

Modélisation hydrodynamique DELFT3D des courants de marée de la plage sous-marine du littoral sud-ouest de la Côte d'Ivoire

[DELFT3D hydrodynamic modelling of tidal currents on the underwater beach of the littoral sud-ouest of Côte d'Ivoire]

N'Guessan Eric Yao¹, Konan Roger Assie¹, and Josias Boanerges Nongbe²

¹UFR Environnement, Université Jean Lorougnon GUEDE, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire

²UFR-STRM, Université Felix Houphouët-Boigny, Cocody-Abidjan, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Copyright © 2024 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The fundamental tool of this study is the two and three-dimensional modeling software DELFT 3D. It was used to model the hydrodynamic processes of the harbor of San-Pédro (Côte d'Ivoire) and its immediate marine environment, with the input parameters such as tidal variations in tides and river flows, as well as average annual wind speeds. Studies focused on the behavior of current fields, water level variation, and the nature of the tidal wave. The calibration of the model followed by an analysis of the literature led us to choose a coefficient of $0.03 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$, with which the model performs very well. Current fields tend to follow the wind direction, parallel to the coast at sea, while they fit the morphology of the roadstead. At sea, currents are exclusively linear at low water, and exceptionally gyrotory at flood stage in front of the San-Pedro river outlet. In the roadstead, they are gyrotory and linear, alternating in some places and permanently gyrotory in others. The shape of the current also depends on its speed, with a limit of 1.5 cm/s for the appearance of gyrotory currents at lower speeds. The current speeds in the roadstead are between 0 and 6 cm/s while at sea they are between 5 and 11 cm/s, exceptionally between 10 and 34 cm/s in front of the outlet. As water level variations are highly dependent on tide and season, they are greater in the roadstead (4cm on average) than at sea. The wave is stationary in roadstead, with the existence of the seiche phenomenon, and progressively dominant at sea. The seiche wave determines the directions of entry and exit of water from the roadstead, with low tide corresponding to an outflow of water and high tide, a period of transition between the ingress and egress of water from the roadstead.

KEYWORDS: DELFT 3D, Foreshore, Submersion rate, Coastline, San-Pedro.

RESUME: L'outil fondamental de cette étude est le logiciel de modélisation numérique à deux et trois dimensions DELFT 3D. Il a été utilisé pour modéliser les processus hydrodynamiques du port de San-Pédro (Côte d'Ivoire) et de son environnement marin immédiat, avec comme paramètre d'entrée : les variations de la marée et des débits fluviaux ainsi que la moyenne annuelle du vent. Les études se sont portées sur le comportement des champs de courant, la variation du niveau d'eau, et la nature de l'onde de marée. Le calage du modèle suivi d'une analyse de la littérature nous a amené à choisir un coefficient de $0,03 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$, avec lequel le modèle est très bon. Les champs de courant ont tendance à suivre la direction du vent, parallèle à la côte en mer, tandis qu'ils épousent la morphologie de la rade. En mer les courants sont exclusivement linéaires en étiage et exceptionnellement giratoire en crue en face de l'exutoire du fleuve San-Pedro. En rade, ils sont giratoires et linéaires, alternativement pour certains endroits et giratoires permanemment pour d'autres. La forme du courant dépend aussi de sa vitesse, avec une limite de 1,5 cm/s d'apparition des courants giratoires en baissant les vitesses. Les vitesses en rade sont entre 0 et 6 cm/s alors qu'en mer ils sont entre 5 et 11 cm/s, exceptionnellement entre 10 et 34 cm/s en face de l'exutoire. Les variations de niveau d'eau dépendant fortement de la marée et de la saison, elles sont plus importantes en rade qu'en mer. L'onde est stationnaire en rade, avec l'existence du phénomène de seiche, et à dominance progressive en mer. L'onde de

seiche détermine les directions d'entrée et de sortie d'eau de la rade avec la basse mer qui correspond à une sortie d'eau et la pleine mer, une période de transition entre l'entrée et la sortie d'eau de la rade.

MOTS-CLEFS: DELFT 3D, Estran, Taux de submersion, Littoral, San-Pédro.

1 INTRODUCTION

Situé dans le sud-ouest de la Côte d'Ivoire, précisément entre la longitude comprise entre 761900 et 768300E et la latitude entre 521300 et 526600N dans les Coordonnées UTM WGS84, notre zone d'étude, le Port Autonome de San-Pédro (PASP) est le second port de Côte d'Ivoire et le seul port en eau profonde du pays. Les travaux d'extension nécessitent que soit résolue au préalable certaines questions relatives à la sécurité des activités portuaires et à la compréhension de l'hydrodynamisme y afférent. Cela permettra de prévenir toute incidence comme l'érosion rapide et soudaine à l'est du chenal central, ou encore la rupture de la jetée ouest du port. C'est pour répondre à ces besoins que cette présente étude de modélisation numérique des courants marins de la plage sous-marine de San-Pédro a été menée. Toutefois, l'appréhension de cette étude et du thème, nécessite que soit survolé les travaux antérieurs de la spécialité sur la zone d'étude.

Jusqu'à récemment, tous les travaux de modélisation numérique des systèmes hydrodynamique et morphodynamique du littoral ivoirien ne concernait que le littoral sud-est, avec le Port Autonome d'Abidjan et la lagune Ebrié [14] et [16]. Les études sur le littoral sud-ouest de la Côte d'Ivoire et particulièrement le port Autonome de San-Pédro était des mesures ponctuelles; citons par exemple [2] pour leur observation sur l'hydrodynamisme du port ou encore [7] pour ses travaux sur l'évolution morphodynamique du périmètre portuaire de San-Pédro. Il a fallu attendre [13] pour avoir à notre connaissance un premier modèle numérique hydrodynamique de la rade portuaire de San-Pédro, et cela par le logiciel SMS (Surfacewater Modeling System). Il s'est attelé à décrire le comportement des champs de courants, la variation du niveau d'eau, et a effectué un bilan de masse. Les travaux de la présente étude s'inscrivent dans la poursuite d'une description plus approfondie des travaux de [13], avec un logiciel qui a servi à modéliser l'Hydrodynamisme et le Morphodynamisme de la lagune Ebrié, DELFT 3D [10]. Aucune étude n'a simulé l'influence que pouvait avoir les variations du débit du fleuve sur l'hydrodynamisme du port. [13] et [17] dans leur modèle numérique, ce sont concentré sur la rade, la mer n'a pas été pris en compte ni le chenal d'entrée dans son entièreté. [7] dans la perspective d'une compréhension approfondie des mécanisme et phénomènes recommande une étude par modèle du périmètre portuaire de San-Pédro. En outre, il y a un manque de données et de connaissances sur la nature de l'onde (stationnaire ou progressive) et ses conséquences sur le comportement des champs de courants. Toutes ces observations ont emmené à se poser la question suivante: Quel est l'impact de la variation du débit du fleuve San-Pédro sur l'hydrodynamisme des courants marins de la plage sous-marine du littoral sud-ouest de la Côte d'Ivoire ?

Les modèles en générale permettent de faire ressortir les processus pertinents. Les simulations numériques de l'hydrodynamisme révèlent quant à elles plusieurs avantages du fait qu'elles sont utilisées pour simuler les phénomènes fondamentaux. De ce fait, elles sont la base de plusieurs autres études de modélisation, notamment le transport de sédiment, la morphologie, les vagues, la qualité de l'eau et/ou les changements écologiques. La modélisation des courants de marée est particulièrement utile dans le traçage de particules (cas de fuite de polluant ou propagation d'un contaminant), l'étude des zones d'approvisionnement et de déversement des eaux industrielles (centrale thermiques ou nucléaire par exemple), la navigation (zone de turbulences ou pas), la pêches (zone de upwellings et zones calmes et/ou de reproductions), l'érosion et le transport de sédiment (la dynamique de mobilisation et de déplacement des particules). Cette présente étude a pour objectif de simuler et comprendre le fonctionnement hydrodynamique du port de San-Pédro, et par une connaissance synoptique des champs de courants dans la zone, s'avère être d'une grande utilité dans un contexte de modernisation du port de San-Pédro et de développement des activités anthropiques dans la région.

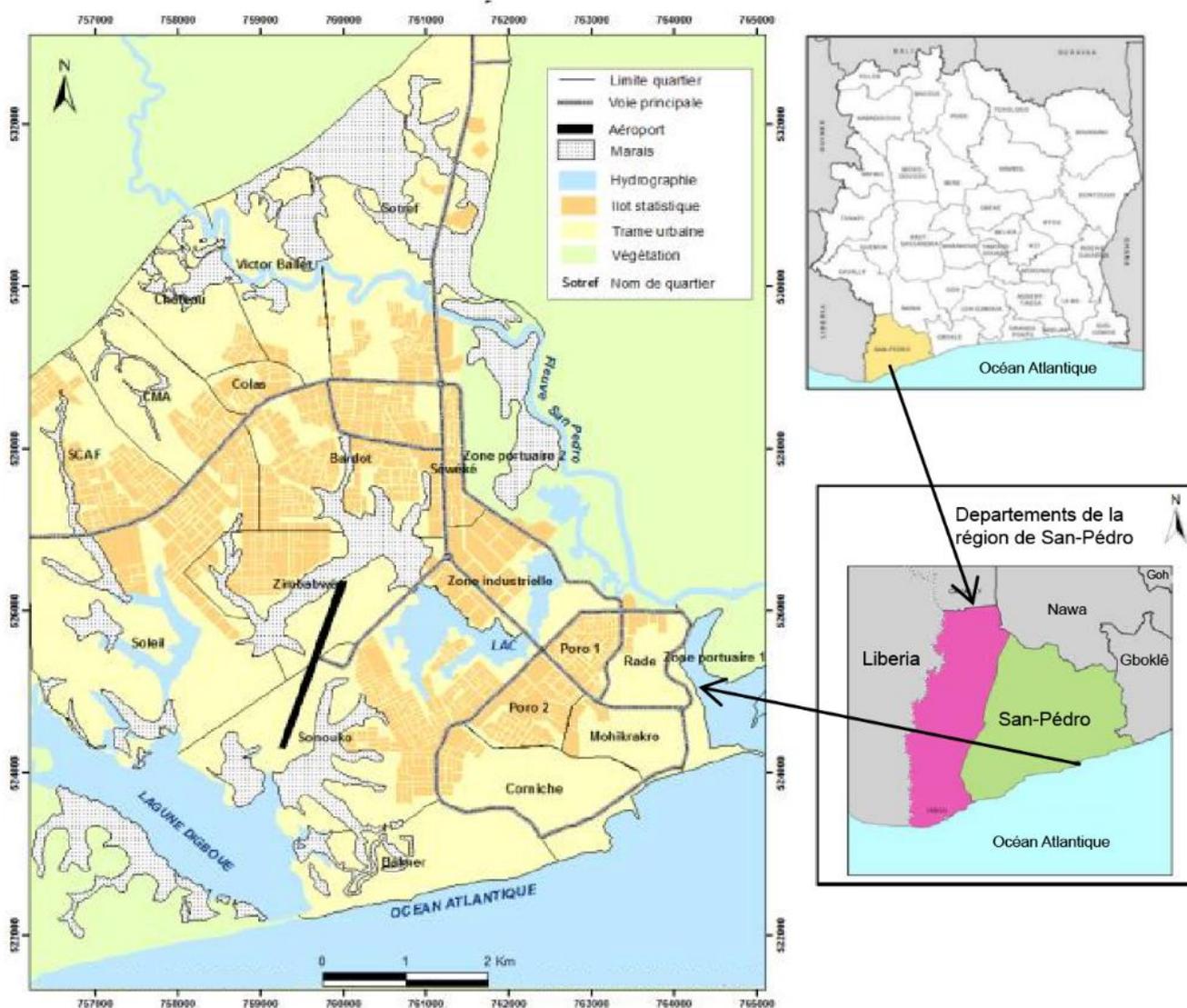


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude

2 METHODOLOGIE

2.1 PRESENTATION DU LOGICIEL DELFT 3D

La modélisation hydrodynamique requière un certain nombre de données à savoir: la bathymétrie de la zone d'étude, la marée en mer, le vent (vitesse et direction), la hauteur d'eau etc. L'intégration et l'analyse de ces données dans la présente étude a nécessité l'utilisation de certains logiciels: Principalement DELFT 3D. Delft 3D est un logiciel pluridisciplinaire développé par l'institut de recherche hollandais "Deltares". Il est composé de modules (Figure 2) qui permettent chacun de réaliser la modélisation de processus spécifique aux environnements fluviaux, estuariens et costaux. Ce travail peut être effectué et présenté en deux ou trois dimensions [4].

