

## Interprétation du fonctionnement écologique d'un lagon corallien par modélisation hydrodynamique : influence des apports terrigènes

Clavier J. et P. Douillet

ORSTOM, Centre de Brest, BP70, 29280 Plouzané, France

La croissance démographique associée au développement économique à l'échelle de la planète est responsable de modifications majeures de l'environnement marin côtier. Cette pression sur le milieu naturel est tout particulièrement sensible en zone tropicale. La compréhension des mécanismes mis en jeu dans les écosystèmes est indispensable à l'évaluation des risques écologiques et économiques, condition nécessaire à la réalisation d'un développement durable. Les lagons de Nouvelle-Calédonie sont parmi les plus étendus du monde. Ils se caractérisent par une double influence récifale et terrigène ; cette dernière résulte notamment des activités minières qui provoquent un important transit de particules fines vers le domaine marin. Dans le cadre d'une approche multidisciplinaire, les masses d'eau du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie (2000 km<sup>2</sup>) ont été étudiées en tant que vecteurs des matières particulaire et dissoute pour aider à la compréhension du fonctionnement bioécologique du lagon. Nous allons résumer la démarche suivie pour cette modélisation, puis illustrer son intérêt pour l'interprétation de la structure des biotopes et des biocénoses en milieu côtier.

La modélisation hydrodynamique repose à la fois sur le développement de méthodes numériques et la mise en oeuvre d'un réseau de mesures (courants, hauteurs de marée et vent). Deux modèles, bi- et tridimensionnel permettent le calcul, dans le temps et dans l'espace, des courants instantanés engendrés par les deux principales variables forçantes : la marée et le vent.

Le modèle bi-dimensionnel est adapté au calcul des courants dus à la marée. Il est basé sur les équations de Saint Venant qui sont obtenues par intégration sur la verticale des équations de Navier-Stokes dans le cas d'un océan homogène avec les hypothèses classiques de Boussinesq et de pression hydrostatique (Bowden, 1983). A partir de ces contraintes les équations de mouvement sont les suivantes :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - fV = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + N_h \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_{xb}}{\rho_0 (h + \zeta)}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + N_h \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_{yb}}{\rho_0 (h + \zeta)}$$

couplées avec l'équation de continuité :

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial((h + \zeta)U)}{\partial x} + \frac{\partial((h + \zeta)V)}{\partial y} = 0$$

où  $\zeta$  est la valeur instantanée du niveau de la mer,  $h$  la profondeur,  $U$  et  $V$  sont les deux composantes de la vitesse moyennée par rapport à la verticale,  $f$  la force de Coriolis,  $\rho_0$  la densité de la mer,  $g$  l'accélération gravitationnelle,  $\tau_{xb}$ ,  $\tau_{yb}$  sont les composantes du frottement au fond paramétrisées par les lois :

$$\tau_{xb} = g \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{K_r^2 (h + \zeta)^{1/3}} U \quad \tau_{yb} = g \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{K_r^2 (h + \zeta)^{1/3}} V$$

où  $K_r$  est le coefficient de Strikler

Le modèle numérique est un schéma en différences finies utilisant une méthode A.D.I. (Alternating Direction Implicit). Ce code développé par Salomon (Lazure & Salomon, 1991) inclut le



traitement automatique des bancs découvrants. Il a été choisi pour son bon rapport robustesse rapidité d'exécution. La discrétisation spatiale des équations est basée sur une grille de type Arakawa C légèrement modifiée en ce qui concerne les profondeurs qui sont à la même position que les composantes de la vitesse.

Le modèle tridimensionnel est plus particulièrement utilisé pour calculer les courants dûs au vent. Il résout le jeu complet des équations de Navier-Stokes simplifiées par les hypothèses de Boussinesq et de pression hydrostatique. Un changement du système de coordonnées est effectué de manière à maintenir un nombre constant de points de grille sur la colonne d'eau pendant la discrétisation :

$$(x, y, z, t) \rightarrow (x, y, \sigma, t) \text{ où } \sigma = (z+h)/(\zeta+h)$$

Le système d'équation s'écrit alors :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w^* \frac{\partial u}{\partial \sigma} - fv = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{(\zeta+h)^2} \frac{\partial \left[ N_z \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right]}{\partial \sigma} + F_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w^* \frac{\partial v}{\partial \sigma} + fu = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{(\zeta+h)^2} \frac{\partial \left[ N_z \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right]}{\partial \sigma} + F_y$$

$$p = g\zeta + (\zeta+h) \int_{\sigma}^1 b \, d\sigma$$

l'équation de continuité :

