



Transport de polluants dans la lagune de Bizerte simule par un modèle de circulation de l'eau

Item Type	Journal Contribution
Authors	Harzallah, A.
Citation	Bull. INSTM Salammbô, 30, p. 121-133
Publisher	INSTM
Download date	09/02/2023 09:04:23
Link to Item	http://hdl.handle.net/1834/1114

TRANSPORT DE POLLUANTS DANS LA LAGUNE DE BIZERTE SIMULE PAR UN MODELE DE CIRCULATION DE L'EAU

Ali Harzallah*

Institut National des Sciences et Technologies de la Mer - Salammbô.

*ali.harzallah@instm.rnrt.tn

ملخص

نموذج حسابي لتمثيل تنقل المياه وتسرب المواد الملوثة في بحيرة بنزرت : لقد تم تطبيق نموذج حسابي لتمثيل تنقل المياه وتسرب المواد الملوثة في بحيرة بنزرت. يتكون النموذج من ثلاثة أبعاد وهو يأخذ في الحسبان تبادل كميات المياه، الأملاح والطاقة بين البحيرة والبيئة المحيطة بها. وفي هذا النموذج مثالي حسابي لتسرب المواد الملوثة اللاتفاعلية. لقد تم تطبيق النموذج لتمثيل تسرب هذه المواد من موقع في جنوب غرب البحيرة ثم في أهم المواقع حول البحيرة. ولقد استعملت الرياح التي قيست والمد والجزر من البحر.

لقد أثبتت النتائج ان المواد الملوثة تتبخر في المياه في خلال بضع ساعات.
كلمات مفاتيح : نموذج حسابي، تنقل المياه، تسرب المواد الملوثة، بحيرة بنزرت.

RESUME

Un modèle numérique simulant la dynamique de l'eau et le transport d'un traceur passif a été appliqué à la lagune Bizerte. L'objectif est d'étudier le comportement des rejets de type industriel ou urbain une fois émis dans la lagune. Le modèle utilisé est tridimensionnel et tient compte les échanges d'eau, de sel et de chaleur entre les eaux de la lagune et son milieu environnant. Il inclut un module de transport de traceur passif. Des simulations numériques ont été faites en considérant des rejets se faisant à partir d'un site test puis à partir des principaux sites d'émission dans la lagune. Les simulations sont forcées par des situations reproduisant les vents et la marée observés. Les résultats montrent que les rejets mettent quelques heures pour se disperser dans l'eau. Les rejets sont emportés par l'eau vers l'Est jusqu'au bord, puis se dirigent vers l'Ouest en s'enfonçant dans l'eau. Ils atteignent le bord Ouest après environ une semaine. Les rejets mettent par contre un temps beaucoup plus long (environ 7 mois) pour quitter définitivement la lagune. Ce temps long est du au fait que les oscillations de la marée ne permettent d'évacuer qu'une partie du traceur disponible. Une grande partie du traceur qui sort de la lagune durant la phase sortante de la marée y rentre durant la phase rentrante. Le temps de résidence des rejets dans la lagune permet d'envisager une amélioration de l'état de la lagune en quelques mois dès l'arrêt des émissions.

Mots clefs : Modèle numérique, transport, polluant, lagune, Bizerte

ABSTRACT

Pollutant advection in the Bizerte lagoon simulated by a water circulation model : A numerical model simulating the dynamics of water and passive tracer advection was applied to the lagoon of Bizerte. The objective is the study of the behaviour of industrial or urban inputs into the lagoon. The model is three-dimensional and takes into account the exchanges of water, salt and heat between the waters of the lagoon and the surrounding environment. It includes a model of passive tracer advection. Numerical simulations were done considering inputs from one test then from the principal source sites around the lagoon. Simulations are forced by realistic winds and tides. The results show that tracer dispersion occurs during few hours. The tracer is transported by water circulation towards the eastern edge of the lagoon, then towards the Western edge in deeper layers. They reach the western edge after about a week. The tracer leaves the lagoon through the channel on a longer time, about 7 months. This long time results from that tide oscillations do not allow the tracer to leave the lagoon without recycling. A large part of the tracer that leaves the lagoon during the outflow returns back in during the inflow. The residence time of the tracer in the lagoon suggests that an improvement of the lagoon is possible few months after the tracer input stops.

Key words : Numerical model, transport, pollutant, lagoon, Bizerte

INTRODUCTION

L'hydrodynamique de la lagune de Bizerte (Nord de la Tunisie, Figure 1) est complexe puisqu'elle fait intervenir en plus de la connexion avec la mer, les échanges avec le lac Ichkeul à travers l'Oued Tinja, la forte évaporation, les apports d'eau par les rivières et la contribution du bassin versant. De même les variations de la pression atmosphérique doivent jouer un rôle important sur les échanges d'eau. La circulation de l'eau dans la lagune est principalement gouvernée par deux facteurs, la marée et le vent. Pour la marée, la lagune subit les variations de la hauteur d'eau de la

Méditerranée, la marée propre à la lagune étant très faible. Le vent agit sur les couches de surface et déplace l'eau selon la direction dominante du vent qui est le Nord-Ouest.

La lagune de Bizerte est aussi caractérisée par un nombre croissant d'unités industrielles qui couvrent des activités variées (petites et moyennes industries, industrie portuaire, etc.). Ces unités exercent une pression importante sur la lagune de part les rejets qu'elles y déversent et des matériaux et éléments charriés par les eaux de ruissellement. La Figure 1 montre Les principaux sites de rejets industriels et urbains ainsi que les principales rivières qui déversent dans la lagune.

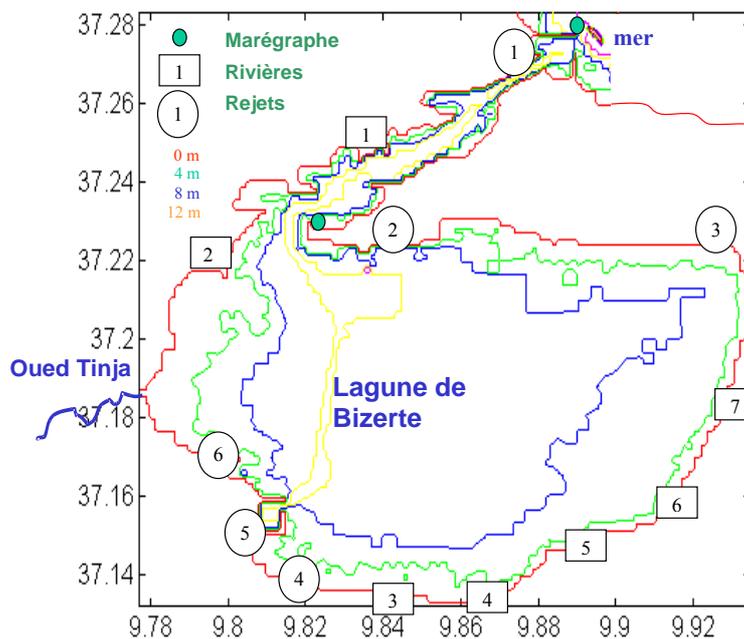


Figure 1.: Contour et bathymétrie de la lagune de Bizerte. L'emplacement de deux marégraphes est représenté par un cercle plein. Les principales rivières sont représentées par des cercles vides ; les principaux points de rejets domestiques et industriels sont représentés par des rectangles vides.

La lagune est soumise à des apports de tous les bords avec une plus grande concentration au Nord, Nord-Ouest et au Sud-Ouest au voisinage des grandes agglomérations. Pour un tel système faisant intervenir une hydrodynamique complexe et des rejets multiples, seule une modélisation numérique peut constituer un outil d'étude performant. Le modèle numérique doit contenir une modélisation du déplacement de l'eau de façon tridimensionnelle puisque la lagune de Bizerte est un milieu relativement profond (7 m de profondeur moyenne et 15 m de profondeur maximale, Figure 1). De même, le modèle doit inclure une modélisation du transport de rejet afin de suivre son déplacement et déduire le temps de résidence dans la lagune de la matière émise.