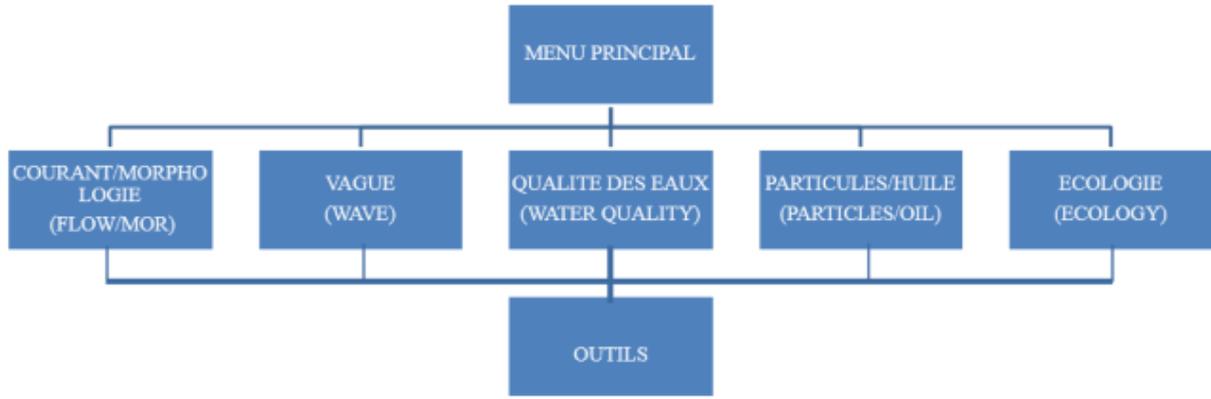


Fig. 2. Architecture du système de Delft 3D

L'accent sera mis sur le module traitant de la circulation des eaux et du transport des sédiments (FLOW). Le module FLOW est basé sur les équations de Navier-Stokes. Dans le plan horizontal, Delft 3D-Flow, les coordonnées curvilinéaires sont soit le système de coordonnées cartésienne (ξ, η) soit sphérique (λ, ϕ) . Les coordonnées sphériques sont un cas particulier des coordonnées curvilinéaires orthogonales avec:

$$\xi = \lambda, \eta = \phi, \sqrt{G\xi\xi} = R \cos \phi, \sqrt{G\eta\eta} = R \quad (1)$$

Les équations de mouvement dans le plan horizontal décrivent les mouvements des particules d'eau dans le plan horizontal selon l'équation:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{1}{\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\eta\eta}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{1}{\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\xi\xi}}{\partial \eta} - fv = - \frac{1}{\rho\sqrt{G\xi\xi}} P\xi + F\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(V_v \frac{\partial \mu}{\partial \sigma} \right) + M\xi \quad (2)$$

et

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{uv}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{1}{\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\eta\eta}}{\partial \xi} + \frac{u^2}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{1}{\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\xi\xi}}{\partial \eta} - fu = - \frac{1}{\rho\sqrt{G\eta\eta}} P\eta + F\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(V_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M\eta \quad (3)$$

uv est le coefficient de viscosité turbulente dans le plan vertical. Les variations de densité sont négligées, excepté dans les termes de la variation barocline. $P\xi$ et $P\eta$ représentant les gradients de pression. Les forces

$F\xi$ et $F\eta$ dans les équations de mouvement, représentent le déséquilibre des stressés horizontaux de Reynold.

$M\xi$ et $M\eta$ représentent la contribution dues aux sources externes.

Dans l'hypothèse des eaux peu profondes, l'équation de mouvement verticale est réduite à une équation de la pression hydrostatique. Les accélérations verticales dues aux effets de flottabilité et aux soudaines variations sur le fond topographique ne sont pas prises en compte. Ainsi:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H \quad (4)$$

$$P = P_{atm} + gH \int_{\sigma}^0 \rho(\xi, \eta, \sigma', t) d\sigma' \quad (5)$$

$$\frac{1}{\rho\sqrt{G\xi\xi}} P\xi = \frac{g}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{1}{\rho\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \xi} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\rho\sqrt{G\eta\eta}} P\eta = \frac{g}{\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \eta} \quad (7)$$

(5) est obtenue après intégration de (4).

Premièrement, on considère l'eau avec densité constante et ensuite avec une densité non uniforme. Pour une eau densité constante, et tenant compte de la pression atmosphérique, gradients de pression sont (6) et (7).

Les contraintes horizontales de Reynolds $F\xi$ et $F\eta$ sont déterminées par rapport au concept de viscosité turbulente [18] selon l'équation suivante:

$$F\xi = \frac{1}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial \tau_{\xi\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \eta} \text{ et } F\eta = \frac{1}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial \tau_{\eta\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \tau_{\eta\eta}}{\partial \eta} \quad (8)$$

Dans Delft3D-FLOW, la redéfinition de la contrainte du système cartésien au système de coordonnées σ , se fait par une rotation et introduit des dérivés supplémentaires [5]. Cette redéfinition suppose que l'échelle de longueur horizontale est beaucoup plus grande que la profondeur de l'eau [1]. A petite échelle, les contraintes de cisaillement $\tau_{\xi\xi}, \tau_{\xi\eta}, F\xi, F\eta$ sont déterminées par:

$$\tau_{\xi\xi} = \frac{2\nu_H}{\sqrt{G\xi\xi}} \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) \quad (9)$$

$$\tau_{\xi\eta} = \tau_{\eta\xi} = \nu_H \left\{ \frac{1}{\sqrt{G\eta\eta}} \left(\frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{\sqrt{G\xi\xi}} \left(\frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) \right\} \quad (10)$$

$$F\xi = \nu_H \left(\frac{1}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G\eta\eta}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} \right) \quad (11)$$

$$F\eta = \nu_H \left(\frac{1}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G\eta\eta}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \right) \quad (12)$$

2.2 CONSTRUCTION DU MODELE

La réalisation d'un modèle hydrodynamique dans Delft 3D se fait en cinq (05) grandes étapes:

- ✓ Acquisition de la bathymétrie;
- ✓ Réalisation de la grille couvrant la zone d'étude;
- ✓ Interpolation de la bathymétrie dans la zone couverte par la grille;
- ✓ Définition des conditions initiales;
- ✓ Définition des conditions à imposer aux limites ouvertes de la zone d'étude

Suite à ces étapes, il est effectué un calibrage du modèle afin qu'il puisse représenter au mieux la réalité.

- Acquisition de la bathymétrie

L'acquisition des données de la bathymétrie s'est faite à partir d'un plan de sondage du Bassin, du chenal, et des darses du rivage est et ouest, Le logiciel MapInfo Professional 7.5 a été usité pour effectuer un géoréférencement. Après le géoréférencement, les coordonnées x, y , ainsi que la profondeur z de chaque point bathymétrique ont été manuellement saisies dans un tableur Excel (*.xls). Cette bathymétrie a été interpolé à la bathymétrie du plateau continental ivoirien de [15], pour inclure l'embouchure du fleuve. En outre afin et d'attester de la fiabilité de notre modèle, nous nous sommes procuré les enregistrements de la marée des deux marégraphes du port. Nous comparerons ces données avec les prévisions du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM).

- Réalisation de la grille

Après l'acquisition de la bathymétrie, on commence par couvrir la surface de notre zone d'étude d'une grille, c'est-à-dire en plusieurs cellules contiguës qui contiennent chacune les informations bathymétriques nécessaires pour le calcul des différents processus à modéliser. Dans le plan horizontal (2D), le Delft 3D-FLOW utilise une grille orthogonale qui peut être rectangulaire, sphérique ou curvilinéaire. Le type de grille à choisir est fonction de la forme de la zone d'étude. Les directions de grille réalisée dans Delft 3D suivent deux axes que sont M et N, avec l'axe M tendant vers l'horizontal et l'axe N vers la verticale. Ainsi chaque cellule de la grille est repérée par ses coordonnées selon ces deux axes (Figure 3).

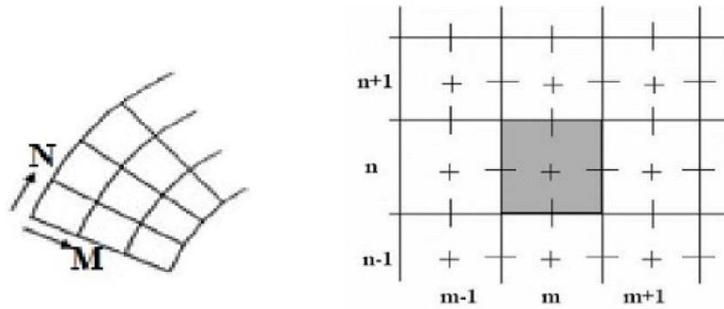


Fig. 3. Directions et coordonnées des cellules d'une grille dans Delft 3D

Dans notre étude, nous avons utilisé une grille curviligne dans le plan horizontal car permet d'épouser les contours de la rade et de la côte. La Figure 4 montre à droite la grille après conversion des « splines » à gauche. La grille utilisée est en système de coordonnées cartésiennes et possède 90 points de grille dans la direction M et 197 points de grilles dans la direction N. Pour qu'elle soit valide, elle doit respecter le critère d'orthogonalité et de ratio d'aspect. L'orthogonalité de notre grille est présentée sur la Figure 5, les valeurs γ sont presque toutes inférieures à 0,03, quelque rares points notamment l'extrémité nord de la rade, mais c'est une zone isolée entourée de lignes présentant des orthogonalités inférieures à 0,015. La Figure 5 montre également le ratio d'aspect de notre grille, généralement inférieure à 1,2 avec quelques zones sensiblement supérieures à 1,4 dans la rade.

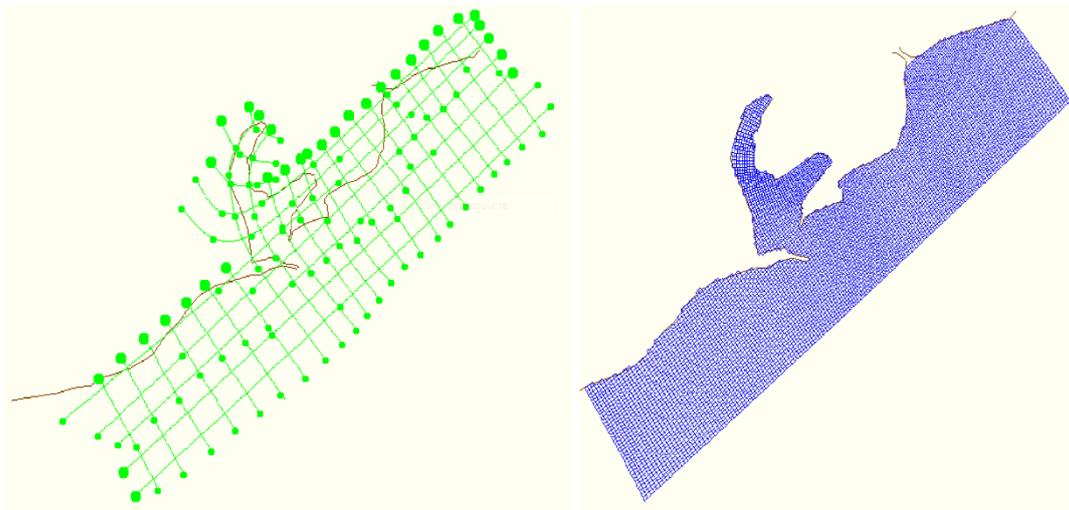


Fig. 4. « Splines » (gauche) et grille (droite) de la zone d'étude

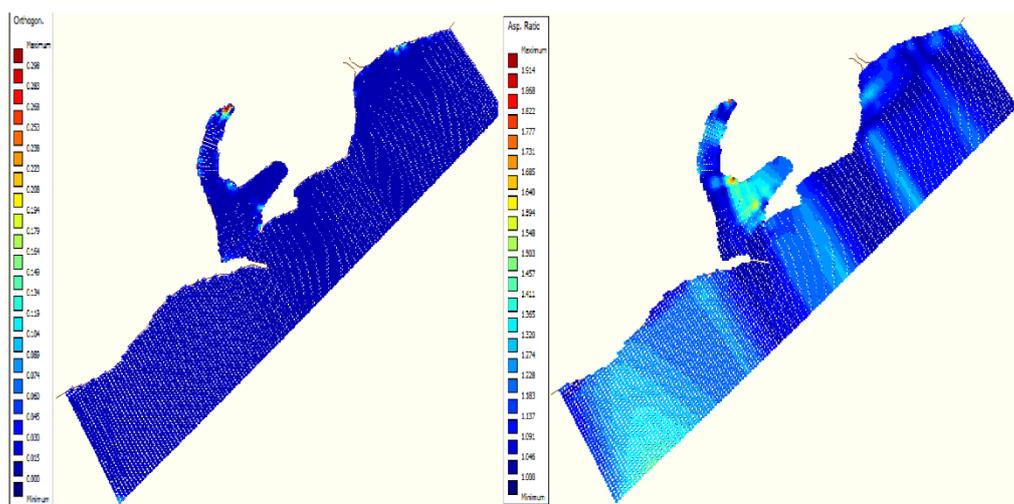


Fig. 5. Orthogonalité (droite) et Ratio d'aspect (gauche) de la zone d'étude

- Interpolation de la bathymétrie sur la grille

En superposant les données bathymétriques avec la grille que nous avons réalisée (Figure 6, gauche), on constate qu'il y a certaines cellules qui sont vides et d'autres qui contiennent plusieurs points bathymétriques. Nous allons interpoler les données et utiliser tous les outils fournis par « QUICKIN » (lissage, moyenne des cellules, diffusion interne et interpolation triangulaire) pour étendre la bathymétrie à toute notre surface d'étude afin que chaque cellule contienne au moins un point bathymétrique. Nous avons appliqué chacun de ces outils sur l'ensemble de notre zone d'étude pour obtenir le résultat qui suit (Figure 6, droite). Il s'agit d'une bathymétrie allant de 1 à 16 mètres, avec les valeurs les plus faibles (entre 1 et 3 m) aux bras nord et est de la rade, ainsi que sur la côte.

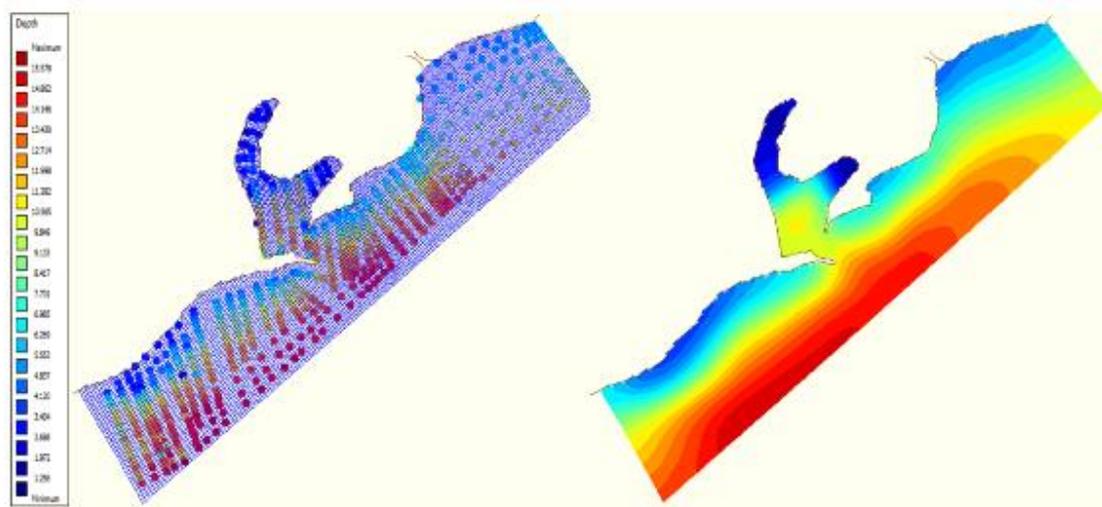


Fig. 6. Grille sur la bathymétrie avant (gauche) et Bathymétrie après interpolation (droite)

- Conditions initiales du modèle

Les conditions initiales définissent les valeurs initiales avec lesquelles les calculs pour la simulation se feront. Ces valeurs sont requises pour toutes les variables dépendantes telles que: le niveau d'eau, la température, la salinité, la concentration de sédiment et l'épaisseur de la couche de sédiment. Le choix de ces valeurs est arbitraire. Cependant, l'écart entre les valeurs initiales et les conditions aux limites ne doit pas être trop grand au début de la simulation. Auquel cas, cette situation pourrait

entraîner des erreurs. Dans notre étude, la condition initiale fixée pour le niveau d'eau est 1 m. C'est un choix arbitraire qui s'assure tout de même d'un écart modéré aux conditions aux limites.

