

SIMULATION DE LA DISPERSION SEL - EAU DOUCE DANS LA LAGUNE ABY (CÔTE D'IVOIRE)

Ted-Edgard WANGO^{1*}, Lazare AKPETOU² et Kouassi L. ADOPO¹

¹*Université Félix Houphouët-Boigny, UFR STRM,
22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

²*Université Lorougnon Guédé de Daloa, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire*

*Correspondance, e-mail : tedwango10@gmail.com

RÉSUMÉ

Un modèle hydrodynamique 2DH a été développé pour simuler la dispersion du sel et de l'eau douce dans la lagune Aby. Des mesures de vitesses ont été utilisées pour calibrer le modèle hydrodynamique. Le modèle a été forcé avec une marée moyenne et des débits fluviaux puis calibrer avec des vitesses de courants. On note un bon accord entre les prédictions du modèle et les mesures avec un coefficient de Manning $n=0,04 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ et un coefficient de dispersion $E=5 \text{ m}^2/\text{s}$. La propagation des eaux douces est fonction de la bathymétrie et de l'intensité des débits des fleuves.

Mots-clés: *lagune, Aby, Assinie, Tanoé, Bia, modèle hydrodynamique, Surface-water Modeling System (SMS).*

ABSTRACT

Simulation of the variation of salt-freshwater in the Aby Lagoon (Côte d'Ivoire)

A hydrodynamic model 2DH has been developed to simulate the variation of salt and freshwater in the Aby lagoon. The model was forced by tide and rivers outflows and calibrated with velocities. There is a good agreement between the predictions and measurements with a Manning coefficient $n=0.04 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ and a coefficient of momentum diffusion $E=5 \text{ m}^2/\text{s}$. The variation of freshwater depends on the bathymetry of the lagoon and the discharge of the rivers.

Keywords: *lagoon, Aby, Assinie, Tanoé, Bia, Hydrodynamic Model, Surface-water Modeling System (SMS)*

I - INTRODUCTION

La lagune Aby est située dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire entre les longitudes 2°75' et 3°25' W et les latitudes 5°05' et 5°20' N (*Figure 1*). Elle est caractérisée par une superficie de 424 km², une faible profondeur moyenne (4,8 m) et une faible communication avec la mer. La lagune présente deux axes orthogonaux. Un axe EW de 56 km et un axe de 25 km NS qui fait sa particularité, car, c'est la seule lagune ivoirienne qui pénètre à l'intérieur des terres sur près de 25 km. Principale source de protéines des populations riveraines, la lagune Aby montre des signes de pollution. En effet, une concentration de mercure de l'ordre de 3 µg/L et de 8,26 mg.kg⁻¹ a été observée respectivement dans la tranche d'eau et dans les sédiments entre le goulet d'Eboinda et le fleuve Tanoé dont le bassin versant est occupé par des gisements d'or en exploitation [1,2]. Il se pose donc un problème de qualité des eaux et du devenir des polluants dissous dans la lagune Aby. L'objectif principal de cette étude est de développer un modèle hydrodynamique 2D couplé à un modèle de transport dissous pour simuler la dispersion du sel.

