

Hydrodynamique du complexe lagunaire Grand-Lahou, Ebrié et Aby (Côte d'Ivoire) : Impacts des forçages fluviaux et de la marée

Hydrodynamics of the Grand-Lahou, Ebrié and Aby lagoon complex (Ivory Coast) : Impacts of river and tidal forcing

Ted Edgard WANGO^{1*}, Mahmoud MOUSSA², Yao Alexis N'GUESSAN¹ & Sylvain MONDE¹

1. Université de Cocody, UFR. Sciences de la Terre et des Ressources Minières, B.P. 582, Abidjan 22, Côte d'Ivoire
*(tededgard@yahoo.fr).

2. Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Labo. d'Hydraulique, BP. 37, Le Belvédère, 1002 Tunis, Tunisie.

Résumé. Le Système de Modélisation des eaux de Surface (SMS) est un modèle bidimensionnel horizontal aux éléments finis adapté aux milieux peu profonds. Il a été utilisé pour modéliser le fonctionnement hydrodynamique des systèmes lagunaires de Grand-Lahou, Ebrié et Aby (Côte d'Ivoire) en période d'étiage et de crue. Le modèle hydrodynamique a été calibré par comparaison entre les vitesses calculées et celles mesurées. Les résultats indiquent un bon accord entre les mesures et les prédictions du modèle. Les résultats hydrodynamiques montrent que la marée et les fleuves contribuent à la création de courants de circulation dans ce complexe lagunaire. Les courants de marée sont symétriques en période d'étiage et dissymétriques en période de crue. Le temps de renouvellement des eaux, qui est de 26,2 jours en étiage, est passé à 34,2 jours en crue. Ainsi, l'impact de la marée est réduit en période de crue des fleuves.

Mots-clés : hydrodynamique, lagune, Système de Modélisation des eaux de Surface, Grand-Lahou, Ebrié, Aby, Côte d'Ivoire.

Abstract. Surface-water Modelling System (SMS) is a two-dimensional model of finite element, adapted to depth-average flow. It has been chosen for modeling the hydrodynamics of Grand-Lahou, Ebrié and Aby lagoons (Ivory Coast) during the dry and rainy seasons. The numerical model was calibrated by comparing the calculated to measured velocities. The results suggest a good agreement between measurements and model predictions. The hydrodynamic results show that the tide and rivers contribute to the establishment of circulation currents in the lagoon complex. These tidal currents are symmetric during the dry season and asymmetric in rainy season. The water renewal time is 26.2 days in dry season, but is increased to 34.2 days during the flooding season. The impact of the tide on the lagoons is reduced during rivers flooding.

Keywords : hydrodynamic, lagoon, Surface-water Modelling System, Grand-Lahou, Ebrié, Aby, Ivory Coast.

Abridged English version

Description of the area

The lagoon system, topic of this study, is located in the coastal zone of Ivory Coast. It extends on about 300 km, between longitudes 2°52' and 5°25' W and latitudes 5°08' and 5°22' N (Fig. 1). From west to east, there are three lagoons, namely: Grand-Lahou, Ebrié and Aby, which are connected by two channels; the Azagny channel links the lagoons of Grand-Lahou and Ebrié, while the Assinie channel joins Ebrié and Aby lagoons.

Surface-water Modeling System (SMS) 2D model

The SMS numerical model has been used to study the hydrodynamic of these lagoons. The SMS code solves the second-order partial differential equations for depth-averaged fluid flow from Navier-Stokes. It is a flow model based on finite element. Before using the model, this must be calibrated by comparison measurements to model predictions in order to fix the Manning friction (n) and the coefficient of momentum diffusion (E). The model has been forced by the tide and the flow of rivers. Two conditions have been simulated: dry and rainy seasons.

Hydrodynamic results

The calibration of the model allows a definition of the calibration parameters (n and E) for each lagoon (Fig. 4, Tab. 3). We noted that there is a good agreement between the model and measurements, despite of slight differences due to the use of the same roughness for each lagoon, the accuracy of tide, the mesh and bathymetry resolution and climate.

Velocity vectors are respectively low and high throughout the lagoon of Grand-Lahou, when the rivers inflows (Figs. 4, 5). During the high tide, the currents move westwards. Strong velocities can be observed near the Bandama River due to the prescribed freshwater discharge in rainy season (Fig. 5). In low tide, the water bodies move seawards. The tide current has got the same duration (5 hours), while in rainy season; the ebb current lasted more 3 hours than flow current.

The Azagny channel joins the Grand-Lahou and Ebrié lagoons. The motion of water bodies in this channel depends on the Bandama River inflow. Currents always move eastwards, while the flow of the Bandama River is maximal (Fig. 7). In dry season, we observe a double flow in the channel (Fig. 6).

The spatial distribution of velocity vectors in the Ebrié lagoon of Abidjan is shown in figures 8 and 9. The area is characterized by the presence of bays. The currents are strong in the Vridi channel and also in the channel located between Banco and Cocody bays. However in these bays, we do not observe currents, probably that is why, these bays are much polluted. The flood and ebb currents have lasted 5 hours during the dry season, while in rainy season, they don't have the same time. The ebb and the flood lasted 6 and 4 hours, respectively. This is due to the discharge of freshwater that becomes more important in rainy season. These results are similar to those obtained by Mondé (2004) during low flow periods.

The Assinie channel connects the Ebrié and Aby lagoons. The currents are weak during the dry season. In low tide, they move to East, while in high tide, they return

back. The tide currents move only eastwards but the discharge of Comoé River is maximal. The double flow disappears (Figs. 10 and 11).

Spatial distribution of velocity vectors was simulated throughout the Aby lagoon during low water and floods (Figs. 12, 13). The currents are more strong in the Assinie area, however, they are low in other area of the lagoon (Figs. 12, 13). The ebb currents and flood have lasted 5 hours for each one during low flow periods. In rainy season, the ebb lasted 6 hours and the flood 4 hours.

One important aim in this study was to show the existence of exchanges between the three studied lagoons (Grand-Lahou, Ebrié et Aby) through the Azagny and Assinie channels. These exchanges are more important during raining seasons. In addition, the circulation in these lagoons is a result of the tide and river flows.

INTRODUCTION

Le complexe lagunaire de Côte d'Ivoire constitue un ensemble représentatif d'environnements lagunaires actuels. Il est constitué des systèmes lagunaires Grand-Lahou, Ebrié et Aby qui sont reliés entre eux par des canaux artificiels. Comme la plupart des régions littorales, ce complexe lagunaire est aussi le siège d'activités naturelles et/ou anthropiques diverses et variées qui ont contribué à la dégradation de ce milieu marin côtier. Plus généralement, à cause du réchauffement climatique, de la réduction des apports fluviaux, et de la montée du niveau de la mer, ces écosystèmes aquatiques sont de plus en plus vulnérables et menacés par l'eutrophisation (Arfi *et al.* 1981, Zabi 1982, Guiral & Lanusse 1984, Arfi & Guiral 1994). La préservation des aptitudes naturelles de ces milieux, tout en assurant une meilleure gestion et exploitation de ces environnements lagunaires, requiert une bonne connaissance des processus hydrodynamiques qui s'y déroulent. Dans ce domaine, la modélisation peut aider à cette quête du savoir. Rappelons à ce propos que seul le système lagunaire Ebrié avait fait l'objet d'une modélisation hydrodynamique (Ramany 1979, Mondé 2004). Cependant, toute modélisation de chaque système lagunaire isolé serait incomplète, puisqu'elle ignorerait tous les échanges entre les systèmes lagunaires à travers les canaux artificiels qui les relient. Ce travail constitue donc une première tentative de modélisation hydrodynamique de la totalité du complexe lagunaire de Côte d'Ivoire couplé.