- Conditions aux limites du modèle

Pour notre modèle, nous avons décidé de faire la simulation avec deux (02) limites ouvertes, eu égard de leur localisation, de l'importance des processus qui s'y déroulent et leur impact sur l'hydrodynamisme de la zone d'étude que sont l'exutoire du fleuve San-Pédro et le large (en mer) (Figure 7). A l'exutoire du fleuve, la condition fixée est le débit moyen mensuel, en mer la condition fixée est la marée. En plus des conditions aux trois limites ouvertes, nous avons ajouté l'effet du vent sur toute la surface d'étude.

Les conditions fixées à ces limites ouvertes sont consignées dans le Tableau 1, selon les travaux de Molinier et Toilliez (1973) dans lequel, 3 m³/s est la limite qui détermine les périodes d'étiages, tandis que la valeur 315 m³/s est le débit de crue moyenne calculé sur 6 ans.

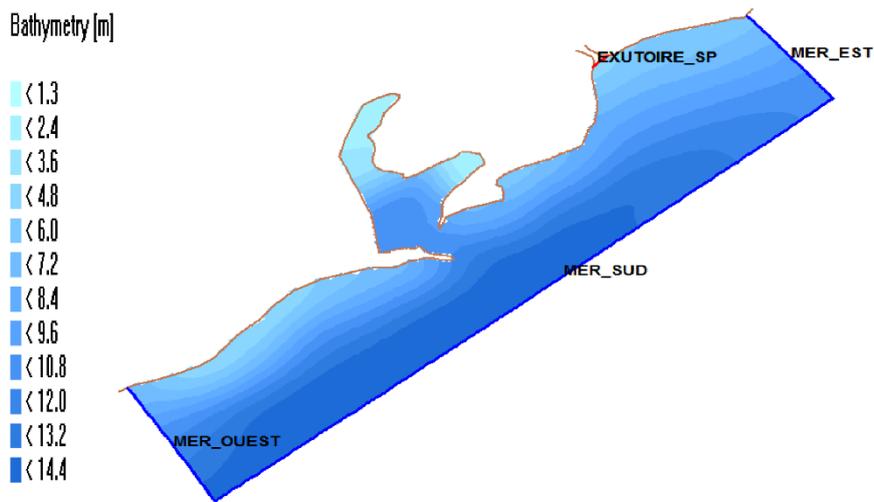


Fig. 7. Limites ouvertes, la mer et l'exutoire du fleuve San-Pédro

Tableau 1. Condition à la limite amont

Limite	Périodes	Conditions fixées	Nature
Exutoire du San-Pédro	Crue	Débit=3.15 m ³ /s	Série temporelle
	Etiage	Débit=3 m ³ /s	Série temporelle

La condition imposée à l'entrée du port est celle de la variation temporelle du niveau d'eau par rapport au niveau moyen de la mer ou marée (Figure 8). Ces données sont celles du marégraphe situé sur la digue Ouest à l'entrée du canal. Elles correspondent à la variation du niveau d'eau durant les mois de Février (étiage) et Juin (crue) 2020. C'est une marée semi-diurne, d'une période comprise entre 12h et 13h, avec un niveau moyen (moyenne arithmétique des hauteurs horaires) de 1.15 m en Février et 1.13 m en Juin.

Même si des données présentées dans la charte des vents dominants en fonction des saisons nous présentent des vents allant de 1 m/s à 2,5m/s, une étude plus récente [10] fait état de moyennes de vitesses et de directions respectivement de 3m/s et N225°. Ce sont ces valeurs que nous avons fixé comme conditions aux limites du vent.

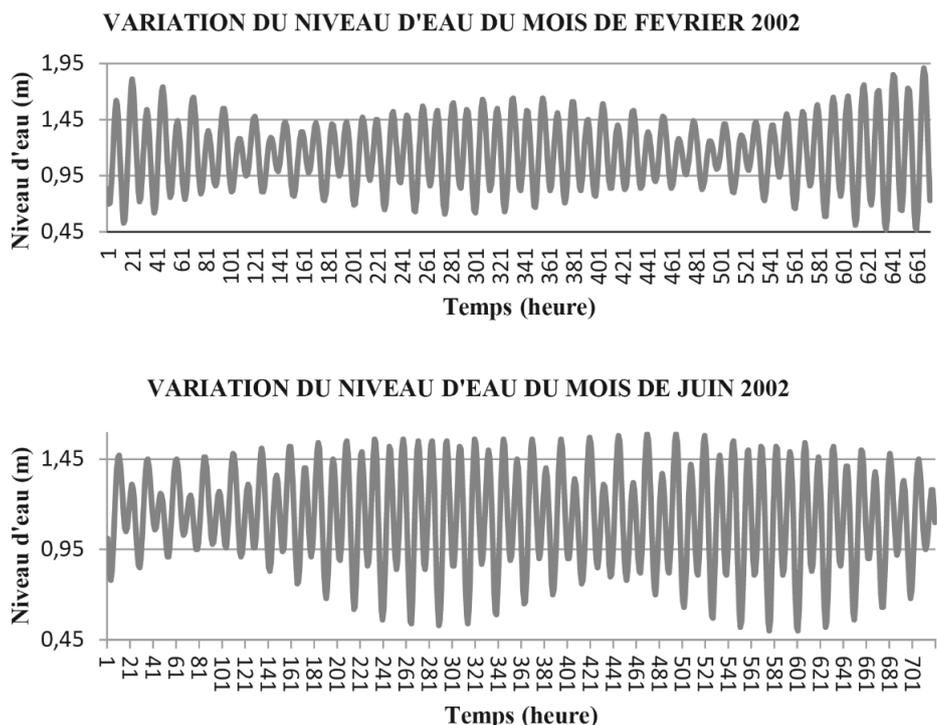


Fig. 8. Niveaux d'eau du PASP pour Février et Juin 2020

- Calage du modèle (calibrage)

Le calibrage du modèle s'est fait avec les données de deux (02) marégraphes: celui fixé à l'entrée du port (mg1), et celui installé à environ 20 m à l'intérieure du port du côté ouest (mg2). Sur notre grille, nous fixerons deux (02) points correspondant à la localisation exacte des deux marégraphes présentés plus haut, appelés points d'observations (Figure 9) à partir desquels sont enregistrés les résultats de notre modèle. Nous comparerons les résultats fournis par le modèle avec ceux fournis par les marégraphes.

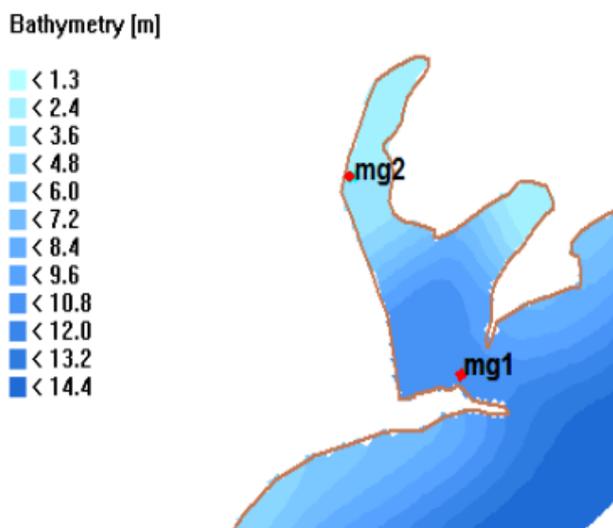


Fig. 9. Marégraphes du PASP

Nous avons établi ensuite un test de sensibilité qui consiste à lancer le modèle avec différentes valeurs du paramètre dont on veut voir l'impact sur les résultats du modèle. Ce test permet d'apprécier l'influence du paramètre en question sur le

modèle et aussi de déterminer sa valeur avec laquelle le modèle produit de bons résultats. Les Tests ont été réalisés sur les données les trois premiers jours du mois d'aout 2020, les données de débits sont le débit moyen annuel du fleuve soit 22,8 m. Nos tests de sensibilité porteront sur: Le coefficient de rugosité du fond, la viscosité et la diffusivité de l'eau. Le pas de temps, valeur communément testée pour le calibrage n'est réellement pertinent que pour la durée des simulations et non la précision des calculs, il ne serra de ce ne fait pas tester et la valeur par défaut d'une (1) minutes serra admise pour toutes les simulations. La qualité des modèles sera mise en évidence par trois indicateurs statistiques: l'erreur quadratique moyenne (Root-Mean-Square Error: RMSE), le coefficient de corrélation (r) et le coefficient de détermination (R^2).

- La RMSE mesure la différence entre les valeurs prédites par un modèle et les valeurs observées, et représentée par l'équation ci-après. Plus la RMSE est faible, plus les valeurs modélisées sont proches de celles observées. Ainsi, la qualité de la prédiction est évaluée suivant des paliers de valeurs tels que présenté au Tableau 2. Son unité est celle du paramètre étudié

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (hc - ho)_i^2} \tag{13}$$

où n est l'effectif de la série, hc la hauteur d'eau calculée par le modèle et ho la hauteur d'eau observée.

Tableau 2. Qualification de la marge d'erreur pour RMSE [10]

Qualification RMSE	
Excellent < 0.2	
Bon [0.2 – 0.4[
Moyen [0.4 – 0.7[
Faible [0.7 - 1]	
Mauvais >1	

- Le coefficient de corrélation (r) définit le degré de dépendance entre deux variables. C'est un nombre compris entre -1 (évolution strictement inverse des variables) et +1 (évolution strictement parallèle). Il est égal à la covariance mathématique des variables divisée par le produit des écarts-types

$$r = \frac{Cov(hc,ho)}{\sigma_{hc} \cdot \sigma_{ho}} \tag{14}$$

où hc la hauteur d'eau calculée par le modèle et ho la hauteur d'eau observée, $Cov(hc, ho)$ la covariance entre hc et ho . σ_{hc} et σ_{ho} , l'écart-type respectivement de hc et ho . $-1 \leq r \leq 1$. Une valeur de r proche de +1 montre une forte liaison entre les deux variables. La relation linéaire est ici croissante (c'est-à-dire que les variables varient dans le même sens); Une valeur de r proche de -1 montre également une forte liaison mais la relation linéaire entre les deux variables est décroissante (les variables varient dans le sens contraire); Une valeur de r proche de 0 montre une absence de relation linéaire entre les deux variables.

- Le coefficient de détermination mesure de la qualité du modèle; dans le cas d'une relation linéaire:

$$R^2 = (r)^2 = \left(\frac{Cov(hc,ho)}{\sigma_{hc} \cdot \sigma_{ho}} \right)^2 \tag{15}$$

avec $0 \leq R \leq 1$.

- Points de prélèvement

Une fois les paramètres fixés, l'extraction des données ponctuelles s'effectue en des points précis qui seront nommés points de prélèvements. Ces points sont aussi des points d'observation, fixées de façons arbitraires suivant des lieux qui auront été perçues comme étant d'intérêt. A cet effet, six (06) points ont été positionnées (Tableau 3, Figure 10).

Tableau 3. Coordonnées et profondeurs des points de prélèvement

Nom des points	Coordonnée		Profondeur (m)
	X (m)	Y (m)	
RADE CENTRE	764399.00 E	524571.00 N	9.95
MAREGRAPHE 1 (MG1)	764579.00 E	524154.00 N	10.19
PORT FRONT	765095.00 E	525056.00 N	10.8
MER OUEST	764063.00 E	522982.00 N	13.7
MER FRONT	765481.00 E	523955.00 N	13.7
MER EST	767289.00 E	525193.00 N	11.82



Fig. 10. Points de prélèvement

3 RESULTATS

3.1 SIMULATION DES CHAMPS DE COURANT

Les simulations réalisées dans cette étude ont été faites avec les paramètres issus des tests de sensibilité (coefficient de rugosité, viscosité), en tenant compte des régimes du fleuve San-Pédro et des phases de la marée en mer. L'année choisie pour nos simulations est l'an 2020 soit la même année qu'au calage. La période de crue choisie est le mois de juin et celle d'étiage est le mois de février. En outre l'analyse du courant nous amène à subdiviser notre zone d'étude en secteurs (Figure 11). Ainsi les différents noms et les coordonnées des secteurs sont donnés dans le Tableau 4 ci-après.

