

# Etude préliminaire: simulation des trajectoires de particules dans un upwelling côtier

P.Cinque et Y.Leredde

## 1. Description

L'environnement d'une cellule phytoplanctonique est fortement contraint par l'hydrodynamisme ambiant. Les algues sont transportées par le courant, leur activité dépend de la lumière (donc de la profondeur et de la turbidité), de la température, de la salinité, de la turbulence et de la concentration en sels nutritifs (nitrates, phosphates,...). L'objectif de cette étude est de développer un modèle de circulation océanique susceptible de simuler l'évolution spatio-temporelle de ces différents paramètres physico-chimiques. Les zones fortement productives sont le plus souvent situées sur les marges océaniques, ce qui nous conduit à utiliser un modèle spécifique d'hydrodynamique côtière. Cet outil numérique, le modèle SIMPHONIE (SIMulation de Processus Hydrodynamique Océanique. Interaction avec l'Environnement) est développé au Laboratoire d'Aérodynamique (Toulouse) et a été principalement utilisé pour simuler l'hydrodynamique du Golfe du Lion (Estournel et al, 1997). Il s'agit d'un modèle tridimensionnel de l'océan côtier, résolvant les équations de Navier Stokes sous hypothèses de Boussinesq et d'équilibre hydrostatique. Les équations du modèle sont discrétisées sur une grille selon la méthode des différences finies et résolues au travers d'un code de calcul programmé en C et Fortran. Ce modèle est aujourd'hui utilisé au LOB (Laboratoire d'Océanographie et de Biogéochimie, Marseille) dans un objectif de couplage avec un modèle de production primaire de type NPZD (Nutriment-Phytoplancton-Zooplancton-Détritus) (Fasham, 1990).

Nous avons développé dans ce code existant un suivi Lagrangien de particules. Le modèle a été développé dans une approche Eulerienne où les vitesses sont calculées par rapport à un repère fixe, tout au moins dans le référentiel Terrestre. Le champ de vitesse ainsi calculé peut servir à reconstruire les trajectoires Lagrangiennes des particules fluides. Partant d'un état initial, grâce à la connaissance du champ de vitesse  $V$ , le calcul de la position de la particule  $X$  se fait en intégrant  $dX/dt=V$ . L'environnement physico-chimique de la particule peut ainsi être simulé pas de temps après pas de temps.

La situation océanique présentée ici est schématique. Un upwelling côtier est généré par un vent constant ( $5 \text{ m.s}^{-1}$ ), orienté vers l'Est parallèlement à une côte rectiligne située au Nord d'un bassin semi-ouvert. Ce phénomène a bien souvent été décrit (e.g. Richards, 1981) et la résolution analytique (Crépon et Richez, 1982) ou numérique (Foo, 1991; Verdier-Bonnet, 1995, Leredde, 1999) du phénomène physique a déjà fait l'objet d'études précédentes. Il ne s'agit donc pas ici d'étudier différents effets de bathymétrie, de stratification ou de l'un des nombreux paramètres influençant le phénomène physique d'upwelling (profil de côte, conditions atmosphériques, ...). Avec des conditions simples, on évalue la faisabilité des calculs.

Le bassin considéré a des dimensions horizontales de 40 km par 40 km pour des mailles horizontales de la grille de calcul de 500 par 500 m. Pour représenter la forme simplifiée d'un plateau continental, la bathymétrie considérée est linéaire de 10 m à la côte jusqu'à 160 m à 40 km de la côte. 20 niveaux (en coordonnées sigma resserrés en surface et au fond) sont utilisés sur la verticale.

A l'instant initial, le fluide est au repos, la salinité est uniforme, une thermocline schématique est représentée (entre 0 et 10 m la température est de  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ , entre 10 et 50 m, la température varie linéairement de  $18$  à  $13 \text{ }^\circ\text{C}$ , après 50 m et jusqu'au fond, elle est de  $13 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Dans cette expérience, une variable supplémentaire a été introduite pour jouer le rôle d'un traceur biogéochimique. Cette variable que nous appellerons par la suite et par commodité concentration en Nitrate (en  $\mu\text{g.l}^{-1}$ ) est passive c'est à dire que seul le transport par l'hydrodynamisme est susceptible de modifier ses valeurs. Aucune production ou consommation de type biologique ou chimique n'est ici prise en compte. Cette variable est initialisée de la même manière que la température. Initialisée à 0 de la surface jusqu'à 10 m de profondeur, elle varie linéairement de 0 à  $0.8 \mu\text{g.l}^{-1}$  entre 10 et 50 m puis reste constante jusqu'au fond.