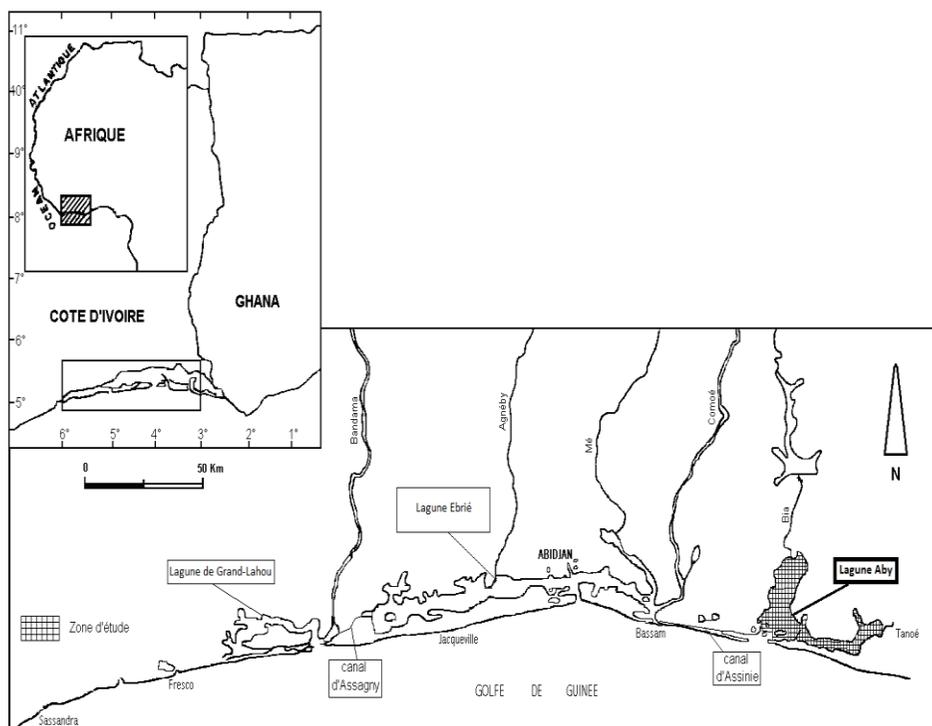


Figure 1 : Localisation de la lagune Aby

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'outil de modélisation utilisé pour la dispersion d'un traceur dans la lagune Aby est le logiciel SMS (*Surface-water Modeling System*). C'est un modèle utilisant la méthode des éléments finis pour la résolution des équations de l'écoulement. Dans un repère orthogonal (O, x, y), les **Equations** de bases des modèles 2D, intégrés sur la hauteur d'eau h, sont les suivantes [3] :

- l'équation de bilan de masse: (1)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = m_o$$

- l'équation de bilan de quantité de mouvement suivant Ox : (2)

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - h \left[E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + gh \left[\frac{\partial Z_f}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{g u n^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta \frac{\rho_a}{\rho} V_a^2 \cos \varphi - 2h\omega v \sin \phi = 0$$

- l'équation de bilan de quantité de mouvement suivant Oy : (3)

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - h \left[E_{xx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + gh \left[\frac{\partial Z_f}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{g v n^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta \frac{\rho_a}{\rho} V_a^2 \sin \varphi + 2h\omega u \sin \phi = 0$$

- l'équation de conservation et de transport du traceur : (4)

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hCu}{\partial x} + \frac{\partial hCv}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[hD \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[hD \frac{\partial C}{\partial y} \right] - KhC$$

Dans lesquelles : h : hauteur d'eau (m), u et v : composantes horizontales de la vitesse moyenne sur la hauteur d'eau (m/s), t : le temps (s), ρ : masse volumique de l'eau (kg/m^3), ρ_a : masse volumique de l'air (kg/m^3), m_o : flux massique (m/s) à l'interface (évaporation, pluviométrie), g : accélération de la pesanteur (m/s^2), Z_f : côte au fond (m), n : coefficient de rugosité du fond de Manning ($\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$), ζ : coefficient de cisaillement du vent ; V_a : vitesse du vent (m/s), φ : direction du vent par rapport à l'axe OX, ω : vitesse de rotation angulaire (rd), ϕ : latitude du milieu, C : concentration en polluant moyennée sur la hauteur d'eau (kg/m^3), D : coefficient de dispersion du polluant (m^2/s), K : taux de disparition du polluant dans le milieu (s^{-1}).

Ces **Equations**, dont les inconnues sont h, u, v n'admettent pas de solutions analytiques. Elles sont résolues numériquement par la méthode des éléments finis pour aboutir à un modèle numérique. Les coefficients n et E_{ij} sont déterminées par calage du modèle en s'appuyant sur des mesures de terrain.