Tableau 4. Secteurs de la zone d'étude (UTM WGS84)

Noms	Coordonnée X (km)	Coordonnée Y (km)
Rade	763.5 – 765.5	523.5 - 526
Exutoire	766 - 768	525 – 526.5
Mer ouest	762 - 765	521.2 - 524
Mer centre	765.5 – 766.5	523 - 525

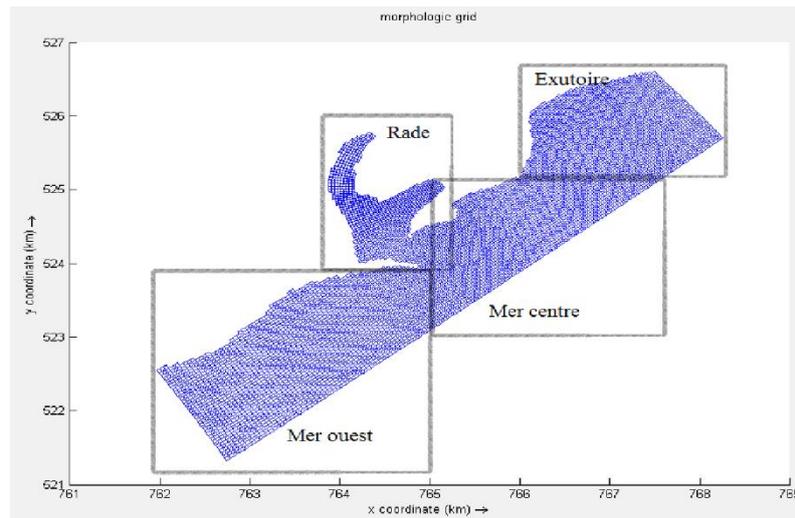


Fig. 11. Secteurs de la zone d'étude

- Période d'été

Deux formes de courant sont constatées: linéaire (alternatif) et giratoire. La forme linéaire se constate principalement dans l'axe qui conduit au bras nord de la rade (Figure 12), lorsque les intensités s'accroissent, régissant les périodes de migrations importantes de l'eau. Cette forme est aussi à constater dans le bras est sur une longueur de 200 m environ jusqu'à son bord. Il est à noter que les directions sont indépendantes de la direction du vent. La forme giratoire de courant est la plus commune et à certains endroits, installée de façons permanente tout au long du mois. Les courants giratoires permanentement installés tout au long du mois sont: à l'entrée de la rade; à l'entrée du bras est; à l'entrée du bras nord; à l'extrémité sud-ouest du port à la latitude 524.2 km N (quasi permanent).

Ceux qui ne sont pas permanents sont:

- dans le bras est suivant les cycles de transitions entre entrée et sortie de l'eau du bras;
- mi-parcours du bras nord, juste après l'entrée de la rade;
- Les courants giratoires de la rade de la période d'été (mois de février) sont tous antihoraires (tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre) (Figure 13);
- Concernant les vitesses, l'entrée et l'intérieure de la rade atteint rarement 5,5 cm/s. les courants linéaires apparaissent pour des vitesses comprises entre 2,5 et 5 cm/s. Les courants giratoires sont généralement plus faibles en intensité, inférieur à 1 cm/s, ils se forment lorsque les valeurs de vitesse descendent sous 1,5 cm/s, sauf à l'entrée de la rade où elles peuvent atteindre 5 cm/s.

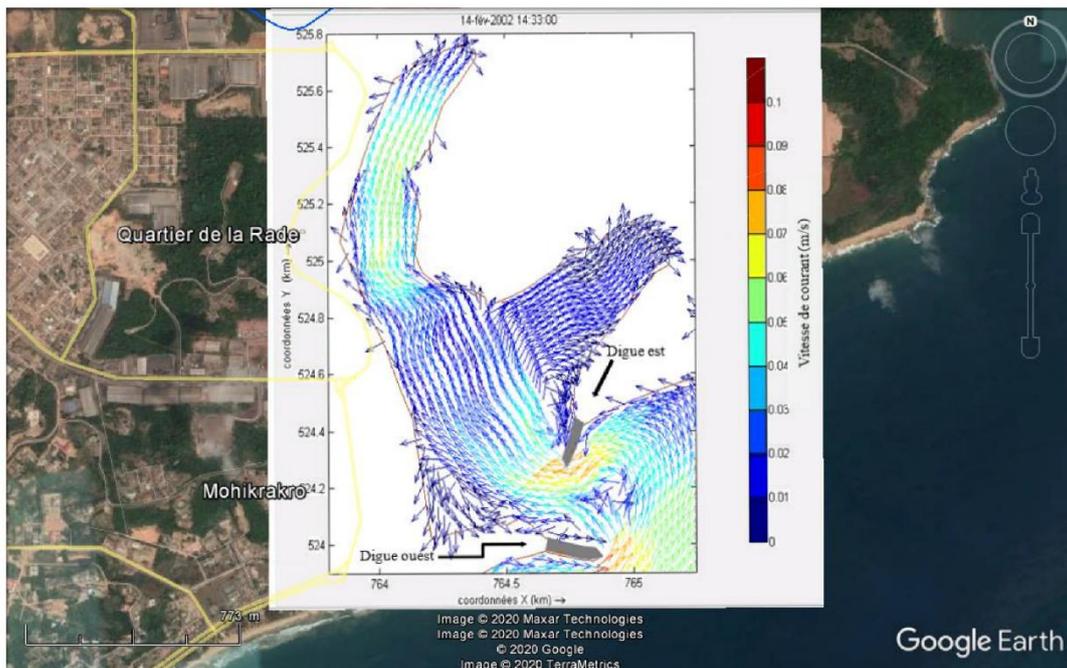


Fig. 12. Intensité des Courants linéaires (3 heures après la BM ou BM+3 à gauche)

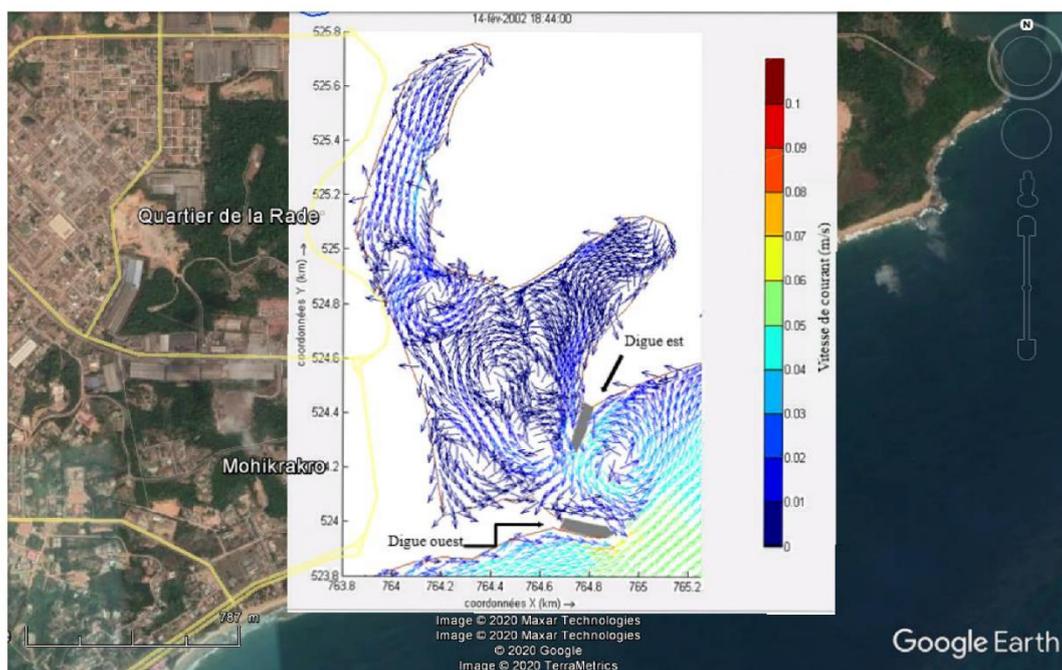


Fig. 13. Intensité des Courants rotatifs (PM) en étiage

Comme le montre la Figure 14, la forme linéaire, parallèle à la côte (entre WSW-ENE et SW-NE), est seule constatée (pas de courant giratoire). Les vitesses de courants décroissent dans le sens du déplacement du courant (d'ouest en est). Les vitesses n'excèdent quasiment jamais 11 cm/s, le foyer de vitesse compris entre 9 et 11 cm/s se trouve à la limite ouest de notre zone d'étude entre les longitudes 762.5 et 763 km E et les latitudes 521.5 et 522 km N (UTM WGS84). Les raisons de la présence du foyer à vitesse comprise entre 9 et 11 cm/s dans la partie sud-ouest du secteur semblent obscures. Toutefois, de façon générale, il semble qu'à la circulation du courant, la morphologie de la côte joue un rôle important dans l'accélération de la

vitesse du courant. En effet les zones de la côte présentant une forme avancée vers la mer ont des vitesses plus importantes que les zones creusant vers le continent, et cela suivant le même axe de propagation du courant.

La Figure 15 montre qu'il y a ici que deux courant de forme linéaire situés au large, dans la continuité du courant WSW-ENE et SW-NE, et sortant du fleuve côtoyant la partie ouest de la sortie du fleuve. En mer les vitesses sont généralement comprises entre 4,5 et 5,5 cm/s avec un foyer exceptionnel à 6,5 cm/s (Figure 15). Les courants entrants et sortant de la rade provoquent une distorsion de sens dans la continuité linéaire des courants SW-NE. Cependant il n'est pas de distorsion sur l'ordre des vitesses. En outre, c'est à peine si le courant côtoyant la côte ouest de l'exutoire atteint 1 cm/s et cela dans des sens alternants entré et sortie de l'eau de l'exutoire, même s'il est rare de voir l'eau de la mer pénétrer dans l'exutoire. Comme explication, il y a bien contestation entre le courant marin et le débit du fleuve, le premier n'offrant qu'un simple couloir ouest de sortie de l'eau douce du fleuve. Tout comme précédemment, la morphologie de la côte impacte les vitesses de courant. Les vitesses de courant en période d'étiage sont plus importantes en mer qu'en rade (maximum de 5.5 cm/s en rade contre maximum de 11cm/s en mer).

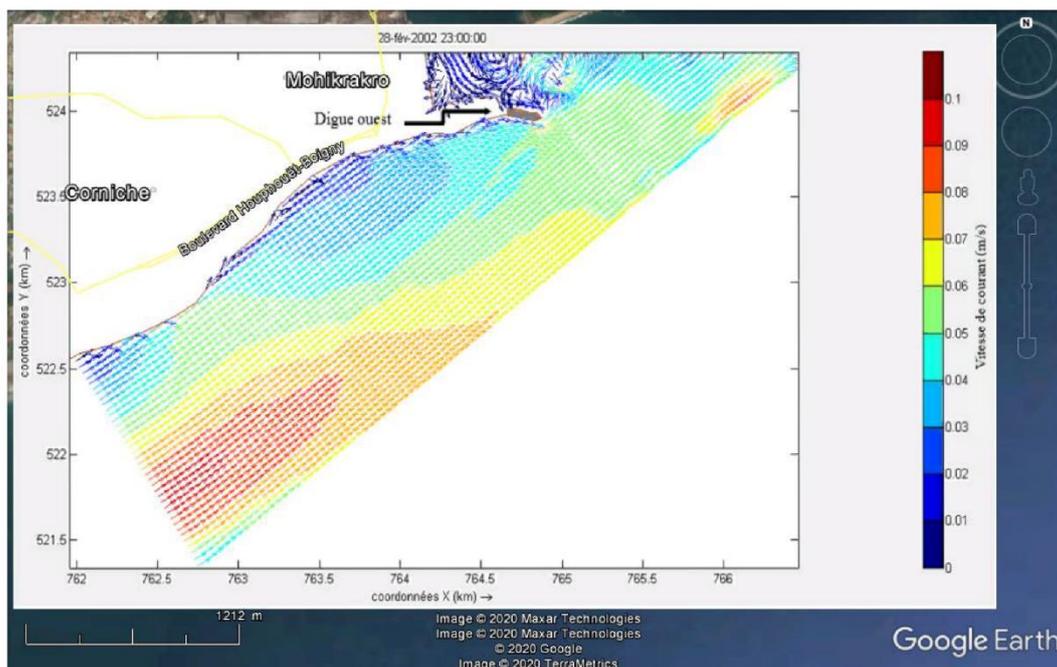


Fig. 14. Sens (WSW-ENE) et vitesse du courant linéaire du secteur mer ouest en étiage

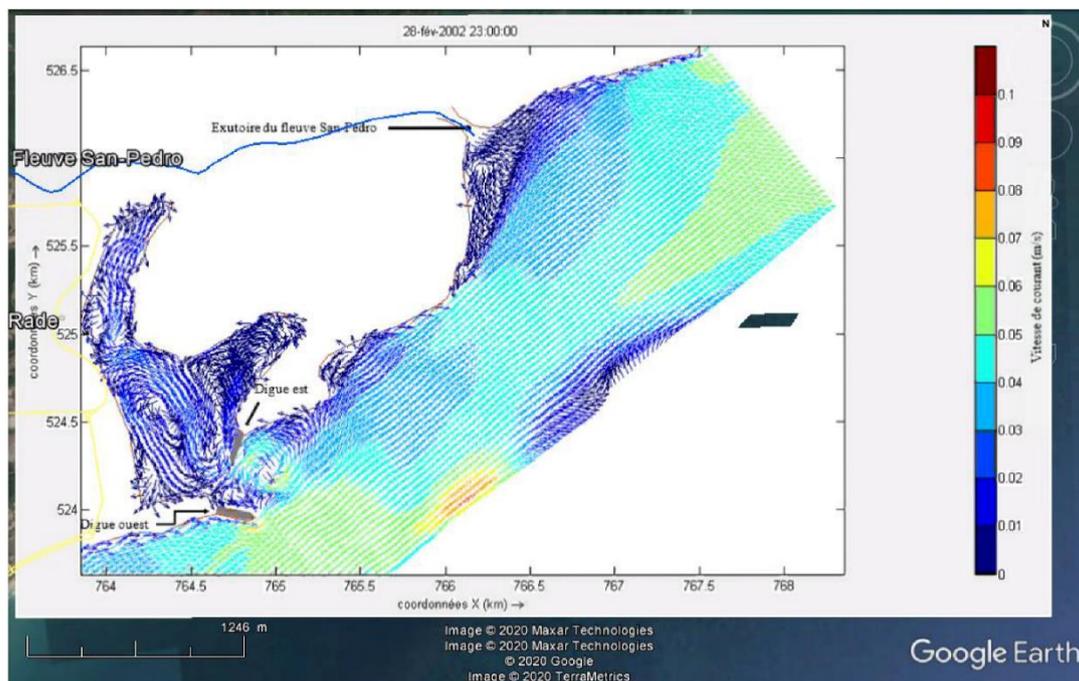


Fig. 15. Sens et vitesses des courants linéaires en mer secteur centre et exutoire en étiage

- Période de crue (juin 2020)

