

Modélisation numérique d'un couplage physico-biologique en milieu côtier

Modélisation hydrodynamique
Modélisation biologique
Écoulement turbulent
Océanographie côtière

Hydrodynamic modelling
Biological modelling
Turbulent flow
Coastal oceanography

Richard MARCER^a, **Philippe FRAUNIE**^a, **Ivan DEKEYSER**^b, **Valérie ANDERSEN**^c

^a Institut de Mécanique Statistique de la Turbulence, 12, avenue du Général Leclerc, 13003 Marseille, France.

^b Centre d'Océanologie de Marseille, Campus de Luminy, case 901, 13288 Marseille Cedex 9, France.

^c Station Zoologique de Villefranche-sur-Mer, B.P. 28, 06230 Villefranche-sur-Mer, France.

RÉSUMÉ

Cette étude concerne des simulations numériques du comportement de systèmes pélagiques en milieu côtier au moyen de modèles biologiques et physiques.

Le modèle physique s'appuie sur une résolution des équations de Navier-Stokes, de température et de salinité dans les trois dimensions d'espace avec un modèle de fermeture à deux équations supplémentaires pour la turbulence (modèle κ - ϵ).

Le modèle biologique tridimensionnel distingue cinq compartiments : le phyto-plancton vivant et mort, l'azote inorganique dissous, les herbivores (copépodes essentiellement) et les déchets zooplanctoniques (cadavres et pelotes fécales). Outre les relations biologiques (nutrition, excrétion...), est aussi considérée la sédimentation des particules biogéniques (cellules phyto-planctoniques vivantes et mortes, herbivores morts). Les champs tridimensionnels établis de vitesse et de dissipation sont utilisés comme variables forçantes pour ce modèle biologique.

Une application est faite sur une configuration de baie réelle, la «baie de Cannes-Mandelieu», dans laquelle l'écoulement considéré résulte de l'effet du courant liguro-provençal. Les résultats obtenus concernent l'étude d'un écosystème pélagique méditerranéen évoluant dans une baie en présence d'un courant traversier. Ils ont permis de caractériser une forte interaction des champs dynamique et biologique.

Il apparaît que les structures tourbillonnaires et les effets tridimensionnels caractérisant le champ hydrodynamique peuvent être des éléments de forçage importants pour l'évolution des processus biologiques.

Oceanologica Acta, 1991. Actes du Colloque international sur l'environnement des mers épicontinentales, Lille, 20-22 mars 1990, vol. sp. n° 11, 71-79.

ABSTRACT

Numerical modelling of biological-physical interactions in coastal sites

This study concerns the numerical simulation of the behaviour of pelagic systems in marine environments by means of a coupled biological and physical model.

The physical model is based on the resolution of the Navier-Stokes, temperature and salinity equations in the three dimensions of space with a turbulent closure

model consisting of two supplementary equations (κ - ε model).

The tridimensional biological model distinguishes five areas: phytoplankton (alive and dead); dissolved inorganic nitrogen; herbivores (essentially copepods); and zooplanktonic wastes (dead bodies and fecal pellets). Other than biological relations (nutrition, excretion,...), the sedimentation of biogenic particles (alive and dead phytoplanktonic cells, dead herbivores) are also considered. The established tridimensional velocity and dissipation fields are used as forcing variables for this biological model.

This model has been applied in the case of a real bay configuration: the "baie de Cannes-Mandelieu", in which the flow is under the influence of the Liguro-Provençal stream. The results obtained concerning the study of the evolution of a pelagic ecosystem in the Ligurian Sea have enabled us to characterize a strong interaction of the dynamic and biological fields.

It appears that vortex structures and all important three-dimensional effects characterizing the hydrodynamic field could be relevant forcing terms on the evolution of the biological processes.

Oceanologica Acta, 1991. Proceedings of the International Colloquium on the environment of epicontinental seas, Lille, 20-22 March, 1990, vol. sp. n° 11, 71-79.

INTRODUCTION

L'état actuel des connaissances sur les interactions physico-biologiques en milieu marin reste limité non seulement par la difficulté à modéliser correctement les écoulements hydrodynamiques, mais également du fait de la connaissance réduite de certains processus biologiques. Cependant, les progrès récents des techniques de modélisation numérique nous permettent d'envisager une représentation réaliste des interactions physico-biologiques.

La présente étude concerne, d'une part l'élaboration d'un code numérique 3-D permettant de décrire les écoulements turbulents en milieu marin côtier sur des reliefs très accidentés, d'autre part et ensuite, la prise en compte du champ hydrodynamique obtenu dans l'état stationnaire comme forçage d'un modèle biologique.

Le modèle de fermeture de la turbulence du système d'équations décrivant les phénomènes hydrodynamiques est du type « κ - ε », tandis que les processus biologiques suivent un modèle d'écosystème pélagique à cinq équations des eaux côtières de la Mer Ligure.

Le domaine spatial retenu est l'aire de la «baie de Cannes-Mandelieu», espace compris entre la pointe de la Galère à l'Ouest et l'île de Saint-Honorat à l'Est. L'écoulement considéré est supposé être engendré uniquement par le courant traversier liguro-provençal, imposé comme condition de frontière en mer ouverte.