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial((h+\zeta)u)}{\partial x} + \frac{\partial((h+\zeta)v)}{\partial y} + (\zeta+h) \frac{\partial w^*}{\partial \sigma} = 0$$

$$\text{où } w = (\zeta+h)w^* + \sigma \left[ \frac{\partial \zeta}{\partial t} - U \left[ \frac{\partial h}{\partial x} - \sigma \frac{\partial(\zeta+h)}{\partial x} \right] - V \left[ \frac{\partial h}{\partial y} - \sigma \frac{\partial(\zeta+h)}{\partial y} \right] \right]$$

où  $u, v$  et  $w$  sont les composantes de la vitesse dans le système de coordonnées  $(x, y, z, t)$  ;  $U$  et  $V$  sont les composantes horizontales du courant moyen sur la verticale et  $N_z$  est le coefficient d'échange turbulent vertical ;  $F_x$  et  $F_y$  sont les termes de diffusion.

La transformation des termes de diffusion devenant très complexe dans le nouveau système de coordonnées, ils sont approximés par :

$$(F_x, F_y) = N_h \nabla^2 (u, v)$$

Le coefficient d'échange turbulent est calculé en supposant un équilibre local entre la production et la dissipation de l'énergie turbulente :

$$N_z = (\zeta+h) U^* \sigma (1-\sigma)^{1/2} (1+10R_i)^{-1/2}$$

où  $R_i$  est le nombre de Ridcharson

La résolution des équations est basée sur la séparation des modes externes et internes (Lazure & Salomon, 1991 ; Blumberg & Mellor, 1981). L'avantage de cette méthode est de permettre au modèle tridimensionnel de calculer les courants sans la limitation du pas de temps imposée par la propagation des ondes. Les deux modèles travaillent en parallèle. Le modèle bidimensionnel, décrit ci-dessus, calcule l'élévation de la surface libre et la fournit au modèle tridimensionnel. Ce dernier résout les équations complètes. La discrétisation spatiale des équations est la même que pour le modèle bidimensionnel. La discrétisation en temps est du type Leap-Frog.

Les deux modèles ont été validés par comparaison des calculs et des mesures de terrain. Ainsi les amplitudes et les phases des ondes  $M_2$  et  $S_2$  et les courants induits ont été confrontés à la réalité. Les résultats montrent un parfait accord entre les modèles et les mesures. A partir des courants instantanés, le courant résiduel lagrangien a été calculé (figure 1). Celui-ci représente le déplacement à long terme des particules sous l'influence de la marée. Les courants dûs aux alizés de sud-est ont été déterminés par le modèle tridimensionnel sur dix niveaux de profondeur. Les résultats montrent la structure tridimensionnelle de la circulation.

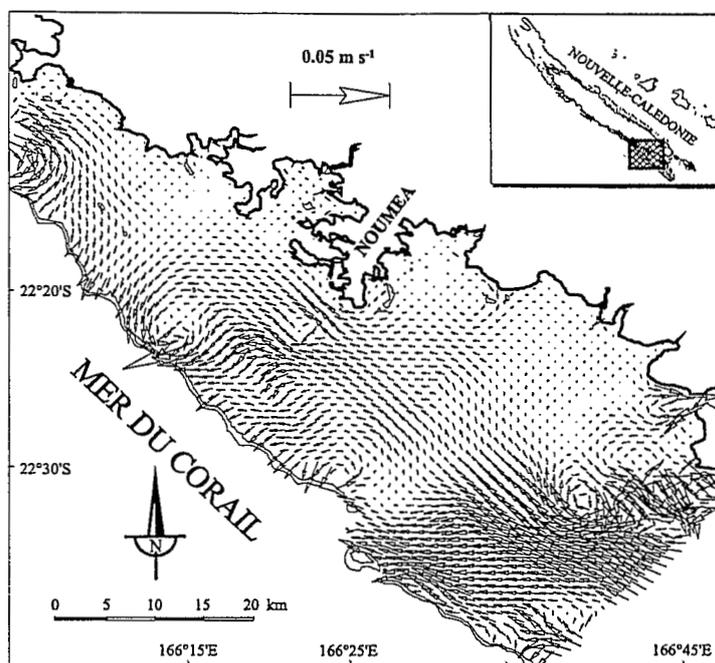


figure 1 : Courants résiduels lagrangiens le l'onde de marée  $M_2$  caractérisant le déplacement à long terme des particules.

