

Évolution saisonnière du cycle biogéochimique dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. Application d'un modèle compartimental

Stéphane Bujan^a, Christian Grenz^{a*}, Renaud Fichez^b, Pascal Douillet^b

^a Centre d'océanologie de Marseille, rue de la Batterie des Lions, 13007 Marseille, France

^b Centre IRD, BP A5, 98848 Nouméa cedex, Nouvelle-Calédonie

Reçu le 3 août 1999 ; accepté le 29 novembre 1999

Présenté par Lucien Laubier

Abstract – Biogeochemical recycling in the south-west lagoon of New Caledonia.

A box model approach. A biogeochemical box model describing the south-west lagoon of New-Caledonia was developed in order to simulate the seasonal cycle of carbon and nitrogen. We used fluxes generated by a 3D hydrodynamic model to simulate horizontal exchanges between boxes and added freshwater influxes as nitrogen sources from the land. Average residence time proved to be less than 11 days for the lagoon as a whole. Standard simulations showed baseline values of chlorophyll *a* between 0.2 and 0.4 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Influences of freshwater influxes proved to be significant (increases up to 1 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) only in shallow areas protected from wind exposure and during short periods of heavy rainfall (tropical depressions). Tropical climatic events have reduced impact in space and time and long-term simulations over decades with increased nutrient inputs did not show any significant process of eutrophication. Hydrodynamics seemed to be one of the major control factors with respect to organic matter cycling in the lagoon. © 2000 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

phytoplankton / lagoon / modelling / biogeochemistry / New-Caledonia

Résumé – Un modèle biogéochimique en compartiments du cycle du carbone et de l'azote a été développé pour le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. Ce modèle est forcé par des débits issus d'un modèle hydrodynamique 3D et des apports terrigènes azotés. Pour l'ensemble du lagon, nous avons pu mettre en évidence des temps de résidence courts (11 j) et des concentrations de chlorophylle *a* comprises entre 0,2 et 0,4 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Lors de brefs événements de crues se produisant principalement durant la saison des pluies (dépressions tropicales), les concentrations en chlorophylle *a* dans les zones les plus abritées du vent peuvent dépasser 1 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Une simulation à long terme et pour laquelle nous avons introduit progressivement une concentration croissante de nitrate dans les apports, démontre que cette perturbation se traduit par une augmentation locale mais limitée dans le temps de la biomasse chlorophyllienne, sans eutrophisation significative du milieu. L'hydrodynamisme est un facteur important qui permet à ce système de préserver son caractère oligotrophe. © 2000 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

phytoplankton / lagoon / modélisation / biogéochimie / Nouvelle-Calédonie



* Correspondance et tirés à part : grenz@com.univ-mrs.fr

Fonds Documentaire IRD

Cote : B * 23680 Ex : 1

Abridged version

Pacific islands are subject to diverse direct or indirect anthropogenic influences, among which urbanisation, agricultural practices and deforestation are of increasing concern. A major consequence is the drastic enhancement of terrigenous and anthropogenic inputs into the lagoon. We developed a box model of the south-west tropical lagoon of New-Caledonia in order to simulate the impact of freshwater inputs such as flooding events that occur during tropical depressions. We also used this model to test the sensitivity of this lagoon system to a significant increase in nutrient discharge. The 2 000 km² lagoon area was divided into 27 spatial boxes and we used a coupled modelling approach, which combines advective fluxes calculated from a 3D hydrodynamic model, and a biogeochemical process model. The biogeochemical model embodies: a) the effect of superficial heat exchange; b) the effect of wind and tidal stirring on resuspension and deposition of inorganic, light-absorbing and organic sediments; c) diffusional exchange between the water-column and pore water in superficial oxic sediments; d) the growth of phytoplankton, and associated micro-heterotrophs, according to cell-quota, threshold-limitation theory, with nitrogen as the limiting nutrient; and e) the mineralization of detrital organic material. Further processes such as phytobenthic production and benthic grazing were added according to site specificity.

Each biogeochemical state variable is re-initialized at each time step (1 day) by means of the horizontal advective transport between boxes and calculated by the hydrodynamic model.

General hydrodynamic circulation is dominated by the south-east trade wind, which flushes the water masses outside the lagoon through the passes. Resi-

dence time for the whole area is estimated at 11 days on average under the eight selected meteorological conditions. River flows are usually weak ($< 5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), but during the wet season (December to March) these values can reach $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ during the few days of tropical depressions.

Weekly field data and recent monthly measures of Chlorophyll *a* (chl*a*) from the ECOTROPE program can be compared with standard simulations. Simulated phytoplankton biomass rarely exceeds $1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ chl *a* with average values between 0.2 and $0.4 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ all year long without clear seasonal patterns of variability. Coastal to barrier-reef gradient is very weak and shows relative homogeneity over space and time. Heavy rainfall periods showed chl *a* increases only in the shallow coastal boxes and during very short periods of time. Concentration of freshwater nitrate is on average less than $10 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-3}$. Restricted nutrient inputs combined with constant hydrodynamic features in the lagoon maintain this coastal environment close to oligotrophic conditions. Advective transport of the water masses leads to a rapid dispersion of nutrients and limits phytoplanktonic growth.

A long-term simulation over 20 years showed the stability of the model. This simulation combined with a gradual increase in nutrient content of the river discharges from 2 to $110 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-3}$ resulted in occasional increases in chlorophyll *a* (up to $6 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ for the previous year) in the boxes corresponding to the coastal parts of the lagoon. However, such high chlorophyll *a* concentration events only occurred for limited periods of time during flooding events; the lagoon returned to prevailing oligotrophic conditions after a few weeks. Therefore, in the south-west lagoon of New Caledonia, hydrodynamics appears as one of the major controlling force with respect to organic matter cycling.