Le modèle est lancé pour une période de 4 jours correspondant 4320 pas de temps de calcul.

## **2. Représentation Eulérienne**

Les caractéristiques principales d'un upwelling côtier en milieu stratifié sont bien simulées (figures 1 à 9). A faible distance de la côte (environ 5 km) un "jet" côtier se développe dans la direction du vent. Pour un paramètre de Coriolis  $f=10^{-4}\text{ms}^{-1}$ , la couche de mélange de surface est advectée vers le large. Le courant de retour est confiné dans la couche de mélange de fond. Au niveau de la côte, les eaux froides sont advectées du fond vers la surface et le niveau de la surface libre diminue également. Les résultats sont présentés ci-dessous après 96 h de simulation. La phase transitoire de l'établissement de l'upwelling n'est pas terminée mais les oscillations d'inertie sont déjà fortement amorties (Kundu et al, 1983).

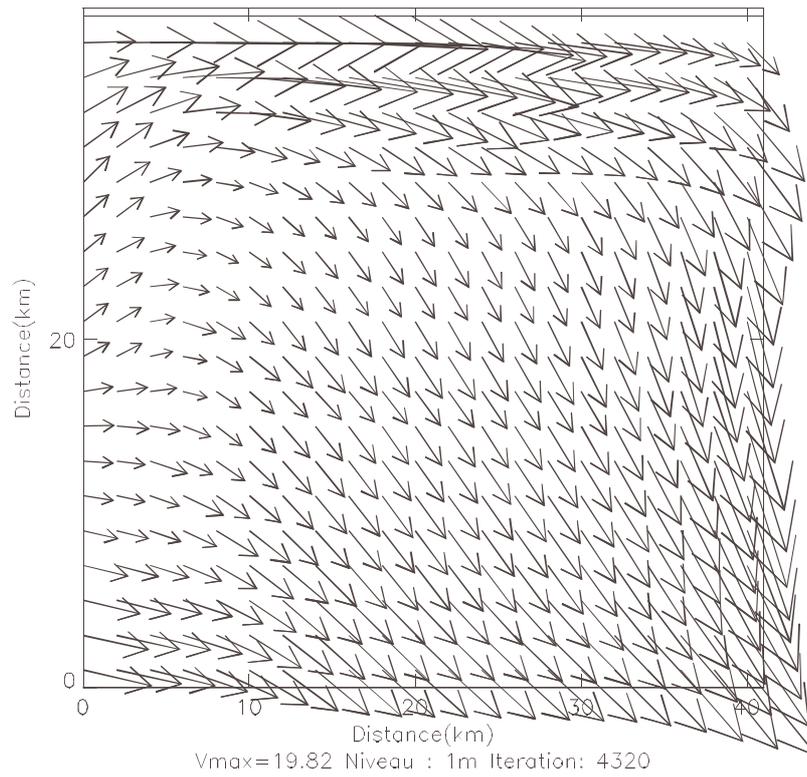


Figure 1 : Vecteurs vitesses du courant à 1 m de profondeur après 96 h de simulation.