La lagune de Bizerte qui couvre une superficie de 128 km² était considérée comme l'une des plus poissonneuses au monde où l'on pouvait dénombrer 30 espèces différentes (Groupe Lagune de Bizerte, 1999). Les différents aménagements effectués ont fortement affecté cet équilibre naturel faisant varier son bilan hydrique. Le total des apports d'eau douce a chuté de 165 millions de m³/an à seulement 20 millions de m³/an après la construction de barrages sur les bassins versants du lac Ichkeul et est devenu tributaire des programmes de gestion de l'ensemble de l'infrastructure mise en place (ANPE, 1990, Ben Mbarek, 1995). Ces aménagements ont engendré des modifications profondes sur les caractéristiques hydrobiologiques de la lagune dont en particulier la salinité de ses eaux (Harzallah et al, 2003).

Un modèle numérique a été développé pour la lagune de Bizerte. Dans ce modèle plusieurs aspects de la dynamique de la lagune ont été étudiés (Harzallah et Vladimir, 2001 ; Harzallah et al., 2003). La circulation a en effet été étudiée de façon détaillée et le schéma ancien donné par Frisoni et Guelorget (1983) corrigé. Ainsi les échanges d'eau, de sel et de chaleur entre la lagune et la mer ont été étudiés pour les saisons d'hiver et d'été. Les variations du niveau de l'eau dues à la pression atmosphérique et à la marée ont été examinées. Les observations faites dans la lagune ont montré que le modèle simule de façon réaliste la dynamique de la lagune. Dans le présent article, nous allons étudier la manière dont un modèle numérique simule l'advection et la dispersion de traceurs émis dans la lagune de Bizerte afin d'étudier leurs impacts. Le traceur est considéré passif et complètement dissous dans l'eau de l'émissaire d'où il est émis. Dans la section suivante du présent article nous allons donner une description du modèle et en particulier les équations qui régissent le déplacement de l'eau et le transport de traceurs. Dans la 3^{ème} section nous allons montrer les résultats de simulations de la circulation de l'eau et du transport de traceur. Des conclusions seront présentées dans la 4^{ème} section de cette étude.

DESCRIPTION DU MODELE

A-Fonctionnement du modèle

Le modèle est basé sur les équations primitives de circulation (équations de Navier Stokes) appliquées à un bassin rectangulaire (*POM: Princeton Ocean Model*, (Mellor et Blumberg, 1985 ; Mellor, 1996). Le modèle est à surface libre. Il est à coordonnées verticales sigma. La grille horizontale est curviligne orthogonale avec un schéma de discrétisation de type « Arakawa C ». La discrétisation temporelle est explicite mais la discrétisation verticale est implicite ce qui permet de s'affranchir des contraintes sur le pas de temps pour la coordonnée verticale et permet l'utilisation d'une résolution fine près de la surface et d'une couche limite près du fond. Le pas de temps du modèle est composé d'un pas de temps court pour le mode bidimensionnel externe déterminé par la condition de stabilité de Courant-Friedrichs-Levy (CFL) sur la vitesse de propagation de l'onde externe, et d'un pas de temps long pour le mode tridimensionnel interne déterminé par la condition CFL sur la vitesse de propagation de l'onde interne.

Le modèle incorpore une thermodynamique complète et une fermeture turbulente du second ordre (Mellor et Yamada, 1982) pour le mélange vertical, ainsi qu'une couche limite au fond. Les variables calculées par le modèle sont la vitesse et la direction du déplacement de l'eau, sa température, sa salinité et sa densité. La lagune de Bizerte a été divisée en volumes élémentaires (52 éléments dans la direction zonale, 61 selon la direction méridienne et 7 selon la direction verticale). La Figure 2

montre une vue horizontale de la grille du modèle. La grille du modèle étant curviligne, les éléments ont des volumes différents.

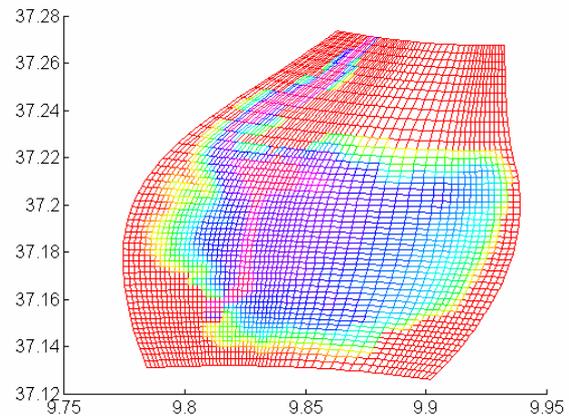


Figure 2 : Grille du modèle de l'INSTM représentant la lagune de Bizerte. Les nuances de gris représentent la profondeur de l'eau (gris clair : 2-3 m ; gris foncé > 7 m).

Les points de grille (les nœuds des éléments) sont plus rapprochés dans le canal et plus éloignés à l'intérieur de la lagune. La bathymétrie utilisée a été obtenue par numérisation d'une carte bathymétrique de la lagune relativement ancienne mais qui a été mise à jour à plusieurs reprises notamment lors du creusement du chenal de navigation reliant la mer à l'arsenal de Menzel Bourguiba. Le modèle utilise comme conditions aux limites (variables nécessaires au modèle) :

- La tension du vent et la pression atmosphérique qui agissent sur la surface de l'eau, obtenues à partir des données météorologiques.
- Le rayonnement infrarouge émis de la lagune vers l'atmosphère et la quantité de chaleur échangée entre l'eau de la lagune et l'atmosphère par conduction obtenus à partir de données météorologiques. La chaleur latente d'évaporation (et donc l'évaporation elle-même) des eaux de la lagune obtenue à partir de données faites sur la lagune (Groupe lagune de Bizerte, 2000)
- La précipitation, les apports continentaux (rivières, bassin versant, rejets urbains, rejets industriels) et les apports du lac Ichkeul obtenus à partir de données faites sur la lagune (Groupe lagune de Bizerte, 2000).
- Le niveau de l'eau de la marée à l'entrée du canal observé ou calculé théoriquement.

Une propriété fondamentale du modèle est qu'il n'y a pas de conditions imposées pour les flux à la frontière ouverte de la lagune avec la mer. Le modèle doit calculer le flux nécessaire à équilibrer la perte ou le gain d'eau à la surface. Ceci permet de réaliser différentes d'expériences et de tester des scénarios d'évolution.

Les conditions initiales du modèle sont les champs tridimensionnels de température et de salinité. Ils sont obtenus à partir d'une analyse objective de données

décrites dans le Groupe lagune de Bizerte (2000). Nous avons supposé qu'à l'état initial la lagune soit en équilibre dynamique sans déplacement d'eau. La vitesse de déplacement de l'eau et le niveau de l'eau sont donc pris égaux à zéro initialement. Dans la présente version le pas de temps du modèle est de 2 mn ; il atteint un équilibre dynamique après quelques jours d'intégration.

B- Les équations du modèle

Les équations de base du modèle sont décrites dans Mellor (1996). Le présente version du modèle diffère par l'introduction de la pression atmosphérique comme variable de forçage dynamique du modèle et par l'introduction des différents flux de chaleurs de sel et échanges d'eau. Le présente version incorpore aussi une modélisation de transport de traceurs qui sera présentée plus bas. D'autres versions incorporent des modules d'advection et de transport de sédiment, des modules écologiques ont été développés et son en cours de test. Les coordonnées *sigma* du modèle sont définis par la transformation suivante et illustrées par la Figure 3.