D'autre part, trois principales communautés benthiques correspondant aux fonds envasés, aux fonds de sables gris et aux fonds de sables blancs (respectivement 35, 50 et 15 % de la superficie du lagon) ont été identifiées (Chardy *et al.*, 1988) (figure 2). Les peuplements de micro- et de méiobenthos des fonds envasés répartis près du littoral et dans les zones les plus profondes présentent des caractéristiques nettement inférieures à celles observées sur les deux autres types de fonds (tableau 1). Les biomasses de macrobenthos sont moins caractéristiques (Chardy & Clavier, 1988). En revanche, un net gradient de structure trophique peut être observé depuis les fonds envasés peuplés principalement par les suspensivores (75 % de la biomasse totale), jusqu'aux fonds blancs d'arrière récif où les déposivores de surface dominent (45 % de la biomasse). Les paramètres planctoniques diffèrent également sur les trois parties du lagon avec une prédominance des fonds envasés côtiers (tableau 1).

Cette distinction en trois zones, établie sur des bases taxinomiques, reflète des fonctionnements bioécologiques différents (Boucher & Clavier, 1990 ; Boucher *et al.*, 1994a ; Boucher *et al.* 1944b ; Clavier *et al.*, 1995). L'activité métabolisme benthique croît depuis les fonds envasés jusqu'aux fonds de sables blancs. Les fonds envasés assurent la plus faible production primaire mais reçoivent le plus important flux de matériel particulaire. Les caractéristiques biogéochimiques des fonds de sables blancs sont inverses alors que les fonds de sables gris occupent une position intermédiaire (tableau 1). De fait, le rapport production/respiration benthique montrent que les fonds de sables blancs et de sables gris peuvent être qualifiés d'autotrophes alors que les fonds

envasés nécessitent un apport externe pour couvrir leurs besoins métaboliques ; il est notamment assuré par le matériel particulaire véhiculé par la masse d'eau.

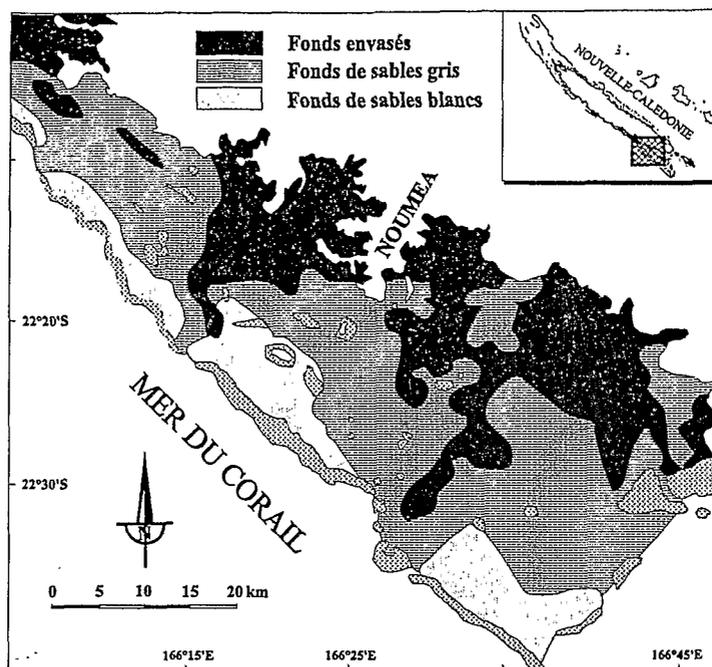


figure2 : Répartition des trois grandes subdivisions écologiques du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie (d'après Chardy *et al.*, 1988).

Tableau 1 . Caractéristiques des paramètres environnementaux dans les trois parties du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. L'erreur standard est indiquée entre parenthèses.

	Fonds envasés	Fonds de sables gris	Fonds de sables blancs
<b>Domaine pélagique</b>			
Chlorophylle ( $\text{mg m}^{-3}$ )	0.49 (0.24)	0.45 (0.24)	0.33 (0.12)
Biomasse de zooplancton ( $\text{mgPMSSC m}^{-3}$ )	12.8 (7.9)	9.4 (5.6)	5.0 (3.6)
Carbone organique particulaire ( $\text{g m}^{-3}$ )	0.25 (0.18)	0.23 (0.12)	0.20 (0.12)
<b>Domaine benthique</b>			
ATP ( $\text{ng cm}^{-2}$ )	155 (31)	348 (153)	521 (259)
Meiofaune ( $\text{ind } 10\text{cm}^{-2}$ )	1224 (520)	1732 (450)	3229 (450)
Macrobenthos ( $\text{g m}^{-2}$ )	12.9 (2.5)	35.7 (7.5)	8.1 (1.7)
Taux de particules $<63\mu\text{m}$	45.9 (6.0)	9.0 (0.7)	5.3 (1.2)
<b>Flux de carbone à l'interface eau sédiment</b>			
Sédimentation nette ( $\text{g m}^{-2} \text{j}^{-1}$ )	1.21 (0.70)	0.65 (0.24)	0.55 (0.24)
Production primaire (P ; $\text{g m}^{-2} \text{j}^{-1}$ )	0.09 (0.02)	0.54 (0.05)	0.60 (0.05)
Respiration (R ; $\text{g m}^{-2} \text{j}^{-1}$ )	0.23 (0.01)	0.57 (0.05)	0.55 (0.02)
Rapport P/R	0.39	0.95	1.09