LE MODELE PHYSIQUE ET MATHÉMATIQUE

Le fluide est considéré comme incompressible. Cependant, les effets de flottabilité induits par les écarts de température et de salinité sont pris en compte. Les variations de masse volumique étant faibles par rapport à la masse volumique

totale du fluide, l'approximation de Boussinesq est adoptée. Suivant cette hypothèse, les équations moyennes de continuité (1), de conservation de la quantité de mouvement (2), de température (3) et de salinité (4) s'écrivent respectivement, en négligeant les effets moléculaires:

$$\partial U_k / \partial x_k = 0 \quad (1)$$

$$\partial U_i / \partial t + U_j (\partial U_i / \partial x_j) = [(\rho - \rho_r) / \rho_r] g \delta_{i3} - (1 / \rho_r) (\partial P / \partial x_i) - (\partial \overline{u_i u_j} / \partial x_j) - 2 \varepsilon_{ijk} \rho \psi_j U_k \quad (2)$$

$$\partial \Theta / \partial t + U_j \partial \Theta / \partial x_j = - (\partial \overline{u_j \theta}) / \partial x_j \quad (3)$$

$$\partial S / \partial t + U_j \partial S / \partial x_j = - \partial \overline{u_j s} / \partial x_j \quad (4)$$

où ψ_j représente les composantes du vecteur rotation terrestre intervenant dans les termes de coriolis et r est un indice relatif à un milieu de référence.

L'équation d'état représentative de la variation de la masse volumique par rapport au milieu de référence s'écrit, si l'on ne retient que les termes du premier ordre:

$$(\rho - \rho_r) / \rho_r = \beta_T (T - T_r) + \beta_S (S - S_r) \quad (5)$$

les deux coefficients β_T et β_S pouvant être considérés constants.

La résolution numérique du système d'équations ouvert précédent nécessite l'introduction d'équations d'évolution supplémentaires ou de relations algébriques pour décrire les tensions de Reynolds $\overline{u_i u_j}$ et les flux turbulents de température $\overline{u_j \theta}$ et de salinité $\overline{u_j s}$.

Le modèle de fermeture à deux équations supplémentaires, de type « κ - ε », consiste à relier ces flux turbulents aux champs moyens par l'intermédiaire de coefficients ν_t , K_t et D_t , appelés respectivement viscosité cinématique, diffusivité thermique et diffusivité massique équivalentes dues à la turbulence.

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t (\partial U_i / \partial x_j) + (\partial U_j / \partial x_i) - 2/3 (\delta_{ij} \kappa) \quad (6)$$

$$\overline{u_j \theta} = K_t \partial \theta / \partial x_j \quad (7)$$

$$\overline{u_j s} = D_t \partial s / \partial x_j \quad (8)$$

Bien que v_t , K_t et D_t soient très variables dans un écoulement donné et également d'un écoulement à un autre, les rapports :

$$Pr_t = v_t / K_t \text{ et } Sc_t = v_t / D_t, \quad (9)$$

appelés nombres de Prandtl et Schmidt de la turbulence, peuvent être considérés comme constants; de plus, pour ce type d'écoulement ils sont sensiblement égaux.

Le problème de la fermeture du système est ainsi ramené à la détermination de la distribution de v_t , pour laquelle il est fait appel à la relation classique (Hanjalic et Launder, 1972) :

$$v_t = C_\mu (\kappa^2 / \epsilon) \quad (10)$$

où C_μ est une constante empirique, qui sera considérée égale à 0,09, bien que cette valeur ne soit pas universelle.

Cette relation implique la nécessité de faire appel aux équations d'évolution de l'énergie cinétique de la turbulence κ et de son taux de dissipation ϵ .

Les équations modélisées pour κ et ϵ s'écrivent respectivement, si on néglige les effets moléculaires (Hanjalic, Launder, 1972):

$$\begin{aligned} \partial \kappa / \partial t + U_\kappa (\partial \kappa / \partial x_\kappa) \\ = P + B - \epsilon + \partial / \partial x_\kappa (v_t / \sigma_\kappa) (\partial \kappa / \partial x_\kappa) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \partial \epsilon / \partial t + U_\epsilon (\partial \epsilon / \partial x_\epsilon) = C_{\epsilon 1} (\epsilon / \kappa) (P + B) \\ - C_{\epsilon 2} (\epsilon^2 / \kappa) + \partial / \partial x_\epsilon (v_t / \sigma_\epsilon) (\partial \epsilon / \partial x_\epsilon) \end{aligned} \quad (12)$$

avec:

$$\begin{aligned} P = - \overline{u_j u_k} (\partial U_j / \partial x_k) \\ \text{et } B = \beta_T g_j (\overline{u_j \theta}) + \beta_S g_j (\overline{u_j s}) \end{aligned} \quad (13)$$

où P et B sont des termes de production générés respectivement aux dépends du mouvement moyen et par le travail des forces d'Archimède (Launder, 1975). σ_κ , σ_ϵ , $C_{\epsilon 1}$ et $C_{\epsilon 2}$ sont des constantes de modélisation pour lesquelles les valeurs habituellement admises seront retenues, à savoir respectivement: 1,0 ; 1,3 ; 1,44 et 1,92 (Launder et Spalding, 1972).

Ce modèle dynamique a été validé pour des écoulements classiques bi- et tridimensionnels (Sini et Dekeyser, 1987; Moses *et al.*, 1990).