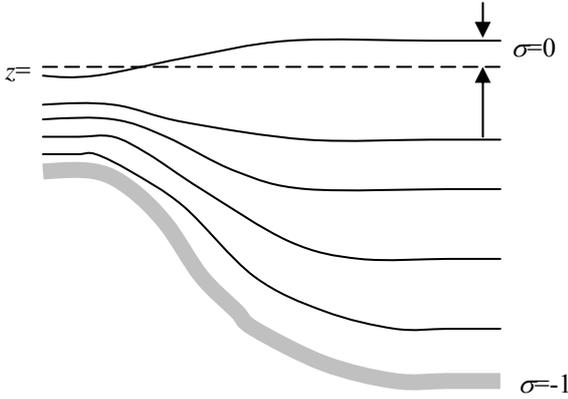


Figure 3 : Le système de coordonnée *sigma*.

$$\sigma = \frac{z-\eta}{H+\eta}, \quad x, y, t : \text{invariées} \quad (1)$$

Avec $D=H+\eta$, $H(x,y)$ est la bathymétrie, $\eta(x,y)$ est la l'élévation de la surface de l'eau. σ varie de $\sigma=0$ à $z=\eta$ à $\sigma=-1$ à $z=-H$. Les équations de la présente version modèle sont écrites dans ce système de coordonnées. Dans des coordonnés cartésiennes horizontales l'équation de continuité s'écrit :

$$\frac{\partial UD}{\partial x} + \frac{\partial VD}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = Es \quad (2)$$

U et V sont les deux composantes horizontales de la vitesse, Es est le bilan net d'eau échangé entre la lagune à sa surface en provenance des terres (rivières), ω est la composante de la vitesse normale aux surfaces *sigma*. Les deux équations pour la vitesse horizontale sont données par :

$$\frac{\partial UD}{\partial x} + \frac{\partial UUD}{\partial x} + \frac{\partial UVD}{\partial y} + \frac{\partial U\omega}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta_x = -\frac{D\partial Pa}{\rho \partial x} + F_{KM}(U) + F_x \quad (3)$$

$$\frac{\partial VD}{\partial y} + \frac{\partial UVD}{\partial x} + \frac{\partial V2D}{\partial y} + \frac{\partial V\omega}{\partial \sigma} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \beta_y = -\frac{D\partial Pa}{\rho \partial y} + F_{KM}(V) + F_y \quad (4)$$

L'équation pour la température est donnée par :

$$\frac{\partial TD}{\partial t} + \frac{\partial TUD}{\partial x} + \frac{\partial TVD}{\partial y} + \frac{\partial T\omega}{\partial \sigma} = F_{KH}(T) + F_T - \frac{\partial R}{\partial z} \quad (5)$$

L'équation pour la salinité est donnée par

$$\frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial SUD}{\partial x} + \frac{\partial SVD}{\partial y} + \frac{\partial S\omega}{\partial \sigma} = F_{KH}(s) + F_S \quad (6)$$

Pour les besoins de fermeture des équation le modèle inclut aussi deux équations l'une pour l'énergie cinétique turbulente q^2 et l'autre pour le produit de l'énergie cinétique turbulente par une longueur de mélange q^2l .

Dans ce système d'équations, f est l'accélération de Coriolis $f=2\Omega \sin \Phi$, Φ étant la latitude de la lagune supposée constante, ρ est la densité, Pa est la pression atmosphérique, ρ'_x et ρ'_y sont les gradients de pression barocline (dues à une variation de la densité) :

$$\rho'_{(x,y)} = \frac{gD}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho'}{\partial (x,y)} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial (x,y)} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' \quad (7)$$

g est l'accélération de la pesanteur. F_{KM} et F_{KH} sont les forces de frottements dues à la viscosité cinématique verticale K_M et à la diffusion verticale K_H d'une quantité Q :

$$F_{KM}(U,V) = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial (U,V)}{\partial \sigma} \right]$$

$$F_{KH}(Q) = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right] \quad (8)$$

F_x et F_y sont les forces dues à la viscosité cinématique horizontale A_M et à la diffusion horizontale A_H de la quantité Q :

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} (H \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H \tau_{xy})$$

$$F_y = \frac{\partial}{\partial x} (H \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (H \tau_{yy}) \quad (9)$$

Les 3 composantes de la tension sont données par :

$$\tau_{xx} = 2A_M \frac{\partial U}{\partial x}, \tau_{xy} = \tau_{yx} = A_M \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \tau_{yy} = 2A_M \frac{\partial V}{\partial y} \quad (10)$$

et

$$F_Q = \frac{\partial}{\partial x} (Hq_x) + \frac{\partial}{\partial y} (Hq_y) \quad (11)$$

$$q_x = A_H \frac{\partial Q}{\partial x}, q_y = A_H \frac{\partial Q}{\partial y} \quad (12)$$

La quantité Q peut être T, S, q^2, q^2l . La diffusivité de Smagorinski est utilisée pour calculer A_M :

$$A_M = C \Delta x \Delta y \frac{1}{2} \left| \nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T \right| \quad (13)$$

avec :

$$\left| \nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T \right| / 2 = \left[(\partial u / \partial x)^2 + (\partial v / \partial x + \partial u / \partial y)^2 + (\partial v / \partial y)^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

Les valeurs de C varient entre 0.1 et 0.2. Si la grille est assez fine C peut être nulle. Les avantages de la diffusion de Smagorinsky sont : C est non dimensionnel, A_M diminue quand la résolution augmente et donc : A_M est faible si le gradient des vitesses est faible. Les conditions aux limites verticales pour l'équation de continuité (2) sont données par

$$\omega(0) = \omega(-1) = 0 \quad (15)$$

Celles pour la quantité de mouvement :

$$\frac{K_M}{D} \left(\frac{\partial U}{\partial \sigma}, \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) = -(\langle wu(0) \rangle, \langle wv(0) \rangle), \sigma \rightarrow 0 \quad (16)$$

où le terme de droite de (16) est le flux turbulent du moment à la surface (opposé à la tension du vent).

Les conditions aux limites au fond supposent un profil de couche limite en Ln :

$$\frac{K_M}{D} \left(\frac{\partial U}{\partial \sigma}, \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) = -C_z [U_2 + V_2]^{1/2} (U, V), \sigma \rightarrow -1 \quad (17)$$

$$C_z = \text{MAX} \left[\frac{k_2}{[\ln\{(1 + \sigma^{kb-1})H/z_0\}]^2}, 0.0025 \right] \quad (18)$$

$k=0.4$ est la constante de von Karman et z_0 est le paramètre de rugosité. Les conditions aux limites pour (5) et (6) sont :

$$\frac{K_H}{D} \left(\frac{\partial T}{\partial \sigma}, \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) = -(\langle wT(0) \rangle, \langle wS(0) \rangle), \sigma \rightarrow 0 \quad (19)$$

où le terme de droite de (19) est le flux de chaleur et de sel échangé entre la lagune et l'atmosphère.

$$\frac{K_H}{D} \left(\frac{\partial T}{\partial \sigma}, \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) = 0, \sigma \rightarrow -1 \quad (20)$$

Des conditions appropriées sont imposées à q^2 et q^2l . Pour des raisons d'économie de calcul, le mode externe (moyenne verticale) et calculé séparément du mode interne. Cette technique permet le calcul de la surface libre en résolvant l'équation de continuité. Ces équations sont obtenues en intégrant verticalement les équation (2) à (4) et en utilisant les conditions aux limites (1).

Ayant calculé, le mode externe, la moyenne verticale de la vitesse du mode interne (mode barocline) du pas d'avant est ajustée pour égaliser la vitesse barotrope. On calcule alors le mode interne. Dans la présente version 30 itérations externes sont calculées pour un pas de temps externe.

Le calcul des variables internes (température et salinité) se fait en deux étapes, l'advection et la diffusion horizontale suivies de la diffusion verticale. Le premier calcul est explicite alors que le deuxième est implicite.