Le rapprochement des figures 1 et 2 permet d'interpréter cette structure par l'hydrodynamique. Les fonds envasés correspondent aux courants résiduels les plus faibles qui

autorisent une hypersédimentation des particules fines terrigènes, notamment des rejets miniers qui, par les sels métalliques qu'ils contiennent, peuvent être à l'origine des activités métaboliques réduites. Les fonds de sables gris subissent également une influence terrigène qui les enrichit mais les courants ne permettent pas le dépôt des particules fines qui sont évacuées par les passes. Enfin, les fonds de sables blancs correspondent à l'influence des eaux océaniques transitant par-dessus le récif et interdisant les apports terrigènes. Ces eaux, oligotrophes mais claires, permettent le développement d'une forte production benthique assurant l'essentiel des besoins énergétiques du milieu.

L'étude écologique intégrée qui a été entreprise dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie permet donc d'interpréter les caractéristiques d'un milieu côtier en fonction des résultats d'un modèle hydrodynamique. Outre leur intérêt local, les résultats obtenus fournissent d'intéressants éléments pour la compréhension du fonctionnement des écosystèmes tropicaux. Il sera particulièrement fructueux de poursuivre cette démarche par la modélisation des couplages entre la physique, la biogéochimie et la biologie pour aboutir à un outil prédictif. L'aménagement et la gestion des zones côtières constituent en effet un enjeu économique important qui doit bénéficier d'une assise scientifique solide, en dépit de la complexité des systèmes écologiques qui sont parmi les plus divers et les productifs de la planète.

### *Références bibliographiques*

- Blumberg et Mellor, 1981. *A numerical calculation of the circulation in the Gulf Mexico*. Dynalysis of Princeton, N.J., Rep. 66, 153.
- Boucher G. & J. Clavier, 1990. Contribution of benthic biomass to overall metabolism in New Caledonia lagoon sediments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 64: 271-280.
- Boucher G., J. Clavier. & C. Garrigue, 1994a. Estimation of bottom ammonium affinity in the New Caledonian lagoon. *Coral Reefs*, 13 : 13-19.
- Boucher G., J. Clavier & C. Garrigue, 1994. Oxygen and carbon dioxide fluxes at the water-sediment interface of a tropical lagoon. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 107 : 185-193.
- Bowden K. F., 1983. *Physical Oceanography of Coastal Waters*. Ellis Horwood Series in Marine Science, 302.
- Chardy P. & J. Clavier, 1988. Biomass and trophic structure of the macrobenthos in the south west lagoon of New Caledonia. *Mar. Biol.*, 99: 195-202.
- Chardy P., C. Chevillon & J. Clavier, 1988. Major benthic communities of the south-west lagoon of New Caledonia. *Coral Reefs*, 7: 69-75.
- Clavier J., P. Chardy & C. Chevillon, 1995. Sedimentation of particulate matter in the SW lagoon of New Caledonia : spatial and temporal patterns. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 40 : 281-294.
- Lazure P., Salomon J.C., 1991. Coupled 2-D and 3-D modelling of coastal hydrodynamics. *Oceanologica Acta*, 14 (2) : 173-180.

### Légende des figures

figure 1 : Courants résiduels lagrangiens le l'onde de marée  $M_2$  caractérisant le déplacement à long terme des particules.

figure2 : Répartition des trois grandes subdivisions écologiques du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie (d'après Chardy *et al.*, 1988).

Tendances nouvelles

EN MODÉLISATION  
POUR L'ENVIRONNEMENT

cité des Sciences et de l'Industrie, Paris  
les 15, 16 et 17 janvier 1996

ACTES DES JOURNÉES DU PROGRAMME  
ENVIRONNEMENT, VIE ET SOCIÉTÉS

POSTERS

THÈME 3 : Modélisation des systèmes complexes,  
systèmes écologiques, dynamique des populations,  
bases de connaissances.

THÈME 4 : Chimie de la pollution atmosphère-  
océan, systèmes hydrodynamiques couplés, modèles  
de diffusion dans un milieu poreux.



CENTRE NATIONAL  
DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE