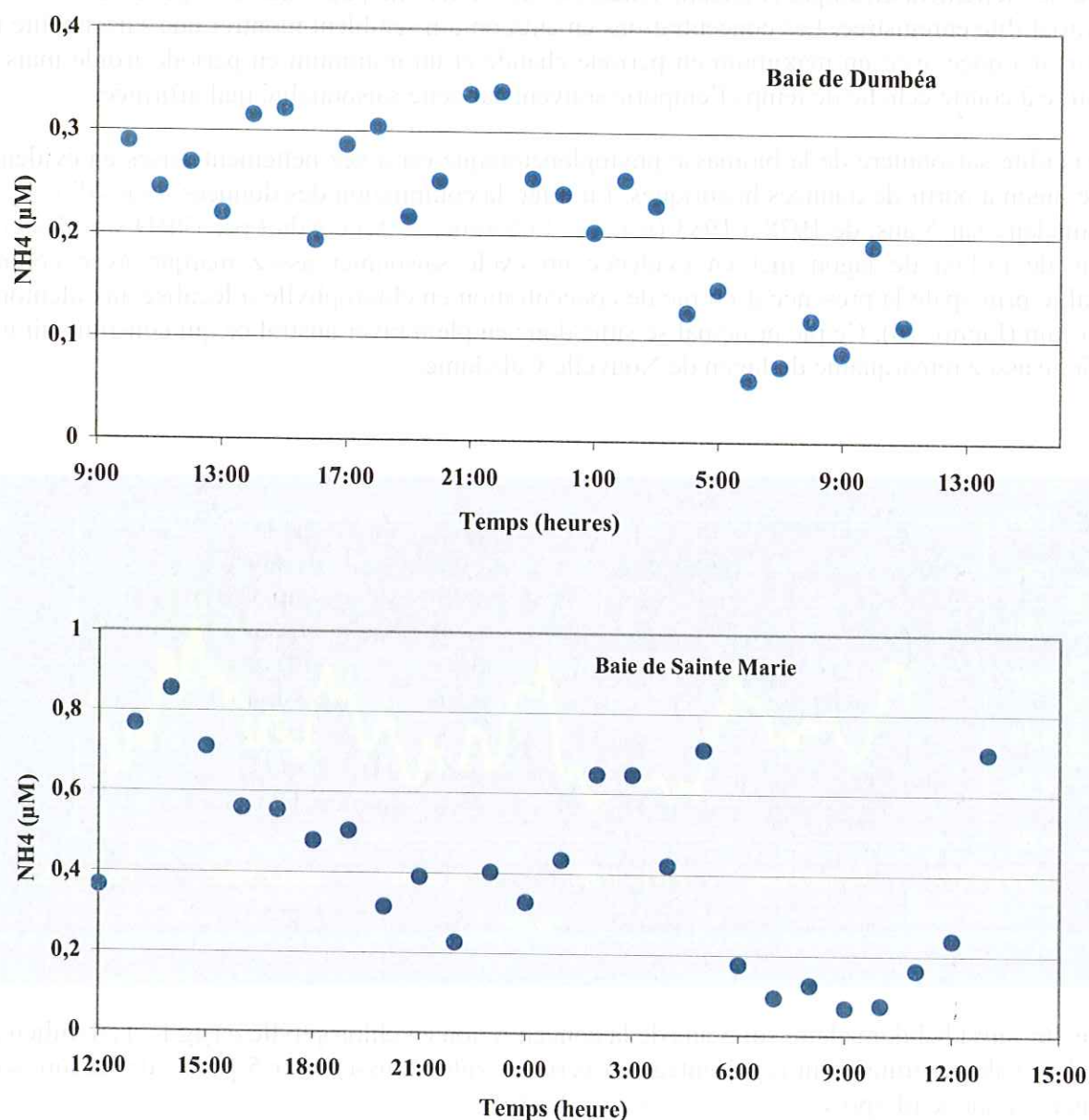


Figure 15: Variabilité de la concentration en ammonium (μM) dans le milieu de la baie de Dumbéa (station D46) et dans le fond d'une baie enrichie par les rejets urbains (station N04, Baie de Sainte Marie) à l'échelle d'une journée avec un pas d'échantillonnage d'une heure.