CADRE PHYSIQUE DU COMPLEXE LAGUNAIRE DE CÔTE D'IVOIRE

Les milieux lagunaires en Côte d'Ivoire, avec une superficie totale d'environ 1180 km², se rencontrent le long de la moitié orientale du littoral et s'étendent sur près de 300 km, entre les longitudes 2°52' et 5°25' Ouest et les latitudes 5°08' et 5°22' Nord (Fig. 1). Ils sont formés de trois principaux systèmes lagunaires: le système lagunaire Grand-Lahou, le système lagunaire Ebrié et le système lagunaire Aby dont les cartes bathymétriques sont illustrées

par la figure 2. Ces trois systèmes de lagunes sont reliés entre eux par deux canaux artificiels. Le canal d'Azagny relie les systèmes Grand-Lahou et Ebrié, et celui d'Assinie joint le système Ebrié au système Aby. Cet ensemble constitue le Complexe Lagunaire de Côte d'Ivoire (CLC).

Localisé dans le bassin sédimentaire ivoirien, ce complexe lagunaire est sous l'influence d'un réseau hydrographique assez dense, constitué par:

- trois fleuves de régime tropical de transition (Bandama, Comoé et Tanoé) caractérisé par une crue annuelle entre septembre et octobre;
- quatre fleuves côtiers de régime équatorial de transition (Boubo, Agnéby, Mé et Bia) avec deux crues annuelles, respectivement en juin et en octobre.

En aval, la marée pénètre dans les trois systèmes lagunaires en passant par le grau de Grand-Lahou (système Grand-Lahou), le canal artificiel de Vridi (système Ebrié) et la passe d'Assinie (système Aby). La marée dominante est de type semi-diurne avec une inégalité diurne. Le marnage au large est faible, il est compris entre 0,4 m en mortes eaux et 1,3 m en vives eaux (Lemasson & Rebert 1973).

Les principales caractéristiques climatiques (température de l'air, humidité relative, précipitations, insolation et vent) du littoral ivoirien sont présentées dans le tableau 1.

MATERIEL ET METHODES

Modèle hydrodynamique utilisé

Pour les simulations du fonctionnement hydrodynamique du système lagunaire, le logiciel de modélisation choisi est le modèle numérique RMA2 de SMS (*Surface-water Modeling System*) (SMS, 2003). C'est un modèle bidimensionnel (à 2 dimensions), intégré sur la hauteur d'eau, puisque les trois systèmes lagunaires sont peu profonds (entre 3 et 4,8 m de profondeur moyenne) par rapport aux dimensions horizontales (50 à 150 km) d'une part, et la dynamique du milieu qui est essentiellement contrôlée par la marée et les débits fluviaux, d'autre part.

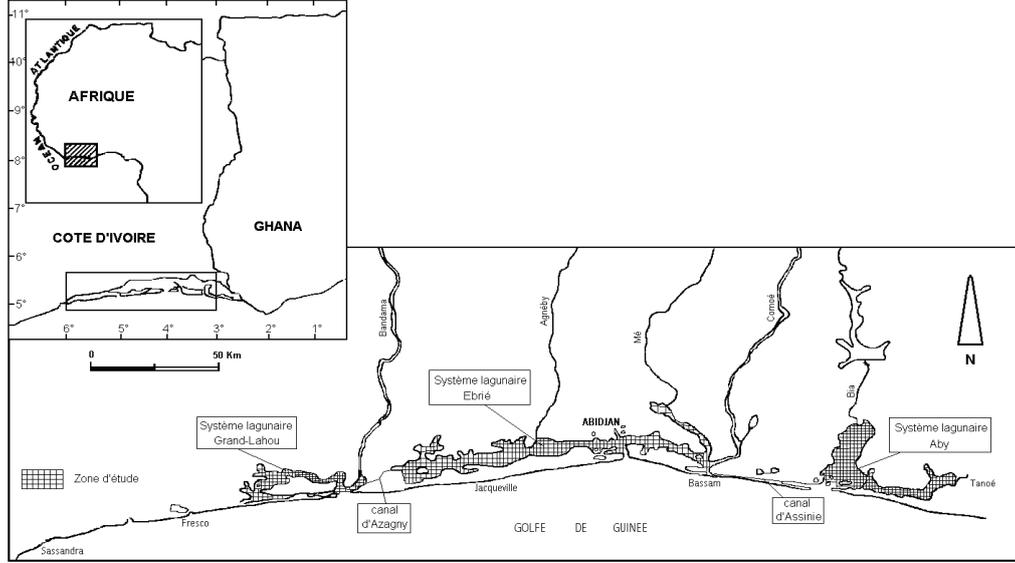


Figure 1. Localisation des systèmes lagunaires Grand-Lahou, Ebrïé et Aby.

Figure 1. Location of Grand-Lahou, Ebrïé and Aby lagoon system.

Tableau 1. Données climatiques du littoral ivoirien (CEDA 1997).

Table 1. Climatic data of the Ivorian coast (CEDA 1997).

Données climatiques	Moyenne annuelle	Maximum annuel
Température de l'air (°C)	24	33
Humidité relative (%)	50	80
Précipitation (mm/an)	1500	2300
Insolation (h/mois)	151	230
Vitesse des vents (m.s ⁻¹)	1,4	1,7

Ce logiciel utilise la méthode des éléments finis pour résoudre les équations de conservation de la masse et du bilan de quantité de mouvement intégrées sur la hauteur d'eau (Rezgui *et al.* 2008, Moussa 2009):

- l'équation de continuité: (1)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = m_0$$

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

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - h \left[E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + gh \left[\frac{\partial Z_f}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{g \rho_a V_a^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2}$$

$$- \xi \frac{\rho_a}{\rho} V_a^2 \cos \varphi - 2h\omega v \sin \varphi = 0$$

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

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - h \left[E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + E_{xx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right] + gh \left[\frac{\partial Z_f}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{g \rho_a V_a^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2}$$

$$- \xi \frac{\rho_a}{\rho} V_a^2 \sin \varphi + 2h\omega u \sin \varphi = 0$$

Dans ces équations, on a; h: hauteur d'eau (m); u et v: composantes horizontales de la vitesse moyenne sur la hauteur d'eau (m.s⁻¹); t: temps (s); ρ : masse volumique de l'eau (kg.m⁻³); ρ_a : masse volumique de l'air (kg.m⁻³); m_0 : flux massique (m.s⁻¹) à l'interface (évaporation, pluviométrie); E_{ij} : coefficients de dispersion (m².s⁻¹); g: accélération de la pesanteur (m.s⁻²); Z_f : cote au fond (m); n: coefficient de rugosité du fond de Manning (m^{-1/3}.s); ξ : coefficient de cisaillement du vent; V_a : vitesse du vent (m.s⁻¹); φ : direction du vent par rapport à l'axe Ox; ω : vitesse de rotation angulaire de la terre (rd.s⁻¹) et ϕ : latitude du milieu.

Ces équations dont les inconnues sont h, u et v, n'admettent pas de solutions analytiques, du moins pour les milieux naturels. Elles sont alors résolues numériquement par la méthode des éléments finis. Les valeurs des coefficients (n, ξ , et E_{ij}) devraient être déterminées par calage du modèle en s'appuyant sur des mesures de terrain (Rezgui *et al.* 2008).

Données du modèle hydrodynamique

Après le choix des valeurs des paramètres de calage (n et E) du modèle, le travail s'est orienté vers la simulation. Les données du modèle utilisées pour simuler le fonctionnement hydrodynamique du complexe lagunaire sont:

- temps (ou durée) de la simulation: T=144 heures (la simulation a duré 6 jours afin d'aboutir à un régime permanent en raison de l'état initial et de la grande inertie du système);

- pas de temps: $\Delta t=900$ secondes;

- précision des calculs itératifs: $\epsilon=0,001$ m;

- nombre maximum d'itérations à chaque pas de temps: NMAX=20.

Les conditions initiales définissent l'état du modèle au début de la simulation. L'état initial imposé au modèle est tel que le système est supposé uniformément immobile (sans mouvement).