Un calcul similaire est fait pour la vitesse. Les schémas numériques suivants illustrent ces calculs pour le cas de la température :

$$\frac{D_{n+1}\tilde{T} - D_n T_{n-1}}{2\Delta t} = -Adv(T_n) + Dif(T_{n-1}) \quad (21)$$

$$\frac{D_{n+1}T_{n+1} - D_n \tilde{T}}{2\Delta t} = \frac{1}{D_{n+1}} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_H \frac{\partial T_{n+1}}{\partial \sigma} \right) - \frac{\partial R}{\partial \sigma} \quad (22)$$

Dans ce schéma numérique 'leap frog' un filtre est appliqué pour lisser le résultat. La condition de CFL principale (sur l'équation de transport du mode externe intégrée verticalement) limite le pas de temps selon :

$$\Delta t_E \leq \frac{1}{C_l} \left| \frac{1}{\delta x_2} + \frac{1}{\delta y_2} \right|^{-1/2} \quad (23)$$

$$C_l = 2(gH)^{1/2} + U_{\max} \quad (24)$$

avec U_{\max} la vitesse maximale. Dans la présente version, le pas de temps est de 2mn (4 secondes pour la pas de temps externe).

Les conditions aux limites aux frontières ouvertes sont :

$$\eta_{\text{int}} = \eta_{\text{ext}} \quad (25)$$

et pour T et S , un schéma amont en définissant une température et une salinité externe.

C- Module du transport de traceurs

La version actuelle du modèle inclut un module de transport de traceurs passifs. Ce module incorpore les mêmes équations que celles pour la température et la salinité. L'équation pour un traceur p est donnée par :

$$\frac{\partial p D}{\partial t} + \frac{\partial p U D}{\partial x} + \frac{\partial p V D}{\partial y} + \frac{\partial p \omega}{\partial \sigma} = F_{KH}(p) + F_p \quad (26)$$

où la diffusion verticale de p est donnée par :

$$F_{KH}(p) = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \right] \quad (27)$$

avec K_H la diffusion verticale du traceur p . Le terme de diffusion horizontale est donné par :

$$F_p = \frac{\partial}{\partial x} (H p_x) + \frac{\partial}{\partial y} (H p_y) \quad (28)$$

$$p_x = A_H \frac{\partial p}{\partial x}, p_y = A_H \frac{\partial p}{\partial y} \quad (29)$$

La condition aux limites au fond est similaire à celle de la salinité alors qu'à la surface, elle est donnée par :

$$\frac{K_H}{D} \left(\frac{\partial p}{\partial \sigma} \right) = -(\langle w p(0) \rangle), \sigma \rightarrow 0 \quad (30)$$

Le terme de droite représente le flux du traceur p à travers la surface de l'eau, égal dans notre cas aux apports en provenance des terres.

Les conditions aux limites aux frontières ouvertes pour le traceur sont représentées par un schéma amont d'advection en définissant une température et une salinité externes.

SIMULATION DE TRANSPORT DE POLLUANT

A. Débits d'eau

Afin d'étudier la circulation de l'eau dans la lagune le modèle est démarré à partir d'un état initial correspondant à la situation moyenne de température et de salinité de l'eau et avec une vitesse de courant nulle. Le modèle utilise un pas de temps de 2 mn et atteint un équilibre dynamique au bout de quelques jours d'intégration. Une simulation de 30 jours a été faite. A partir des résultats de cette simulation, les moyennes des champs sur les 10 derniers jours de la simulation ont été calculées. Le Tableau I résume les différents flux à la surface et en provenance des terres utilisés par le modèle et déduits de ANPE (1990) et Ben Hadj (1992).

Tableau I : Echanges d'eau avec la lagune de Bizerte en m³/s. Les valeurs correspondent à la situation après les aménagements. Les valeurs correspondantes à la situation avant les aménagements sont données entre parenthèses.

Flux d'eau échangé	m ³ /s
Evaporation	-5.26
Précipitation	2.34
Rivières	0.98
Apport d'Ichkeul	0.63 (5.23)
Entrée d'eau de mer (sortie)	1.31 (-3.29)

L'équilibre dynamique fournit un flux d'eau dirigé de la mer vers la lagune égal à celui calculé : 1.31 m³/s. La lagune est de type bassin de concentration, les pertes d'eau par évaporation excèdent les apports d'eau douce. La salinité pourrait donc augmenter dans la lagune jusqu'à ce que le gradient de densité avec la mer devienne suffisamment fort pour qu'il engendre une sortie d'eau salée. Dans ce cas il est fort probable qu'un écoulement barocline a lieu au niveau du canal de sortie et vienne se superposer aux oscillations barotropes de la marée. La situation d'avant la marée correspondait à un flux net dirigé de la lagune vers la mer. Il y'avait un surplus d'eau douce et la lagune était un bassin de dilution. Les différents termes du bilan de chaleur calculés à partir des données reportées dans le Groupe Lagune de Bizerte (1999) et à partir de données météorologiques récoltées par ailleurs sont résumés dans le tableau II :

Tableau II : Echanges thermiques faisant intervenir la lagune de Bizerte (en W/m²). Les valeurs correspondent à la situation après les aménagements.

Flux de chaleurs (+vers la mer)	W/m ²
Echanges avec l'atmosphère	-1.04
Rivières et apport d'eau continentale	0.81
Apport d'Ichkeul	0.43
Entrée d'eau de mer	-0.20

Le bilan de chaleur de la lagune (après les aménagements) est presque équilibré. Seule une faible

quantité de chaleur (-0.2 W/m²) est véhiculée vers la mer. Le bilan de chaleur doit varier énormément selon la saison et l'année. Les calculs montrés ici sont donnés à titre indicatif mais permettent de comprendre le fonctionnement de la lagune du point de vue thermique. La simulation d'un mois fournit un flux sortant de 0.21 W/m² très proche de la valeur calculée (0.2 W/m²). Les aménagements sur Ichkeul n'ont sûrement pas eu des implications importantes sur le bilan de chaleur dans la lagune, à l'opposé des variations importantes qui ont eu lieu sur la salinité. Dans le modèle la prise en compte des apports d'eau, de sel et de chaleur à partir des différentes sources telles que présentées dans la figure 1 se fait en les considérant se faisant à la surface donc comme conditions aux limites des équations (8) :

$$\frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial (U, V)}{\partial \sigma} \right] = \text{apports d'eau en kg/m}^2/\text{s en } \sigma=0$$

$$\frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right] = \text{apports de sel et de chaleur en g/m}^2/\text{s}$$

ou en W/m²

B. Circulation des masses d'eau

La vitesse de déplacement du courant (une simulation avec effet du vent mais sans marée) est présentée en Figure 4. L'analyse de cette vitesse est importante car elle renseigne sur la trajectoire des masses d'eau de la lagune et permet d'ainsi d'étudier de quelle manière est transportée une particule émise dans ce bassin. Elle permet aussi de distinguer les régions qui sont à l'abri de toute pollution, des zones où une pollution est potentiellement possible. La figure 4 montre cette vitesse à la surface de l'eau sous des conditions de vent du Nord-Ouest (tension du vent de l'ordre de 0.02 N/m²/s)

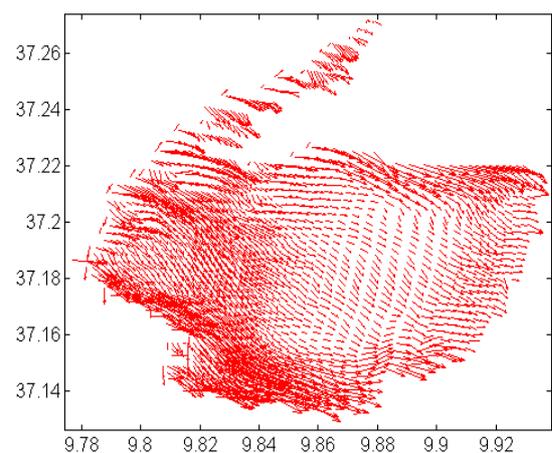


Figure 4 : Circulation de l'eau de surface simulée par le modèle de l'INSTM. Le modèle est forcé par un vent du Nord-Ouest.