Cette forte variabilité dans les zones les plus côtières et eutrophisées est une conséquence logique de l'hétérogénéité spatiale. En effet dans ces zones où les concentrations peuvent largement évoluer sur une faible distance il est bien évident que le déplacement des masses d'eau sous l'effet de la marée et du vent se traduira en un point donné par une fluctuation importante des conditions de milieu.

Cycles saisonniers

Cette variabilité à courte échelle de temps vient généralement masquer une éventuelle saisonnalité des paramètres trophiques du milieu. En milieu de lagon, Les nitrates et les phosphates varient de façon essentiellement erratique et aucune tendance saisonnière ne peut être distinguée au sein de la forte variabilité enregistrée. Les concentrations en ammonium semblent montrer une saisonnalité un peu plus marquée avec un maximum en période chaude et un minimum en période froide mais la variabilité à courte échelle de temps l'emporte souvent sur cette saisonnalité mal affirmée.

La variabilité saisonnière de la biomasse phytoplanctonique est assez nettement mise en évidence dans le lagon à partir de données historiques. En effet, la compilation des données issues d'un suivi hebdomadaire sur 5 ans, de 1978 à 1983 (Binet et Leborgne, 1996) conduit par l'IRD sur plusieurs stations de milieu de lagon met en évidence un cycle saisonnier assez marqué avec comme originalité principale la présence d'un pic de concentration en chlorophylle *a* localisé aux alentours de mai-juin (Figure 16). Ce pic principal se situe donc en plein hiver austral ce qui constituerait une spécificité assez remarquable du lagon de Nouvelle-Calédonie.