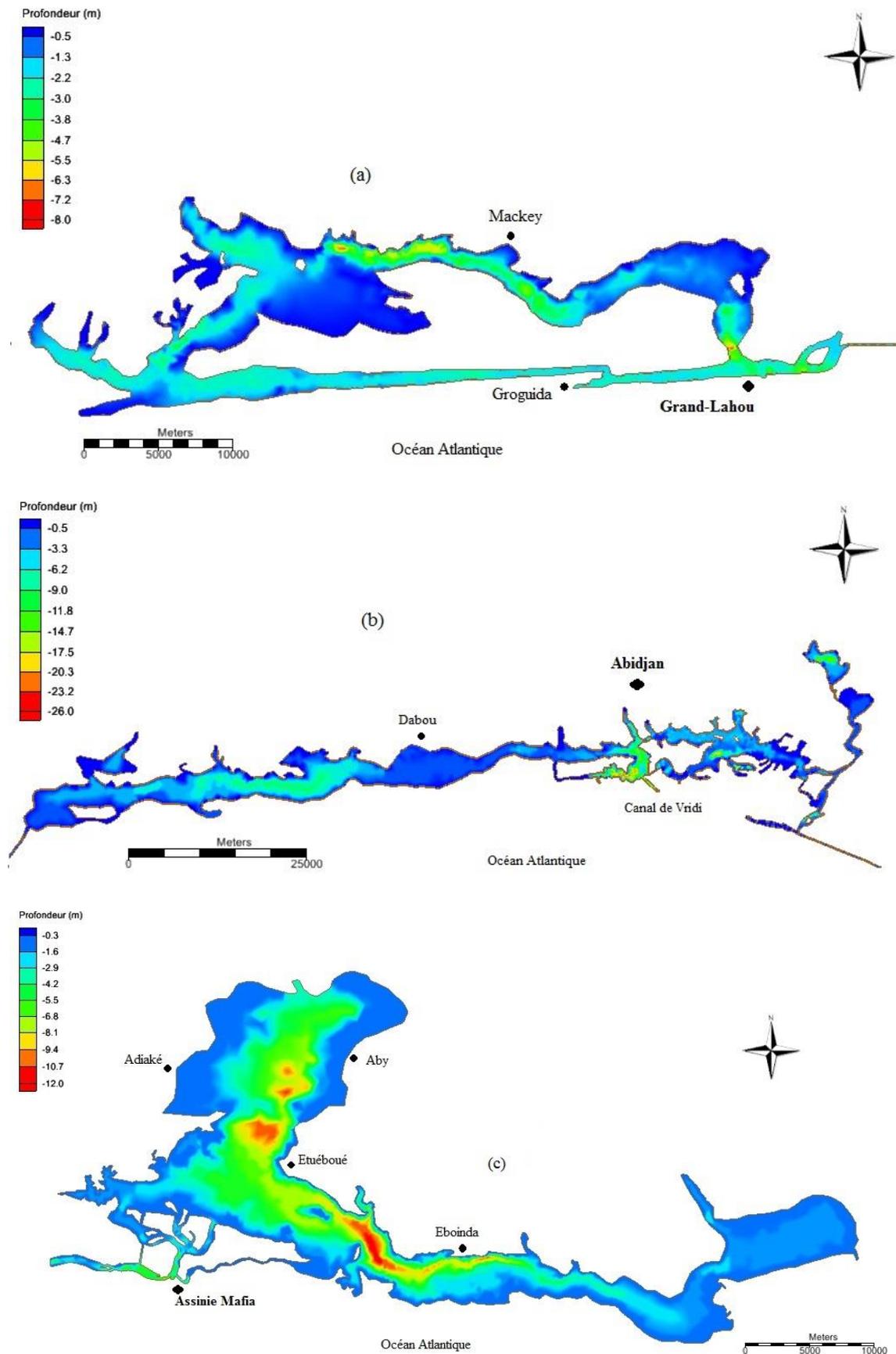


Figure 2. Bathymétrie des lagunes Grand-Lahou (a), Ebrié (b) et Aby (c).

Figure 2. Bathymetry of the Grand-Lahou (a), Ebrié (b) and Aby (c) lagoons.

Des conditions de débits imposés aux exutoires des fleuves ont été utilisées, afin de reproduire les apports des cours d'eau en période d'étiage ou en période de crue dans le modèle. Les débits injectés aux sept frontières fluviales ouvertes du modèle sont donnés dans le tableau 2.

La condition du niveau de la surface d'eau imposée aux frontières ouvertes maritimes du domaine est celle de la variation temporelle du niveau d'eau par rapport au niveau moyen de la mer due à la marée. Les données marégraphiques proviennent du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine Française) disponible en libre accès sur internet (www.shom.fr). Dans cette étude, une marée moyenne a été imposée. C'est une marée semi-diurne, d'une période de 12 h 25, avec un niveau moyen de 0,98 m et un marnage de 0,64 m. Le niveau de la marée varie donc entre un niveau minimal de 0,63 m et un niveau maximal de 1,27 m (Fig. 3).

Le modèle a permis également de calculer le temps de renouvellement moyen des eaux (en jours) qui est le rapport du volume moyen du complexe lagunaire par le volume d'eau échangé durant 24 heures à travers les frontières ouvertes maritimes du modèle (Koutitonsky & Tita 2006).

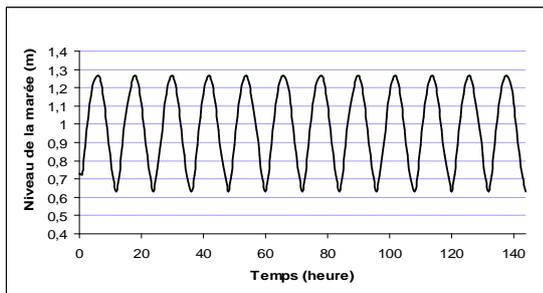


Figure 3. Marée moyenne imposée aux frontières maritimes du domaine.

Figure 3. Mean tide imposed on the domain maritime boundaries.

RESULTATS DES SIMULATIONS ET DISCUSSION

Calage du modèle hydrodynamique

Dans le logiciel SMS, le calage consiste en la détermination des valeurs du coefficient de rugosité du fond de Manning (n) et du coefficient de dispersion supposé isotrope ($E=E_{xx}=E_{xy}=E_{yx}=E_{yy}$). Les valeurs de ces paramètres de calage, adoptées pour chacun des trois systèmes lagunaires, sont celles obtenues par Wango (2009) et Wango et al. (2011). Elles sont résumées dans le tableau 3. Les différents tests de sensibilité du modèle hydrodynamique aux variations des coefficients de Manning (n) et de dispersion (E) nous ont permis d'avoir un bon accord entre les résultats du modèle et les mesures de terrain. Sachant que les observations ont été réalisées en absence de forts vents (moins de 2 km.h^{-1}), nous n'avons pas pu caler la valeur du coefficient de frottement dû au vent (τ). Les simulations ont été réalisées en négligeant l'effet du vent. En outre, le complexe lagunaire étant situé à proximité de l'équateur ($5^{\circ}20$ de latitude Nord) et étiré d'Ouest en Est parallèlement à celui-ci, l'accélération de Coriolis qui est liée à la rotation de la terre a été négligée, car son effet est très limité ($f=2 \cdot \sin\phi=1,3 \cdot 10^{-5} \text{ rd.s}^{-1}$ dans la zone) (Pouvreau 2002).

Tableau 2. Débits moyens (m^3/s) imposés aux frontières fluviales du modèle (Wango 2009).

Table 2. Average flow rate values (m^3/s) imposed at the model river borders (Wango 2009).

Systèmes lagunaires	Fleuves	Débit (m^3/s)	
		Etiage	Crue
Grand-Lahou	Boubo	0,64	34,2
	Bandama	60	400
Ebrié	Agnéby	12,5	50
	Mé	12,5	50
	Comoé	5	550
Aby	Bia	1,68	59,7
	Tanoé	13,4	142

Tableau 3. Synthèse des résultats du calage des modèles hydrodynamiques (Wango 2009).

Table 3. Result synthesis of the hydrodynamic models calibration (Wango 2009)

Lagune	Surface (km^2)	Profondeur moyenne (m)	Coefficient de Manning « n » ($\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$)	Coefficient de Dispersion « E » ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
Grand-ahou	190	3	0,05	30
Ebrié	566	4,8	0,03	10
Aby	424	3,8	0,04	5

Champs des vitesses calculées à l'intérieur des lagunes

Les simulations ont été réalisées avec une marée moyenne de marnage 0,64 m et pour deux différentes conditions de débits des fleuves (débits d'étiage et débits de crue).