Au niveau du secteur rade, il se forme des courants à formes giratoires et linéaires. Parlant des courants alternatifs (linéaires), à l'intérieur de la rade, ils présentent de plus fortes intensités que les courants rotatifs (de même qu'en étiage). En effet, les courants linéaires marquent une accélération du mouvement d'entrée et de sortie d'eau de la rade, leur direction est plus ou moins parallèle à l'axe Nord-Sud du bras nord de la rade. Les mouvements d'entrées linéaires voient des vitesses plus importantes que les mouvements de sortie linéaires, sachant que les entrées et sorties se font généralement par courant linéaire (Figure 16). Concernant les courants rotatifs (giratoires), ils sont antihoraires (Figure 17). A l'entrée de la rade il semble s'être installé un courant rotatif antihoraire lors des périodes de sorties d'eau du port (tout comme en période d'étiage); lors des périodes d'entrée, ce même courant prend une forme semi-giratoire, n'accomplissant pas totalement les 360° de rotation sur lui-même. Les courants rotatifs sont la plupart du temps inférieurs à 1 cm/s atteignant rarement 4cm/s. Le bras allongé est-ouest de la rade témoigne de courants ne dépassant guère 1cm/s (Figure 16). La vitesse de circulation du courant et la morphologie de la zone semblent être les facteurs explicatifs des variations de forme des courants. Les courants giratoires se forment lorsque la largeur du passage de circulation des courants devient un multiple de la demi-longueur d'onde. Ceci pourrait être une explication à la présence de courants giratoires permanents. A cet effet les centres des courants giratoires permanents peuvent être considérés comme des nœuds vibratoires ou points amphidromiques. En outre, les courants giratoires se localisent aussi aux entrées de passages étroits, comme si l'organisation rotative permettait une meilleure organisation de l'écoulement du fluide avant son entrée dans un couloir. De même aux sorties de couloirs, le relâchement de la pression et l'occupation de zone de circulation plus large tend à étendre de façon radiale le mouvement du fluide. En étiage comme en crue, les vitesses les plus faibles correspondent aux courants rotatifs. 1,5 cm/s, la limite de transition du courant alternatif au courant rotatif en augmentant les vitesses jusqu'à 4 cm/s en crue et 5,5 cm/s en étiages. La direction de propagation des courants (surtout lin est fonction du mouvement du fluide dans l'espace disponible.

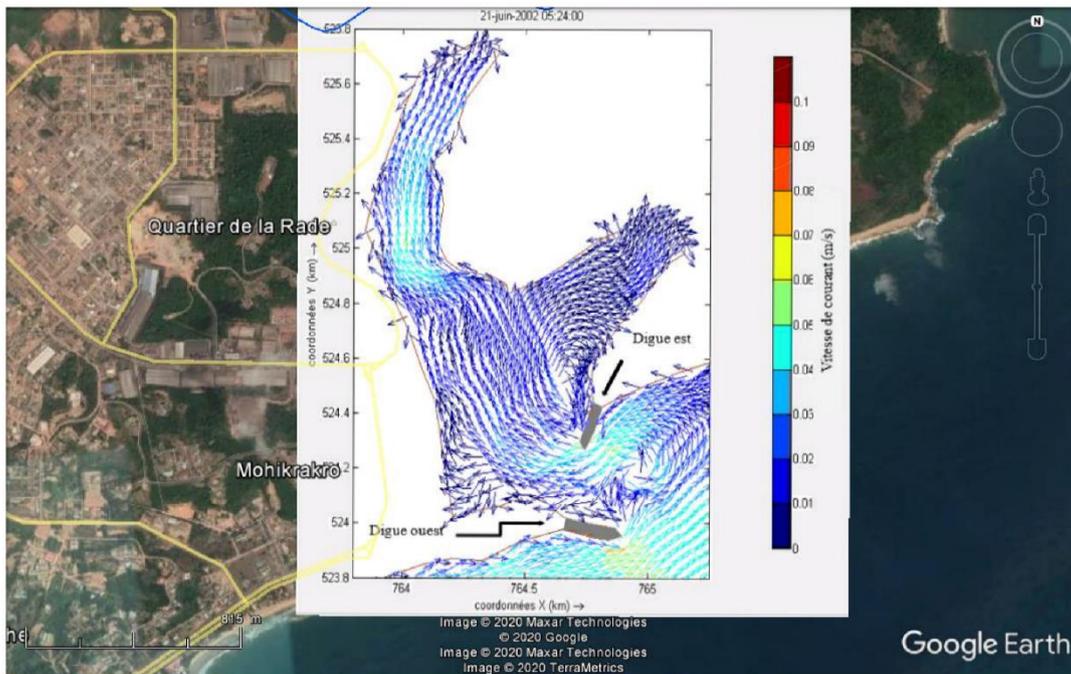


Fig. 16. Intensité des Courants linéaires en crue environ 3h après la PM (mi-perdant)

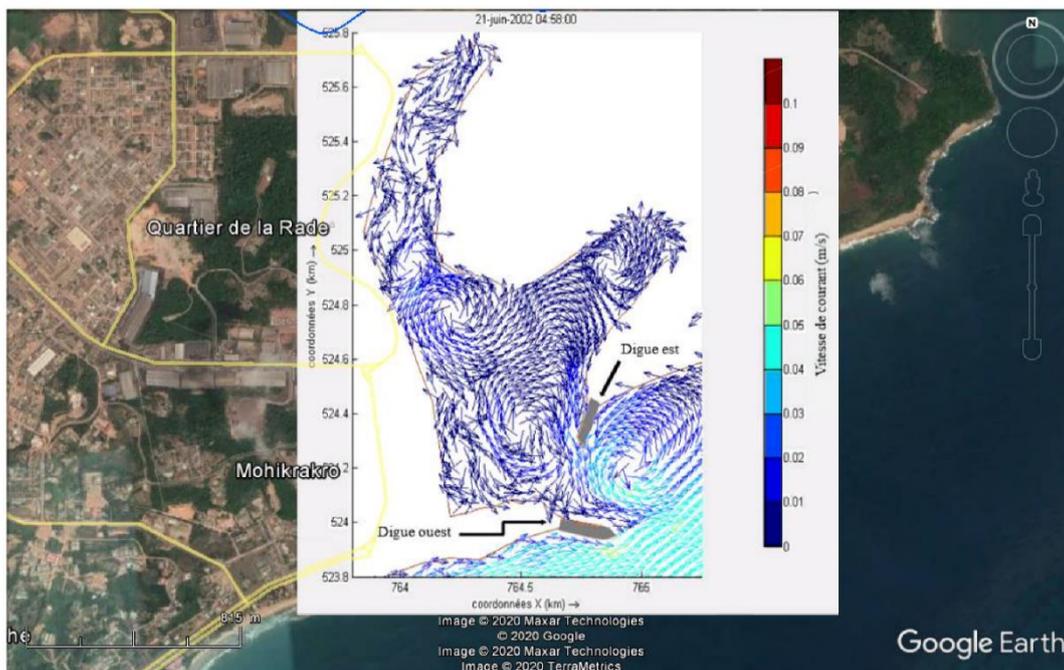


Fig. 17. Intensité des Courants rotatifs en crue environ 3h après la PM

Dans le secteur Mer ouest, a été observé un courant de forme linéaire de direction parallèle à la côte (WSW-ENE et SW-NE) de sens d'ouest en est. Cette direction est quasi-parallèle à celle du vent, il se pourrait que le vent soit un facteur agissant sur le courant, ou même de façon plus probable la force de Coriolis. Il est à noter une énergie plus ou moins décroissante d'ouest en est. En réalité, le courant semble montrer une radiale décroissante des intensités au vue même de la décroissance de la vitesse de circulation du courant en descendant et en montant les latitudes, de part et d'autre du point (762,5 / 521,7) ou de la cellule (762,5-762,7 / 521,5-521,8) située à l'extrême ouest (Figure 18). De façon générale les courants atteignant les côtes sont inférieurs 1cm/s voir proche de 0 cm/s, toutefois aux coordonnées 766,25-766 km et 522,5-523 km, il est constaté des vitesses avoisinant 5cm/s. L'avancé de la côte est vraisemblablement responsable de cette augmentation de la vitesse du

courant à la côte. Cette affirmation se tient pour la digue ouest de la rade, qui voit des vitesses aussi de l'ordre de 5cm/s. A titre de comparaison, la seule différence fondamentale entre les périodes de crue et d'étiages, pour les courants dans ce secteur de Mer ouest est la vitesse plus importante en étiages avec un maximum de vitesse se situant autour de 10 cm/s.

Au secteur Mer centre, la forme du courant observé est linéaire de direction plus ou moins parallèle à la côte (WSW-ENE et SWNE et allant vers l'est. Les vitesses sont communément comprises entre 5 et 7 cm/s, 6cm/s étant une valeur fréquente. Ces courants linéaires contestent la propagation vers l'ouest des courants giratoires à l'ouest de l'exutoire (Figure 19), tout en leur communiquant l'énergie et la direction nécessaire pour accentuer (pousser) leur parcours vers l'est (pousser les courants linéaires et giratoire antihoraire de l'exutoire vers l'est). Il existe une légère déformation du courant en face du port dû à des vitesses d'entrée et de sortie qui contestent quelque peu le transit est-ouest.

Secteur exutoire, Deux formes de courants, linéaires et giratoires, se disputent la zone. Le courant linéaire est dans le prolongement de l'écoulement du fleuve (Figure 20). Les courants giratoires, de part et d'autre du courant linéaire sont de sens horaire pour celui de droite (côté est) et antihoraire pour celui de gauche (côté ouest). Les cellules de sens horaires et antihoraires se communiquent tour-à-tour leur énergie lorsqu'elles entre en contact l'une de l'autre. C'est-à-dire qu'alternativement le courant giratoire de sens horaire semble pousser le courant de sens antihoraire vers l'est et le courant antihoraire lui, « pousse » le courant horaire vers l'ouest. Sur les deux périodes et sur toute la zone en mer, hormis la saison de crue et dans le secteur exutoire, la direction du courant est quasi parallèle à la direction du vent dominant (SW-NE), ce qui laisse à supposer une influence considérable ou du moins non négligeable du vent sur les déplacements de particule d'eau en mer. Dans le secteur exutoire cette influence est aliénée par le débit important du fleuve. Si l'on fait abstraction du phénomène exceptionnel à l'exutoire, en mer les vitesses de courants sont plus fortes en périodes d'étiages qu'en période de crue. Elles vont décroissantes suivant l'éloignement de la côte et sont croissantes suivant le renflement de la côte par rapport à la direction et au sens du courant.