II-1. Construction du modèle hydrodynamique

A partir de la carte bathymétrique de la lagune Aby (*Figure 2*), la lagune a été discrétisée en mailles triangulaires (*Figure 3*). La passe d'Assinie où pénètre l'onde de marée en lagune et les embouchures des fleuves Tanoé et Bia constituent les frontières ouvertes du modèle.

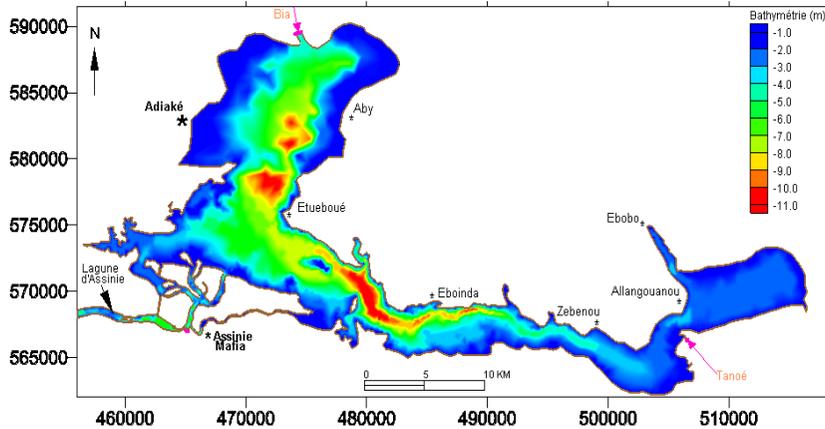


Figure 2 : Carte bathymétrique de la lagune Aby [4]

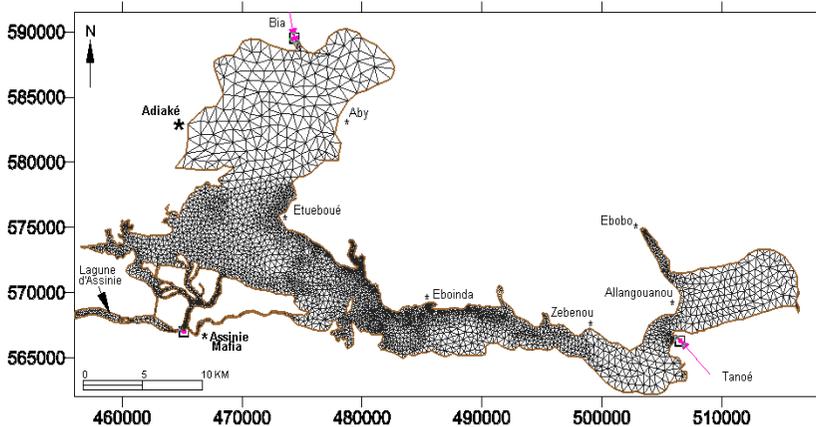


Figure 3 : Maillage et conditions aux limites du modèle [4]

II-2. Calage et simulation hydrodynamique

Le calage du modèle hydrodynamique a consisté à la détermination des coefficients de Manning (n) et de dispersion (E) par comparaison des résultats du modèle et des mesures de terrain.

La lagune Aby a été forcée avec deux types de forçage. Une marée moyenne de période 12h25, d'un niveau moyen de 0,98 m et avec un marnage de 0,64 m a été introduite à l'entrée de la passe d'Assinie (**Figure 4**). En amont, des débits instantanés sont injectés aux débouchés des fleuves Bia et Tanoé en lagune (**Tableau 1**).