1. Introduction

Dans le Pacifique insulaire, la concentration urbaine des populations est généralement associée au développement d'une « ceinture verte » et à la déforestation. Ceci se traduit notamment par un changement notable des débits liquides et solides qui se déversent dans la zone littorale, entraînant une dégradation du milieu plus ou moins prononcée surtout pendant les événements brefs mais intenses de pluies tropicales [1].

Dans le passé, la grande majorité des travaux de recherche en zone littorale intertropicale a été focalisée sur la description de la biodiversité, l'évaluation des différents stocks biogéochimiques, puis l'analyse des relations entre compartiments biologiques dans le but de quantifier les flux d'énergie au sein de l'écosystème [2, 3]. Suite au

récent et considérable développement des outils informatiques et des traitements numériques, les programmes de recherche se sont orientés vers la modélisation déterministe des mécanismes et des processus interagissant dans le fonctionnement de l'écosystème, en considérant à la fois les forçages externes et les processus hydrodynamiques internes [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

Ainsi dans le cadre du PNRCO (Programme national sur les récifs coralliens), le programme Écotrope (Écosystèmes côtiers tropicaux du Pacifique sous influences terrigènes et anthropiques) de l'IRD (Institut de recherche pour le développement) a lancé un projet visant à caractériser d'une manière couplée, les aspects physiques et biogéochimiques de l'environnement lagunaire proche de Nouméa. Le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie est situé à une latitude comprise entre $22^{\circ}10'$ et $22^{\circ}40'$ Sud, à $1\,500 \text{ km}$

à l'est de l'Australie. Cette zone côtière, d'une superficie de l'ordre de 2 000 km² et de profondeur moyenne de 20 m, est essentiellement représentée par des fonds meubles (95 % de la superficie lagonaire) [12]. Les conditions météorologiques se distinguent par un alizé de sud-est dominant, ponctué par des coups de vent d'ouest. Le vent est pratiquement toujours présent sur le site, parfois soutenu pendant plusieurs semaines. La saison des pluies s'étend de décembre à mars, amenant des dépressions tropicales qui évoluent parfois en cyclones, avec pour conséquence une multiplication ponctuelle par 100 à 300 des apports d'eaux douces, qui alimentent alors le lagon en sels nutritifs. Afin de mettre en évidence l'impact de ces apports limités dans le temps sur le fonctionnement de l'écosystème lagonaire, un modèle à compartiments a été développé pour le lagon calédonien. Nous présentons ici le modèle couplé qui permet de simuler l'évolution saisonnière du cycle biogéochimique du lagon, de tester les interactions entre les différents compartiments de l'écosystème au regard de perturbations comme les pluies tropicales ou encore de simuler les effets d'une élévation régulière des apports chroniques en éléments nutritifs.

2. Matériel et méthodes

La structure de base du modèle en compartiments adapté au lagon calédonien est tirée du modèle L3VMP (*Three layers microbiological processes model*) [13], qui combine les processus verticaux physiques et microbiologiques afin de simuler l'évolution du phytoplancton en termes de carbone et d'azote particuliers sur l'année. Deux couches d'eau mélangées sont représentées au-dessus d'un compartiment sédimentaire. À ce modèle unidimensionnel vertical a été ajoutée une circulation horizontale afin de tenir compte des phénomènes d'advection [14].

Les données météorologiques et de débits des rivières disponibles sont issues soit de mesures effectuées par l'IRD de Nouméa, soit de données recueillies auprès de Météo-France et des services territoriaux d'hydrologie (Division de l'agriculture et de la forêt).

Un modèle hydrodynamique 3D a été développé sur un maillage fin de 1 km avec une discrétisation verticale en sigma sur 21 niveaux à partir d'un modèle 2D [15] (*figure 1*). Le code numérique est un schéma en différences finies selon une méthode ADI (*Alternating direction implicit*), dont l'une des particularités est de traiter automatiquement les bancs découvrants. La discrétisation spatiale du modèle hydrodynamique est de type Arakawa C. La discrétisation du lagon en 27 compartiments pour le modèle biogéochimique tient compte de la bathymétrie du site, de la répartition des sédiments en trois types de fond [16] et des champs de courants issus des simulations hydrodynamiques. Ces simulations établies à partir de huit conditions de vent (alizé de sud-est et vent d'ouest, d'intensités de 4, 8, 10 et 12 m·s⁻¹ représentant 65 % du temps annuel) déterminent les débits aux limites des différentes boîtes. Les flux entrants et sortants dans chaque compartiment

sont traduits en variation du niveau d'eau dans chaque boîte. De proche en proche et jusqu'au dernier compartiment, ces flux advectifs réinitialisent les concentrations des variables d'état à chaque pas de temps (1 j).

La discrétisation verticale utilisée dans le modèle couplé est décrite par une stratification verticale de la colonne d'eau, qui se matérialise par une pycnocline isolant une couche de mélange de surface et une couche de mélange de fond. Une troisième boîte représente la partie sédiment aérobie. Les flux à l'interface eau-sédiment sont générés par le gradient de concentration des différents éléments entre l'eau de fond et l'eau interstitielle du sédiment. Les variables température et hauteur de pycnocline sont calculées respectivement à partir des flux de chaleur à l'interface air-mer et de l'anomalie de l'énergie potentielle. Les compartiments biologiques sont définis dans la *figure 2*. Le compartiment microplanctonique est constitué de phytoplancton et de flagellés hétérotrophes. La production primaire dépend de la disponibilité de la lumière (loi de Beer-Lambert) et des sels nutritifs azotés (nitrate et ammonium). Les termes de perte de biomasse algale sont représentés par la mortalité naturelle et le broutage zooplanctonique, tous deux se traduisant par un flux de sédimentation (cadavres et pelotes fécales) alimentant le compartiment détritique benthique. Les termes sources pour les sels nutritifs sont représentés par l'excrétion des brouteurs, la minéralisation pélagique et la nitrification des détritus, ainsi que les flux issus de l'interface eau-sédiment. Le compartiment sédimentaire présente les mêmes variables d'état décrivant la production primaire et la minéralisation benthique. La différence majeure réside dans le fait que le broutage benthique se distingue par l'activité trophique des organismes suspensivores, qui s'alimentent dans la colonne d'eau (filtration), et des déposivores qui prélèvent leur nourriture directement dans le sédiment. Le compartiment détritique du sédiment recueille les pelotes fécales issues du broutage et la matière pélagique provenant de la sédimentation verticale. Il subit les processus bactériens de minéralisation et de nitrification ainsi que la remise en suspension des particules liée au vent et au courant [17].