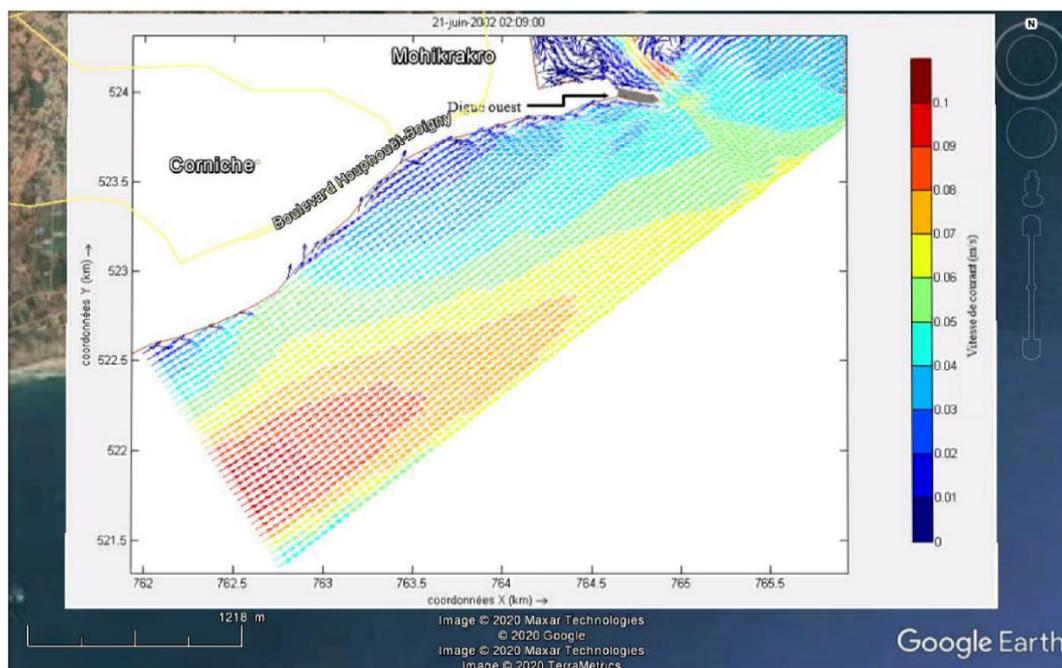


Fig. 18. Sens et vitesses en mer secteur ouest (Pleine Mer (PM)) en crue

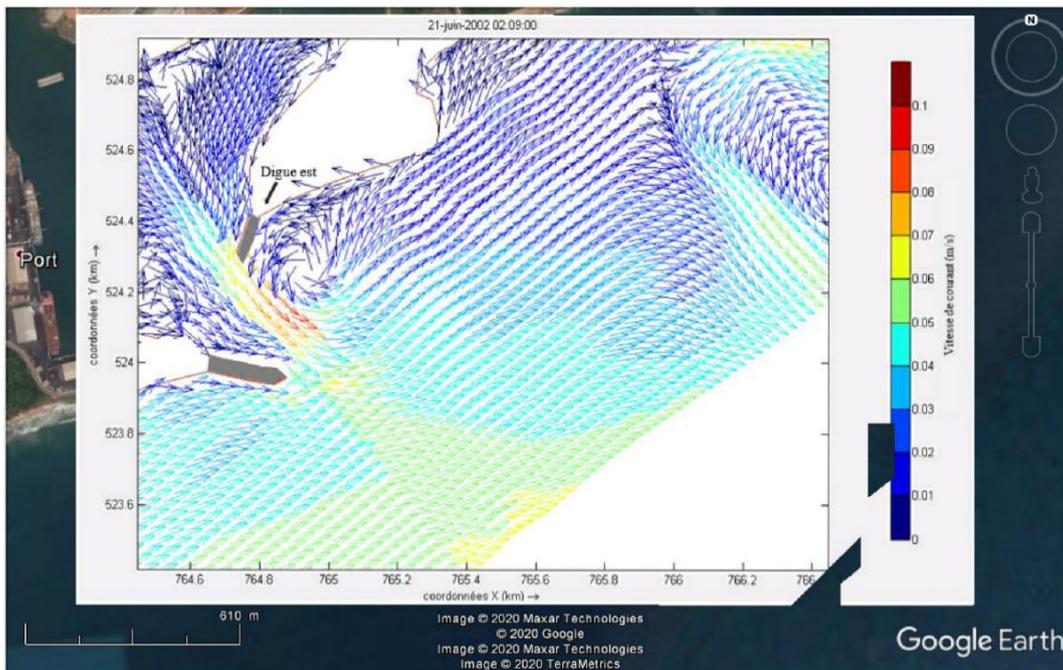


Fig. 19. Sens et vitesse des au secteur mer centre (PM) courants en crue

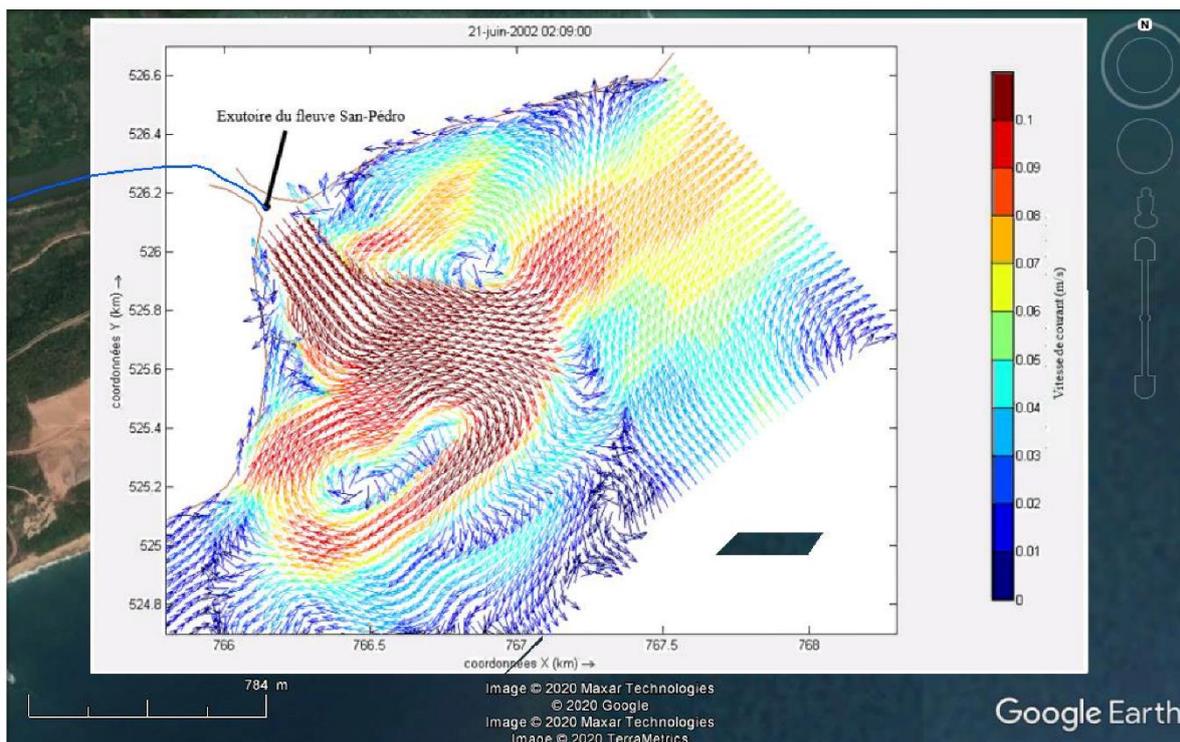


Fig. 20. Forme sens et vitesse des courants dans le secteur exutoire (PM) en crue

3.2 CARACTERISATION DE L'ONDE DE MAREE

La déduction de la nature de l'onde ici est basée sur l'analyse corrélationnelle des variations de niveau d'eau par rapport à la vitesse du courant, soit une action horizontale par rapport à une action verticale de la marée. Puisque les données de vitesses peuvent paraître à première vue disparate par rapport aux données de hauteurs, il a été utilisé et représenté les moyennes mobiles par pas de 60 valeurs, ce qui permet une plus grande aisance dans l'interprétation des données.

En rade, la présence d'ondulation secondaire typique des phénomènes de seiche est bien marquée (Figure 21). L'onde y est totalement stationnaire. En effet les vitesses les plus faibles sont réalisées aux Pleine Mer (PM) et Basse Mer (BM) tandis que les vitesses les plus élevées sont aux mi-perdants et mi-montants. Comme le montre la Figure 26, MG1 a une configuration très similaire au point RADE, réalisant ses plus faibles valeurs aux PM et BM et les valeurs les plus élevées aux mi-perdants et mi-montants. Les ondulations secondaires sont bien marquées.

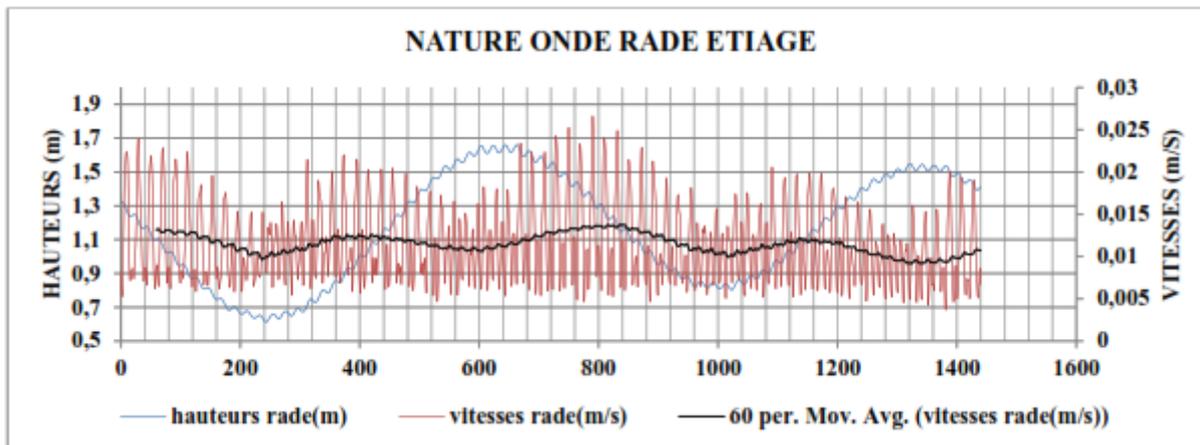


Fig. 21. Hauteur de l'onde et vitesse du courant au point rade en étiage

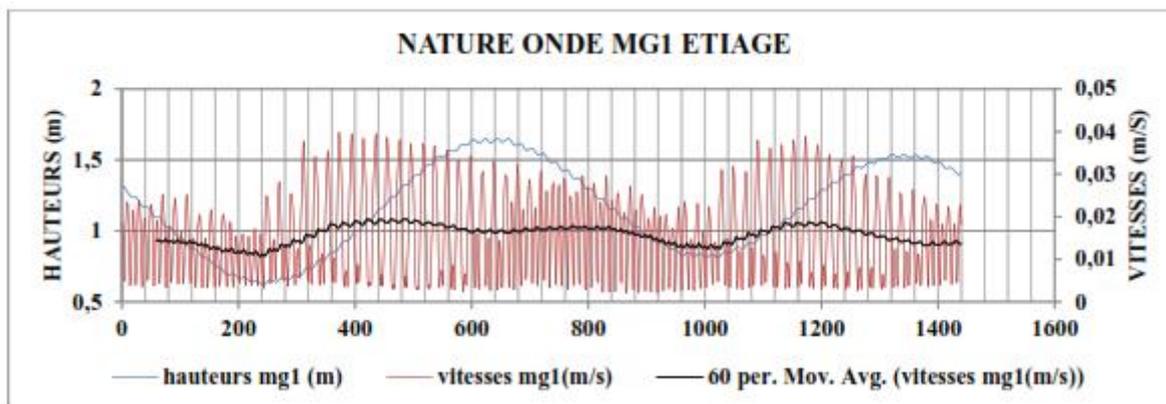


Fig. 22. Hauteur de l'onde et vitesse du courant au point MG1 en étiage

Au PORT FRONT, on note une avance de 240 min du courant sur les hauteurs d'eau, ce déphasage signifie que l'onde accompagne le courant ou que le courant porte l'onde (Figure 23). Ceci s'explique par le fait que l'entrée de l'eau dans le port nécessite une redirection des mouvements de l'eau par rapport à leur direction en mer, ce qui donne au courant d'impulsé les ondes.

La Figure 24 montre un déphasage de 160 min de l'onde par rapport au courant. Cette avance indique que l'onde porte le courant, ou que le courant accompagne l'onde. Le fait que ce point est en Mer et qu'il n'y a vraisemblablement aucun obstacle immédiat au mouvement de l'onde, celui-ci à une certaine aisance à impulser les mouvements des particules. L'onde à tendance à être progressive dans les évènements entourant la PM et stationnaires pour ceux entourant la BM. Le fait de ne pas avoir une onde totalement progressive en mer peut être expliqué par la proximité de la côte (1 km environ), qui permettrait une légère opposition au déplacement du courant. Opposition qui aurait tendance à être levé pendant les flots et accentué pendant les jusants.

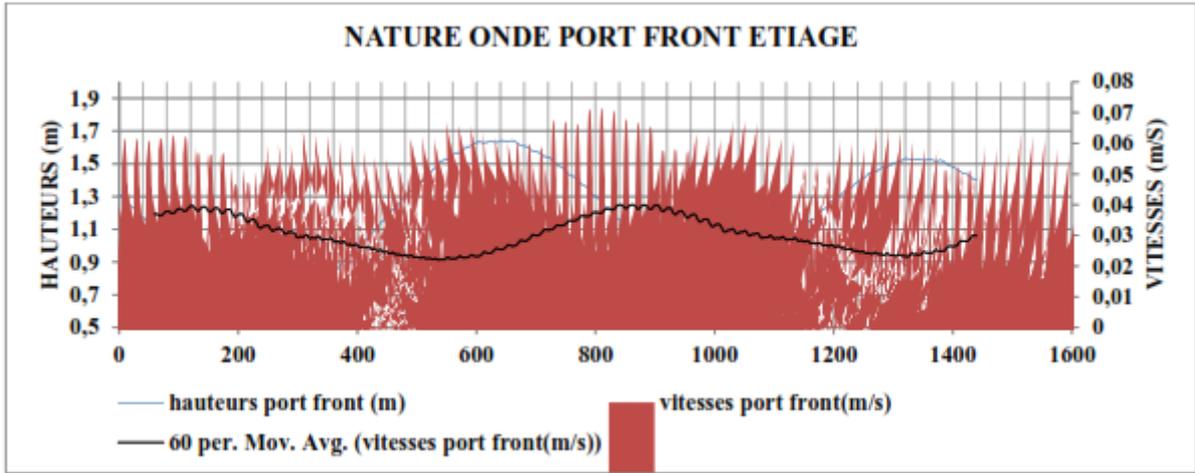


Fig. 23. Hauteur de l'onde et vitesse du courant au point PORT FRONT en étiage

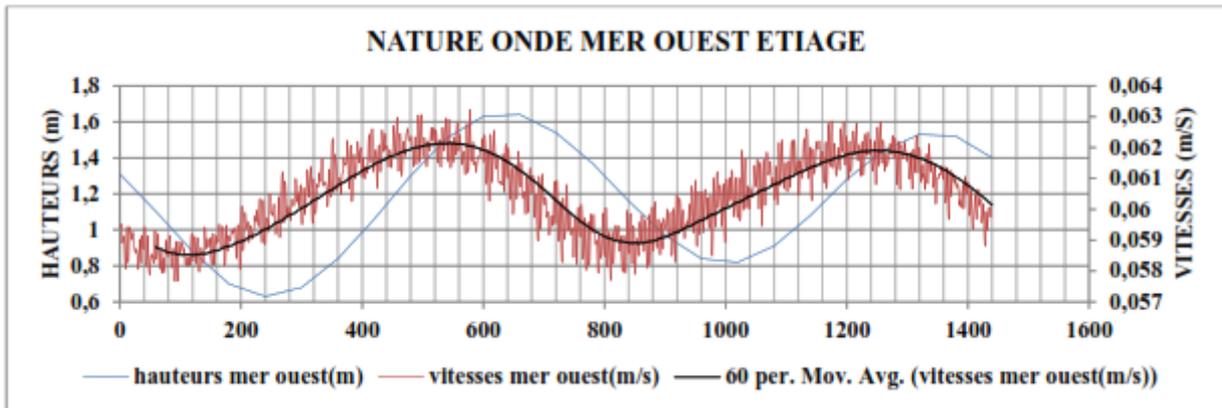


Fig. 24. Hauteur de l'onde et vitesse du courant au point MER OUEST en étiage

L'analyse et l'interprétation de la nature de l'onde en MER FRONT (Figure 25) s'avère complexe. Globalement, les valeurs les plus élevées sont réalisées à proximité des BM, et les moins élevées à proximités des PM. Soit une opposition de phase ou soit une avance de près de 200 min du courant par rapport à l'onde. Dans le cas de l'avance est explicable par le fait de la digue ouest qui crée une accélération du courant, ce qui a pour effet d'affecter la vitesse du courant dans toute la zone d'étude en face de la rade. En effet, il se passe comme une communication ou une alternance entre l'énergie potentielle de la marée et l'énergie cinétique du courant pour la propagation des particules. Tout compte fait vis-à-vis de la MER OUEST, il y a perte de l'influence de l'onde sur le courant. Vue la Figure 26 les deux variables peuvent être considéré comme indépendantes en MER EST. Il semble en effet que pendant que l'onde de marée poursuit son ballet périodique, le courant tire son impulsion de phénomènes un peu plus en amont, soit du côté ouest dans la direction de déplacement du courant, soit du côté nord de l'exutoire. Vue les faibles débits du fleuve, une influence de celui-ci est peu probable même si le mélange des eaux marines et fluviales n'est pas à exclure. A cet effet cette indépendance peut être aussi mise en relation avec la diminution de la vitesse de circulation du courant. L'éloignement de la côte est un facteur à considérer. D'ouest en est, il est à constater une perte progressive de l'influence de l'onde sur le courant suivant la diminution de la vitesse du courant.