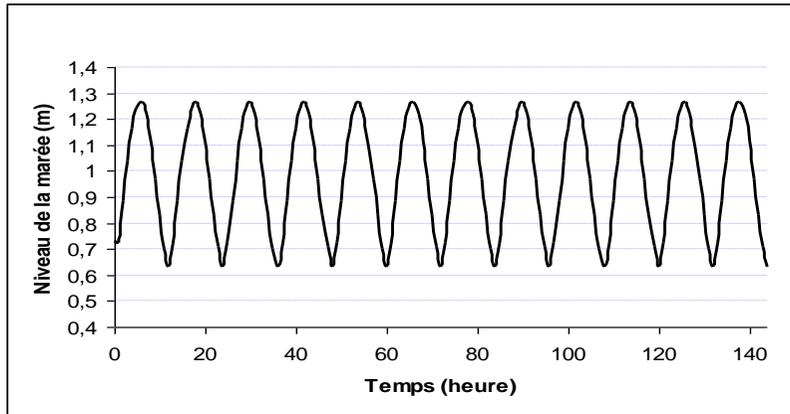


Figure 4 : Marée moyenne imposée à l'embouchure de la lagune Aby [4]

Tableau 1 : Débits (m^3/s) imposés aux embouchures des fleuves [4]

Fleuves	Débit (m^3/s)	
	Etiage	Crue
Bia	1,68	59,7
Tanoé	13,4	142

Les données utilisées pour le calage sont des vitesses instantanées de courants de surface et la localisation des stations de mesure sont illustrées sur la **Figure 5**. L'évaluation de la qualité du modèle à reproduire les mesures de terrain, bien que subjective, a été réalisée en utilisant l'indice d'erreur RMAE proposé par [5,6] . Après calibration, le modèle a été utilisé pour simuler les courants puis la dispersion sel-eau douce dans la lagune.

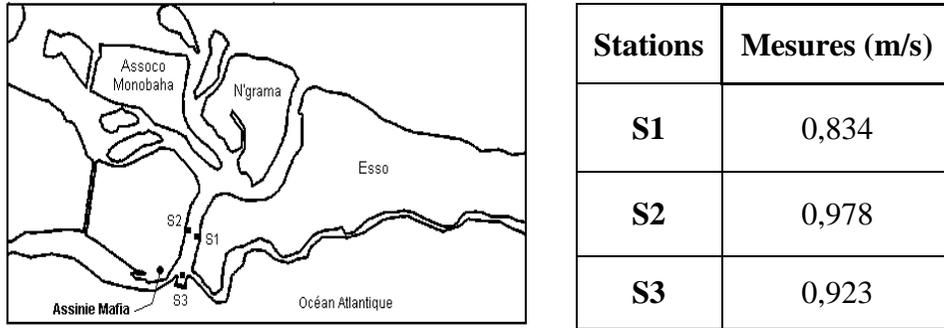


Figure 5 : Localisation des stations de mesure des vitesses de courants [7]

II-3. Simulation de la dispersion sel-eau douce

Le traceur utilisé est la salinité qui constitue un excellent marqueur des masses d'eau douce. Il représente une grandeur physique passive ou inerte qui ne modifie pas l'écoulement, c'est une variable conservative. Il sert ainsi à des études de transport de contaminants. Aux débouchés des fleuves de l'eau douce a été injectée avec une concentration en sel de 2 psu. Au niveau de la passe d'Assinie en contact avec la mer, la concentration en sel est de 36 psu. Une concentration initiale en sel a été fixée de façon arbitraire à 20 psu pour toute la lagune. La simulation a duré 720 h, soit un mois avec un coefficient de dispersion D du traceur fixé à $1 \text{ m}^2/\text{s}$ car il n'a pas d'influence notable sur le transport des traceurs.

III - RÉSULTATS ET DISCUSSION

III-1. Calage du modèle

Les paramètres de calage $n=0,04 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ et $E=5 \text{ m}^2/\text{s}$ ont été retenus après comparaison des vitesses prédites et des vitesses mesurées (**Tableau 2**). Les écarts entre les résultats du modèle et les mesures sont de l'ordre du millimètre. Les indices d'erreur RMAE calculés à chaque station montrent que le modèle reproduit assez bien les mesures de terrain. La différence entre les vitesses prédites et celles mesurées peut être due à la résolution de la bathymétrie (maillage) et aux conditions aux limites du modèle.