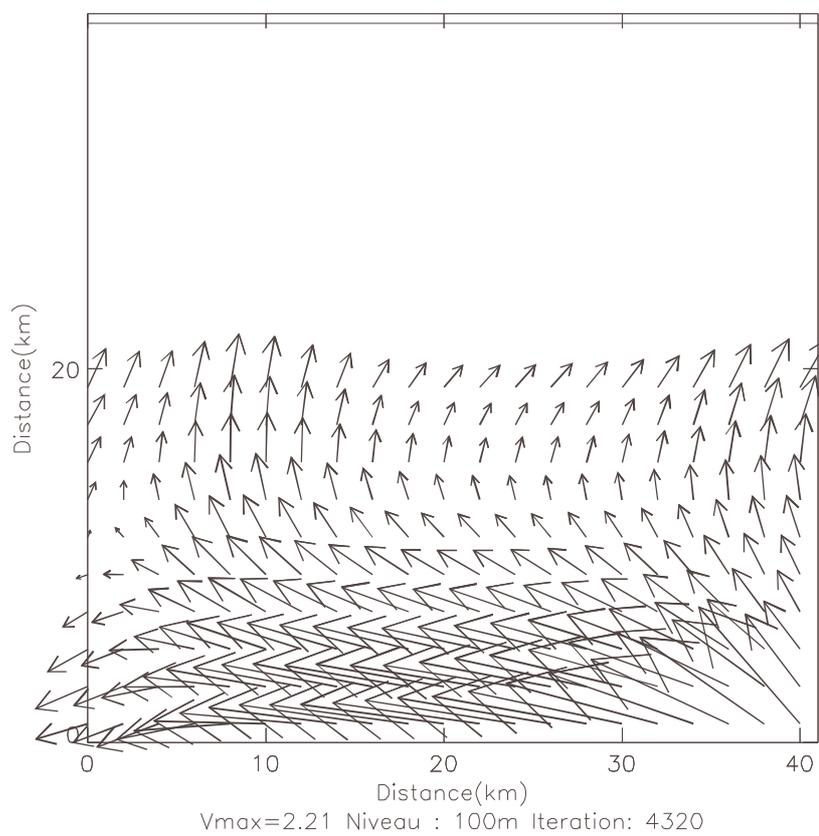


Figure 2 : Vecteurs vitesses du courant à 100 m de profondeur après 96 h de simulation.

Figure 3 : Coupe verticale perpendiculaire à la côte. Composante Sud du courant après 96 h de simulation.

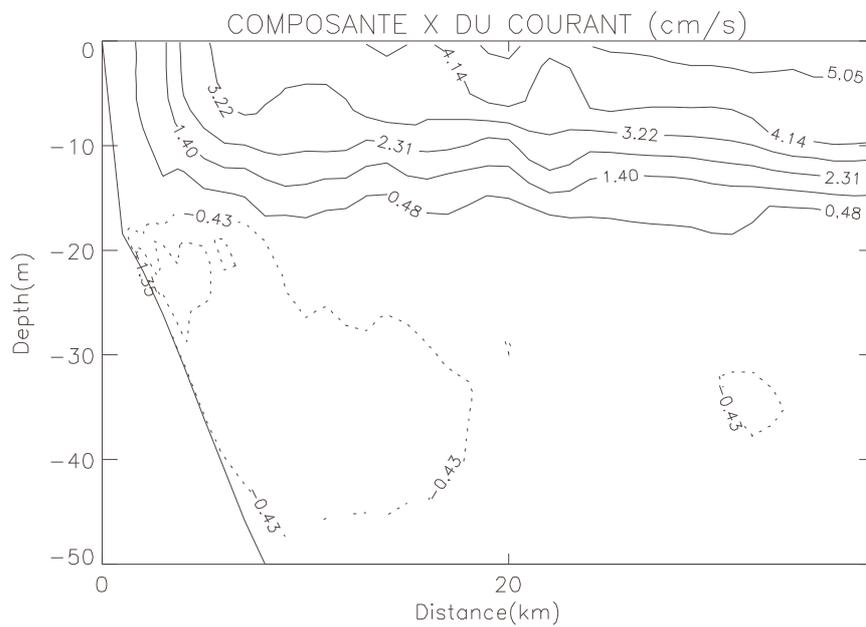


Figure 4 : Coupe verticale perpendiculaire à la côte. Composante Est du courant après 96 h de simulation.