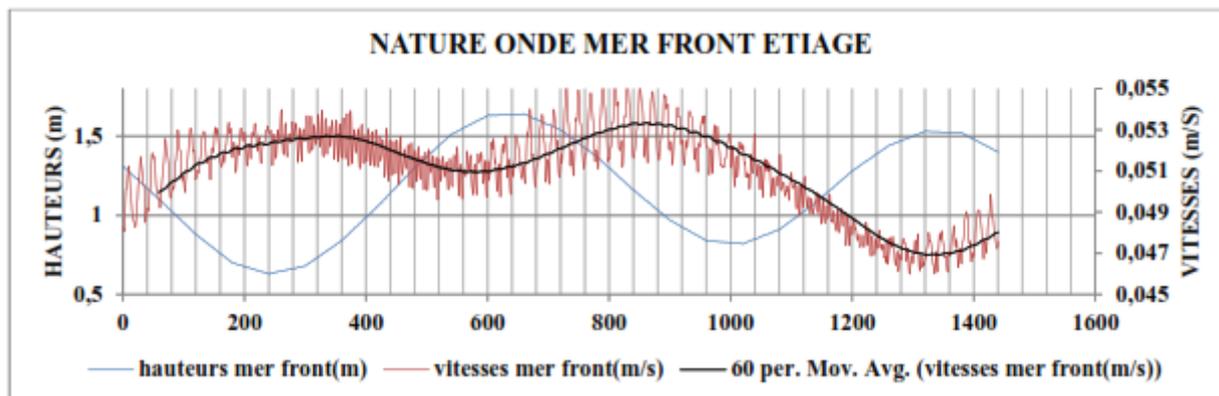


Fig. 25. Hauteur de l'onde et vitesse du courant au point MER FRONT en étiage

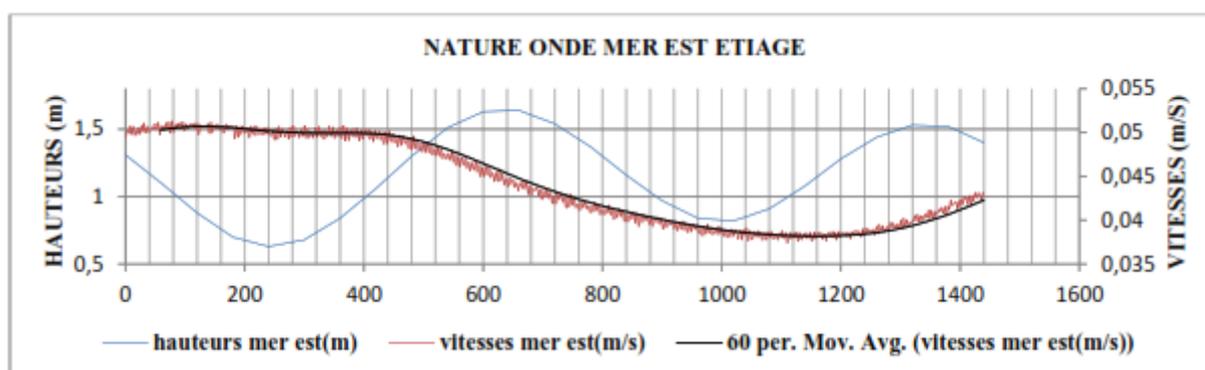


Fig. 26. Hauteur de l'onde et vitesse du courant au point MER EST en étiage

4 DISCUSSION

4.1 EVOLUTION DES CHAMPS DE COURANT

Les fortes perturbations du courant enregistrées du côté de l'exutoire n'ont aucune influence sur le fonctionnement hydrodynamique de la rade et de la mer ouest. L'effet du débit du fleuve s'estompe sous l'effet de la marée, et cela quelque soit la saison. Soit une communication de l'énergie des courants d'abord par l'intermédiaire du courant d'axe linéaire, ensuite en descendant les latitudes une communication directe l'un par rapport à l'autre (Figure 20). Il est à noter une augmentation du diamètre des cellules de chaque courant lorsque l'on descend les latitudes. De façon plus générale, en étiage comme en crue, les vitesses de courant sont plus importantes en mer qu'en rade. Les courants en mer dans la partie ouest et centre sont faibles, totalement inférieurs à 11 cm/s. Ils sont en revanche autour de 30 à 35 cm/s en face de l'exutoire à cause du fort débit du fleuve. Nous devons spécifier ici qu'il n'a, à aucun moment, été observé les 86,65 cm/s en rade tel que signalé par [12] selon les travaux de [16]. Peut-être la différence de méthode utilisée, c'est-à-dire, l'une empirique par une mesure ponctuelle et l'autre de modélisation par calcul assisté d'ordinateur, permet-elle d'expliquer ce phénomène. En effet, le modèle étant une représentation de la réalité, certains phénomènes naturels (coup de vent) ou anthropiques (mouvements des bateaux) peuvent ne pas être ou ne sont pas pris en compte. Cependant les résultats de la présente étude sont conformes aux observations de [11], qui sur tout le plateau continental ivoirien situe les vitesses généralement inférieures à 10 cm/s toute l'année, avec une exception en juin où les courants peuvent atteindre 30 cm/s et sont dirigés vers le sud. Les vitesses maximales de courants en rade sont plus faibles dans cette présente étude avec Delft 3D qu'avec SMS selon [13]. En effet [13] estime les résultats de la vitesse moyenne de champ à 8 cm/s (0,08 m/s) contre 5,5 cm/s en vitesse maximale en étiage. Il serait possible de tenter d'expliquer cette différence par le fait que les deux modèles ont été développés par des logiciels différents, ou encore ne couvrent pas la même période de temps [13], ou encore la différence dans la taille de la zone couverte (le forçage de la marée étant beaucoup plus loin de la rade pour cette présente étude) ou même encore une différence des paramètres d'entrées, qui n'ont tous pas été spécifiés dans le mémoire de ce dernier. Toutefois les résultats de [13], sont plus proches de

cette présente étude que celle de [12]. Concernant les formes de courant en rade, [13], n'a observé que des courants linéaires contrairement à cette présente étude qui a pu mettre en évidence des courants linéaires et giratoires. Cela a sans doute été possible par le fait que les résultats ici, ne se sont pas contentés uniquement des périodes de BM et PM mais aussi d'autres périodes intermédiaires, comme le mi-montant ou le mi-perdant, avec un pas de temps plus fin.

4.2 COMPORTEMENT DU COURANT AUX DIGUES

La digue ouest constitue une barrière à l'avancement du courant de guinée, barrière que le courant aura naturellement tendance à contourner. Ce contournement s'accompagne d'une accélération locale du courant et aussi dans tout le secteur perpendiculaire au sens de déplacement du courant en face au port. De plus, comme montré à la Figure 27, par son opposition à la circulation du courant ouest-est, la digue ouest pourrait être source de sédimentation. Vu que cette digue provoque une accélération du courant, il se pourrait bien que les particules fines ne soient pas à mesure de sédimenter, en d'autres termes, que ce ne soit que les particules de taille supérieures ou égales au sable qui soit à mesure de se déposer dans la zone. Ceci pour expliquer que la digue ouest pourrait jouer un double rôle dans les processus morphodynamiques, soit un filtre aux particules qui sédimenteraient dans la zone. Après la digue ouest et la déviation de son axe de circulation, le courant aura tendance à se rabattre sur l'entrée du port, ce rabattement du courant initie un mouvement circulaire, mouvement qui sera entretenu et maintenu permanemment par le flux d'eau à travers l'entrée du port et le resserrement de cette dite entrée par la digue est. Le courant giratoire permanent crée, constitue non pas une source de décantation mais plutôt une source de mobilisation constante des particules, d'autant plus que les périodes de transitions, périodes voyant un affaiblissement du courant et une possibilité de décantation, sont très courtes, deux minutes tout au plus, contre 6 à 10 minutes pour les périodes d'entrée et de sortie. Cette interprétation de l'impact morphodynamique des digues peut être une réponse aux interrogations de [7] concernant l'influence de l'hydrodynamisme sur le recul du rivage coté est de l'entrée du port et du double comportement (à la fois engraissement d'une part et recule d'autre part) côté ouest de l'entrée du port. La prise en compte de ces facteurs de vulnérabilité par les autorités portuaires, pourrait être adéquate dans les travaux d'aménagement annoncé du port afin de réduire les risques de ruptures comme cela a été le cas en 2011, où la digue ouest a cédé sous la pression de « vagues virulentes »

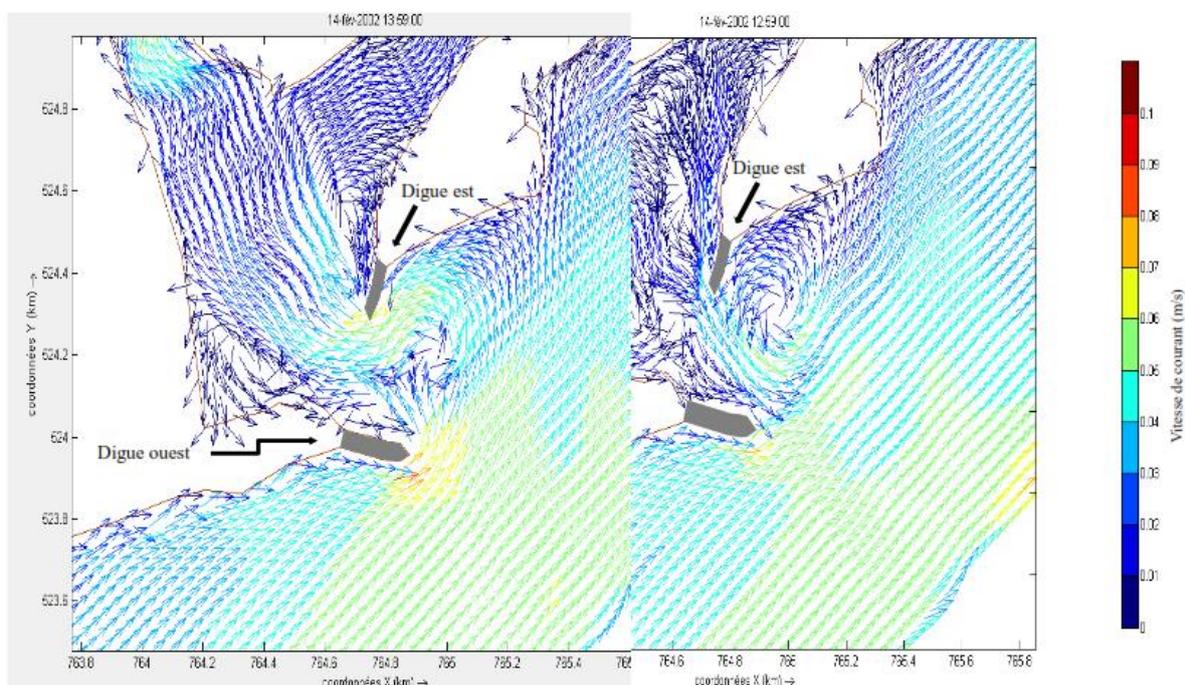


Fig. 27. Forme, sens et vitesse du courant aux digues ouest et est à mi montant (BM+1) et à (BM+2)

4.3 CARACTERISATION DU PHENOMENE DE SEICHE EN RADE

Les périodes d'entrées correspondent aux périodes d'élévation du niveau de l'eau et les périodes de sortie celles de diminution (Figure 28). La BM est une période de sortie d'eau. Cette dernière observation a été signalée par [13] et [17]. En BM il est à remarquer que le temps des entrées est égal à celui des sorties, entre 7 et 9 min, les temps de transitions de 1 à 2

min. Il existe des harmoniques (2 au moins) dont l'amplitude est certes capable de provoquer des inflexions de l'onde mais n'est pas assez suffisante pour provoquer une variation de direction du courant. A mi-montant (BM+3), les temps d'entrées (12 min) sont largement supérieurs à ceux des sorties (4 à 5 min) même si les temps de transitions restent les mêmes 1 à 2 min. Pendant que les mouvements d'entrées correspondent à des augmentations de niveau d'eau, les périodes de sortie correspondent à des instants de stagnation. L'effet de la résonance est perceptible, en ces dernières périodes exerçant une action suffisante pour s'opposer au déplacement à la sortie de l'eau. En période de PM, les temps de sortie et d'entrée s'égalisent (8 min), avec ce même temps de transition de moins de 2 min. la PM correspond à une période de transition d'une période d'entrée à une période de sortie. Cette assertion est un peu plus nuancée que les travaux de [13] et [17]. En effet ceux-ci attribuaient à la pleine mer, une période d'entrée d'eau. Cette différence de résultat est attribuable à un pas de temps plus petit dans la présente étude, soit des résultats plus précis. La PM nous permet de supputer sur certaines caractéristiques de l'onde de seiche, on a ainsi une amplitude de 2,5 à 3 cm et une période de 20 min environ. Le mi-perdant (PM+3) semble être la configuration symétrique du mi-montant, à savoir, les temps de sortie plus important (9 min contre 6 min). Les mouvements de sorties sont des périodes de diminution du niveau d'eau dans la rade tandis que ceux d'entrée sont des périodes de stagnation. La résonance est à mettre en cause dans ce phénomène, même si l'action d'une réflexion de l'onde peut ne pas être négligée. L'onde enregistrée est une juxtaposition de l'onde de marée donnant les amplitudes principales dépendant de la marée, soit l'harmonique principale qui est la marée, et des ondes secondaires d'amplitude millimétrique à centimétrique, soit des harmoniques secondaires dues à la circulation propre de l'eau à l'intérieure de la rade. Vu la période de ces ondes secondaires (comprise entre les ondes de houle de quelques secondes et celle de marée de quelques heures), on peut dire que le port est sous influence du phénomène de Seiche, suivant la définition même des seiches tel que donnée par [3]. Les harmoniques dit secondaires sont au nombre de deux ou trois, dont l'une détermine la direction du courant observé, les autres n'ayant pas l'influence nécessaire pour y parvenir. Le port est certainement sous effet de résonance et aussi sous effet de réflexion de l'onde incidente.