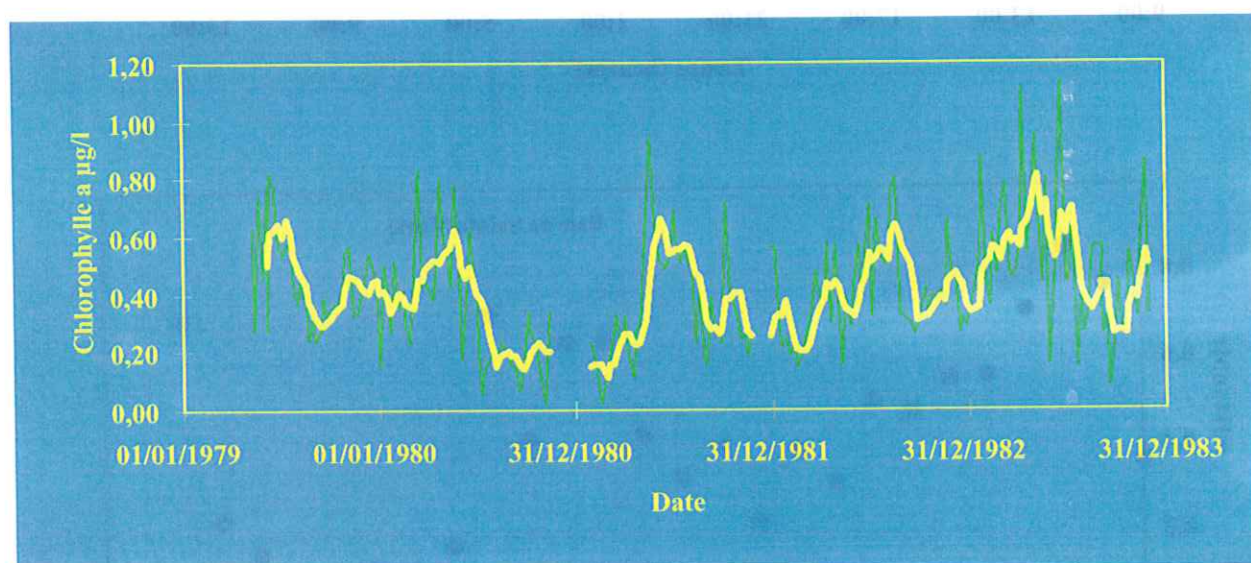


Figure 16: Suivi hebdomadaire sur 5 ans de la concentration en chlorophylle *a* ($\mu\text{g L}^{-1}$) en milieu de lagon. Les valeurs brutes sont représentées en vert, les valeurs lissées sur 5 points de mesure sont présentées en jaune (d'après Binet et Leborgne, 1996).

Cette saisonnalité a été confirmée plus récemment à une échelle géographique plus large dans le cadre du suivi mensuel d'un réseau de station conduit par l'IRD entre 1997 et 1998. Un exemple de l'évolution des concentrations en chlorophylle *a* est présenté pour des stations allant du fond de la baie de Dumbéa à la passe de Dumbéa et regroupant donc des stations de niveaux trophiques

contrastés (Figure 17). Les résultats obtenus mettent en évidence un maximum de concentration en mai qui correspond bien aux observations faites sur la série temporelle 1979-1983.

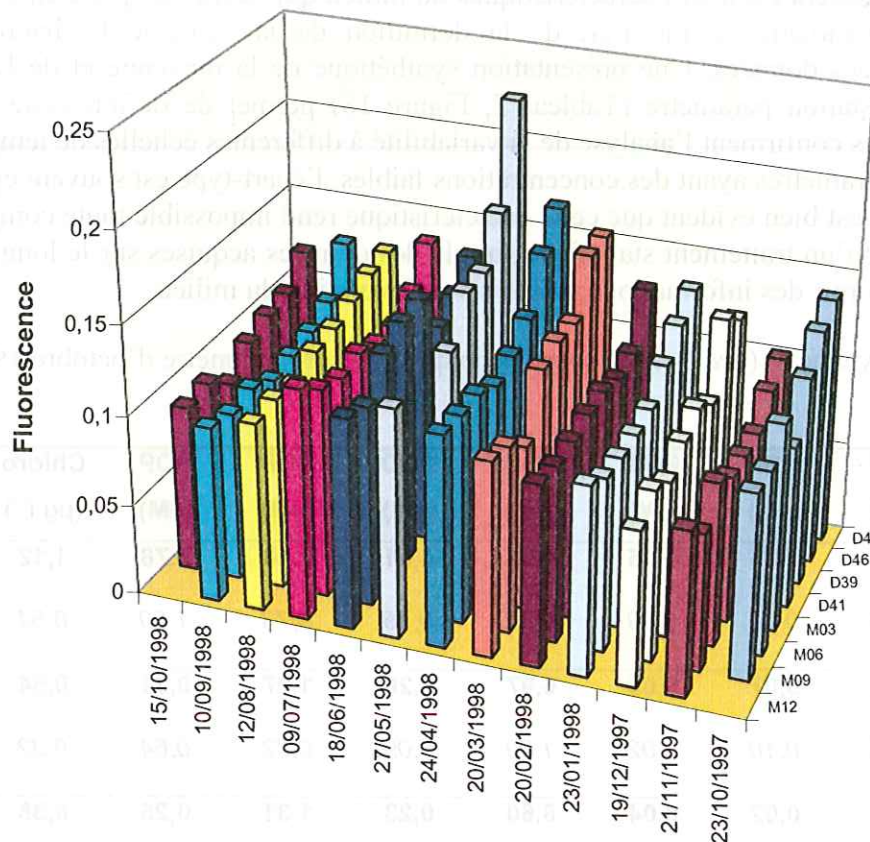


Figure 17: Suivi mensuel sur un an de la fluorescence exprimée en équivalents chlorophylle a ($\mu\text{g L}^{-1}$) le long d'un transect entre le fond de la baie de Dumbéa (station D47) et la passe de Dumbéa (station M12).