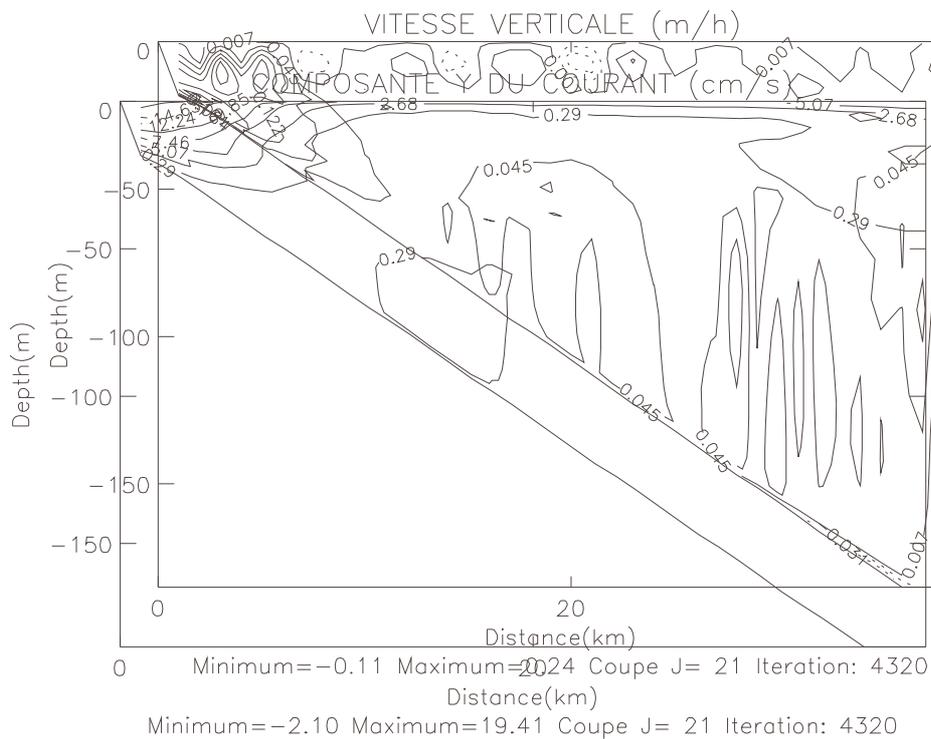
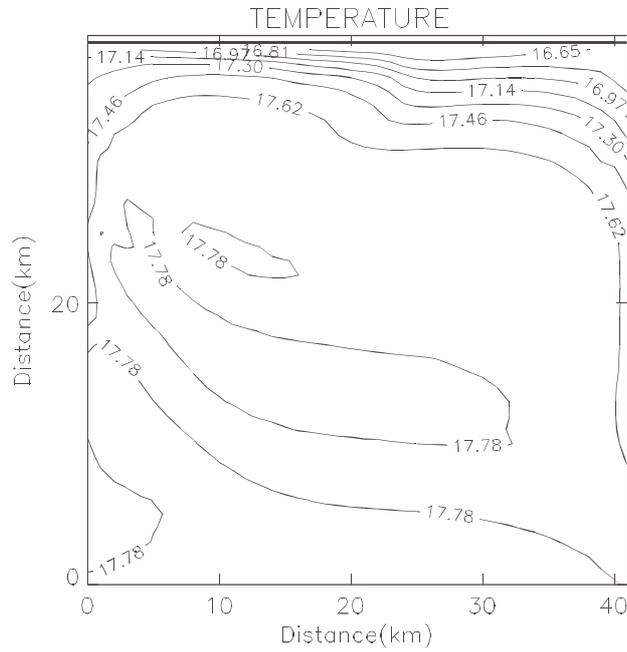
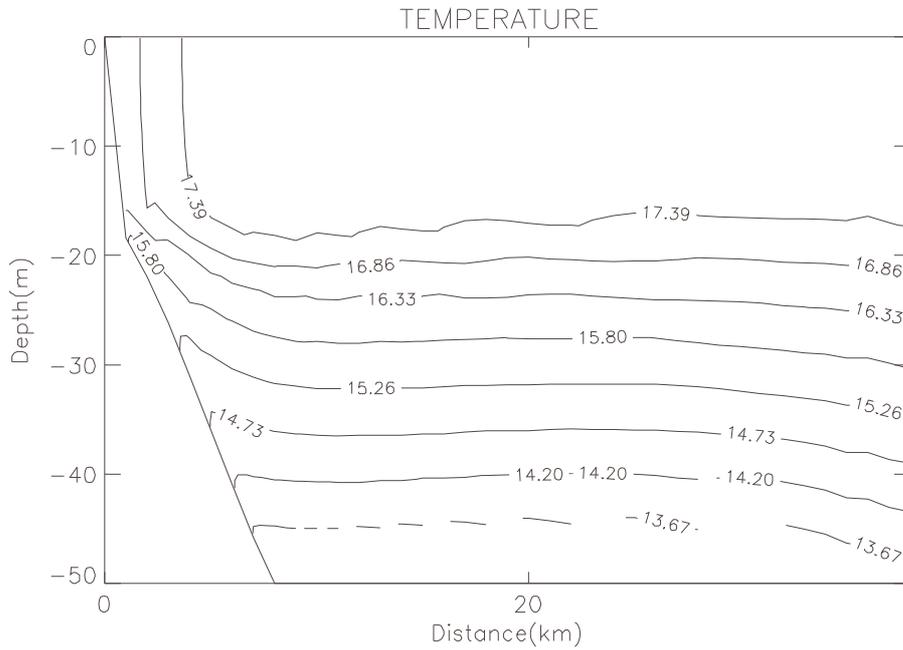


Figure 5 : Coupe verticale perpendiculaire à la côte. Composante verticale (positive vers le zénith) du courant après 96 h de simulation.