Système lagunaire Grand-Lahou et Canal d'Azagny

1. Système lagunaire Grand-Lahou

En période d'étiage, la distribution des vitesses maximales calculées dans le système lagunaire Grand-Lahou est représentée sur la figure 4. En pleine mer (PM) les courants de flot, qui pénètrent dans la lagune se dirigent préférentiellement vers l'Ouest à cause de l'orientation SSE-NNW de la passe de Grand-Lahou. Les vitesses sont maximales dans la passe et atteignent $1,71 \text{ m.s}^{-1}$. A l'Est de la lagune, les courants sont nuls sauf à l'entrée du fleuve Bandama. En basse mer (BM), on observe le mouvement contraire, les masses d'eau évoluent vers la sortie en mer. Sur le cycle de marée PM/BM/PM, le flot et le jusant ont eu la même durée à Grand-Lahou, soit 5 heures. Les courants de marée sont donc symétriques, sauf que les courants de flot sont plus intenses que ceux de jusant. En période de crue (Fig. 5), la circulation des masses d'eau autour de l'île aux chimpanzés (située en face de l'embouchure du fleuve Bandama) est différente de celle observée en période d'étiage. En effet, nous remarquons la présence de courants dirigés vers Grand-Lahou quelle que soit l'heure de la marée durant la crue, ce qui serait dû à l'importance du débit déversé par le fleuve Bandama (soit $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Les courants de jusant sont dans ce cas plus forts ($1,95 \text{ m.s}^{-1}$) que les courants de flot ($< 1 \text{ m.s}^{-1}$). De plus, la phase de flot a duré 3 heures seulement alors que celle de jusant a duré 7 heures. Les courants de marée sont dissymétriques avec l'augmentation du débit fluvial.

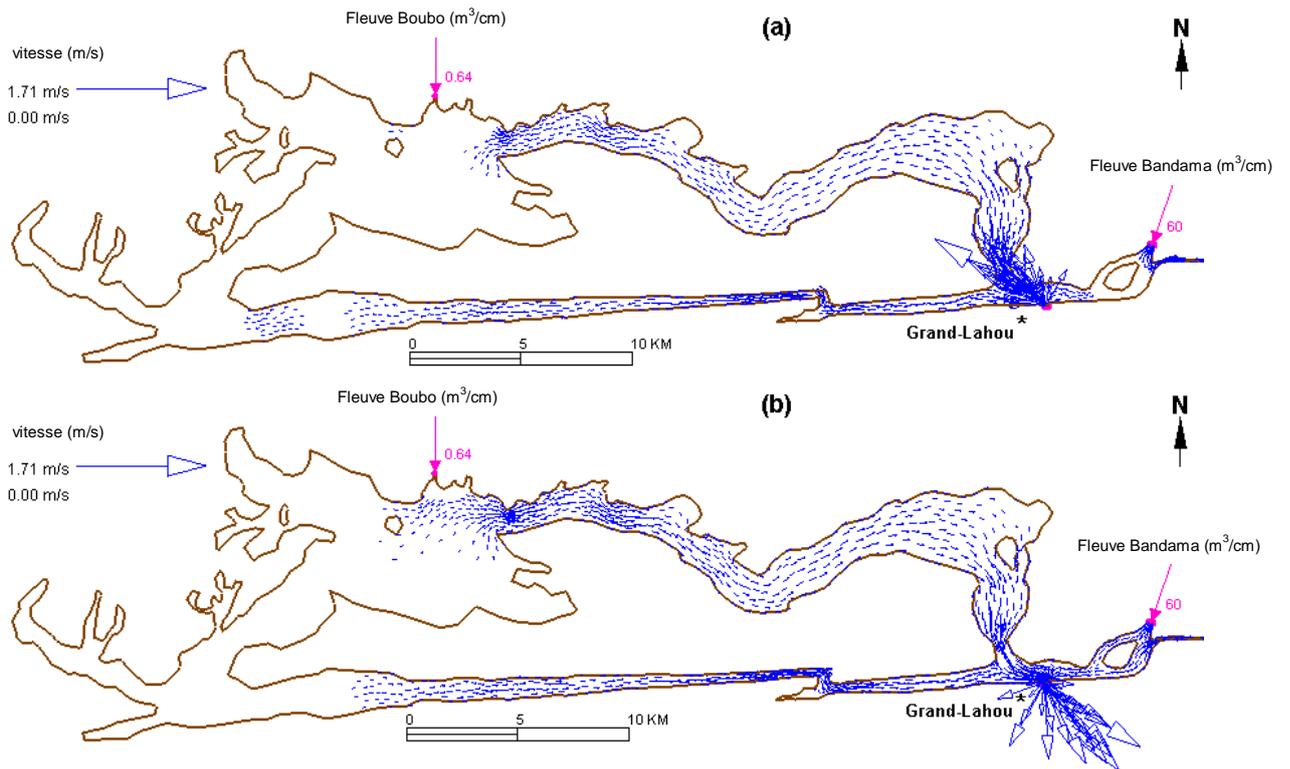


Figure 4. Vitesses calculées dans le lagon Grand-Lahou en PM (a) et BM (b), en étiage (Wango *et al.* 2008). PM = Pleine mer, BM= basse mer.
 Figure 4. Velocities calculated in the Grand-Lahou lagoon in high (a) and low (b) tide during the low-flow (Wango *et al.* 2008).

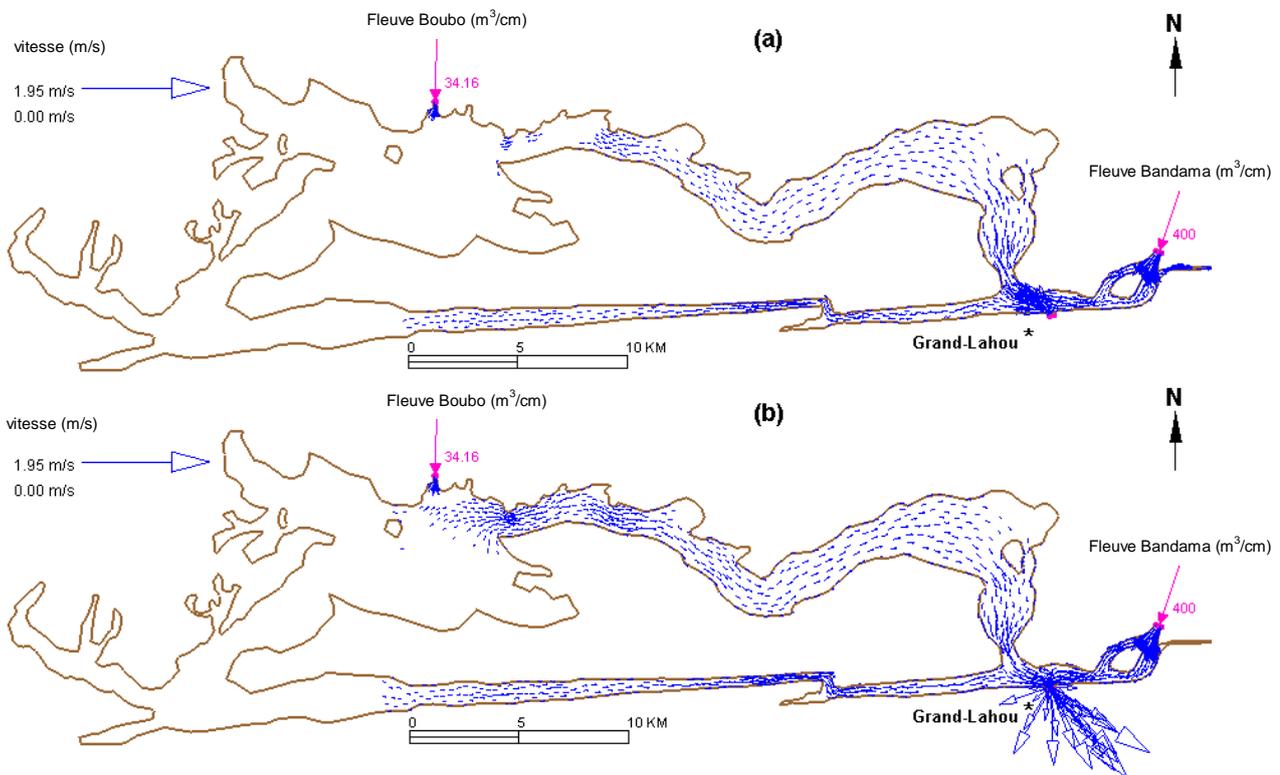


Figure 5. Vitesses calculées dans le lagon Grand-Lahou en PM (a) et BM (b), en crue.
 Figure 5. Velocities calculated in the Grand-Lahou lagoon in high (a) and low (b) tide during the floods