L'identification des processus responsables de cette saisonnalité n'est pas du ressort de ce contrat mais pour information son étude détaillée est actuellement conduite par l'UR Camélia de l'IRD dans le cadre d'un suivi hebdomadaire commencé en 2002. Les facteurs de contrôle permettant d'expliquer l'existence d'un tel pic hivernal sont de deux ordres :

- soit un contrôle de type bottom-up basé sur une injection de nutriments neufs, on notera au passage qu'un processus de ce type a été proposé pour l'océan ouvert en liaison avec la diminution de la thermocline en hiver et le rapprochement de la nutricline de la surface.
- Soit un contrôle de type top-down lié à une réduction en début d'hiver des effets de prédation ou de compétition.

En revanche, dans les zones les plus anthropisées, comme le fond des Baies de Koutio, Dumbéa et de la Grande Rade, il est impossible de mettre en évidence une variabilité saisonnière quel que soit le paramètre trophique considéré. Le premier facteur incriminé est bien évidemment la forte variabilité à courte échelle de temps qui génère un bruit de fond élevé dans lequel il devient impossible d'identifier les variabilités à d'autres échelles de temps. D'autre part, il apparaît logique que ce type d'environnement caractérisé par des apports chroniques en éléments nutritifs par les eaux usées soit beaucoup moins influencé par les facteurs de contrôle cités plus haut.

Conséquences sur la variabilité des paramètres de mesure

Dans l'optique de la mise en place d'un réseau de surveillance, il est bien évident que la variabilité temporelle constituera l'une des caractéristiques du milieu qui devra être prise en compte lors de la sélection des paramètres à mesurer, de la définition de la stratégie d'échantillonnage et de l'interprétation des données. Une présentation synthétique de la moyenne et de l'écart type pour chaque couple station paramètre (Tableau I, Figure 18) permet de définir cette variabilité. Les données obtenues confirment l'analyse de la variabilité à différentes échelles de temps puisque pour la plupart des paramètres ayant des concentrations faibles, l'écart-type est souvent égal ou supérieur à la moyenne. Il est bien évident que cette caractéristique rend impossible toute comparaison directe des données et qu'un traitement statistique simple des données acquises sur le long terme sera seul en mesure de fournir des informations précises sur l'évolution du milieu.

Tableau I : Moyenne et (*écart-type*) pour les couples station-paramètre d'octobre 1997 à septembre 1999 (n = 16)

Stations	NH4 (μM)	NO3 (μM)	PO4 (μM)	NOD (μM)	POD (μM)	NOP (μM)	POP (μM)	Chloro ($\mu\text{g l}^{-1}$)	Pheo ($\mu\text{g l}^{-1}$)
D01	1,01	0,25	0,15	8,53	0,31	2,10	0,78	1,12	0,74
	1,39	0,19	0,09	1,31	0,16	0,73	1,50	0,54	0,35
D12	0,09	0,07	0,05	6,97	0,26	1,27	0,31	0,54	0,45
	0,14	0,10	0,02	1,09	0,09	0,32	0,64	0,32	0,34
D19	0,06	0,02	0,04	6,60	0,23	1,31	0,26	0,38	0,30
	0,09	0,04	0,03	0,92	0,07	0,96	0,56	0,18	0,26
D27	0,06	0,03	0,03	6,89	0,24	1,09	0,30	0,38	0,31
	0,08	0,06	0,03	1,33	0,10	0,30	0,57	0,18	0,19
M03	0,12	0,02	0,03	7,10	0,26	1,09	0,19	0,25	0,22
	0,14	0,06	0,02	2,98	0,16	1,12	0,39	0,14	0,22
D47	0,10	0,12	0,04	7,33	0,24	1,30	0,31	0,58	0,46
	0,13	0,17	0,03	1,04	0,09	0,46	0,62	0,26	0,23