Min=16.49 Max=17.95 Niveau : 1m Iteration: 4320

Figure 6 : Température à 1 m de profondeur après 96 h de simulation.



Minimum=13.13 Maximum=17.93 Coupe J= 21 Iteration: 4320

Figure 7 : Coupe verticale perpendiculaire à la côte. Température après 96 h de simulation

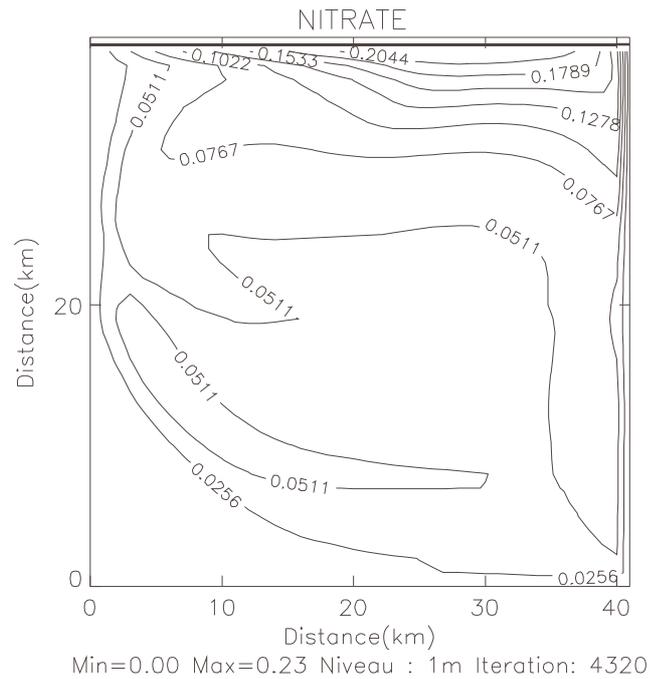


Figure 8 : Nitrate ( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ) à 1 m de profondeur après 96 h de simulation.

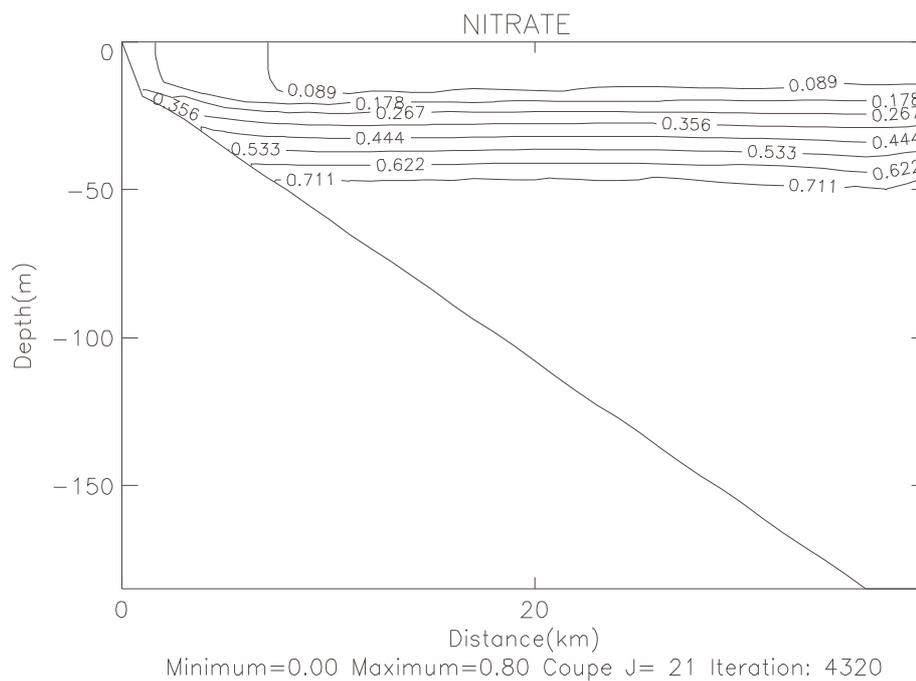


Figure 9 : Coupe verticale perpendiculaire à la côte. Nitrate ( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ) après 96 h de simulation

### 3. Représentation Lagrangienne

La trajectoire d'une particule dans ce système dépend de sa position initiale. A titre d'exemples, quelques trajectoires sont représentées sur les figures 10 à 12.