LE MODELE BIOLOGIQUE TRIDIMENSIONNEL

Le modèle biologique est un modèle 3-D d'écosystème pélagique simple des eaux côtières de la Mer Ligure, comportant cinq variables d'état désignées par :

- N : azote inorganique dissous
- P : phytoplancton
- H : zooplancton herbivore
- P_m : phytoplancton mort
- H_m : déchets zooplanctoniques (cadavres et pelotes fécales)

Le phytoplancton est considéré comme producteur primaire, tandis que les herbivores sont supposés avoir les caractéristiques des copépodes, principal groupe de zooplanctons herbivores présents dans la région considérée. D'autre part, les vitesses de sédimentations fort différentes du phytoplancton mort (1,5 m/j) et des déchets zooplanctoniques (95 m/j) nous ont amenés à ne pas regrouper ces deux variables.

Le modèle biologique développé dans cette étude fait intervenir des processus de limitation de la croissance phytoplanctonique par l'éclairement et par la concentration en azote inorganique dissous, et également des processus d'ingestion zooplanctonique, suivant la loi générale développée par Ivlev (1955).

Le système d'équations du modèle à cinq variables s'écrit (Andersen et Nival, 1988) :

$$\mathcal{D}N = - \mu P + e H + r_p P_m + r_h H_m$$

$$\mathcal{D}P = (\mu - m_p) P - i H - \alpha_p (\partial P / \partial z)$$

$$\mathcal{D}H = (a i - e - m_h) H$$

$$\mathcal{D}P_m = m_p P - r_p P_m - \alpha_{pm} (\partial P_m / \partial z)$$

$$\mathcal{D}H_m = [m_h + (1 - a) i] H - r_h H_m - \alpha_{hm} (\partial H_m / \partial z),$$

où \mathcal{D} représente l'opérateur différentiel :

$$\mathcal{D} = \partial / \partial t + U_j (\partial / \partial x_j) - \partial / \partial z [k_z (\partial / \partial z)]$$

et k_z le coefficient vertical de diffusion turbulente biologique, qui dépend du taux de dissipation de l'énergie cinétique de la turbulence, s'écrit :

$$k_z = 0,25 \epsilon \mathcal{N}^2$$

$$\text{avec } \mathcal{N}^2 = - g (\partial \rho / \partial z)$$

(Denman et Gargett, 1983; Prieur et Legendre, 1988)

Tableau 1

Processus biologiques du modèle.

Biological process of the model.

Processus		Construction
CROISSANCE DU PHYTOPLANCTON		
μ	Taux de croissance	$\mu = \mu_m I_n I_l$
I_n	Limitation de la croissance par l'azote inorganique dissous	$I_n = N / (k_n + N)$
I_l	Limitation par l'éclairement	$I_l = 2 (1 + \beta) x / (x^2 + 2\beta x + 1)$ avec $x = I z / I_s$
INGESTION DES HERBIVORES		
i	Taux d'ingestion des herbivores	si $P < P_o$ $i = 0$ si $P > P_o$ $i = i_m [1 - e^{-k(P - P_o)}]$

Tableau 2

Paramètres du modèle biologique.

Parameters of the biological model.

	Définition	Unité	Valeur
PARAMETRES DU PHYTOPLANCTON			
μ_m	Taux de croissance maximal	j^{-1}	3,0
k_n	Coefficient de demi-saturation pour l'azote inorganique dissous	$\mu\text{atgN.l}^{-1}$	1,0
I_s	Éclairement optimal	$\mu\text{E. m}^{-2}. \text{s}^{-1}$	100
β	Coefficient d'acuité de la courbe	-	- 0,6
m_p	Taux de mortalité	j^{-1}	0,04
α_p	Vitesse de sédimentation	mj^{-1}	0,5
PARAMETRES DU ZOOPLANCTON			
a	Coefficient d'assimilation	-	0,70
i_m	Taux d'ingestion maximal	j^{-1}	0,96
m_h	Taux de mortalité	j^{-1}	0,04
k	Coefficient d'Ivlev	$l.(\mu\text{atgN})^{-1}$	0,50
P_0	Seuil minimal de nutrition	$\mu\text{atgN.l}^{-1}$	0,02
e	Taux d'excrétion	j^{-1}	0,08
PARAMETRES DE LA MATIERE ORGANIQUE PARTICULAIRE			
r_p	Taux de reminéralisation du phytoplancton mort	j^{-1}	0,10
r_h	Taux de reminéralisation des cadavres et pelotes fécales des herbivores	j^{-1}	0,09
α_{pm}	Vitesse de sédimentation du phytoplancton mort	mj^{-1}	1,5
α_{hm}	Vitesse de sédimentation des cadavres et pelotes fécales des herbivores	mj^{-1}	95,0