Dans chaque compartiment, les équations biogéochimiques du modèle calculent les concentrations des variables d'état selon une résolution en différences finies, explicitement au pas de temps de 1 j. En fonction des conditions journalières de vent, les concentrations sont réinitialisées à partir des échanges horizontaux entre les compartiments physiques calculés sous la forme de débits interboîtes par le modèle hydrodynamique.

3. Résultats

Les fichiers correspondant aux conditions hydrodynamiques, variables chaque jour selon les conditions de vent, permettent le calcul du flux hydrique ainsi que des temps de résidence pour chaque boîte et donc pour l'ensemble du lagon. Globalement, le renouvellement des

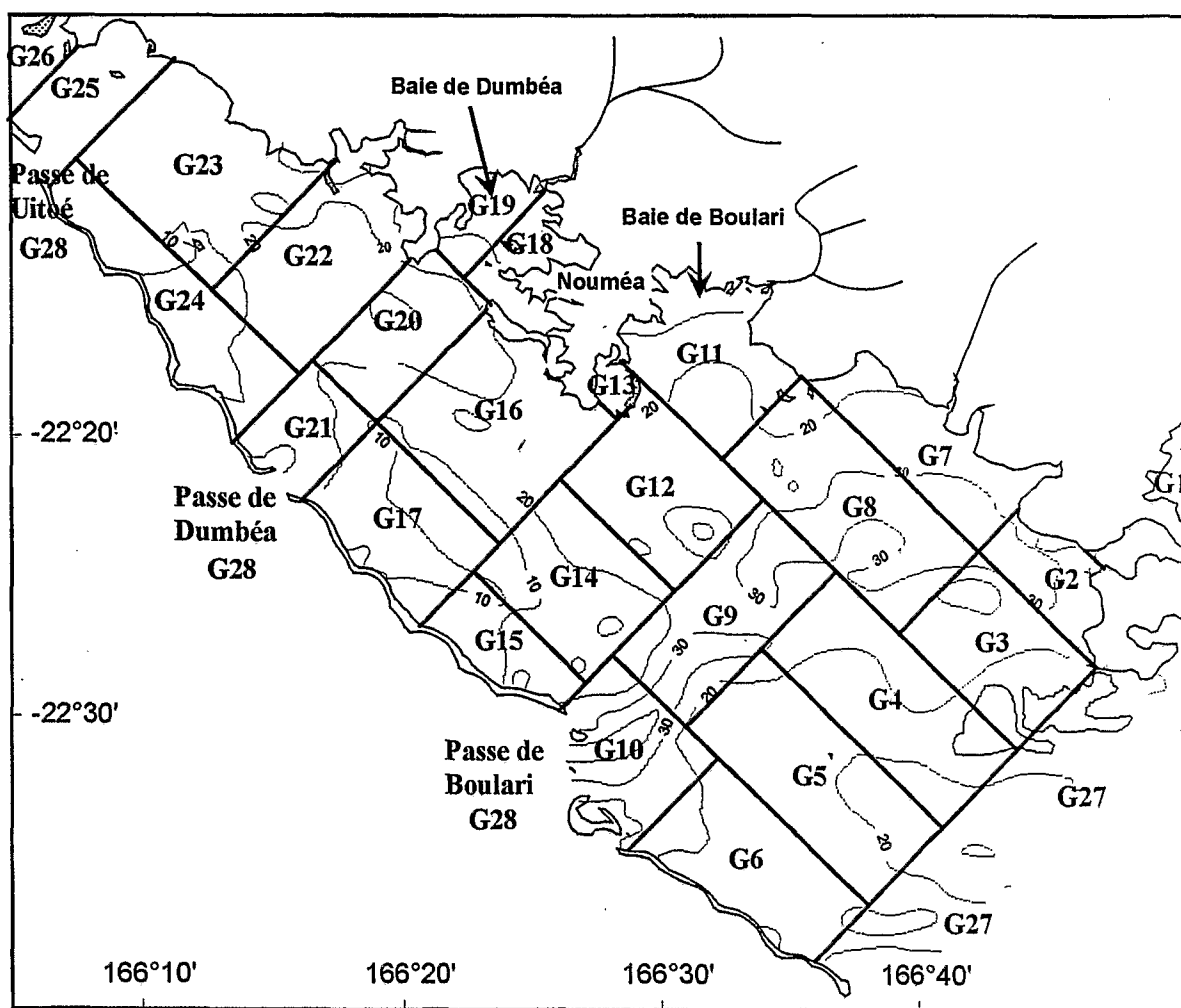


Figure 1. Lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie et discrétisation spatiale en compartiments.

eaux est particulièrement rapide dans le lagon sud-ouest, quel que soit le type de vent, avec en moyenne et sur l'ensemble du lagon un temps de résidence d'environ 11 j.