Tableau 2 : Vitesses prédites et mesurées dans le chenal d'Assinie

	Mesures (m/s)	Modèle (m/s)	RMAE
S1	0,834	0,788	0,05
S2	0,978	0,965	0,01
S3	0,923	0,950	0,03

III-2. Champs de vitesse

La **Figure 6** présente la distribution spatiale des vitesses en marée ascendante (a) et descendante (b) en période d'étiage. Les vecteurs vitesses sont visibles dans la passe d'Assinie et entre Eboinda et l'exutoire du fleuve Tanoé. Dans le reste de la lagune, les vitesses sont nulles et les masses d'eau sont stagnantes.

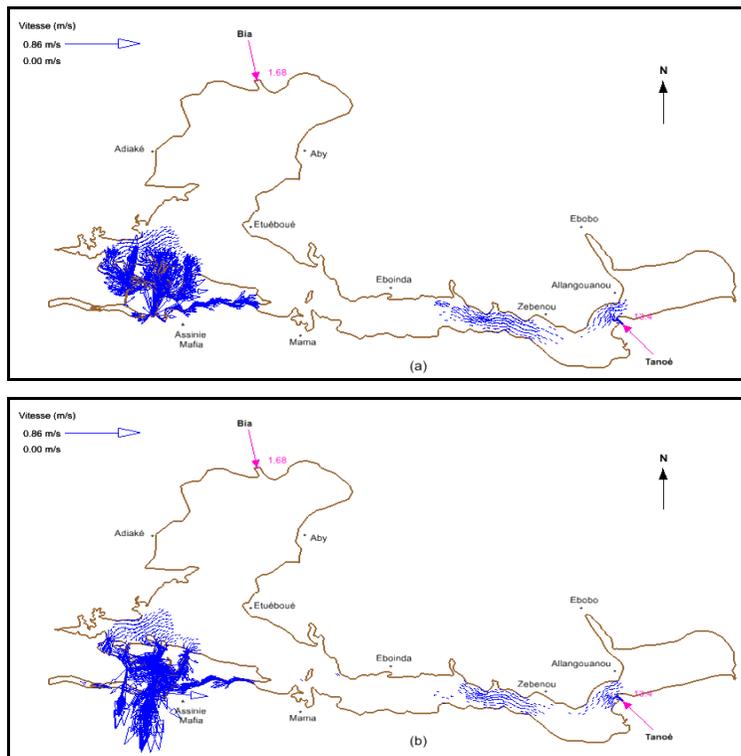


Figure 6 : Vitesse dans la lagune Aby en marée haute et basse durant la période d'étiage

La répartition des champs de courant en période de crue est identique à celle observée en période d'étiage dans la lagune Aby, sauf que les courants de marée n'ont pas eu la même intensité et durée (**Figure 7**).

En effet, le flot et le jusant ont duré chacun 5h sur un cycle de marée PM/BM/PM, tandis qu'en période de crue le jusant durait 6h30 et le flot 5h30. Cette différence est due aux courants de chasse du fleuve Tanoé qui deviennent plus intense en période de crue. Les courants fluviaux s'opposent aux courants de flot et renforcent les courants de jusant. Le modèle a simulé une vitesse maximale de 0.94 m/s en crue et de 0.86 m/s en étiage dans la passe d'Assinie.