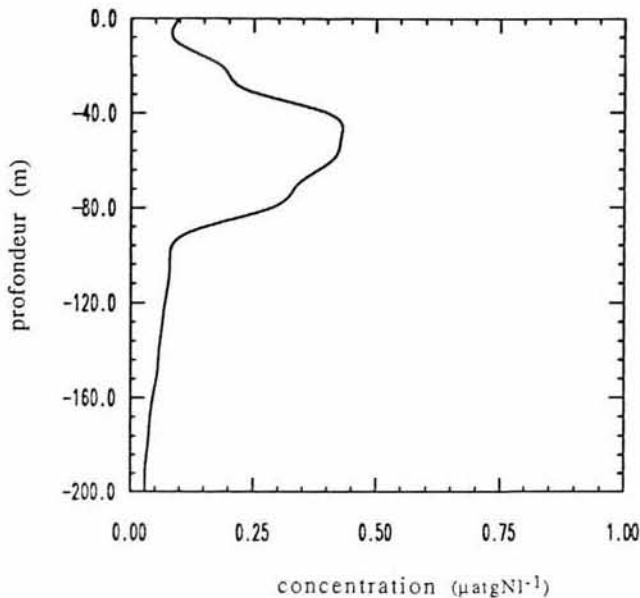


Figure 1

Distribution initiale verticale du phytoplancton ($\mu\text{atgN.l}^{-1}$) dans la baie.*Initial vertical distribution of phytoplankton ($\mu\text{atgN.l}^{-1}$) in the bay.*

Les expressions analytiques des processus biologiques (tab. 1) et les valeurs des paramètres (tab. 2) intervenant dans le système précédent sont celles généralement utilisées dans les modèles d'écosystèmes méditerranéens. Les hypothèses qu'elles admettent et leur validation pourront être trouvées dans Andersen *et al.* (1987) et Andersen et Nival (1988).

Les vitesses d'advections U_j et le taux de dissipation de l'énergie cinétique de la turbulence ϵ , qui agissent comme variables forçantes dans les équations du modèle biologique, sont fournies en tout noeud du maillage par le modèle physique, pour un état établi.

La variation temporelle de l'éclairement correspond au mois de juillet, pour lequel nous disposons de données de référence, en considérant que le cycle lumineux sur 24 heures est le même chaque jour.

Ces valeurs permettent de calculer l'éclairement I_z ($\mu\text{Em}^{-2} \text{s}^{-1}$), à chaque profondeur z :

$$I_z = I_0 e^{-\delta z}$$

où I_0 est l'éclairement en surface ($\mu\text{Em}^{-2} \text{s}^{-1}$) et δ le coefficient d'extinction ($0,1 \text{ m}^{-1}$).

SCHÉMAS NUMÉRIQUES DES MODELES PHYSIQUE ET BIOLOGIQUE

La discrétisation des équations des deux modèles est du type différences finies avec maillage variable (Marcer, 1988). Une procédure de maillage automatique permet de représenter le contour et la bathymétrie d'une baie réelle quelconque.

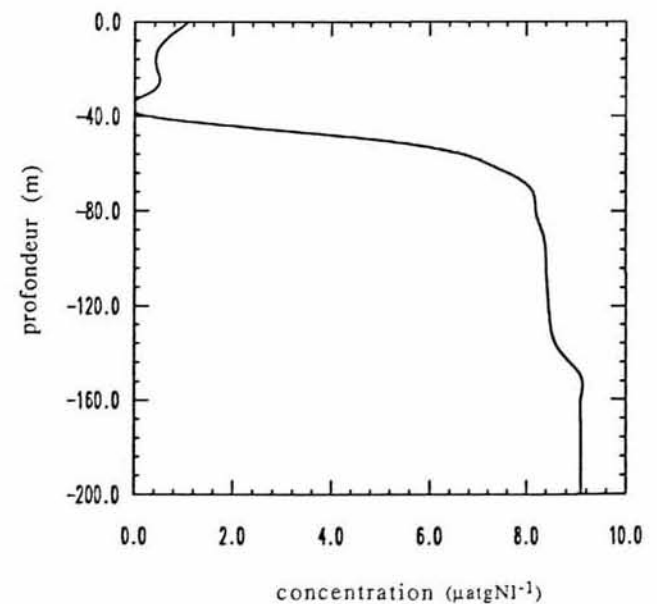


Figure 2

Distribution initiale verticale de l'azote organique dissous ($\mu\text{atgN.l}^{-1}$) dans la baie.*Initial vertical distribution of dissolved organic nitrogen ($\mu\text{atgN.l}^{-1}$) in the bay.*

Figure 3

Isobathes (m) de la «baie de Cannes-Mandelieu».

Isodepth (m) of the "baie de Cannes-Mandelieu".

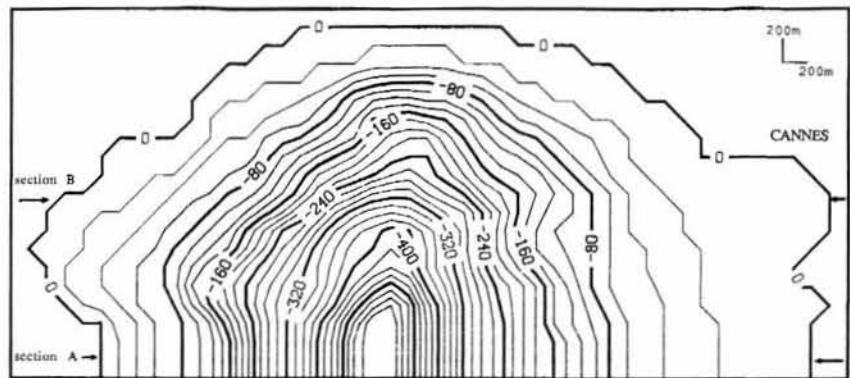


Figure 4

Répartition horizontale du phytoplancton ($\mu\text{atgN.l}^{-1}$) à 30 m de profondeur et pour une simulation portant sur sept jours.

