

Contribution de la modélisation numérique à l'étude de la dynamique hydro-sédimentaire dans l'estuaire du Wouri

Yannick FOSSI FOTSI ^{1,2}, Isabelle BRENON ¹, Raphaël ONGUENE ²,
Nicolas POUVREAU ³, Jacques ETAME ²

1. UMR 7266 LIENSs, Institut du Littoral et de l'Environnement, CNRS – Université de Rochelle, 17000 La Rochelle, France.
fossiyannick@gmail.com
2. Ufd de bio-géosciences et environnement, Université de Douala, BP 24157, Douala, Cameroun.
3. Shom - Service hydrographique et océanographique de la marine, 29200 Brest, France.

Résumé :

La zone de maximum de turbidité estuarienne (ETM) se produit dans les estuaires fluviaux en raison de l'asymétrie des marées, de la circulation résiduelle induite par la densité et du dépôt/érosion de sédiments fins et cohésifs. C'est le cas de l'estuaire du Wouri qui abrite l'un des plus grands Port du Cameroun, sujette à une forte sédimentation engendrant des coûts de dragage d'entretien élevés. De tels problèmes d'envasement des chenaux montrent la nécessité de mieux prédire les points chauds de dragage à l'aide de modèles numériques basés sur les processus de dépôt. Dans cette étude, un modèle tridimensionnel (TELEMAC 3D) de calcul hydrodynamique et de transport des sédiments fins a démontré la satisfaction de prédiction des variabilités de concentration des sédiments, tant en suspension que déposées, dans des conditions variables de marée et de débits fluviaux. Les scénarios de modèle suggèrent que : (1) la morphologie de l'estuaire entre amont et aval induit une convergence localisant la ETM entre les courants de marée montante orientés vers l'amont et ceux de marée descendante orientés vers l'aval ; (2) le débit du fleuve a une forte influence sur les caractéristiques du bouchon vaseux (zones d'extension), plus le débit du fleuve est faible, plus les courants intenses de flot induisent une turbidité maximale essentiellement liée par la marée donc en migration vers l'amont ; (3) l'extension du flux entrant correspond aux zones hautement turbides observées et aux dépôts de boue fraîche, ce qui suggère un approvisionnement extérieur de vase. Ces résultats sont significatifs pour la compréhension de la dynamique des sédiments fins en orientation des campagnes de dragages et d'adaptation de la protection des côtes estuarienne du Wouri.

Mots-clés : Estuaire du Wouri, Maxima de turbidité estuarienne (ETM), Sédiments fins, Modélisation numérique.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

1. Introduction

Le Cameroun et plus particulièrement la ville de Douala, poumon économique de l'Afrique centrale connaît une très forte croissance démographique. Un boom de la population est attendu d'ici 2035, avec une concentration plus importante sur la plaine côtière du Wouri. Afin de faire face à cette croissance, les gestionnaires de cet environnement envisagent de développer les capacités d'accueil du port de Douala (situé à 50 km de l'Océan Atlantique). Ceci au moyen d'entretien du chenal de navigation (fort envasé) par des opérations de dragage, pour faciliter l'accès à des navires à plus fort tirant d'eau. Une bonne connaissance de la dynamique de turbidité maximale (ZTM), appelée bouchon vaseux de l'estuaire, ainsi que des outils de modélisation numérique sont indispensables pour bien planifier ces opérations et pour prévoir leur impact sur l'environnement physique, biologique et humain à court et à moyen terme. Dans ce cadre, l'estuaire mésotidal du Wouri comme la plupart des estuaires en Afrique subsaharienne (FOSSI FOTSI, 2014; ONGUENE *et al.*, 2014) reste encore très peu documenté. Les études antérieures de (FOSSI FOTSI *et al.*, 2019), montrant une l'évolution par l'engraissement prononcé dans la zone de présence du port et celle de 2020 (FOSSI FOTSI *et al.*, 2020), un suivi des zones de turbidité maximale au travers des données collectées de 2019, ont permis de réaliser une description actualisée de l'estuaire. Ainsi, l'objectif de cette étude est d'étudier le comportement hydrosédimentaire de l'estuaire (bouchon vaseux) en fonction des variations de régime fluvial et tidal par modélisation numérique 3D (HERVOUET, 2000).