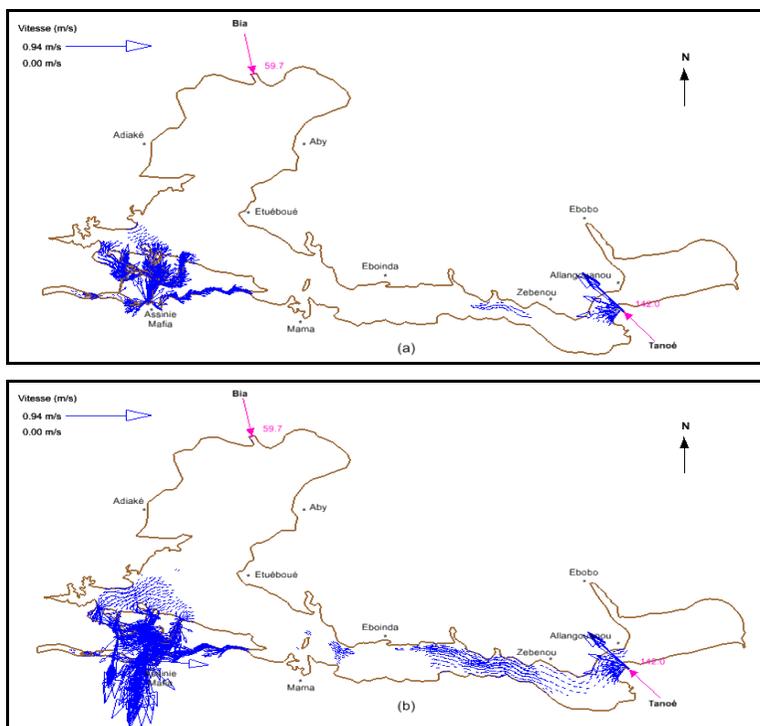


Figure 7 : Vitesse dans la lagune Aby en marée haute et basse durant la période d'étiage

III-3. Dispersion sel-eau douce

La **Figure 8** présente la propagation des eaux douces et des eaux salées après un mois (30 jours) de simulation. La dispersion du traceur est fonction de la bathymétrie et des vitesses de courants. Dans les chenaux d'Assinie, les eaux marines colonisent tous les chenaux séparant les îles et puis évoluent en lagune durant l'étiage. En crue, ces eaux salées se limitent qu'au chenal principal. Cette propagation d'eau marine, s'accompagne d'une augmentation de la salinité.

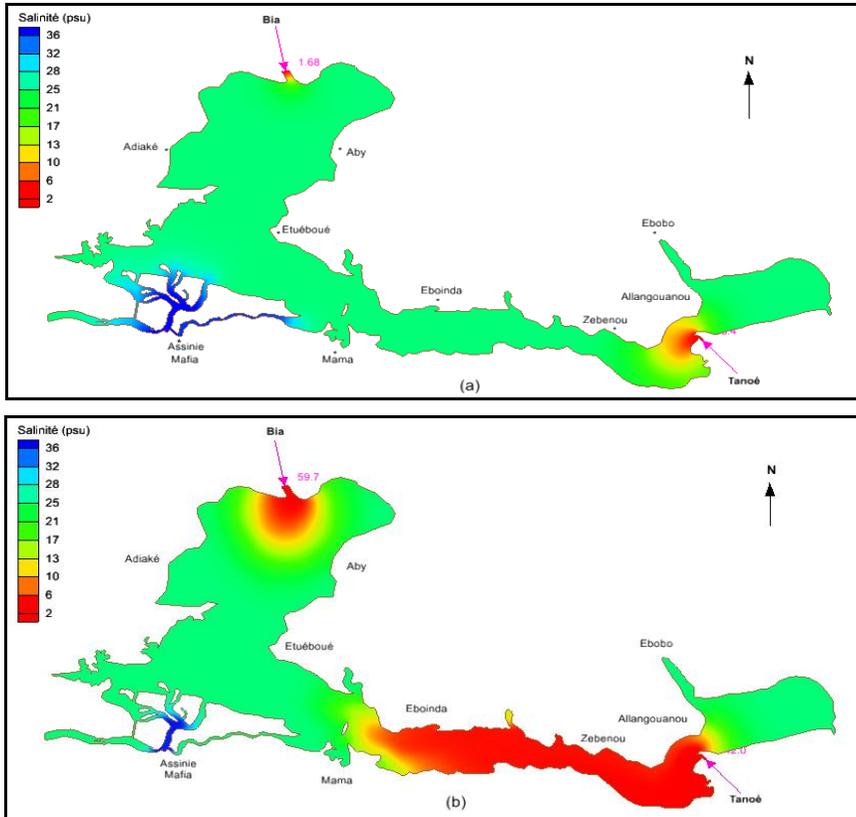


Figure 8 : Dispersion sel-eau douce en étiage (a) et en crue (b)