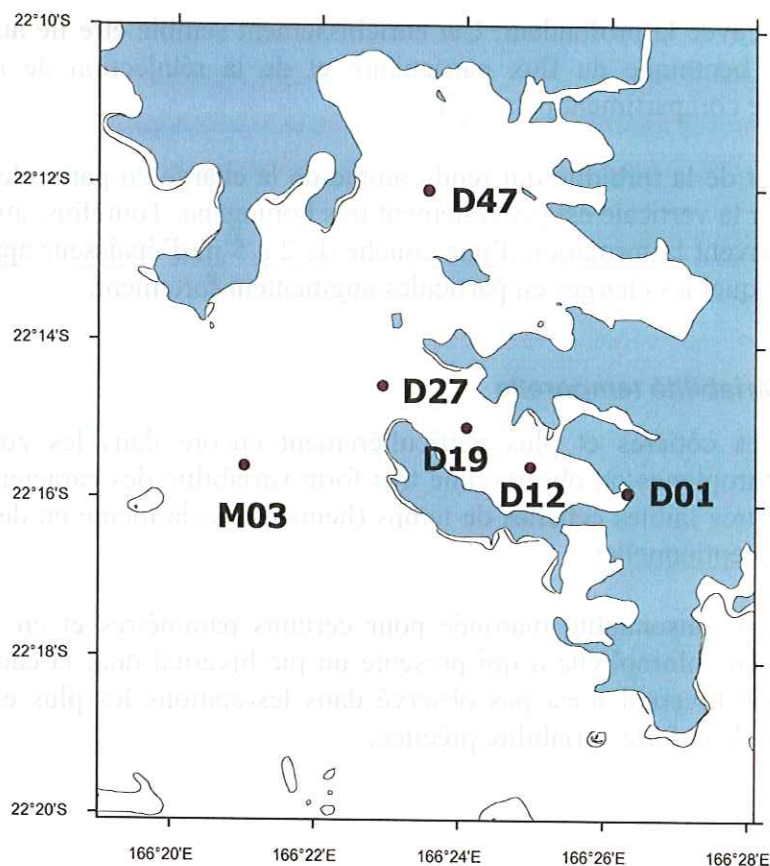


Figure 18 : Localisation des stations mentionnées dans le tableau I

Conclusions

En conclusion de ce travail de consultance les caractéristiques essentielles du milieu peuvent être synthétisés comme suit.

En terme de structuration du milieu :

- On observe la présence d'un gradient d'influence terrigène qui constitue la principale source de variabilité à l'échelle de l'ensemble du lagon.
- Bien que beaucoup plus localisé, un second gradient d'influence, attribuable à l'eutrophisation artificielle des baies abritées, est responsable de plus de 50 % de la variabilité entre stations.
- L'analyse mathématique des données montre que les eaux de la Grande Rade et de la Baie de Dumbéa peuvent être séparées en 4 grandes classes en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques.

En terme de structuration verticale

- Malgré une certaine homogénéité verticale des caractéristiques de densité des eaux, on observe, en milieu de lagon comme dans la Grande Rade, un gradient d'enrichissement en

chlorophylle *a* avec la profondeur. Cet enrichissement semble être lié au recyclage dans le compartiment benthique du flux particulaire et de la réinjection de nutriments dissous recyclés vers le compartiment pélagique.

- Pour ce qui est de la turbidité qui rend compte de la charge en particules en suspension la distribution sur la verticale est généralement très homogène. Toutefois, au voisinage du fond on observe souvent la formation d'une couche de 2 à 5 m d'épaisseur appelé néphéloïde de fond et dans lequel les charges en particules augmentent fortement.