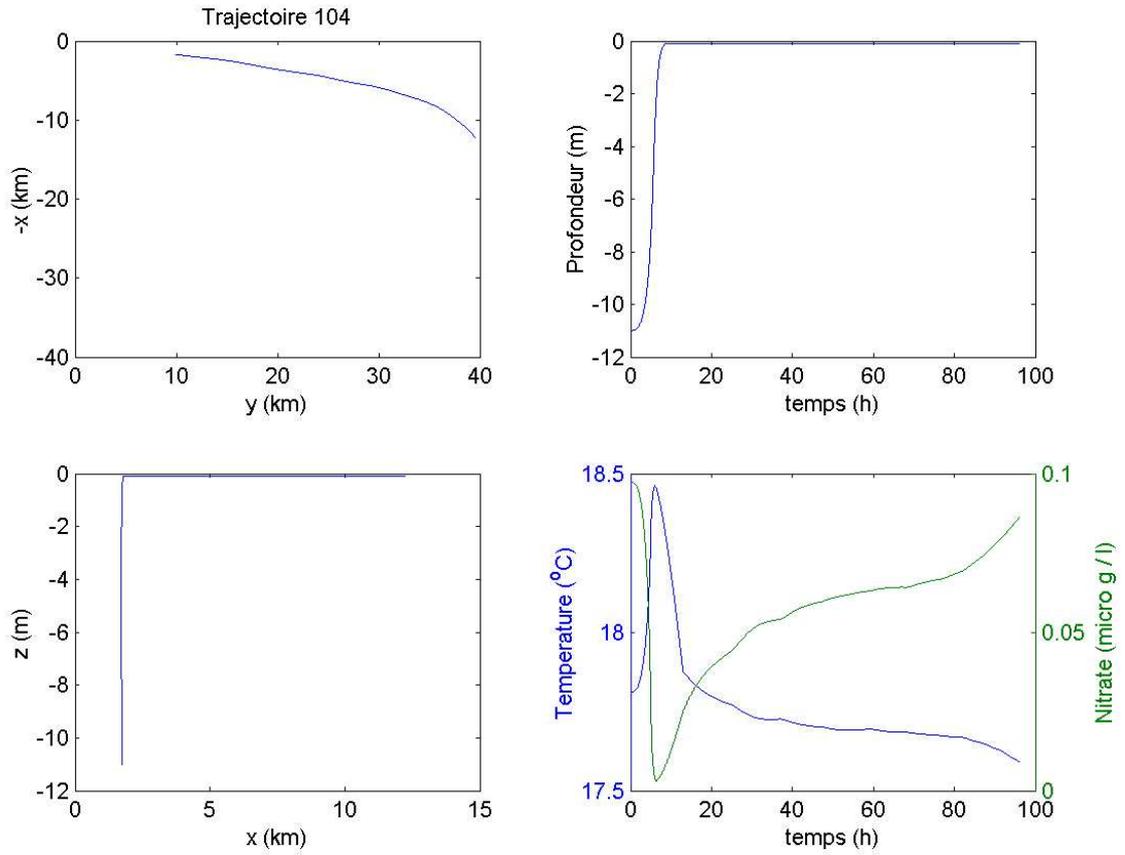


Figure 10 : Trajectoire de la particule 104 : Position initiale :  $x=3,5$  km,  $y=10$  km,  $z=11$  m.