Toutes les simulations suivantes sont annuelles et débutent en hiver austral (1^{er} août). Les années simulées concernent les périodes 1989–1990 et 1997–1998, pour lesquelles les fichiers de forçages externes sont disponibles. Nous présentons l'évolution spatiale et temporelle de la concentration en chlorophylle *a* (chl_a) dans la colonne d'eau, biomasse dont la variabilité traduit le processus de production primaire en fonction des apports externes de sels nutritifs, de la dispersion par advection-diffusion, de l'atténuation de la lumière et, directement ou non, de l'ensemble des processus biologiques et physiques verticaux introduits dans le système d'équations. Les simulations présentées correspondent à un mélange total de la surface au fond en raison de la présence toute l'année du vent qui homogénéise la totalité de la colonne d'eau. Des profils verticaux récemment mesurés à l'aide d'une sonde CTD/fluorimétrie, confirment l'homogénéité verticale de la colonne d'eau sur l'essentiel du site d'étude.

La figure 3 met en évidence l'évolution temporelle mesurée de la concentration en chl_a dans les eaux lagonaires. En effet, la zone centrale du lagon située devant la presqu'île de Nouméa a été le site privilégié d'analyses hebdomadaires en chl_a sur une longue période [18]. Les mesures effectuées en 1979–1980 varient entre 0,1 et 0,8 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ avec une moyenne de 0,4 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

La figure 4 représente le même type de mesures de chl_a pélagique, mais elles correspondent à des valeurs mensuelles (ronds blancs et noirs) issues du programme Écotrope et disponibles pour l'intervalle août 1997–juillet 1998. Ces données récentes sont confrontées aux courbes d'évolution journalière des concentrations phytoplanctoniques simulées pour la même année météo 1997–1998 dans deux compartiments distincts du lagon. Notre choix s'est porté sur un compartiment lagonaire (G21) et un second situé dans une baie côtière, directement influencée par les arrivées d'eau douce de la rivière Dumbéa (G19). Les simulations standard représentent des valeurs centrées autour de 0,3 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ avec des pics de variation haute fréquence. Dans l'ensemble du compartiment péla-

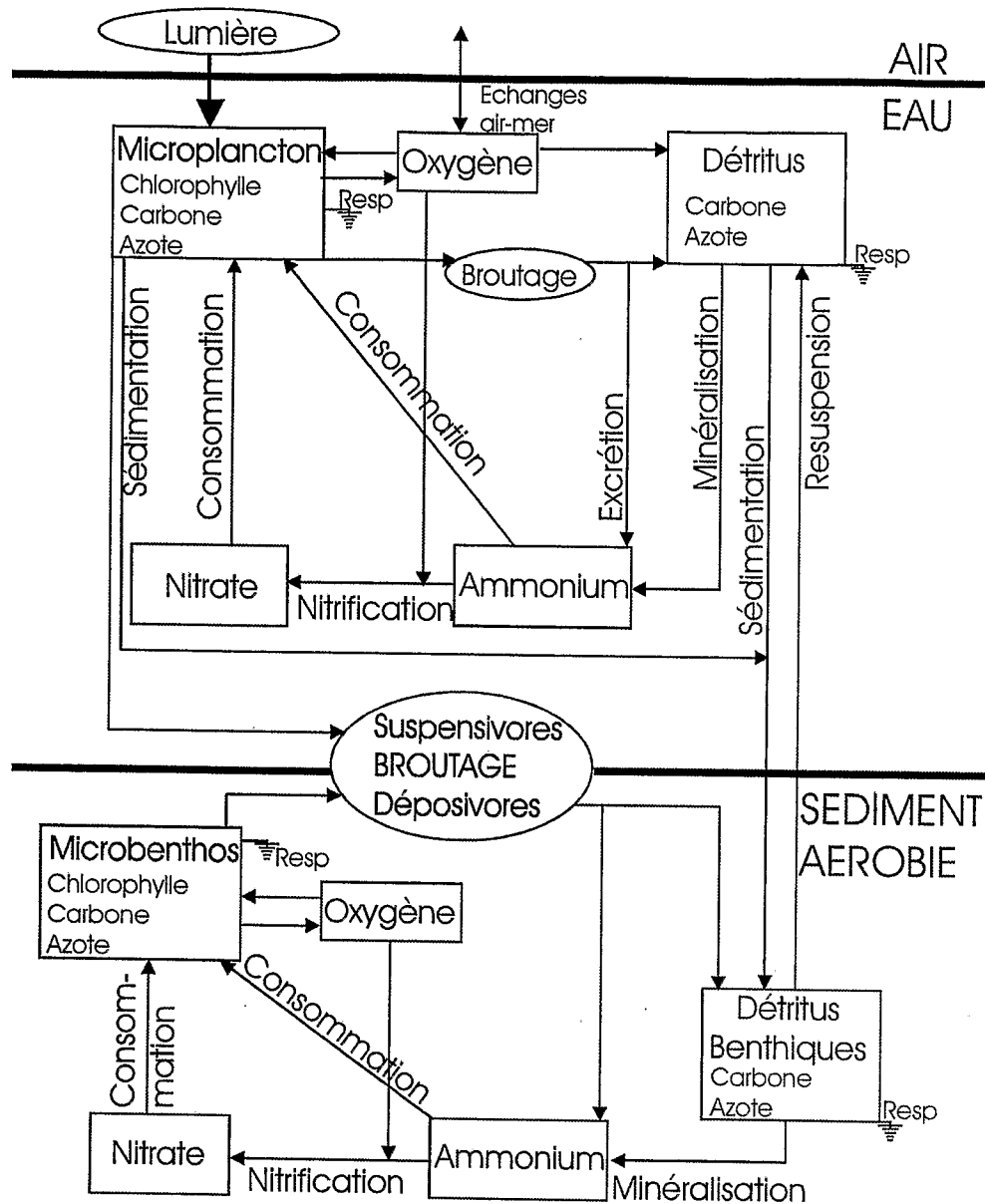


Figure 2. Schéma conceptuel de la modélisation biogéochimique du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. Cas d'une colonne d'eau non stratifiée, voir texte.