2. Canal d'Azagny

Reliant les systèmes lagunaires Grand-Lahou et Ebrié, les courants de marée sont alternatifs entre les deux systèmes de lagunes en période d'étiage. En pleine mer, les courants sont dirigés vers l'Est, c'est-à-dire en direction du système Ebrié, alors qu'en marée descendante ils reviennent vers le système Grand-Lahou (Fig. 6). Le mouvement alternatif des masses d'eau observé en étiage disparaît en période de crue (Fig. 7). En effet, les courants sont presque toujours dirigés vers le système Ebrié: ils sont alors unidirectionnels.

Système lagunaire Ebrié et Canal d'Assinie

1. Système lagunaire Ebrié

Les figures 8 et 9 présentent la répartition des vitesses calculées dans la zone estuarienne du système Ebrié au maximum du flot et du jusant respectivement en période d'étiage et en période de crue. Les vitesses sont maximales dans le canal de Vridi ($1,50 \text{ m.s}^{-1}$) et dans le chenal qui relie les baies du Banco et de Cocody. Le flot et le jusant ont duré chacun 5 heures en étiage. En période de crue nous observons la même distribution spatiale des vitesses qu'en étiage, sauf que le flot et le jusant ont duré respectivement 4 et 6 heures (Fig. 8).

Les résultats obtenus se rapprochent de ceux obtenus par Mondé (2004) en période d'étiage. Ce dernier auteur a noté durant un cycle de marée que les circulations de masse d'eau entre la plate-forme continentale et la lagune durent 10 h, soit 5 heures par type de transfert de masse d'eau. En période de crue par contre, nos résultats divergent de ceux de Mondé (2004) qui a montré que le flot et le jusant ont eu la même durée, soit 5 heures. Cette différence pourrait être due au fait que le dernier auteur a simulé le système Ebrié seul, alors que dans notre cas celui-ci était relié aux deux autres systèmes lagunaires (Grand-Lahou et Aby) à travers les canaux d'Azagny et d'Assinie.

L'une des principales caractéristiques de la zone estuarienne du système Ebrié, c'est que cette zone possède plusieurs baies (Banco, Cocody, Biétri, etc.) où l'on observe un accroissement du degré d'eutrophisation (Pagès *et al.* 1980, Arfi *et al.* 1981, Zabi 1982). Les simulations confirment cet état de fait, car ces baies sont très peu affectées par les courants de marée, d'où la stagnation quasi-permanente des masses d'eau qui va favoriser leur eutrophisation (Wango *et al.* 2008).

2. Canal d'Assinie

Les courants de marée calculés sont alternatifs en

période d'étiage entre les systèmes lagunaires Ebrié et Aby (Fig. 10). En pleine mer, les masses d'eau en provenance du système Aby évoluent vers l'Ouest en direction du système Ebrié. Ces courants de flot s'affaiblissent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la passe d'Assinie. En marée descendante, les masses d'eau reviennent vers Assinie. Par contre, en cas de crue, les vitesses calculées sont nulles à l'entrée du canal dans le système Aby durant la marée montante (Fig. 11). En marée basse, les courants fluviaux ne vont plus s'opposer aux courants de flot mais renforcent ceux du jusant. Les courants sont unidirectionnels vers Assinie. Les masses d'eau vont alors évoluer constamment vers Assinie au cours de la période de crue.

Système lagunaire Aby

La circulation des masses d'eau est en fonction de la morphologie particulière du système Aby. Les figures 12 et 13 montrent la distribution spatiale des vitesses calculées dans la lagune d'Aby respectivement en période d'étiage et en période de crue. Les courants les plus intenses se localisent dans les chenaux d'Assinie. Ensuite, c'est dans le bras oriental de la lagune que l'on observe des vitesses pendant la marée descendante et la crue du fleuve Tanoé qui se déverse à l'extrémité Est de la lagune. Dans la région d'Adiaké et du fleuve Bia, au nord de la lagune, les eaux sont stagnantes puisque les vitesses de courants sont nulles.

Sur l'ensemble du cycle de marée PM/BM/PM, les courants de jusant et de flot ont duré 5 heures chacun en période d'étiage. Mais, en période de crue, le jusant a duré 6 heures et le flot 4 heures seulement. Le jusant a été plus intense que le flot, aussi bien en période d'étiage qu'en période de crue. Il atteint une vitesse maximale de $1,01 \text{ m.s}^{-1}$ en période de crue.

Temps de renouvellement moyen des eaux des lagunes

En se basant sur les volumes d'eau échangés durant 24 heures à travers la passe de Grand-Lahou, le canal de Vridi et le grau d'Assinie, les calculs du temps de renouvellement moyen des eaux donnent 26,2 jours en période d'étiage et 34,2 jours en période de crue (Wango 2009). Le temps de renouvellement des eaux est plus rapide en étiage qu'en crue. Cela s'explique par le fait que le volume tidal du système est réduit en période de fort débit fluvial. Le renouvellement des eaux lagunaires par la marée est permanente tandis que le renouvellement par les eaux douces des fleuves dépend des débits et donc des saisons de crue ou d'étiage. En outre, localement ce temps varie car il suit la distribution spatiale des champs de courants dans les lagunes.

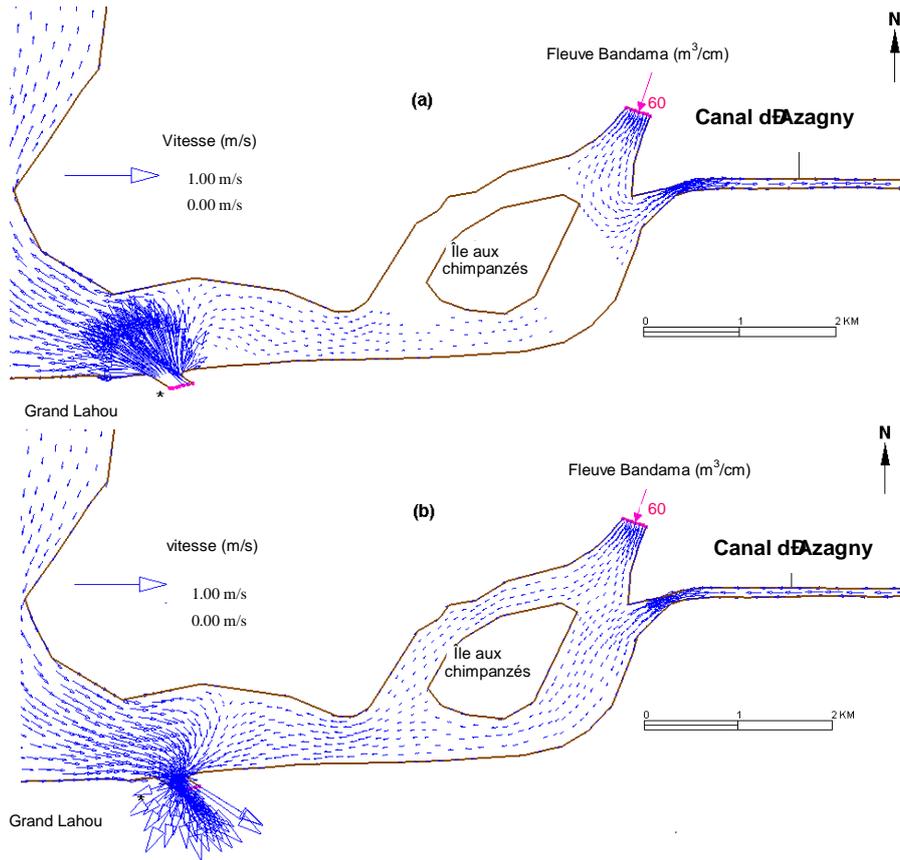


Figure 6. Vitesses calculées dans le Canal d'Azagny en PM (a) et BM (b), en étiage.