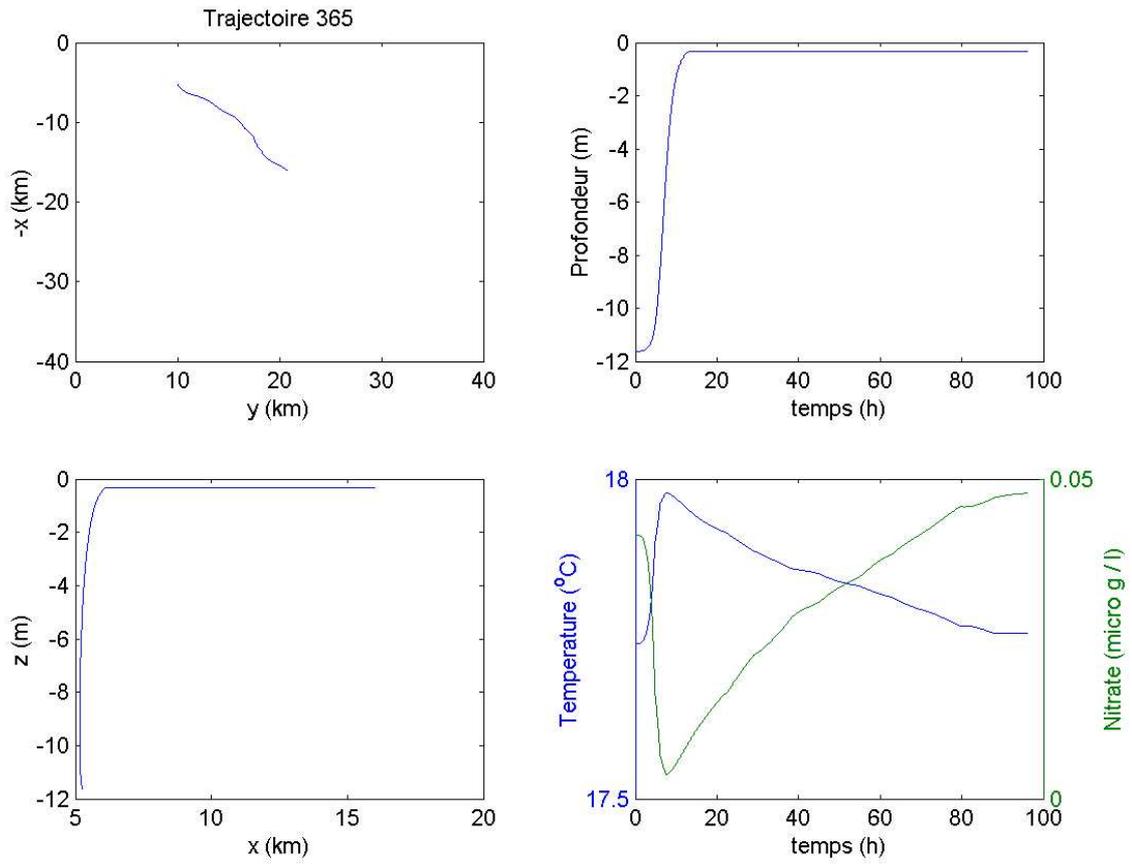


Figure 11 : Trajectoire de la particule 365 : Position initiale :  $x=5$  km,  $y=10$  km,  $z=11.5$  m.