gique du lagon, la biomasse phytoplanctonique présente des concentrations simulées en chl_a rarement supérieures à $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Les valeurs varient essentiellement dans un intervalle de 0,2 à $0,4 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Pendant la saison des pluies (janvier à mars pour l'année de simulation), la boîte côtière (G19) réagit clairement aux épisodes de crue par une augmentation significative mais ponctuelle de la concentration en chl_a. L'impact des eaux douces sur la boîte plus éloignée de la côte (G21) est moins significatif. L'écart des concentrations simulées entre G19 et G21 de 0,1 à $0,2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ est du même ordre de grandeur que la différence entre les mesures d'une même campagne aux deux stations (baie, lagon), la station la plus côtière présentant pratiquement toujours des valeurs plus fortes (figure 4).

La figure 5 montre l'évolution annuelle des concentrations simulées en chl_a pour les compartiments G12 (lagonaire) et G19 (côtier) en fonction des conditions de vent (direction et vitesse) et pour l'année 1989–1990. Pendant cette période, une situation météorologique particulière a été retenue pour les simulations (intervalle B, voir plus loin). Mais globalement, la direction du vent (figure 5.d) indique une valeur de base de 110° (alizé de sud-est) perturbée par des coups de vent de 270° (vent d'ouest). La vitesse du vent moyennée sur l'année (figure 5.c) est de $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et, en moyenne journalière, toujours supérieure à $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La période A indique le moment où les apports d'eau douce dans le lagon sont les plus importants (saison des pluies). Contrairement à la boîte G19 qui réagit aux

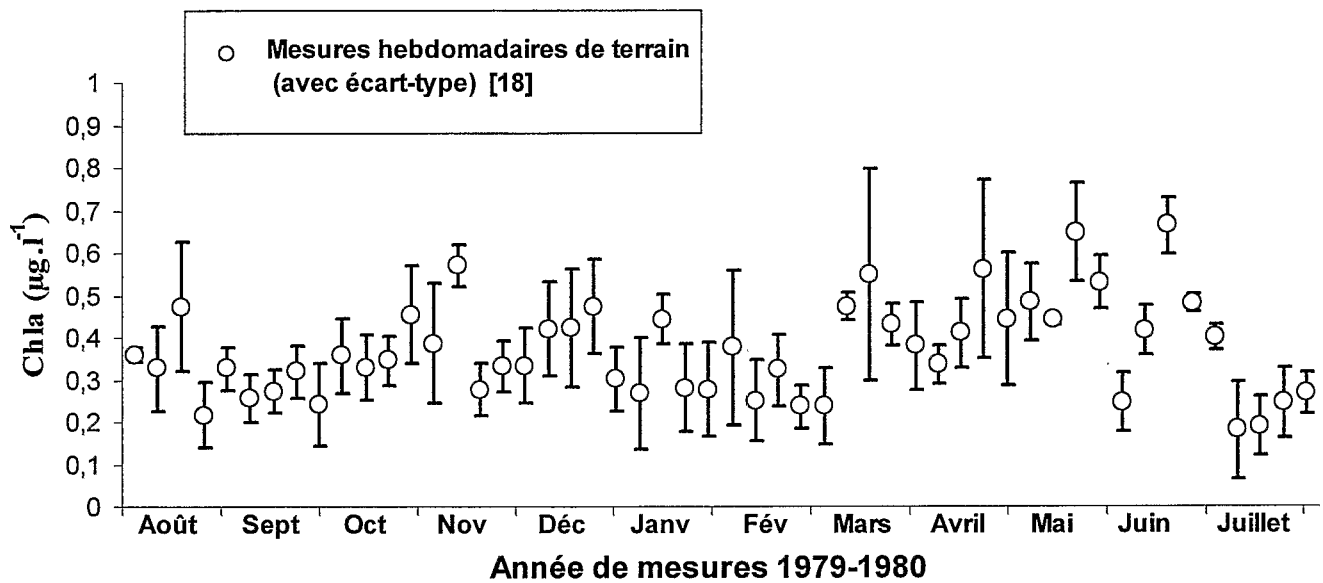


Figure 3. Évolution saisonnière de la concentration en chlorophylle a mesurée hebdomadairement à la station côtière en 1979–1980 (Binet et Leborgne, 1996, [18]).

apports continentaux, la biomasse de la boîte G12 n'augmente pas de façon significative.

La période B présente une condition d'alizé soutenu durant plusieurs semaines (110° à $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Pour la boîte typiquement lagonaire (G12), la concentration en chla simulée (figure 5.b) réagit au fort coup d'alizé par une augmentation de la biomasse qui se maintient vers $0,55 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (figure 5.c). La circulation générale dans la partie sud-est du lagon pendant cette période d'alizé est décrite par une dérive des masses d'eau en direction du nord [15].

Le déplacement des eaux côtières moins oligotrophes (G7, G11) vers les boîtes centrales du lagon (G12 notamment) a pour conséquence une légère augmentation des sels nutritifs, qui se traduit par un accroissement relatif de la productivité. Pendant cette même période B, la boîte G19, plus abritée, retrouve rapidement les bas niveaux de concentration en chla qui prévalaient avant les épisodes de crue ($0,30$ à $0,49 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; figure 5.a). Ainsi, l'ensemble des zones du lagon ne présente pas un comportement uniforme aux forçages externes.