Les eaux de surface, soumises à des tensions du Nord-Ouest (situation dominante dans la région de Bizerte), se

de la lagune. L'intensité de ce déplacement est plus forte dans le bord Ouest, Sud et Nord qu'en milieu et à l'est de la lagune. Ceci a pour conséquence un renouvellement des eaux aux bords Ouest, Sud et Nord plus rapide qu'au centre et au bord est. Comme le montre la Figure 4, le déplacement des eaux à la surface suit fortement la direction du vent. Nous avons effectué une simulation dans la quelle nous avons considéré des vents de même intensité mais de sens inverse (vent du Sud-Est qui soufflent le matin). La simulation a montré un déplacement des eaux similaire à celui montré en Figure 4 mais de sens inverse. Le déplacement des eaux au fond n'est pas tout à fait similaire à celui de la couche de surface. La Figure 5 montre la vitesse intégrée (vitesse barotrope) sur toute la hauteur de l'eau pour des vents du Nord-Ouest.

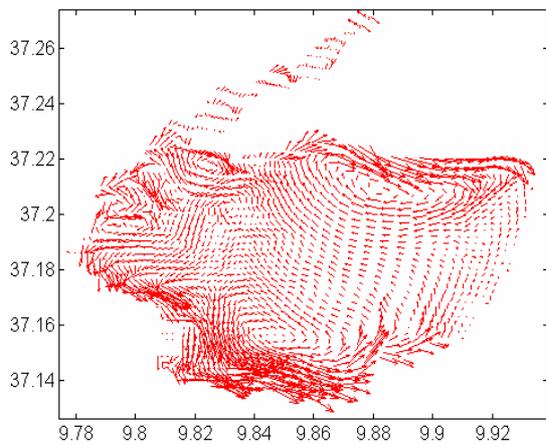


Figure 5: Circulation de l'eau intégrée verticalement (barotrope) simulée par le modèle de l'INSTM. Le modèle est forcé par un vent du Nord-Ouest.

La circulation de l'eau intégrée verticalement montre aussi un déplacement du Nord-Ouest au Sud-Est se faisant essentiellement aux bord Nord et Sud. La circulation aux bords Est et Nord et au centre de la lagune est faible. Un retour d'eau vers le Nord-Est est cependant noté dans le centre de la lagune et en particulier de part et d'autre des bords Nord et Sud. Les zones au Nord et au Sud de la lagune sont donc des régions de renouvellement de l'eau. Ce sont des régions potentiellement propices à une activité d'exploitation conchylicole ou autre. Les parties Est des bords Nord et Sud sont cependant situées en aval des circulations intenses et pourraient donc subir l'influence d'une pollution potentielle amont. Les régions qui nous semblent les plus à l'abri sont celles au nord de l'Oued Tinja et à l'ouest Menzel Abderrahmen.

Pour étudier l'effet de la marée sur la circulation de l'eau dans la lagune de Bizerte, nous avons forcé le modèle avec la marée observée au niveau de la brise lames (Figure 1). La hauteur de la marée est de l'ordre de 10 à 12 cm. A partir d'une simulation d'une dizaine de jours, nous avons déterminé la hauteur de l'eau due à la marée dans plusieurs endroits de la lagune. Les observations montrent un retard des oscillations de la hauteur de l'eau à l'intérieur du goulet par rapport à l'extérieur de 1H27 mn (Figure 6)

. Un retard similaire est aussi trouvé dans la hauteur d'eau simulée au fur et en mesure qu'en progresse vers l'intérieur de la lagune (Figure 7). L'essentiel de ce retard, en très bon accord avec les observations, se fait quand l'eau traverse le canal (points rouge et bleu). Il est de l'ordre de 1H15. A la sortie du goulet (point jaune) le retard est d'environ 2H00. Il n'y a presque pas de retard au-delà du goulet. L'étranglement provoqué par le canal est donc bien simulé par le modèle ainsi que le retard qui

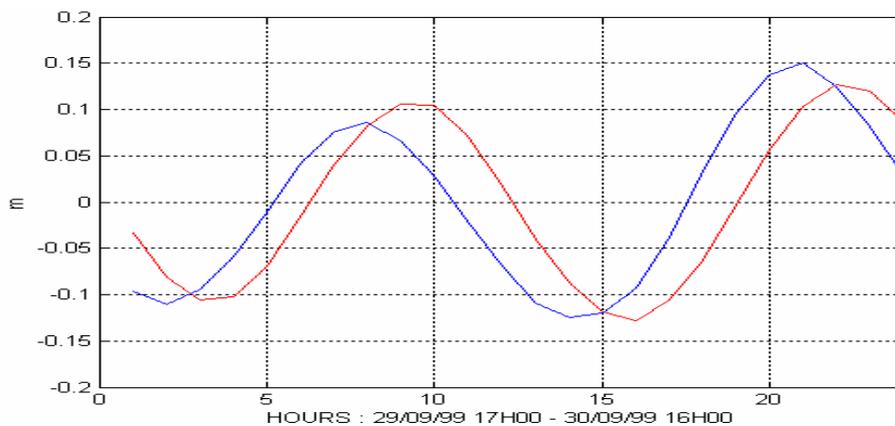


Figure 6 : Marée observée à l'extérieur de la lagune (première courbe) au niveau de la brise-lames et au goulet (deuxième courbe) au niveau de son rattachement à l'intérieur de la lagune. Le retard entre les deux courbes est d'environ 1H27mn.

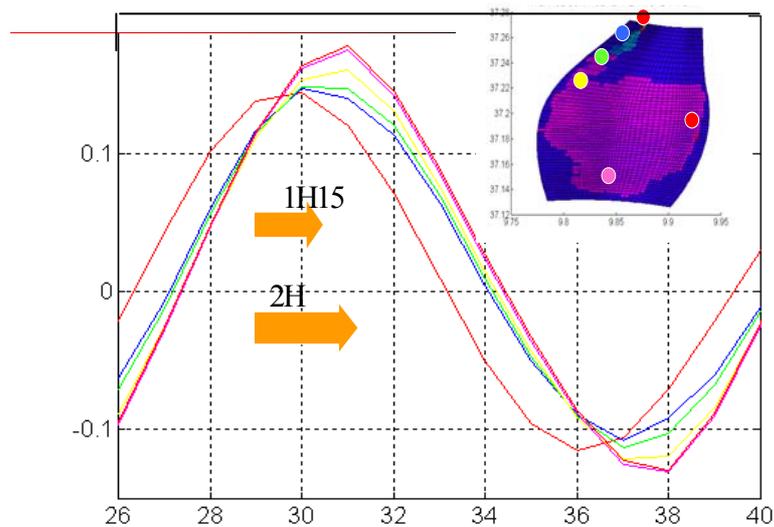


Figure 7 : Marée simulée en divers endroits de la lagune (montrés par les différents cercles). Les retards de part et d'autre du canal de sortie et entre l'extérieur de la lagune et le point le plus à l'intérieur sont montrés par des flèches.

s'en suit. Des mesures complémentaires de la vitesse du courant dans le canal ont été faites et ont confirmé que le modèle simule d'une façon réaliste la dynamique de la lagune.

Il est important de savoir qu'elle est l'étendue de cette entrée d'eau dans la lagune pour pouvoir statuer sur son effet surtout en ce qui concerne son mélange avec les eaux de la lagune. La figure 8 montre les courants de marée lors de la phase entrante superposés aux effets d'un vent du Nord-Ouest.