Figure 6. Velocities calculated in the Azagny channel in high (a) and low (b) tide during the low-water.

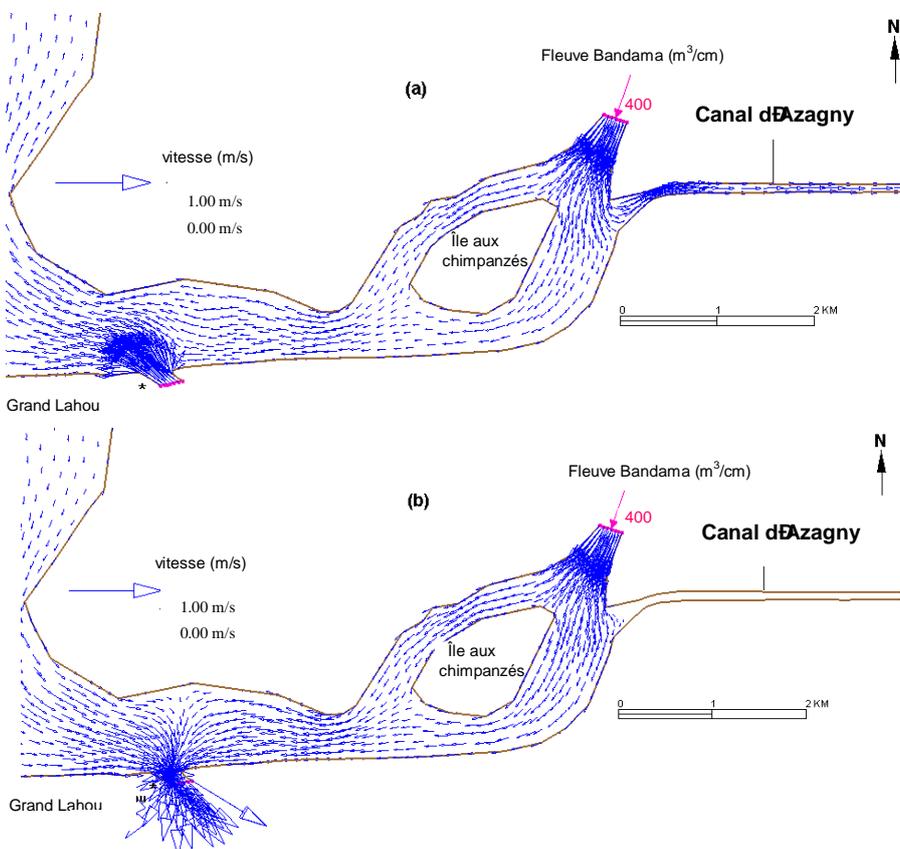


Figure 7. Vitesses calculées dans le Canal d'Azagny en PM (a) et BM (b), en crue.

Figure 7. Velocities calculated in the Azagny channel in high (a) and low (b) tide during the floods.

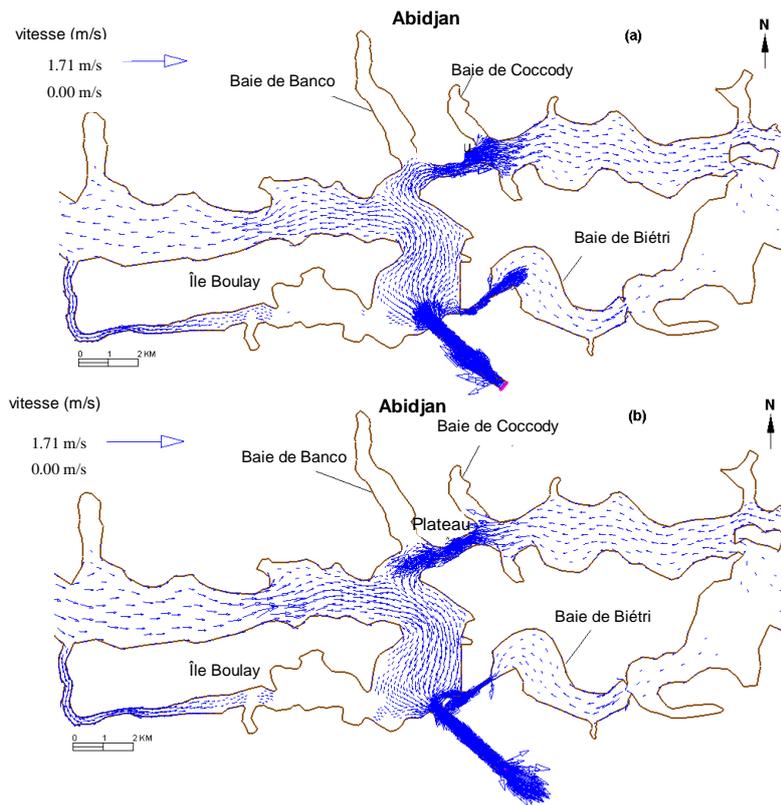


Figure 8. Vitesses calculées dans le Lagon Ebrié en PM (a) et BM (b), en étiage.
 Figure 8. Velocities calculated in the Ebrié in high (a) and low (b) tide during the low-water.

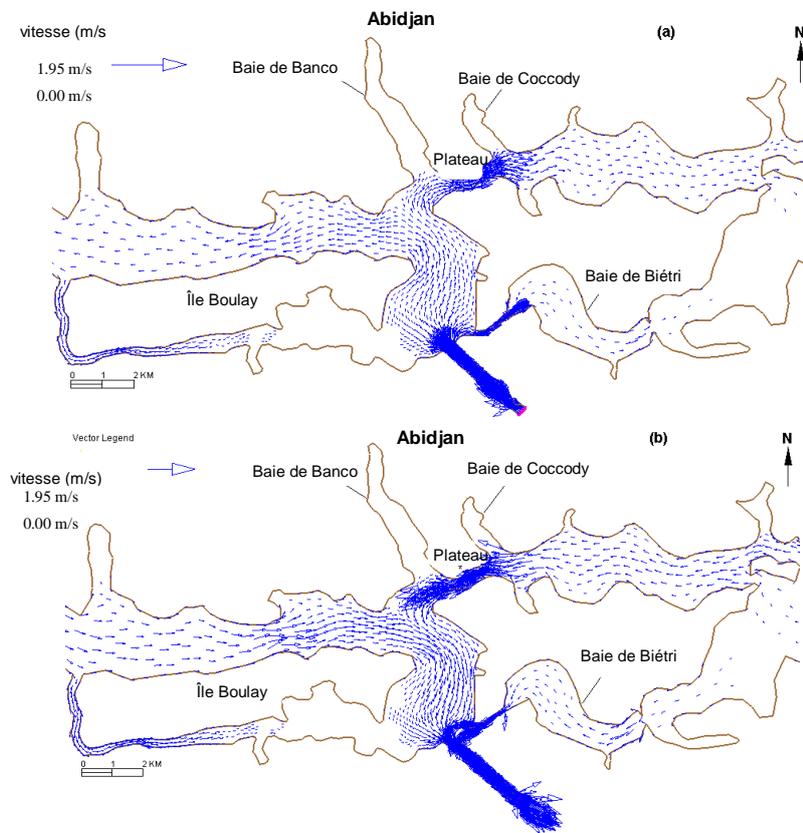


Figure 9. Vitesses calculées dans le lagon Ebrié en PM (a) et BM (b), en crue.
 Figure 9. Velocities calculated in the Ebrié lagoon in high (a) and low (b) tide during the floods.