En terme de variabilité temporelle

- Dans les zones côtières et plus particulièrement encore dans les zones soumises aux influences anthropiques on observe une très forte variabilité des caractéristiques chimiques des eaux à de très faibles échelles de temps (heures) et cela même en dehors de conditions climatiques exceptionnelles.
- On observe une saisonnalité marquée pour certains paramètres et en particulier pour la concentration en chlorophylle *a* qui présente un pic hivernal dont la causalité est en cours d'étude. Ce pic hivernal n'est pas observé dans les stations les plus exposées aux rejets urbains du fait de la forte variabilité précitée.

Recommandations

En terme de paramètres essentiels à mesurer

Les résultats de l'analyse mathématique des données a permis de définir 5 paramètres essentiels à prendre en compte dans le cadre d'un suivi de l'environnement :

- Salinité (sonde)
- Chlorophylle *a* (méthode fluorimétrique de préférence)
- Ammonium (méthode spectrophotométrique ou fluorimétrique)
- Nitrate (méthode de Raimbault et al, 1990)
- Turbidité (sonde *in situ* ou turbidimètre de laboratoire précision minimum 0,1 NTU)

En terme de localisation des stations

Pour ce qui a plus spécifiquement trait à la surveillance de la Grande rade on voit que 4 stations sont à priori suffisantes pour rendre compte les 4 classes (classes 2, 3, 4 et 5) correspondant au gradient d'influence entre la zone la plus perturbée au fond de la baie (D01, classe 5) et des conditions lagunaires côtières sous influence terrigène naturelle (D33, entrée de la baie de Dumbéa, classe 2). En accord avec l'étude des métaux dissous, 4 stations de mesure sont proposés pour constituer un réseau minimum pour la surveillance du milieu marin (Tableau II). La perspective de disposer d'une trame d'échantillonnage recoupant les mesures faites par l'IRD permettrait en outre

de disposer d'information complémentaires. Il semblerait légitime de disposer d'une station supplémentaire dans le canal de rejet des effluents de refroidissement qui draine les eaux usées.

Tableau II : Nomenclature et position des stations de mesure utilisées par l'UR Camélia de l'IRD (en fonction de la nouvelle grille d'échantillonnage définie en 2000) et recommandées pour une surveillance du milieu marin.

D01	22°15,70'	166°26,48'
D12	22°15,24'	166°24,98'
D22	22°14,60'	166°23,85'
D33	22°13,95'	166°22,53'

En terme de stratégie d'échantillonnage et de traitement des données

Il est recommandé de procéder à une surveillance mensuelle des caractéristiques des eaux afin de disposer sur l'année de données suffisantes pour dégager une tendance statistique. Les prélèvements seront effectués en sub-surface à 3 m de profondeur.

Compte tenu de la forte variabilité à différentes échelles de temps, la comparaison des données devra être conduite de façon adaptée en tenant compte des limite statistique. Le suivi sur plusieurs années permettra de disposer de données pouvant faire l'objet de régressions linéaires ou non linéaires permettant de dégager une éventuelle tendance évolutive à long terme.

Bibliographie

- BINET D., LE BORGNE R., 1996. *Archives Sciences de la Mer* n° 2, Orstom Nouméa, 37 p.
- BUJAN S., GRENZ C., FICHEZ R., DOUILLET P., 2000. *C. R. Acad. Sci. Paris, Life Sciences, Ecology*, **323** : 225-233.
- CHIFFLET S., GERARD P., FICHEZ R., 2003. Manuel d'analyses chimiques dans l'eau de mer. Notes Techniques Sciences de la Mer, Centre IRD de Nouméa, 81 p.
- LABROSSE P., FICHEZ R., FARMAN R., ADAMS T., 2000. In, *Seas at the Millenium, an environmental evaluation*. Sheppard C. (ed.), Elsevier, Amsterdam. Vol. 2, p. 723-736.
- RAIMBAULT P. et al., 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. *Mar. Biol.*, 104 : 347-351.
- TORRETON J.-P., 2000. Importance du bactérioplancton dans la transformation et le devenir de la matière organique en milieu corallien. *Oceanis*, 26: 389-425.