La présente étude n'a pu observer de phénomène de seiche d'importance significative, c'est-à-dire pouvant entraîner des dommages à la navigation comme cela est le cas de Port Tudy dans le Groix. Toutefois une similitude avec l'étude de [6] pour ce port du nord-ouest de la France, est que les seiches les plus dangereuses ont des vitesses similaires à celles du port de San-Pedro, soit 10 nœuds (environ 5,14 m/s ou 18,52km/h) pour une hauteur 57 fois supérieure (1,7 m) et une période de $\frac{3}{4}$ inférieure (5 min). Rappelons qu'il s'agit là d'un phénomène exceptionnel (une fois tous les cinq ans pour les seiches de plus de 1 m), dans un port de l'hémisphère nord avec des conditions météorologiques différentes de ceux du golfe de Guinée bien que bordé par le même océan atlantique. En outre, en se basant sur les travaux de Rossouw et al. (2013), les ports sud-africains ont des périodes beaucoup plus courtes que celles du port de San-Pedro comprises entre 25 et 350 secondes soit entre environ 0.5 et 3 min (entre 5 et 40 fois inférieures). Toutefois les hauteurs sont beaucoup plus grandes, entre 2 et 25 cm avec généralement des hauteurs autour de 10cm (le triple de San-Pedro). Une différence entre les études de [6], et Rossouw et al. (2013) et la présente étude est que les deux premières sont des relevés ponctuels, tandis que la présente est une étude par modélisation. Somme toute, même s'il serait possible de tirer des conclusions quant à la convergence de certains paramètres, la prudence dans l'interprétation des résultats serait de mise car les zones d'études citées (France, Côte d'Ivoire, Afrique du Sud) souffrent d'une certaine hétérogénéité concernant les conditions climatiques, la morphologie des zones d'études, les données brutes prélevées, présentées et traitées et les différentes méthodes de traitement de l'information disponible.

Pendant que le flot et le jusant déterminent le volume d'eau entrant et sortant, les directions du courant en Rade sont fonction de l'onde de seiche, l'onde de seiche ayant une période de 20 min et une amplitude de 2,5 à 3,5 cm. Ces ondes de seiches ne représentent à priori pas de risque pour la navigation et les activités portuaires, néanmoins, dans les facteurs de risques, il ne serait pas à négliger un effet cumulatif de facteurs engendrant les seiches comme les coups de vents, tempêtes, ou même les remontés soudains d'upwelling, phénomènes non modélisés dans cette étude.

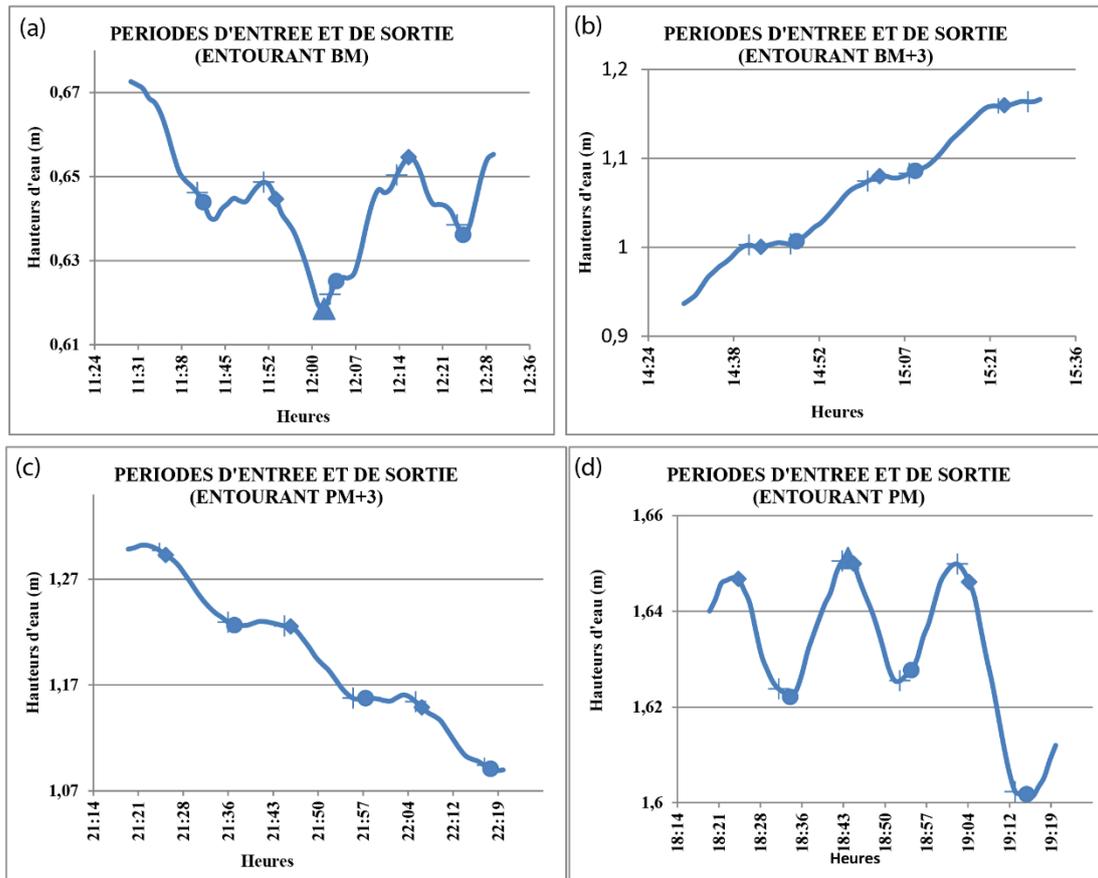


Fig. 28. Périodes d'entrées et de sortie par rapport au niveau de l'eau BM et BM+3, PM et PM+3 en étiage les cercles pleins représentent le début de la période d'entrée de l'eau dans le port, le losange le début de la période de sortie et la croix la période de transition de l'une à l'autre des phases

5 CONCLUSION

Cette étude nous offre une approche hydrodynamique du fonctionnement du Port de San-Pédro et de son environnement maritime immédiat incluant sa plage sous-marine et l'exutoire du fleuve, sur une distance d'environ 7 km de long (est-ouest) et 2 km de large (nord-sud). Les tests de sensibilités ont montré d'excellents résultats, que ce soit en prenant des valeurs par défaut ou en utilisant des données de la littérature. Il ressort de cette étude que le fonctionnement de la rade n'est aucunement influencé par les variations du débit du fleuve, bien que la zone maritime en face de celui-ci le soit. Les débits du fleuve San-Pédro en étiages sont à peine suffisant pour juguler l'entrée d'eau marine à l'exutoire, par contre en crue, ils sont générateurs de courant giratoires temporaires plus ou moins important de sens antihoraire et de rayon décimétrique. Des courants giratoires et alternatifs s'observent en rade, aussi bien permanents que temporaires, que l'on soit en crue ou en étiage. Généralement, 1,5 cm/s correspond à la limite de passage du courant giratoire au courant alternatif lorsqu'il y a augmentation de la vitesse, et pour les endroits où le courant giratoire n'est pas permanent. Les vitesses maximales en rade sont très faibles, de 4 cm/s en crue à 5,5 cm/s en étiages, avec une vitesse moyenne de moins de 1,5 cm/s. Le secteur maritime qui n'est pas sous influence du fleuve, correspond à des courants linéaires décroissant en intensité d'ouest en est, de 4,5 à 11 cm/s en étiage et de 4 à 10 cm/s en crue. En crue le fort débit de 315 m³/s à l'exutoire permet d'avoir les plus fortes vitesses, jusqu'à 35cm/s en mer est. Les variations de niveau d'eau permettent d'observer un phénomène de retard et de rattrapage de l'onde de marée à l'intérieur de la rade, rattrapage due aux phénomènes de résonance et réflexion de l'onde incidente, provoquant les seiches, de sorte à avoir une évolution globalement synchronisée de la marée sur les périodes journalières. La morphologie de la rade, la bathymétrie et les quadratures lunaires ont une influence certaine sur la variation du niveau, agissant chacun respectivement sur le marnage et les amplitudes, et sur l'échelonnement des pleines mers et basses mers aux différents points de la rade, d'où une variabilité saisonnière des extremums. Ces facteurs sont les mêmes que pour la zone marine, avec cette fois des hauteurs moins importantes de 4 à 6 cm par rapport à la rade. L'analyse corrélative des vitesses de courant et de l'onde de marée met en relief des ondes de natures majoritairement stationnaire en rade, avec une tendance au déphasage (opposition de

phase) au fur et à mesure de l'éloignement de l'entrée en direction de la mer, et cela, pour les deux saisons. L'onde a en mer un caractère progressif plus affirmé qu'en rade. En mer, les résultats sont un peu plus contrastés selon les saisons; en étiage, on a l'avance de l'onde par rapport au courant, l'avance du courant par rapport à l'onde, et une évolution totalement indépendante (aplatissement du courant), respectivement pour le secteur ouest, le secteur en face du port, et le secteur est. En crue il y a, dans le même ordre des secteurs, l'opposition de phase, le courant qui accompagne l'onde, et une évolution partiellement en phase. La marée est l'élément prépondérant, elle qui stabilise le système malgré la force importante du fleuve à l'exutoire. Alors que le flot et le jusant déterminent le volume d'eau entrant ou sortant, c'est l'onde de seiche de période de 20 min et d'amplitude de 2,5 à 3,5 cm qui détermine les directions d'entrées et de sortie d'eau de la rade, par suite, les BM sont des périodes de sortie et les PM des périodes de transition entre entrée et sortie d'eau.

REMERCIEMENTS

Les reviewers sont vivement remerciés pour leurs commentaires qui ont permis d'améliorer le document.

CONFLIT D'INTERETS

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont pas d'intérêts financiers concurrents connus ou de relations personnelles qui auraient pu sembler influencer le travail présenté dans cet article.

REFERENCES

- [1] A. F. Blumberg, et G. L. Mellor, «Modelling vertical and horizontal diffusivities with the sigma co-ordinate system.» *Monthly Weather Review* 113 (8): 1379, 1985.
- [2] C. N. Mahan, J. Abe, A. Angora, et S. Bamba, Propagation of tidal waves in the San-Pedro harbor west coast of Cote d'Ivoire, rev. Ivoir. Sci. Technologies 13: in 1813-3290 pp 77 – 88, 2009.
- [3] F. Biesel F, et B. Leméhatjté B, Généralités sur les seiches et les ondes de seiches, Problème de leur origine, la Houille Blanche, n2, 762 p, 1955.
- [4] G.R. Lesser, J. A. Roelvink, J. A.T. Van Kester, et G.S. Stelling, «Development and validation of a three-dimensional morphological model.» *Coastal Engineering* 51: pp 883–915, 2004.
- [5] G.S. Stelling, and J.A.T Van Kester, «On the approximation of horizontal gradients in sigma co-ordinates for bathymetry with steep bottom slopes.» *International Journal Numerical Methods in Fluids* 18: pp. 915–955, 1994.
- [6] J.B. Fleitour, Etude Relative Au Phénomène De Seiche A Port Tudy (Groix), Rapport De Stage, Conseil Général Du Morbihan, 14 p, 2004.
- [7] K.S. Yao, J. Abe, S.B. Bamba, K.E. Konan, K. Aka, Dynamique d'un périmètre littoral portuaire: la côte de San-Pédro, Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Revue Paralia*, Vol. 3, pp 2.1-2.12, 2010.
- [8] M. Molinier et J. Toilliez, hydrologie de la région de San-Pédro (Fleuves San Pedro, Néro et Brimay), centre ORSTOM d'Adiopodoume, pp 20, 22, 1973.
- [9] M. Rossouw, L. Terblanche, et J. Moes, (2013). General Characteristics of Long Waves around the South African Coast. CSIR, Stellenbosch, South Africa, 3 p, 2013.
- [10] N. Yao, Modèle hydrodynamique et transport des sédiments (DELFT3D-flow) dans la lagune Ebrié. Thèse de Doctorat 3è cycle, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody, 220 p. 2018.
- [11] P TASTET P, L. MARTIN et K. AKA, géologie et environnements sédimentaires de la marge continentale de Côte-d'Ivoire dans Environnement et ressources aquatiques de Côte-d'Ivoire TOME I Le milieu marin 36 p, pp 358-359, 1993.
- [12] R. Samassy, A. Akobe, Y. Fossi, S. Monde, A. Angora, et S. Sangare S. Caractéristique Et Vitesse De Propagation D'une Onde De Marée Semi-Diurne A Inégalité Diurne Au Port Autonome D'Abidjan: Incidence De La Morphologie Du Système Lagunaire Ebrié, *European Scientific Journal* Vol.14, No.26 p, 2018.
- [13] S. Kone, Fonctionnement hydrodynamique du port de San-Pedro (littoral sud-ouest de la côte d'ivoire), Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody, 32 p. 2014.
- [14] S. Monde, Étude et modélisation hydrodynamique de la circulation des masses d'eau.
- [15] dans la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'État, Univ Abidjan, 324 p, 2002.
- [16] S. Monde, Nouvelles approches de la cartographie du plateau continental de Côte d'Ivoire. Aspects morphologiques et sédimentologiques. Thèse Doctorat 3 cycle, Université d'Abidjan, 175 p, 1997.

- [17] T.E. Wango, 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 de Doctorat 3è cycle, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody, n0179, 187 p, 2009.
- [18] T.E. Wango, Y.M. N'guessan, K.S. Yao, Fonctionnement Hydrodynamique De La Rade Du Port De San Pedro (Côte Sud-Ouest De La Côte D'ivoire) Bioterre, Rev. Inter. Sci. de la Terre, Vol. 17, 2017, p 77. 2017.
- [19] W. Rodi, «Turbulence models and their application in Hydraulics, State-of-the-art paper article sur l'état de connaissance.» IAHR Paper presented by the IAHR-Section on Fundamentals of Division II: Experimental and Mathematical Fluid Dynamics, The Netherlands, 1984.