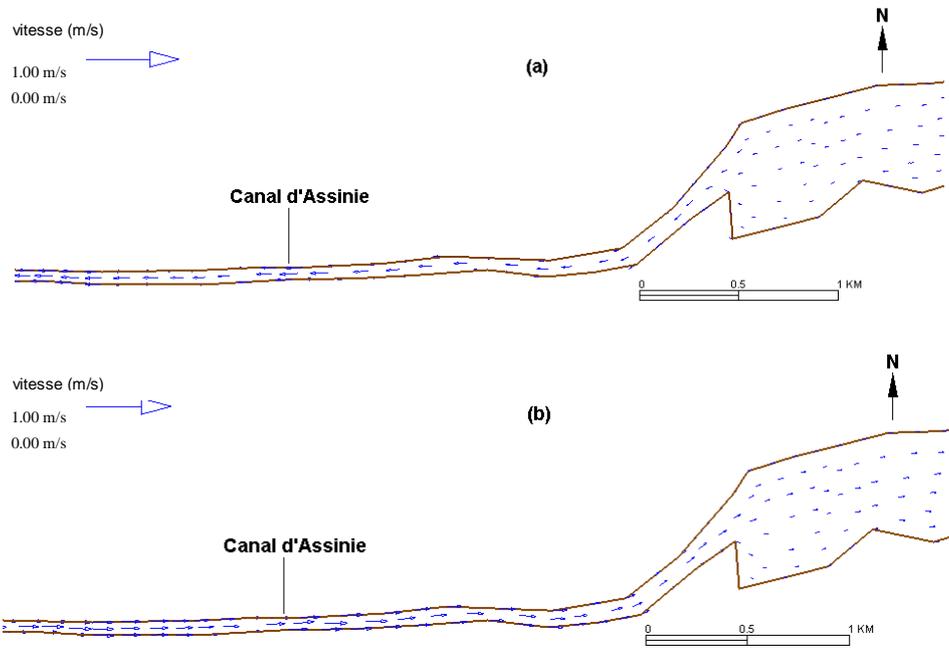


Figure 10. Vitesses calculées dans le Canal d'Assinie en PM (a) et BM (b), en étiage.
 Figure 10. Velocities calculated in the Assinie channel in high (a) and low (b) tide during the low-water.

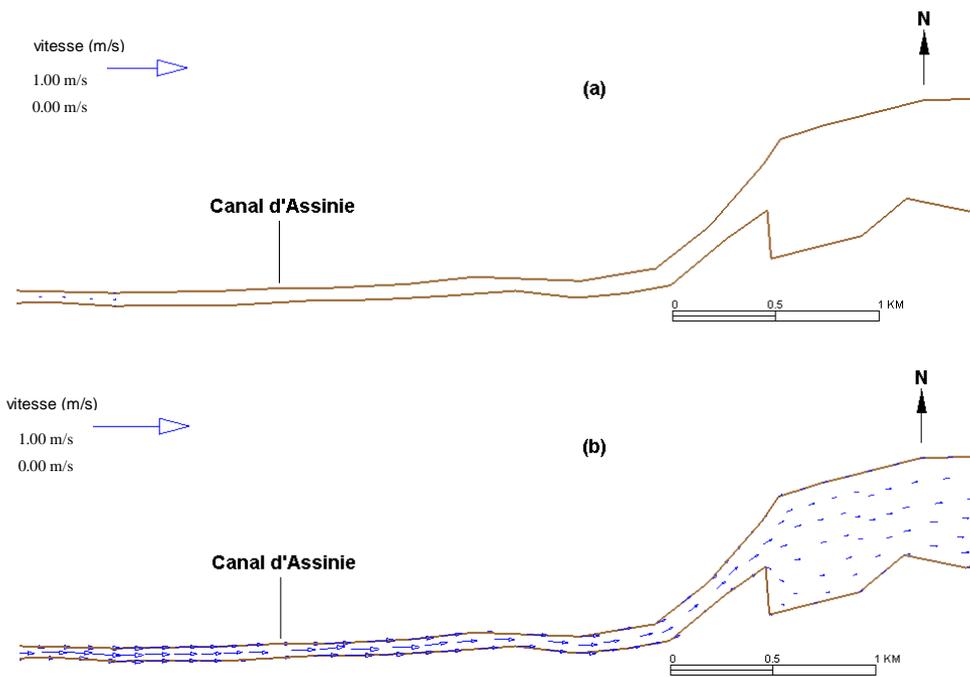


Figure 11. Vitesses calculées dans le Canal d'Assinie en PM (a) et BM (b), en crue.
 Figure 11. Velocities calculated in the Assinie channel in high (a) and low (b) tide during the floods.

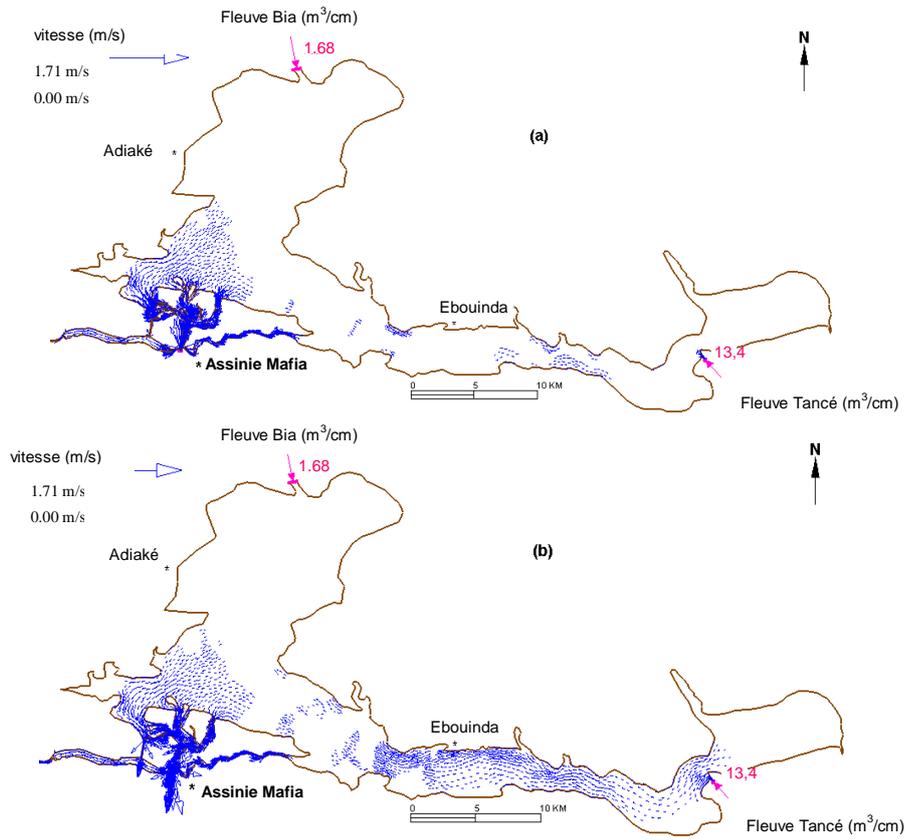


Figure 12. Vitesses calculées dans le lagon Aby en PM (a) et BM (b), en étiage.

Figure 12. Velocities calculated in the Aby lagoon in high (a) and low (b) tide, during the low-water.