Les courants de marée sont très intenses dans le canal et dans le goulet mais beaucoup moins intenses dans la lagune elle-même. Ce sont donc sensiblement les mêmes masses d'eau qui font le va-et-vient entre la mer et la lagune. Ceci implique un mélange très modéré des eaux de la lagune et de la mer. Ce mélange modéré est un facteur supplémentaire de fragilité de la lagune. Une pollution affectant la lagune risque d'y persister pendant une longue période

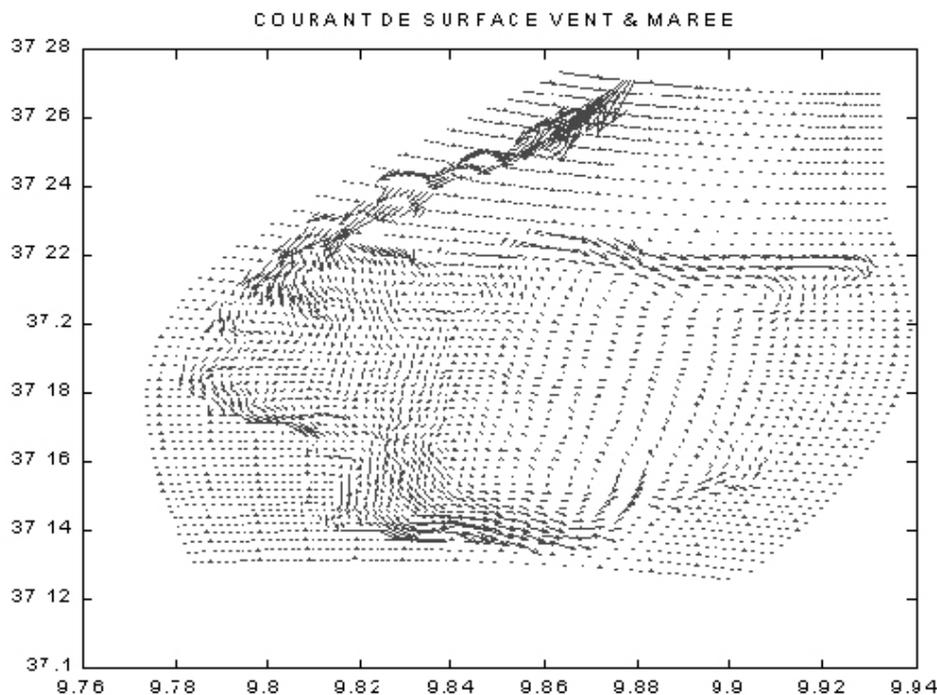


Figure 8 : Circulations de l'eau à la surface de la lagune de Bizerte simulée par le modèle de l'INTSM forcé par un vent du Nord-Ouest et la marée observée. La situation montrée correspond à l'eau entrante dans la lagune.

C. Test d'une émission de polluant à Menzel Bourguiba

L'apport d'eau total par les rivières tel que montré dans le Tableau I est calculé en se basant sur les estimations des débits d'eau des différentes rivières qui se déversent dans la lagune, des apports du bassin versant et de divers apports par les rejets urbains et industriels (ANPE, 1990). Les débits associés à ces différents apports sont présentés dans le Tableau III

L'apport des rejets urbains et industriels est donc significatif. Il est de l'ordre du quart des apports effectués par les rivières. Les émissaires pour ces rejets étant situés au Nord et au Sud de la lagune, il est attendu qu'ils aient un effet considérable sur les zones aux alentours. Pour étudier de tels effets nous avons effectué une première simulation dans la quelle nous avons considéré pour chacun des émissaires et pour chacune des rivières une concentration en un traceur passif p , représentant un polluant quelconque. La concentration

est prise celle de référence égale à 10^{-3} kg/m^3 . L'unité n'a de toute façon pas d'influence sur la simulation. Pour l'émissaire de Menzel Bourguiba qui est pris ici comme émissaire test, la concentration a été multipliée par 10. L'état initial de la simulation correspond à l'état final de la simulation d'équilibre d'un mois dans laquelle le modèle a été forcé par un vent du Nord-Ouest sans marée.

La prise en compte dans le modèle des apports en polluant p se fait dans les conditions aux limites à la surface de l'équation pour la diffusion verticale (22) :

$$\frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \right] = \text{émissions en kg/m}^2/\text{s}$$

Les émissions sont donc supposées se faire à la surface comme s'est le cas réellement. La Figure 9 montre l'évolution du traceur à intervalles de 2 heures.

Tableau III : Différents apports d'eau continentale (rivières, bassin versant, rejets urbains et industriels) à la lagune de Bizerte en $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Rivière	Débit en $10^6 \text{ m}^3/\text{an}$	Emissaire	Rejet urbain $10^6 \text{ m}^3/\text{an}$	Rejet industriel $10^6 \text{ m}^3/\text{an}$
Mrazig	4.56	Bizerte	2.82	2.37
Hlima	12.2	Menzel Abderrah.	0.34	0.00
El Guennine	1.45	Menzel Jemil	0.39	0.05
Ben Hassine	2.95	Sud de l'arsenal	0.00	0.04
Sidi slama	1.8	Arsenal	0.77	1.46
Edhiba	1.05	Menzel Bourguiba	0.19	0.00
Guennich	4.55			
Bassin versant	28.56			
Total	30.81		4.51	3.92

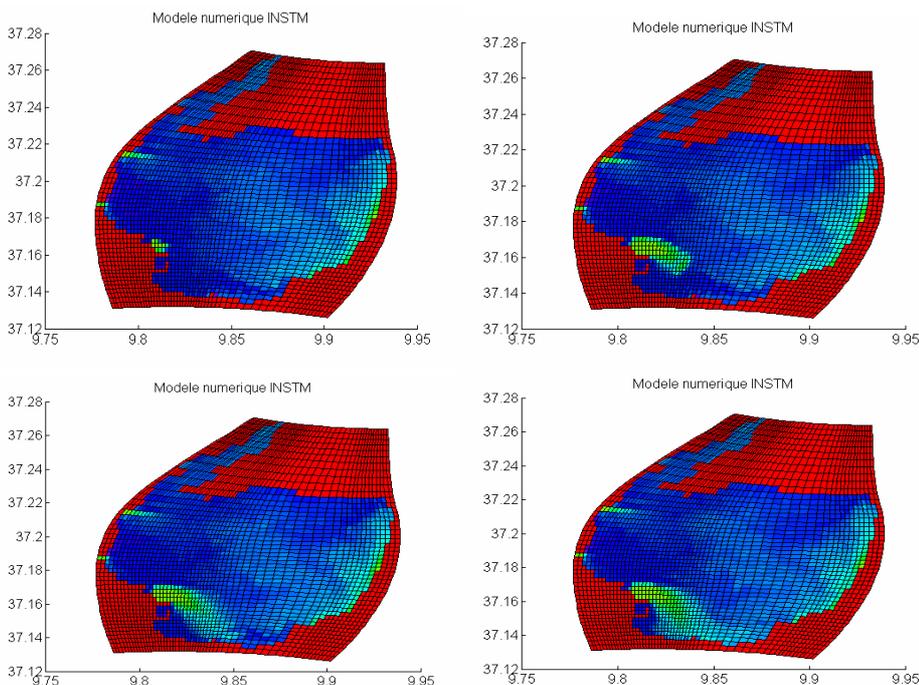


Figure 9 : Illustration du transport d'un traceur issu des principales sources d'apports vers la lagune

La simulation montre que sous l'effet du courant, le traceur issu de la source se dirige vers le Sud-Est où il commence à se diluer progressivement dans les eaux de la lagune. Il est intéressant de noter que la région du port et celle juste à son sud ne sont pas touchées par le polluant et ceci malgré leur proximité de la source. L'étendue d'une émission d'un polluant dans la lagune est d'environ 4 à 5 km. Aude de cette distance, une grande partie du polluant est diffusée dans l'eau. Cependant cette distance est importante comparée aux dimensions de la lagune. Si l'émission continue en absence de dépôt, des zones plus larges de la lagune pourraient être affectées. Pour étudier l'effet d'un vent en provenance d'autres directions, nous avons effectué des simulations en changeant la direction du vent qui force le modèle. Nous avons considéré en particulier les vents du Sud-Est qui soufflent généralement en été durant la matinée. Les conclusions sont très similaires sauf que le panache est dirigé vers le Nord-Est à l'ouest de Menzel Bourguiba.

Pour étudier en détail la dispersion d'un polluant dans la lagune de Bizerte en particulier son comportement à plus

long terme, nous avons effectué une deuxième simulation dans laquelle nous avons considéré l'ensemble des émissaires (égouts et déversements industriels) de la lagune de Bizerte cités dans le rapport de l'ANPE (1990) et résumés dans le Tableau III. Six émissaires ont été inclus dans le modèle. Trois de ces émissaires sont situés dans la région de Menzel Bourguiba et de son arsenal, les autres à Menzel Jemil, Menzel Abderrahmen et Bizerte. L'émissaire de Bizerte est le plus grand déversoir en rejets urbains alors que celui de Menzel Jemil en rejets industriels. Dans notre simulation nous avons considéré que les rejets véhiculent un traceur de même concentration (10^{-2} kg/m^3). La marée observée et un vent variable, mais en moyenne de Nord-Ouest forcent la circulation de l'eau. Les variations du vent sont calculées en se basant sur la moyenne du vent observée pour chaque direction. Dans le cas présent les échanges eau-sédiments ne sont pas inclus. Pour identifier la trajectoire du traceur dans la lagune nous avons arrêté tout rejet dans la lagune après six jours simulés.

La Figure 10 montre la concentration en traceur à

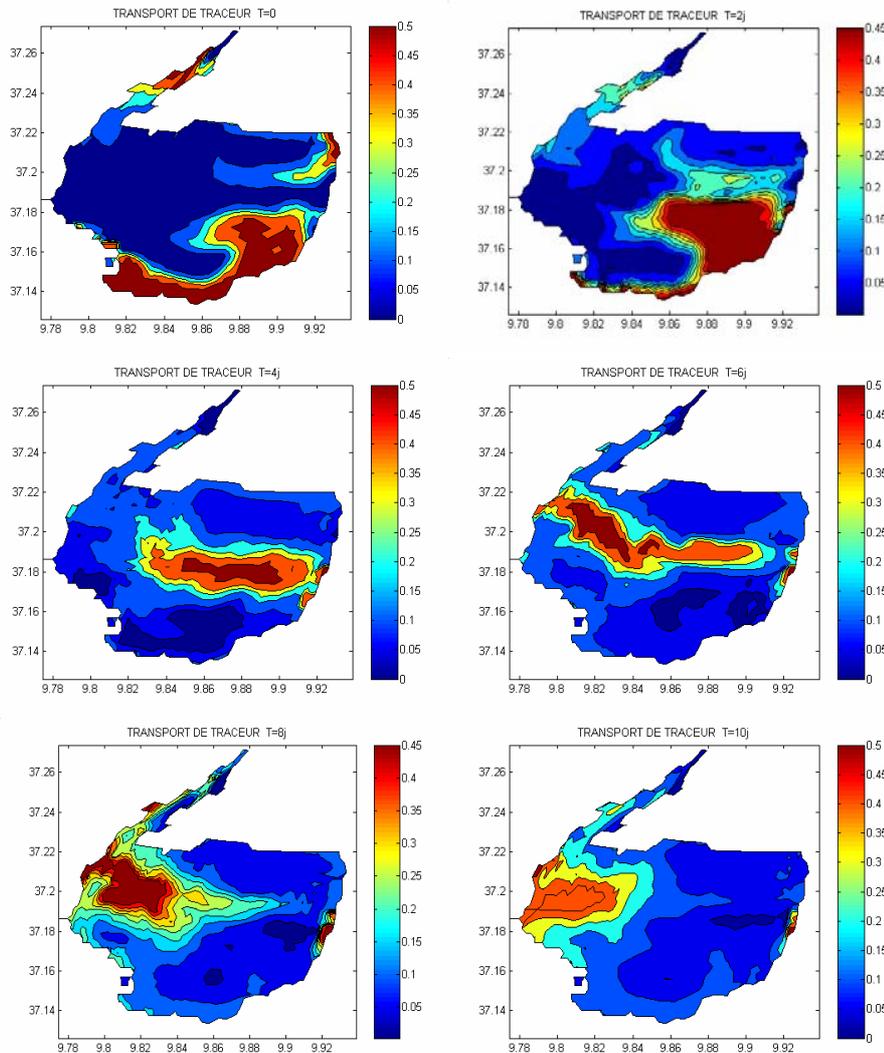


Figure 10 : Séquences de transport d'un traceur passif simulé par le modèle de l'INSTM. Le traceur est émis à partir de 6 sites montrés dans la Figure 1. L'intervalle entre deux séquences est de 2 jours. La première séquence correspond à l'arrêt des émissions (d'une durée de 8 heures).

intervalles de deux jours après l'arrêt du rejet. A l'état initial le maximum de la concentration en ce traceur se trouve au sud-est des rejets de la région de Menzel Bourguiba en accord avec la simulation montrée plus haut, au sud des rejets de Menzel Abderrahmen et Menzel Jemil et dans le canal au voisinage du rejet de Bizerte. La trajectoire du traceur se faisant suivant les deux cellules de rotation anticyclonique au Nord et cyclonique au Sud est très claire. Le traceur amorce déjà son retour vers l'Ouest sans que les traceurs provenant du Nord et du Sud ne se rejoignent au bord Est, qui reste donc intact. Après deux jours, les rejets issus de Bizerte sont presque véhiculés en totalité à la mer puisqu'ils sont émis à sa proximité. Les traceurs sont emportés par l'eau vers l'est de la lagune et ont bien entamé un retour vers l'ouest au centre de la lagune. Le traceur se trouve au centre de la lagune au bout de quatre jours et atteint le bord Ouest au bout de six jours. La traversée de la lagune est donc rapide comme le suggère la forme allongée du panache du traceur. A huit jours, correspondant au temps de traversée (t_t) presque la totalité du traceur rejeté atteint le bord Ouest et commence sa sortie vers la mer à environ 10 jours.

Cette simulation permet de conclure que :

- Les rejets de Bizerte sont véhiculés vers la mer en une journée ou deux et n'influencent donc pas de façon significative l'intérieur de la lagune puisqu'ils sont à une distance faible par rapport à la mer. Quelques oscillations de la marée suffisent pour les faire évacuer.

- Les rejets qui se font à l'intérieur de la lagune sont d'abord véhiculés des bord Sud et Nord vers l'est de la lagune sans toutefois s'y rencontrer à ce bord. Ils retournent ensuite vers l'Ouest se rencontrés à quelques kilomètres du bord Est et passent ensuite par le centre de la lagune. Les deux cellules de circulation montrées en figures 4 et 5 sont responsables de la trajectoire des rejets. Les deux régions au centre des cellules semblent être les moins touchés par les rejets. Il est fort probable qu'une partie du retour du traceur vers l'Ouest se fait dans les couches en dessous de la surface où la vitesse est dirigée vers l'Ouest, la vitesse à la surface étant sous la direction du vent et est dirigée vers l'Est.

- Environ dix jours sont nécessaires pour que les rejets atteignent le goulet. La traversée de la lagune d'Est en Ouest est relativement rapide ; la forme du panache s'allonge au centre de la lagune.

- Le traceur est ensuite véhiculé vers la mer par les mouvements de la marée. A chaque sortie d'eau une partie du rejet est transmise vers la mer.

A ce stade il est important de savoir à quel rythme les rejets sont véhiculés vers la mer. Pour cela nous avons continué la simulation plusieurs mois et calculé la quantité totale du traceur dans la lagune. A l'instant initial la concentration totale atteint $1.5 \cdot 10^5$ Kg. Lorsqu'on arrête les rejets la concentration totale en traceur dans la lagune diminue comme le montre la Figure 11 du fait des échanges avec la mer.

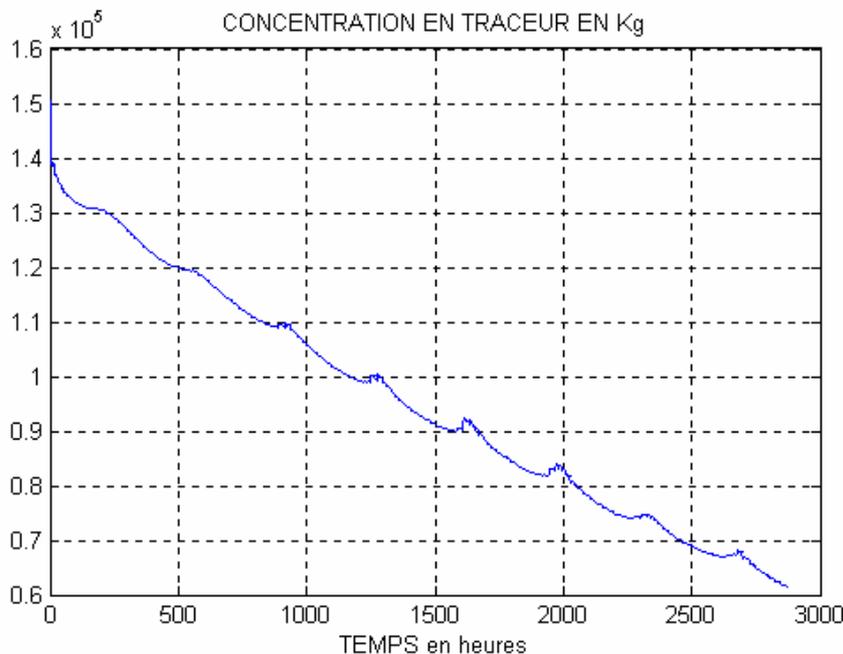


Figure 11 : Concentration de la quantité totale d'un traceur passif dans la lagune de Bizerte en fonction du temps en Kg. L'instant initial correspond au temps d'arrêt des rejets.

La concentration initiale est divisée par deux au bout de 102 jours, environ un peu plus de trois mois. Tout le traceur disparaîtra au bout de 205 jours soit environ 7 mois. Ce temps (tp) est assez court vu que la lagune est capable d'évacuer la totalité d'un rejet néfaste en quelques mois. D'un autre côté cette période pourrait être suffisamment longue pour qu'un polluant puisse agir de façon significative sur le milieu. Les échanges eau-sédiments, non incluses dans la présente simulation doivent retenir une partie du rejet (sous de multiples formes en fonction de la nature du rejet) et donc augmentent le temps de résidence du rejet dans la lagune. Ce temps est aussi beaucoup plus lent que les dix jours nécessaires pour qu'un rejet atteigne le goulet. Un rejet arrive donc relativement rapidement au goulet mais est véhiculé vers la mer beaucoup plus lentement.

Ceci est dû au fait que les mouvements oscillatoires d'entrée et de sortie d'eau engendrés par la marée ne sont pas totalement efficaces pour évacuer le traceur complètement. A chaque entrée d'eau, une partie du traceur qui a quitté la lagune durant la sortie d'avant, y rentre une nouvelle fois. A chaque oscillation, seulement une fraction du traceur disponible quitte définitivement la lagune.

Le temps de résidence due à la marée t_r définit comme le temps moyen que met l'eau dans la lagune avant de la quitter du fait de la marée est calculé selon :

$$t_r = v_{ex} / V \quad (31)$$

où v_{ex} est le volume de l'eau échangée avec la mer en un cycle de la marée. Le temps de résidence est de l'ordre de 7 jours. L'efficacité de la marée donnée par :

$$100 \frac{tp}{tr} = 100 \frac{7}{206} = 3\% \quad (32)$$

est donc très faible. La longueur du goulet, environ 7 km, explique cette très faible efficacité.

A partir de cette simulation nous pouvons considérer le scénario où les concentrations des rejets sont divisées par deux (par connexion des centres urbains à des stations d'assainissements et par intervention auprès des industriels). Dans ce cas, la concentration en matière rejetée est divisée par deux partout dans la lagune. Cependant le temps de résidence des rejets dans la lagune restera de l'ordre de 7 mois et la matière rejetée mettra la même durée à savoir 10 jours pour traverser la lagune. Une réduction des rejets de moitié ne réduira donc pas leur temps de résidence à l'intérieur de la lagune mais par contre contribuera sûrement à avoir une lagune moins polluée en permanence

CONCLUSION

Le modèle de circulation d'eau de l'INSTM est utilisé pour étudier les effets d'un traceur passif, représentant un rejet de polluant dans la lagune de Bizerte. Le modèle utilisé est tridimensionnel et inclut des équations pour la dynamique des masses d'eau ainsi que pour l'évolution de la température et de la salinité de l'eau. Il inclut aussi un modèle de transport de traceurs passifs. La dynamique du modèle a été testée en comparant les résultats de

simulations à des observations faites au niveau du goulet et du canal. Les principaux forçages de la circulation dans la lagune sont le vent et la marée. Les vents dominants du Nord-Ouest agissent sur les eaux de la lagune de Bizerte en les déplaçant vers l'Est autour de deux cellules de circulation au Nord et au Sud de la lagune. Les masses d'eau s'acheminent ensuite vers l'Ouest au voisinage du goulet. Dans cette zone c'est la marée qui prend la relève et les masses d'eau sont échangées avec la mer selon la phase de la marée. Un traceur passif suivra ce schéma de circulation. Les centres des deux cellules de circulations semblent être les zones les moins affectées par les rejets. Les rejets urbains et industriels mettent environ 10 jours pour arriver au niveau du goulet mais plusieurs mois pour sortir de la lagune. Ce temps de sortie, relativement long, est dû au fait que la lagune de Bizerte est reliée à la mer ouverte par un goulet très long (7 km). Lors d'une oscillation de la marée, seule une fraction de la matière disponible quitte définitivement la lagune. Une réduction de la matière rejetée (afin de réduire la pollution de la lagune) permettra de réduire sa concentration dans l'eau mais son temps de résidence dans la lagune restera inchangé. Pour la suite de cette étude il est important d'inclure les interactions eau-sédiment pour étudier d'une manière plus précise le comportement des rejets dans la lagune.

BIBLIOGRAPHIE

- ANPE, 1990 : "*Diagnostic Préliminaire Pour l'Etude de l'Equilibre Ecologique du Lac de Bizerte*," Etude réalisée par le GIC-NNEA-TECI, Rapport ANPE. 1990.
- Ben Hadj S., 1992 : "*Contribution à l'Etude Paléogéologique des Palourdes (Ruditapes descussatus)*". Thèse Doct. Sp. FST-Nantes, 200 pp.
- Ben Mbarek B., 1995, : "*Impacts des Ouvrages sur l'Equilibre de l'Ecosystème « lac Ichkeul »*," : suivi mensuel des principaux paramètres physicochimiques. DEA-FST 1995.
- Frisoni, G.F. and O. Guelorget, 1983 : "*Diagnose Ecologique Appliquée à la Mise en Valeur Biologique des Lagunes Méditerranéennes*", Approches méthodologiques. FAO, Rome, 12-14 septembre 1983.
- Groupe Lagune de Bizerte, 1999 : "*Synthèse Bibliographique sur la Lagune de Bizerte*", Rapport INSTM, 1999.
- Harzallah A. and V. Koutitonsky, 2001 : "*Observations and Numerical Simulations of the Hydrodynamics of the Bizerte Lagoon*". Proceedings of the fifth international conference on the Mediterranean Coastal Environment. 23-27 October, Hammamet, Tunisia. 2001.
- Harzallah A., Brahim M., Sammari C. and V. and V. Koutitonsky, 2003 : "*Water, salinity and heat budgets in the Lagoon of Bizerte estimated from observations and model simulation*", Proceedings of JICA3.

Mellor, G.L., 1996 : "*A three dimensional primitive equation numerical ocean model*". User's Guid. Program in atmospheric and ocean sciences. Princeton Univeristy, Princeton. 122 pp.

Mellor, G.L. and A.F. Blumberg, 1985 : "Modelling vertical and horizontal diffusivities with the sigma

coordinate system". *Mon. Weather Rev.*, 113, 1279-1383.

Mellor, G.L. and T. Yamada, 1982 : "*Development of turbulent closure model for geophysical fluid problems*". *Rev. Geophys.* , 20, 851-875.