Horizontal distribution of phytoplankton ($\mu\text{atgN.l}^{-1}$) at 30-m depth, for a simulation over a 7-day period.

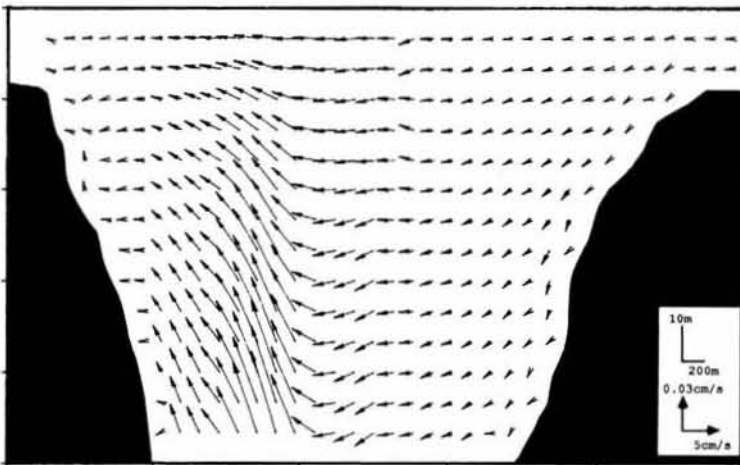
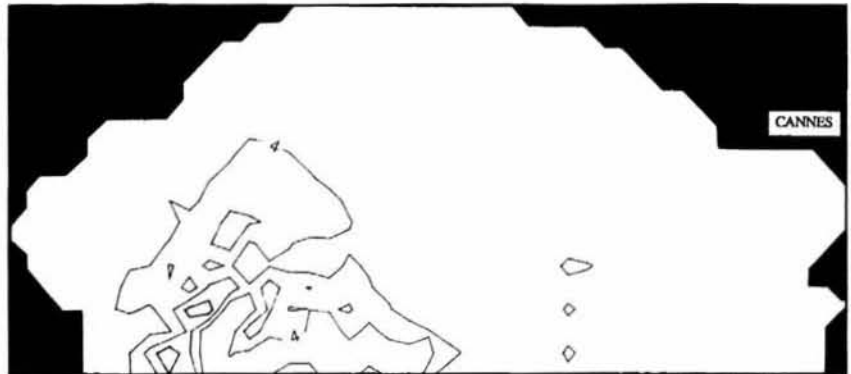


Figure 5

Champ de vitesse sur une coupe verticale à l'entrée de la baie (section A sur fig. 3).

Vertical section of the velocity field of the bay's inlet (section A on Fig. 3).

La méthode considérée dans l'algorithme de résolution est, pour le modèle physique, la méthode M.A.C. (Hirt *et al.*, 1975; Welch *et al.*, 1969), qui est explicite pour le temps et implicite pour la pression, suivant la méthode de compressibilité artificielle de Chorin (1967). Pour le modèle biologique, un schéma explicite est utilisé dans lequel les concentrations des cinq variables sont calculées à chaque pas de temps, en utilisant une procédure itérative. La convergence est obtenue lorsque la différence relative des solutions de deux itérations successives est inférieure à 0,001.

LES CONDITIONS LIMITES ET INITIALES

Les conditions de frontière aux parois solides sont des conditions de Dirichlet pour la vitesse et des conditions de

Neumann pour les variables biologiques. On admet qu'aucun flux ne traverse la surface, tandis qu'en mer ouverte, un courant tangentiel simule le courant liguro-provençal.

Dans un premier temps, le modèle physique seul est considéré, afin d'obtenir un champ hydrodynamique établi correspondant à des conditions stationnaires.

A l'instant initial de la simulation de l'interaction physico-biologique, les espèces biologiques sont uniformément réparties sur l'horizontale.

Les distributions verticales initiales du phytoplancton (fig. 1) et de l'azote inorganique dissous (fig. 2) correspondent à des mesures faites fin juin 1988 au large de Villefranche-sur-Mer. La concentration initiale d'herbivores est fixée constante à $0,06 \mu\text{atgN.l}^{-1}$ de 0 à 90 m de profondeur, et à $0,01 \mu\text{atgN.l}^{-1}$ de 200 m jusqu'au fond. Pour les couches intermé-

Figure 6

Champ de vitesse sur une coupe horizontale de la baie, à 20 m de profondeur.

Horizontal section of the velocity field at 20-m depth.

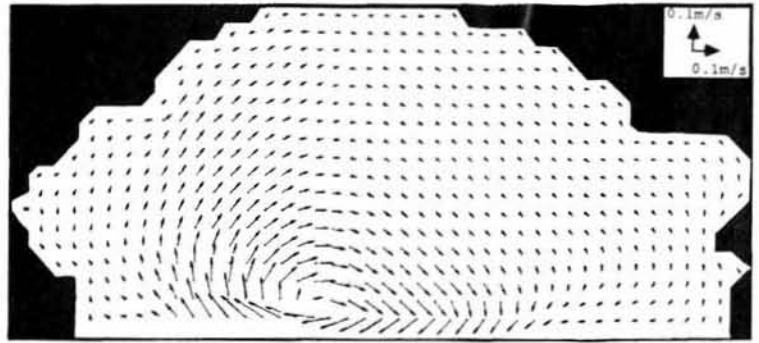


Figure 7

Isovaleurs de la viscosité due à la turbulence ν_t ($m^2 s^{-1}$) sur une coupe horizontale de la baie, à 20 m de profondeur.