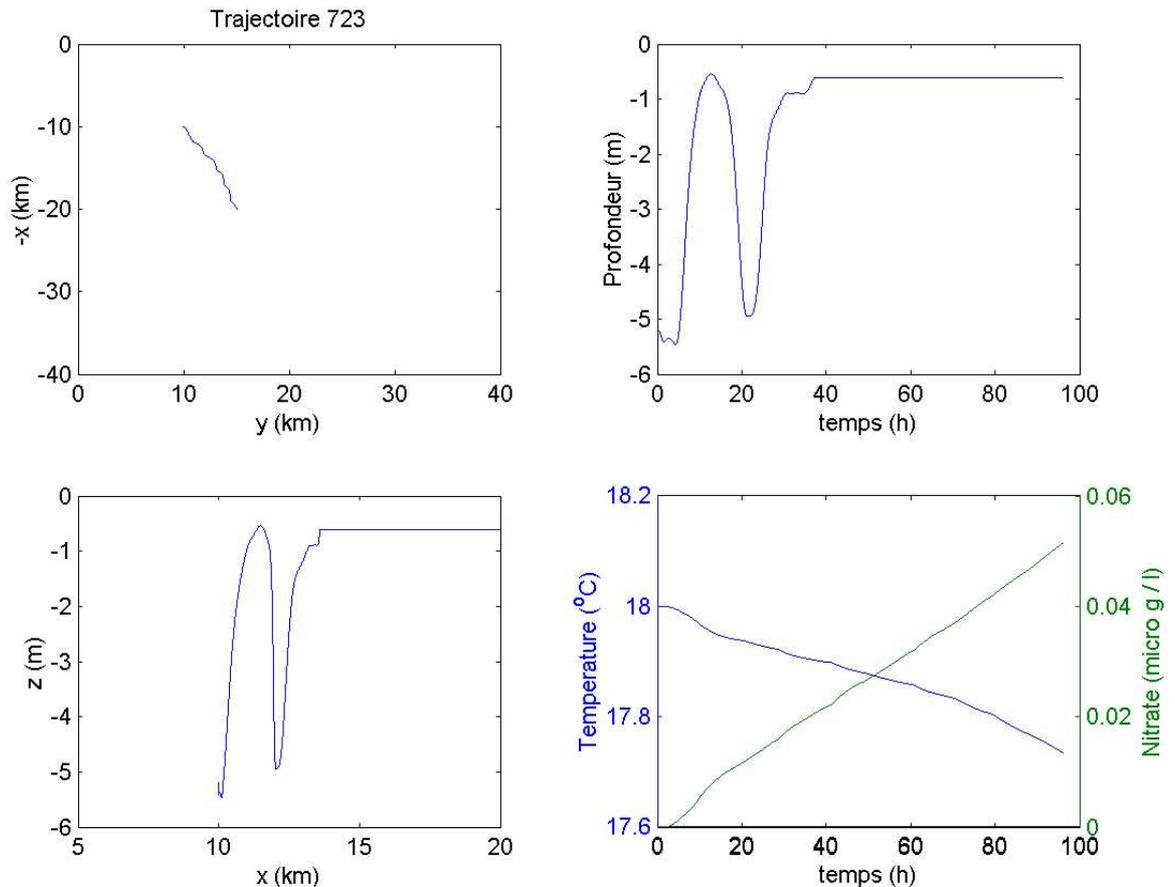


Figure 12 : Trajectoire de la particule 723 : Position initiale :  $x=10$  km,  $y=10$  km,  $z=5.5$  m.

Ces représentations montrent la diversité des trajectoires possibles. Toutefois, celles-ci restent des trajectoires « moyennes ». Les courants calculés par le modèle sont des courants moyens pour chaque maille qui dans le cas présent sont de 500 par 500 m à l'horizontale et variable entre 0.25 et 40 m à la verticale. Le calcul de la vitesse à la position précise de la particule se fait par interpolation des courants calculés aux mailles environnantes. Dans ce calcul, les courants « sous-mailles » n'influencent pas la trajectoire des particules. De même, le calcul des paramètres physico-chimiques (température et nitrate) se fait par interpolation des valeurs aux mailles proches de la position de la particule. Ces valeurs sont également des moyennes et les fluctuations turbulentes sous-mailles ne sont pas prises en compte.

Dans un tel modèle de circulation océanique, les effets de ces courants sous-mailles sur la circulation générale sont paramétrés via des coefficients de diffusion turbulente. Or, la trajectoire réelle d'une particule dépend de la circulation générale résolue par le modèle mais aussi de cette circulation locale qui n'est pas forcément résolue. Plus on réduit la maille de calcul et plus cette circulation peut être approchée. Cette influence de la taille de la maille devra faire l'objet de la suite de ce travail. Toutefois, à moins d'utiliser des méthodes sophistiquées, telles que les DNS (Direct Numerical Simulation, Léonard, 1995), jamais mises en œuvre pour les fluides géophysiques, il restera toujours une partie de l'écoulement non résolu. Cette expérience numérique montre la faisabilité de notre stratégie mais aussi ses limitations...

#### Références :

Crépon M. et Richez C., 1982. Transient upwelling generated by two-dimensional atmospheric forcing and variability in the coastline. *Journal of Physical Oceanography*, 12:1437-1456.

Estournel C., Kondrachoff V., Marsaleix P., Vehil R., 1997. The plume of the Rhone: numerical simulation and remote sensing. *Continental Shelf Research* 17, 899-924.

Fasham M.J.R., Ducklow H.W., McKelvie S.M., 1990. A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer. *Journal of Marine Research*, 48:591-639.

Foo E.C., 1991. A two-dimensional diabatic isopycnal model simulating the coastal upwelling front. *Journal of Physical Oceanography*, 11:604-626.

Kundu P.K., Chao S.Y., McCreary J.P., 1983. Transient coastal currents and inertio-gravity waves. *Deep-Sea Res.*, 30, 10A:1059-1082.

Leonard A., 1995. Direct Numerical Simulation. In: T. Gatski (ed.), *Turbulence and its Simulation*, Springer, New York.

Leredde Y., 1999. Méthode d'assimilation de données par contrôle optimal appliquée à l'estimation de paramètres de diffusion turbulente dans un modèle 3D de circulation océanique. *Thèse de doctorat. Université d'Aix-Marseille II. 149 pp.*

Richards F.A., 1981. Coastal Upwelling. *Coastal and Estuarine Sciences*. American Geophysical Union.

Verdier-Bonnet C., 1995. Modélisation des écoulements côtier stratifiés à surface libre et paramétrisation de la turbulence. Application à la dissémination larvaire. *Thèse de Doctorat. Université d'Aix-Marseille II, 190 pp.*