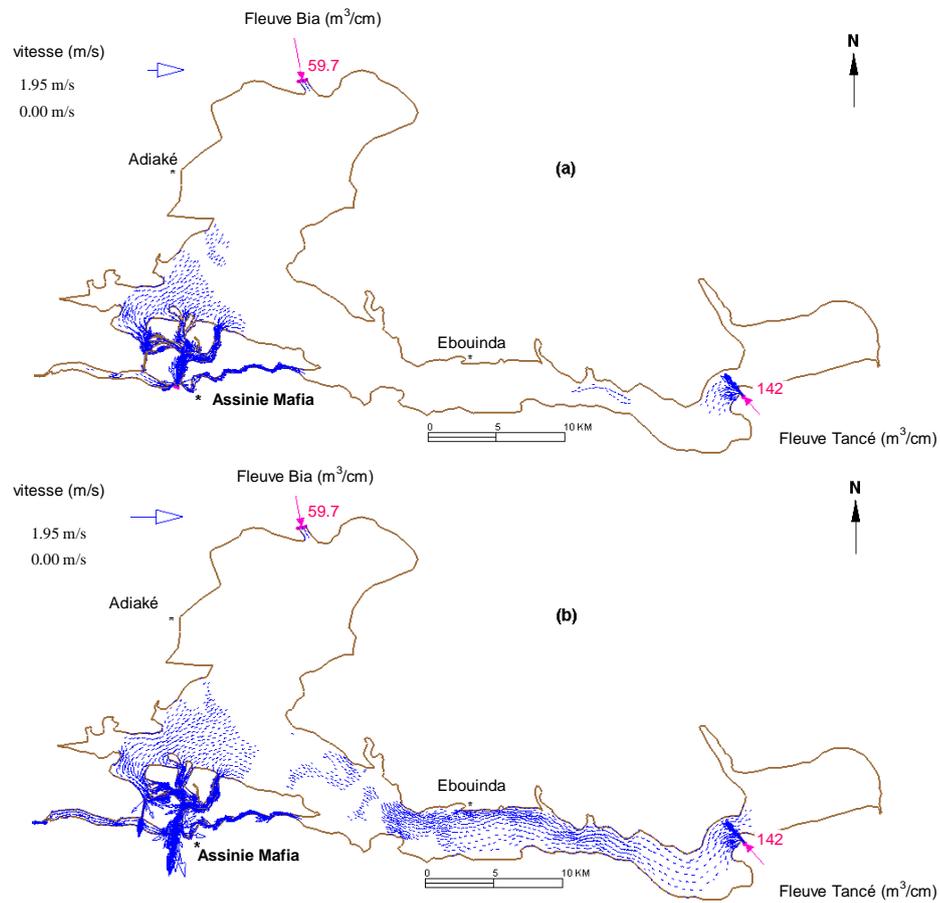


Figure 13. Vitesses calculées dans le lagon Aby en PM (a) et BM (b), en crue.

Figure 13. Velocities calculated in the Aby lagoon in high (a) and low (b) tide during the floods.

CONCLUSION

Des simulations numériques du fonctionnement hydrodynamique du complexe lagunaire de la Côte d'Ivoire ont été réalisées à l'aide du module RMA2 du logiciel SMS, sous l'effet de la combinaison de deux forçages externes : Un forçage par une marée moyenne et un forçage par des débits fluviaux. Les simulations ont montré que la marée et les débits fluviaux contribuent à la création de courants de circulation dans le complexe lagunaire. Cependant, loin des embouchures des fleuves et des passes, ces courants sont généralement faibles. Les simulations ont aussi montré des échanges entre les systèmes lagunaires à travers les canaux d'Azagny et d'Assinie.

Le transfert des masses d'eau entre le milieu lagunaire et le golfe de Guinée a duré 10 heures avec 2 heures d'instabilité en étiage et en crue. Sur le cycle de marée PM/BM/PM, les courants de flot et de jusant ont eu la même durée (5 heures) en période d'étiage. En période de crue, les courants de marée deviennent dissymétriques. Le flot a duré entre 3 et 4 heures et le jusant entre 6 et 7 heures.

Les simulations ont montré des échanges entre les systèmes lagunaires à travers les canaux d'Azagny et d'Assinie. La modélisation de la dispersion des eaux douces (apports fluviaux) et du sel (onde de marée) dans le complexe lagunaire permettrait de mieux comprendre l'effet des débits fluviaux sur la circulation des masses d'eau dans le complexe lagunaire de Côte d'Ivoire. En outre, d'autres mesures de terrains devraient être effectuées pour la validation du modèle hydrodynamique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Dr. K. Hilmi pour ses corrections et commentaires qui ont contribué à l'amélioration de la version finale du manuscrit

REFERENCES

- Arfi R., Dufour P. & Mayer D. 1981. Phytoplancton et pollution : premières études en baie de Biétry (Côte d'Ivoire). Traitement mathématique des données. *Oceanologica Acta*, 3196329.
- Arfi R. & Guiral D. 1994. Un écosystème estuarien eutrophe: la baie de Biétry. In: J.R. Durand, P. Dufour, D. Guiral & S. Zabi (Eds.) - *Environnement et ressources aquatiques de Côte d'Ivoire* T. II. Les milieux lagunaires. Ed. ORSTOM, 59690.
- CEDA - Centre pour l'Environnement et le Développement en Afrique 1997. Principaux problèmes environnementaux de la zone côtière. In : *Côte d'Ivoire ó Profil environnemental de la zone côtière*. Rap. Min. du Log., Cadre de Vie et de l'Environ., Grand écosystème marin du golfe de Guinée, 44647.
- Guiral D. & Lanusse A. 1984. Contribution à l'étude hydrodynamique de la baie de Biétry, lagune Ebrié, Côte d'Ivoire. *Doc. Sci. Cent. Rech. Océano. Abidjan*, 15, 162, 1618.
- Koutitonsky V.G. & Tita G. 2006. *Temps de renouvellement des eaux dans la lagune de Grande-Entrée aux Îles-de-la-Madeleine*. Min. Agr. Pêch. Alim. du Québec. Rap. Rech.-dévelop., n° 151, 73 p.
- Lemasson L. & Rebert J.P. 1973. Les courants marins dans le golfe ivoirien. *Cah. Orstom, série Océanogr.*, 11, 1, 67695.
- Mondé S. 2004. *Etude et modélisation hydrodynamique de la circulation des masses d'eau dans la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire)*. Thèse Doc. Etat, Univ. Abidjan, 324 p.
- Moussa M. 2009. *Maîtrise des logiciels CORMIX et SMS. Polycopié sur «Mécanique des Fluides Environnementales»*. École Nat. d'Ing. Tunis, Tunisie, 68 p.
- Pagès L., Dufour P. & Lemasson L. 1980. *Pollution de la zone urbaine de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire)*. Doc. Sc. Cent. Rech. Océano., Abidjan, 2, 796107.
- Pouvreau N. 2002. *Impact des forçages hydrodynamiques sur la circulation des masses d'eau dans la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire)*. DEA, Univ. La Rochelle, Centre Littoral de Géophysique, 45 p.
- Ramany B.P. 1979. *Le système lagunaire Ebrié en Côte d'Ivoire: fonctionnement hydrodynamique et salinité*. Thèse Doct. d'Ing. Inst. Nat. Polytech. Toulouse, 179 p.
- Rezgui A., Ben Maïz N. & Moussa M. 2008. Modélisation du fonctionnement hydrodynamique et écologique du Lac Nord de Tunis. *Rev. Sc. Eau*, 21, 3, 3496361.
- SMS 2003. *Surface-Water Modeling System. Users guide to RMA2 WES, version 4.3*. US Army Corps of Engineers - Waterways Experiment Station, 240 p.
- Wango T-E., Moussa M., Monde S. 2008. Modèle Bi-dimensionnel de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). *Int. J. Sc. Research*, 24, 3, 2296243.
- Wango T-E. 2009. *Modélisation de l'hydrodynamique, de la dispersion du sel et de l'eau douce dans le complexe lagunaire de Côte d'Ivoire (Grand-Lahou, Ebrié et Aby)*. Thèse Doct., Univ. Cocody, Côte d'Ivoire, 187 p.
- Wango T-E., Moussa M., Adopo K.L., Mondé S. 2011. Calage du modèle hydrodynamique à 2D du complexe lagunaire de Côte d'Ivoire. *Geo-Eco-Trop*, 35, 23632.
- Zabi G.S. 1982. *Les peuplements benthiques lagunaires liés à la pollution en zone urbaine d'Abidjan (Côte d'Ivoire)*. Actes du Symp. Intern. sur les lagunes côtières, Scor/ Labo/ Unesco, Bordeaux, septembre 1981, 4416455.

Manuscrit reçu le 21/09/2011

Version révisée acceptée le 29/12/2012

Version finale reçue le 02/04/2014

Mise en ligne le 16/05/2014