Iso-eddy viscosities ν_t ($m^2 s^{-1}$) on a horizontal section of the bay, at 20-m depth.

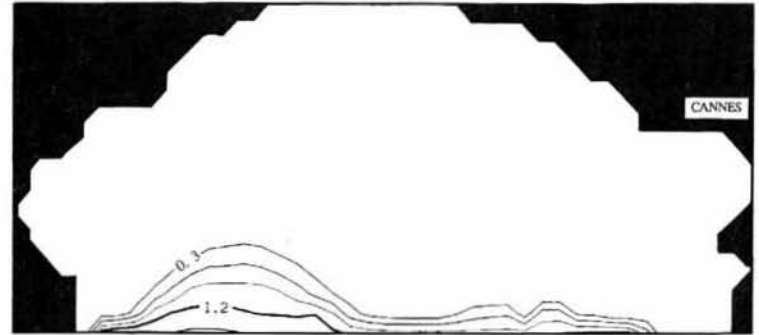


Figure 8

Répartition horizontale du phytoplancton ($\mu\text{atgN.l}^{-1}$) à 30 m de profondeur et pour une simulation portant sur quatorze jours.

Horizontal distribution of phytoplankton ($\mu\text{atgN.l}^{-1}$) at 30-m depth, for a simulation over a 14-day period.



diaires, variant de 90 à 200 m de profondeur, une décroissance linéaire de 0,06 à 0,01 $\mu\text{atgN.l}^{-1}$ est imposée. Les concentrations initiales du phytoplancton mort et des déchets zooplanctoniques sont respectivement égales à 10 % des concentrations de phytoplancton et d'herbivores.

Dans ces conditions, on étudiera un scénario d'évolution de la répartition spatio-temporelle des espèces biologiques à partir d'une répartition initiale donnée.

RÉSULTATS NUMÉRIQUES ET DISCUSSIONS

Les résultats de cette étude concernent les caractéristiques générales de l'écoulement, pour un état stationnaire, sur le domaine de la «baie de Cannes-Mandelieu» et l'influence du forçage hydrodynamique sur l'évolution des processus biologiques.

La baie de Cannes-Mandelieu présente, ainsi que le montre la figure 3, un relief très accidenté, avec un canyon fortement prononcé, dont la profondeur maximale atteint 600 m. Les forts gradients de profondeur existant dans certaines zones côtières, et notamment en Mer Méditerranée, accentuent notablement le caractère tridimensionnel de l'écoulement, dont la caractéristique prin-

cipale est un tourbillon central. La représentation des répartitions spatiales des concentrations biologiques dans la baie met en valeur l'influence du champ hydrodynamique, surtout par le rôle localement prépondérant des vitesses verticales.

La figure 4 représente, sur une coupe horizontale à 30 m de profondeur, la concentration en phytoplancton pour une simulation portant sur sept jours. Il apparaît alors une localisation de fortes concentrations de phytoplancton sur la partie ouest de la baie. Cette particularité, que l'on retrouvera sur la répartition des autres espèces biologiques, s'explique à partir de l'évolution dynamique dans le domaine. En effet on remarque, sur une coupe verticale à l'entrée de la baie (section A sur fig. 3), que le champ de vitesse est fortement tridimensionnel, avec d'importants mouvements ascendants sur le coté ouest (fig. 5). Les espèces biologiques en phase de sédimentation sont ainsi remontées localement vers la surface (couche de 0 à 50 m), pour être ensuite diffusées horizontalement par le tourbillon principal dont le centre se situe à la verticale du point de profondeur maximale (fig. 6). Les quelques mesures *in situ* de chlorophylle disponibles dans la baie de Cannes-Mandelieu confirment la présence de fortes concentrations sur la partie ouest de la baie (Nival, comm. pers.).



Figure 9

Répartition horizontale des espèces biologiques ($\mu\text{atgN.l}^{-1}$) à 20 m de profondeur et pour une simulation portant sur quatorze jours. Figure 9 a : herbivores ; figure 9 b : phytoplancton.

Horizontal distribution of biologic species ($\mu\text{atgN.l}^{-1}$) at 20-m depth, for a simulation over a 14-day period. Figure 9 a: herbivores; figure 9 b: phytoplankton.



a

b

La figure 7, représentant les isolignes de la viscosité due à la turbulence calculées par le modèle physique, confirme que la région ouest et entrante de la baie est celle où les phénomènes de diffusion sont les plus importants.

L'évolution temporelle des processus biologiques a également été étudiée, à partir des conditions initiales définies précédemment, pour une période de quatorze jours. On a constaté que la localisation spatiale des espèces restait globalement inchangée pour les simulations portant sur sept jours (fig. 4) et quatorze jours (fig. 8). Il apparaît cependant, au cours du temps, une forte croissance des concentrations et une diffusion des espèces plus importantes.