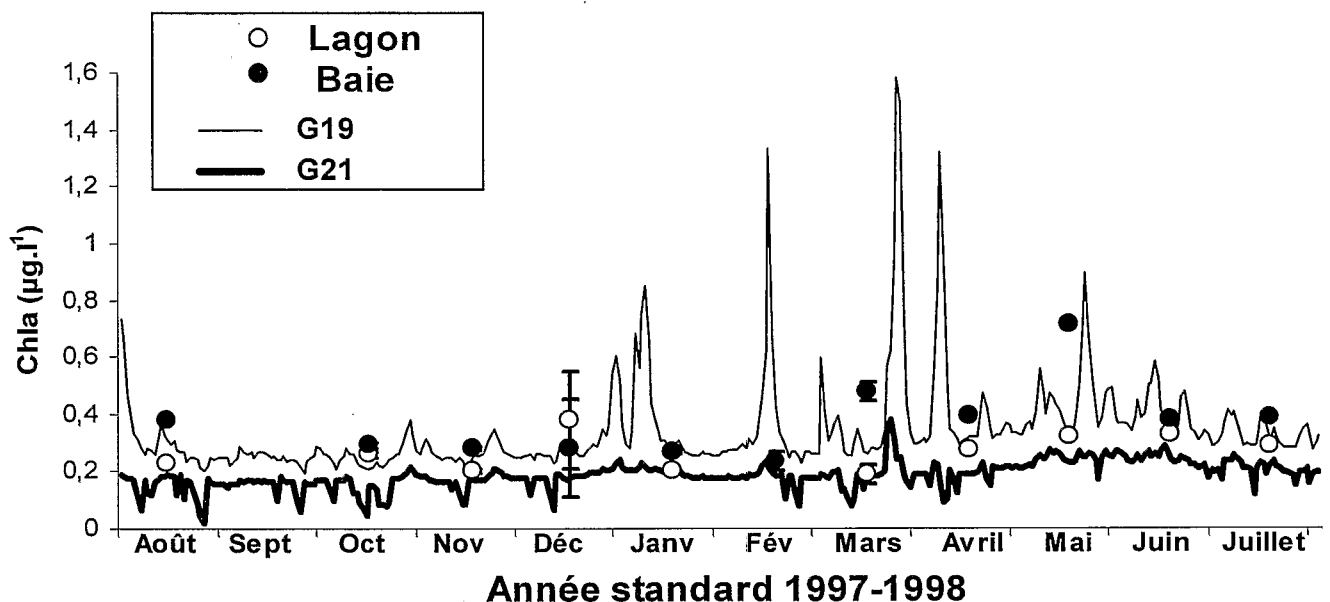


Figure 4. Évolution spatiale des courbes de concentration en chlorophylle a simulée et mesurée mensuellement dans une boîte côtière (G19) et une boîte lagonaire (G21) pour une même année météo 1997–1998.

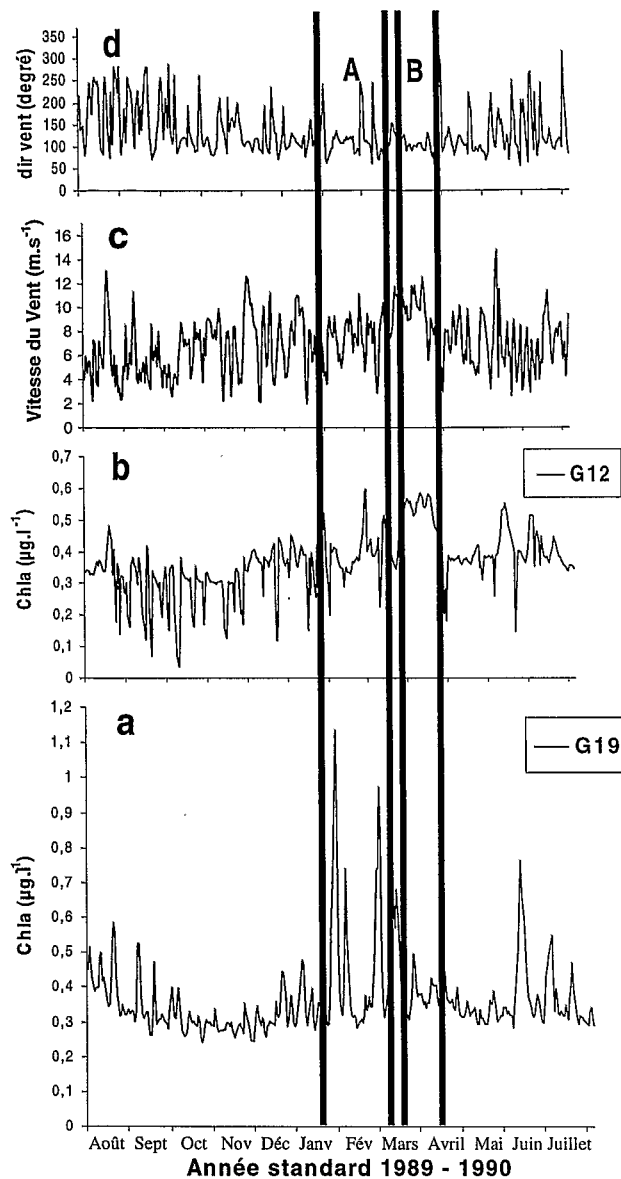


Figure 5. Évolution temporelle des courbes de concentration en chlorophylle a simulée dans une boîte côtière G19 (a) et une boîte typiquement lagunaire G12 (b) en fonction de la vitesse (c) et de la direction du vent (d) pour l'année standard 1989–1990.

Intervalle A : principaux apports d'eau douce ; intervalle B : alizé soutenu plusieurs semaines.

Dans le but d'orienter ce travail de modélisation vers l'étude des influences terrigènes et anthropiques sur le milieu lagunaire calédonien, nous avons simulé une eutrophisation sous la forme d'un apport croissant de nitrate par les eaux des rivières. La *figure 6* représente l'évolution à long terme sur 20 ans de la chla dans le compartiment G19 directement influencé par la rivière Dumbéa. Les mêmes forçages physiques sont reproduits chaque année en utilisant les données météorologiques et de débits de 1997–1998, et avec une incrémentation journalière des concentrations en nitrate de $0,015 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$ dans les eaux douces (*figure 6.a*). On observe d'année en année une

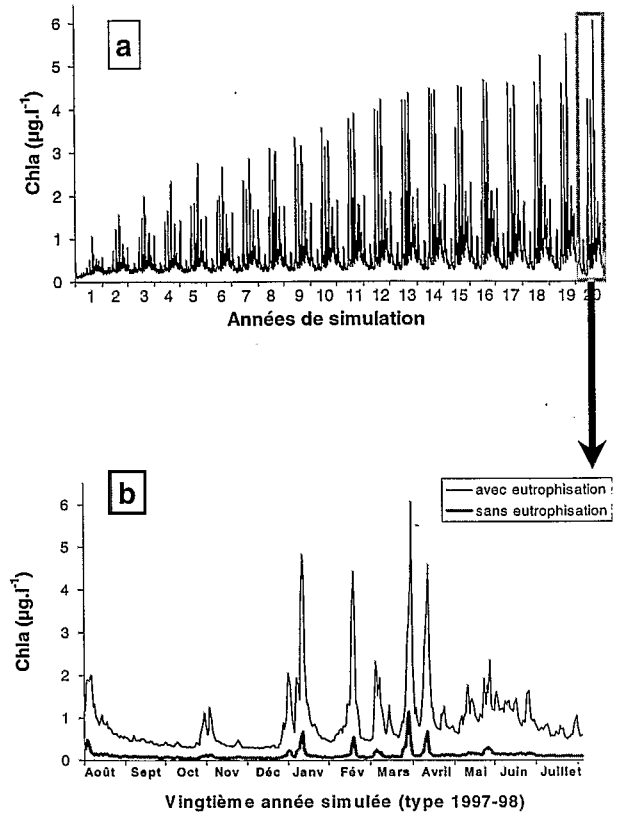


Figure 6. Simulation sur 20 ans de la chlorophylle a dans le compartiment G19 soumis à un apport croissant d'azote ($+0,015 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{j}^{-1}$) (a) et « zoom » sur la vingtième année (b). La simulation standard (courbe large plus claire) est donnée à titre de comparaison.

augmentation progressive de pics de concentration en chla pendant les périodes annuelles de fortes pluies, et un retour rapide à des valeurs inférieures à $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ en dehors de ces phénomènes climatiques. La *figure 6.b* représente la vingtième année de simulation. L'évolution de la concentration au bout de 20 ans sans apport supplémentaire de nitrate est donné à titre de comparaison. Cette contribution externe correspondant à un maximum de concentration de $110 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ pour les eaux douces en fin de simulation, se traduit en baie de Dumbéa par une augmentation du pic de chla, atteignant $6,05 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ lors de la saison des pluies de janvier à mars la dernière année simulée. Après les crues, le retour à des concentrations faibles s'effectue en moins de 2 semaines.

4. Discussion, conclusion

En dépit du décalage temporel entre les seules données hebdomadaires disponibles (1979–1980) et les fichiers de météorologie et d'hydrologie nécessaires pour le développement des simulations (1989–1990 et 1997–1998), les résultats calculés pour la chla pélagique révèlent un comportement de même nature que celui décrit par les mesures. Nous avons pu récemment valider les simulations par

une comparaison modèle–mesures biogéochimiques mensuelles de terrain pour une même année météorologique (1997–1998).

Ces simulations reproduisent des valeurs du même ordre de grandeur et une variation haute fréquence des concentrations en chla (figure 4). L'essentiel de la variabilité temporelle est expliqué par les apports liés aux pluies et dans une moindre mesure à la dispersion générés par les forçages météorologiques. Malgré la distance qui sépare les boîtes de baies côtières des compartiments typiquement lagonaires du fait de l'étendue du site d'étude, la différence de concentration en chla est faible. Seuls les compartiments les plus proches de la côte et des embouchures de rivières réagissent de manière significative aux apports de sels nutritifs par les eaux douces. Cette contribution en azote externe n'est jamais importante en raison de la concentration réduite des éléments nutritifs ($< 10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ de nitrate), mais également en raison des faibles débits de ces cours d'eau (niveau moyen annuel proche de $5 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ pour la rivière Dumbéa). Par comparaison, le Rhône présente en moyenne sur l'année des concentrations de $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ et des débits de $1\,700 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ [19]. Ainsi, l'ensemble du lagon conserve globalement des faibles concentrations en chla toute l'année, limité par la disponibilité en sels nutritifs. L'influence de ces apports exogènes sur l'environnement côtier reste généralement très ponctuelle dans le temps. L'impact sur le développement biologique est réduit à quelques jours et localisé aux zones les plus proches des estuaires.

Outre la limitation par la faible disponibilité en nutriments, le fonctionnement du milieu pélagique lagonaire dans son ensemble est largement régulé par les processus physiques. Le phénomène de marée peut être négligé par rapport aux courants générés par le vent, et les mouvements d'advection dominant amplement les processus diffusifs. Les conditions météorologiques de vent entraînent un hydrodynamisme très actif qui se traduit par des temps de renouvellement des eaux assez rapides. Les apports de sels nutritifs sont rapidement dispersés. L'effet du vent peut avoir des conséquences spatialement différentes selon la configuration géographique du site. Ainsi une boîte côtière abritée par les reliefs de l'île principale va réagir différemment d'une zone soumise directement au vent.

Références

- [1] Malone T.C., Wright L.D., Planning today for the coastal research of tomorrow, *EOS* 75 (1994) 243–244.
- [2] Chardy P., Clavier J., An attempt to estimate the carbon budget for the south-west lagoon of New-Caledonia, *Proc. 6th Int. Coral Reef Symp., Australia* 2 (1988) 541–546.
- [3] Boucher G., Clavier J., Garrigue C., Oxygen and carbon dioxide fluxes at the water-sediment interface of a tropical lagoon, *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 107 (1994) 185–193.
- [4] Billen G., A budget of nitrogen recycling in North Sea sediments of the Belgian coast, *Estuar. Coast. Mar. Sci.* 7 (1978) 127–146.
- [5] Steele J.H., *The Structure of Marine Ecosystems*, Harvard University Press, Cambridge, 1974.

La simulation effectuée sur 20 ans confirme la stabilité du modèle et montre que la production primaire est faible. En effet, cette simulation génère des valeurs de biomasse en chla reproductibles et pratiquement toujours inférieures à $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (figure 6.b, courbe sans eutrophisation). Lors de l'exercice d'eutrophisation du milieu par les eaux douces, les concentrations finales en éléments azotés injectés dans le modèle ($110 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) sont du même ordre de grandeur que la concentration mesurée dans le Rhône [19]. Ce forçage progressif sur deux décennies ($0,015 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) paraît tout à fait réaliste s'il est comparé aux évolutions à long terme observées pour la Seine [20]. Notons que ce type de suivi sur une longue période n'est pas disponible dans les pays insulaires du Pacifique, mais l'explosion démographique qu'ils subissent entraînent de très fortes concentrations en éléments azotés dans certains lagons d'îles hautes ($> 350 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ dans le lagon fidjien [21]).

L'ensemble des simulations indique que l'écosystème pélagique du lagon calédonien réagit rapidement et de façon très fugace à tout apport externe. Le modèle a ainsi pu montrer que l'impact d'une intensification des apports ne se répercute que localement et n'excède pas deux semaines. Le rapide retour au niveau de base s'explique par la ponctualité des apports en eaux douces et le rôle prépondérant de l'hydrodynamisme dans la dispersion de ces apports.

Pour cet environnement côtier tropical calédonien, il paraît donc peu probable d'arriver, même à moyen terme, à une eutrophisation généralisée du système lagonaire, et c'est donc plutôt à une échelle très localisée que des conditions d'eutrophisations significatives pourront se développer en liaison avec l'apparition de structures hydrodynamiques spécifiques et d'extension limitées.

Remerciements : Ce travail s'inscrit dans le cadre du Programme national environnement côtier (PNEC, ex-PNRCO). Nos remerciements s'adressent aux responsables et participants à ces programmes, ainsi qu'aux deux critiques anonymes pour leurs commentaires avisés.

- [6] Billen G., Lancelot C., *Modelling benthic nitrogen cycling in temperate coastal ecosystems*, Blackburn T.H., Sørensen, Scope, Wiley & Sons, New York, 1988, pp. 341–378.
- [7] Fransz H.G., Mommaerts J.P., Radach G., Oxygen and carbon dioxide fluxes at the water-sediment interface of a tropical lagoon. Ecological modelling of the North Sea, *Neth. J. Sea Res.* 28 (1991) 67–140.
- [8] Arias-Gonzales E., Fonctionnement trophique d'un écosystème récifal : secteur de Tiahura, île de Moorea, Polynésie française, thèse, université de Perpignan, 1993, 250 p.
- [9] Niquil N., Étude par la modélisation du fonctionnement et de la stabilité du réseau trophique planctonique d'un lagon d'atoll (Takapoto, Polynésie Française), thèse, université de Perpignan 1998, 235 p.
- [10] Furnas M.J., Mitchell A.W., Nutrient inputs into the central Great Barrier Reef (Australia) from subsurface intrusions of Coral Sea waters: a two dimensional displacement model, *Cont. Shelf Res.* 16 (1996) 1148.

- [11] Guinotte J., A model for predicting coral reef habitat in the tropical and Western Atlantic and Eastern Pacific, Master's thesis, University of Kansas, 1999.
- [12] Testau J.L., Conand F., Estimation des surfaces des différentes zones du lagon de Nouvelle-Calédonie, Publ Orstom, Nouméa, 1983.
- [13] Tett P., A three layer vertical and microbiological processes model for shelf seas, Proudman Oceanographic Laboratory, Report 14, 1990, 85 p.
- [14] Tett P., Grenz C., Designing a simple microbiological-physical model for a coastal embayment, *Vie Milieu* 44 (1) (1994) 39–58.
- [15] Douillet P., Tidal dynamics of the south-west lagoon of New-Caledonia: observations and 2D numerical modelling, *Oceanol. Acta* 21 (1998) 69–79.
- [16] Chardy P., Chevillon C., Clavier J., Major benthic communities of the south-west lagoon of New Caledonia, *Coral Reefs* 7 (1988) 69–75.
- [17] Raillard O., Étude des interactions entre les processus physiques et biologiques intervenant dans la production de l'huître *Crassostrea gigas* du bassin de Marennes-Oléron : essai de modélisation, thèse, université de Paris-VI, 1991, 215 p.
- [18] Binet D., Leborgne R., Dix ans d'observations sur l'hydrologie et le pélagos du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie, Orstom, Rapp. Sci. Tech., Sci. Mer, Biol. Mar., 1996, 37 p.
- [19] Moutin T., Raimbault P., Golterman H.L., Coste B., The input of nutrients by the Rhône river into the Mediterranean Sea: recent observations and comparison with earlier data, *Hydrobiologia* 373 (1998) 246.
- [20] Menesguen A., Guillaud J.F., Aminot A., Hoch T., Modelling the eutrophication process in a river plume: The Seine case study (France), *Ophelia* 42 (1995) 205–225.
- [21] Naidu S. et al., Water quality studies on selected South pacific lagoons, UNEP Regional Seas Reports and Studies n° 136, 1991, Unep, Nairobi, 100 p.