Dans le bras oriental de la lagune, les eaux douces atteignent Eboinda où [1] avait observé une concentration en mercure de l'ordre de $3 \mu\text{g/L}$ dans la tranche d'eau en période de crue. En étiage, les eaux douces se limitent à l'Est de Zebenou après un mois de simulation. Dans la partie Nord de la lagune, les eaux douces forment des auréoles autour de l'exutoire du fleuve Bia (*Figure 8b*).

Le renouvellement des eaux lagunaires par les eaux douces est plus important en période de crue. Ces résultats montrent néanmoins une des limites des modèles bidimensionnels qui ne permettent que de simuler l'hétérogénéité horizontale des variables hydrodynamiques contrairement aux modèles 3D qu'on utilise pour le suivi de l'évolution des phénomènes tels que la stratification en densité.

IV - CONCLUSION

Le modèle hydrodynamique 2D et de transport de la lagune Aby a permis d'une part de simuler les courants et d'autre part la dispersion de l'eau douce dans la lagune. La marée et les débits fluviaux contribuent à créer des courants de circulation dont la distribution est fonction de la morphologie de la lagune. Ces courants sont responsables de la dispersion des eaux douces dont l'expansion géographique est plus importante en période de crue qu'en étiage. Les fleuves Bia et Tanoé peuvent servir de vecteurs de polluants dans la lagune Aby.

RÉFÉRENCES

- [1] – S. CLAON; Evaluation de l'exposition au mercure, à l'arsenic et au sélénium de l'écosystème et des populations de la lagune Aby (Côte d'Ivoire). Impacts de l'extraction aurifère au Ghana. Dea Université Joseph Fourier, ufr de Pharmacie, Grenoble, (1999) 55 p.
- [2] – K. L. AKPETOU, A. M. KOUASSI, B. T. A GOULA, S. ASSÉMIAN ET AKA-KOUAMÉ: Nutrients induction on lead, cadmium, manganese, zinc and cobalt speciation in the sediments of Aby lagoon (Côte d'Ivoire). International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2(8), (2010), 3894-3900.
- [3] - SMS (Surface-Water Modeling System); Users guide to RMA2 WES, version 4.3. US Army Corps of Engineers – Waterways Experiment Station, (2006) 240 pp.
- [4] - T. E WANGO; Modélisation de l'hydrodynamique, de la dispersion du sel et de l'eau douce dans le complexe lagunaire de la Côte d'Ivoire (Grand-Lahou, Ebrié et Aby), *Thèse Unique, Université de Cocody-Abidjan*, (2009) 165 pp.
- [5] - L. C. WALSTRA, L. C. VAN RIJN, H. BLOGG and M. VAN ORMONDT; Evaluation of a hydrodynamic area model based on the COAST3D data at Teignmouth 1999. TR121-EC MAST Project No. MAS3-CT97-0086, HR Wallingford, UK (2001) D4.1-D4.4
- [6] - J. SUTHERLAND; COMOS modeling and the development of model performance statistics, Report TR121-EC MAST project No. MAS3-CT97-0086. HR Wallingford, UK, (2001) B4.1-B4.4
- [7] - J. ABE, B. S. BANDAMA, S. BAKAYOKO, K. P. KOFFI et S. CISSOKO; Influence des régimes hydrologiques sur les variations morphologiques actuelles d'une passe lagunaire en domaine microtidal tropical (la passe d'Assinie en lagune Aby-Côte d'Ivoire). Laboratoire de Physique et de Géologie Marine. J. Rech. Océanographique (1996), Vol. 21, n° 1 et 2: pp. 45 à 52.