On remarque, en outre, une évolution spatio-temporelle du phytoplancton, caractérisée par le déplacement d'ouest en est des concentrations maximales. Un tel décalage apparaît sur les figures 9 a et 9 b représentant les herbivores et le phytoplancton pour une simulation portant sur quatorze jours, et sur une même coupe horizontale à 20 m de profondeur. Le pic de concentration zooplanctonique se situe plus à l'ouest, prouvant ainsi que les herbivores se nourrissent et se développent dans les mêmes régions que le phytoplancton, mais avec un déphasage temporel.

La répartition verticale des différentes variables biologiques et le champ de vitesse correspondant ont également été représentés sur une section transversale de la baie (section B sur fig. 3). Les concentrations maximales des espèces se situent toutes à l'ouest, mais à des profondeurs différentes. La distribution verticale de l'azote inorganique dissous (fig. 10 a) présente une couche de surface (0-30 m) très pauvre et une nitracline très prononcée dans des couches plus profondes (30-60 m). La répartition verticale du phytoplancton (fig. 10 b) présente un maximum sub-

superficiel vers 30 m. La position de ce maximum est réglée par l'évolution temporelle de la répartition verticale de l'éclairement et par la profondeur de la nitracline. Le zooplancton (fig. 10 c), qui ne sédimente pas, présente un pic de concentration légèrement moins profond, vers 20 m. Il apparaît cependant sur les trois figures (10 a à 10 c), une zone au centre du domaine où les espèces sont diffusées vers le bas par le courant qui est descendant à cet endroit (fig. 10 d).

CONCLUSION

Un modèle 3-D de couplage du champ dynamique turbulent et des processus biologiques a été développé sur une configuration représentant la baie de Cannes-Mandelieu.

Les résultats obtenus pour ce site côtier caractérisé par des gradients de profondeur élevés, mettent en évidence des effets tridimensionnels importants.

L'évolution des espèces biologiques est, dans ces conditions, principalement influencée par le champ hydrodynamique, notamment par les mouvements ascendants, qui peuvent être largement supérieurs, dans certaines régions, aux effets de sédimentation des particules biogéniques.

Les résultats présentés dans cette étude dépendent de la valeur des différentes concentrations à l'instant $t = 0$. En effet, l'influence des répartitions initiales retenues pour les différentes espèces ne peut pas être ignorée dans une simulation de relativement courte durée (quatorze jours). Un effort particulier doit donc être porté sur la représentation du champ biologique à l'instant initial, et notamment sur la répartition horizontale des espèces à $t = 0$.

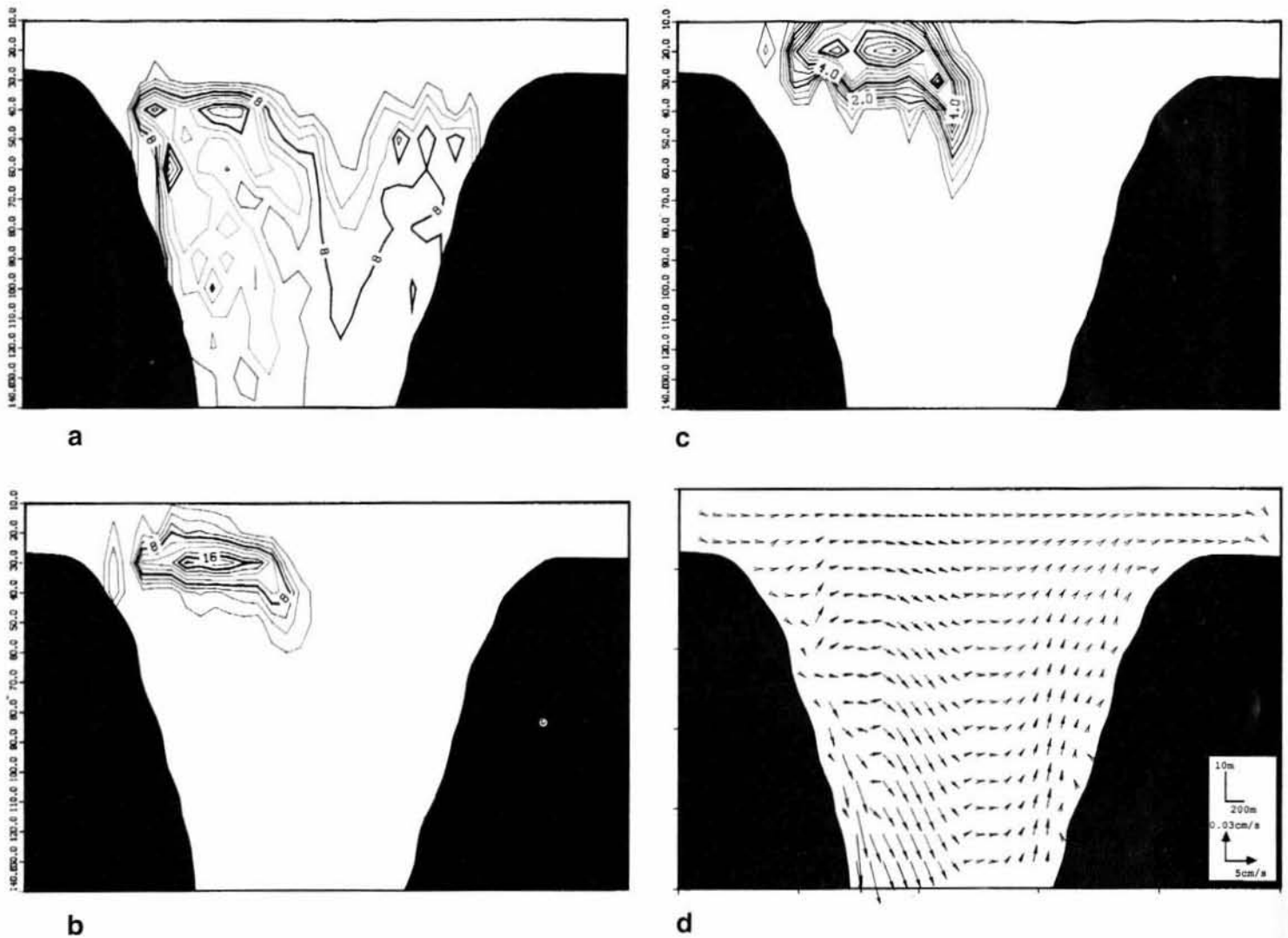


Figure 10

Champ de vitesse et répartition des espèces biologiques ($\mu\text{atgN.l}^{-1}$), pour une simulation portant sur quatorze jours, sur une section verticale de la baie (section B sur fig. 3). Figure 10 a : azote organique dissous ; figure 10 b : phytoplancton ; figure 10 c : herbivores ; figure 10 d : champ de vitesse.

Vertical section of the velocity field and distribution of biologic species ($\mu\text{atgN.l}^{-1}$) for a simulation over a 14-day period (section B on Fig. 3). Figure 10 a: dissolved organic nitrogen; Figure 10 b: phytoplankton; Figure 10 c: herbivores; Figure 10 d: velocity field.

Néanmoins les résultats obtenus lors de cette étude de faisabilité d'un couplage physico-biologique, avec des conditions initiales et de frontière schématisées, sont tout à fait cohérents. Ils permettent en particulier de mettre en évidence l'importance que peuvent prendre les effets du forçage hydrodynamique sur les processus biologiques.

Des simulations, avec prise en considération de conditions initiales et de frontière biologiques et hydrodynamiques déterminées lors d'une campagne de mesures *in situ*, permettront de valider les modèles présentés ici à l'aide de comparaisons simulation-observation dans la baie de Cannes-Mandelieu.

Remerciements

Cette étude a bénéficié d'un support de l'A.I.P. PIREN «Modélisation en milieu côtier», et d'une dotation d'heures

de calcul allouée par le Centre de Calcul Vectoriel pour la Recherche. Nous remercions le Professeur P. Nival pour l'aide qu'il nous a apportée dans l'interprétation des résultats du couplage physico-biologique.

RÉFÉRENCES

Andersen V. et P. Nival (1988). A pelagic ecosystem model simulating production and sedimentation of biogenic particles. "Role of salps and copepods". *Mar. Ecol. Prog.-Ser.*, **44**, 37-50.

Andersen V., P. Nival et R.P. Harris (1987). Modelling of a planktonic ecosystem in enclosed water column, *J. mar. biol. Ass. U.K.*, **67**, 407-430.

Chorin A.J. (1967). A numerical method for solving incompressible viscous flow problems, *J. comp. Phys.*, **2**, 12-26.

Denman K.L. et A.E. Gargett (1983). Time and space scales of vertical mixing and advection of phytoplankton in the upper ocean. *Limnol. Oceanogr.*, **28**, 801-815.

Hanjalic K. et B.E. Launder (1972). A Reynolds stress model of turbulence and its application to thin shear flows, *J. Fluid. Mech.*, **52**, 609-638.

Hirt C.W., B.D. Nicols et C. Romeron (1975). SOLA: a numerical solution for transient fluid flows, Los Alamos Sc. Lab. Report, L.A. 5852.

Ivlev V.S. (1955). *Experimental Ecology of the Feeding of Fishes*. New Haven, Yale University Press, 1961.

Launder B.E. (1975). On the effects of a gravitational field on the turbulent transport of heat and momentum, *J. Fluid Mech.*, **67**, 569.

Launder B.E. et D.B. Spalding (1972). *Lectures in mathematical models of turbulence*, Academic Press, New York.

Marcen R. (1988). Modèle κ - ϵ en milieu côtier avec maillage variable. *Rapport de stage de DEA, Université Aix-Marseille II*.

Moses B.O., J.-F. Sini et I. Dekeyser (1990). κ - ϵ model simulations of vertical jets and plumes in atmospheric environments. *The 4th International Symposium on refined flow modelling and turbulence measurements, 20-23 septembre 1990, Wuhan, Chine*.

Prieur L. et L. Legendre (1988). Oceanographic criteria for new phytoplankton production. In : *Toward a theory on Biological-Physical Interactions in the World Ocean*, B.J. Rothschild, éditeur, Kluwer Academic Publisher.

Sini J.-F. et I. Dekeyser (1987). Numerical Prediction of Turbulent plane jets and forced plumes by use of the κ - ϵ model of turbulence. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **30**, 9, 1787-1801.

Welch J.E., F.H. Harlow, J.P. Shannon et B.J. Daly (1969). The M.A.C. method: a computing technic for solving viscous, incompressible transient fluid-flow problems involving free surfaces, Los Alamos Scientific Laboratory, Report, LA 3425.