2. Zone d'étude

L'estuaire du Wouri, également appelé estuaire du Cameroun, est situé à 04°00'01" de latitude Nord et 09°37'15" de longitude Est, dans la partie méridionale de la plaine côtière du Cameroun (figure 1). C'est une vaste zone humide, longue de 30 km et presque aussi large avec une superficie de 1.200 km² qui constitue le prolongement océanique nord du golfe de Guinée ouvert sur l'océan Atlantique (NDONGO *et al.*, 2015). Cet estuaire, occupe le cœur du bassin sédimentaire de Douala (19.000 km² dont 7.000 km² d'émergences) et constitué essentiellement de sédiments fins (OLIVRY, 1986). Soumis à un régime mésotidal semi-diurne avec un marnage d'environ 3 m, il est caractérisé par de faibles profondeurs avec une distribution de la salinité bien mélangée en vive-eau, particulièrement en étiage, à stratifié en morte eau, particulièrement en période de crue (ONGUENE *et al.*, 2014). Cette zone géographique est drainée par trois fleuves côtiers amont (le Dibamba, le Wouri et le Moungo) et le fleuve Sanaga situé dans sa partie aval. Les différences d'altitude restent faibles, les reliefs dépassent rarement trois mètres, les espaces sont occupés de part et d'autre par une grande forêt de mangrove (DIN *et al.*, 2008; ELLISON & ZOUH, 2012). Afin d'effectuer une analyse longitudinale de l'aval vers l'amont, un transect est utilisé. Ce transect suit le chenal de navigation du Port de Douala.

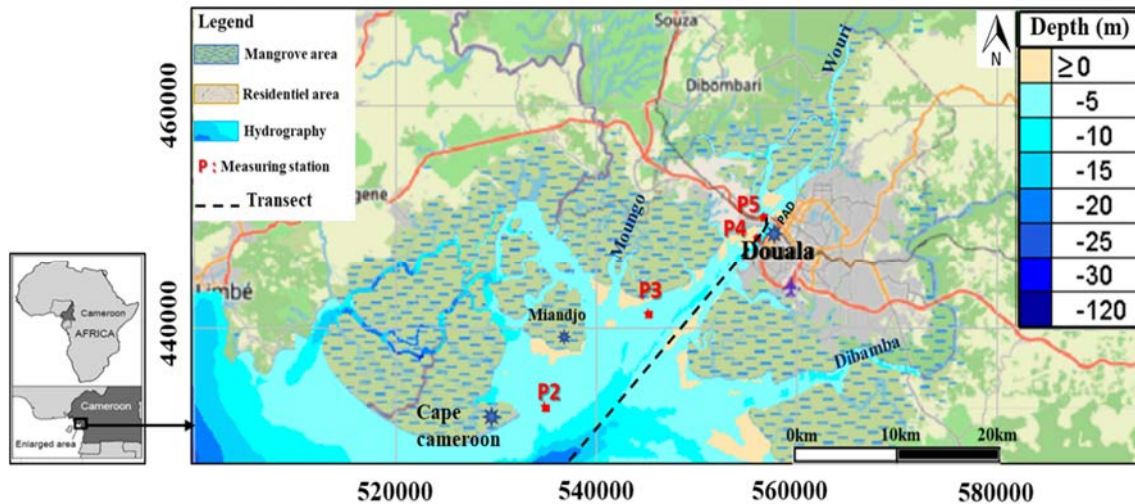


Figure 1. Localisation de l'estuaire du Wouri, les stations de mesures (P2, P3, P4, P5) et les variations bathymétriques.

3. Matériels et méthodes

3.1 Description du modèle

Dans cette étude, l'hydrodynamique est simulé à l'aide du modèle TELEMAC 3D avec 8 couches sigma ajustées aux limites verticales. Par la suite, un modèle de transport de sédiments implémenté dans SEDI3D a été couplé aux modèles hydrodynamiques pour modéliser les sédiments en suspension dans tout l'estuaire du Wouri.

Le domaine de calcul s'étend de la limite amont (fleuves tributaires) à la limite de l'océan ouvert. Le maillage est composé de 55869 éléments triangulaires et de 32539 nœuds avec une résolution variable allant de 2000 m au large, 300 - 200 m autour de l'embouchure de l'estuaire, 200 – 100 m près du littoral à l'intérieur de l'estuaire, 50 -20m en amont de l'estuaire. Le modèle est forcé avec une topo-bathymétrie de 1995, les débits des affluents (1948 - 2004) et les 18 composantes principales de la marée (M2, S2, N2, K1, M4, K2, L2, MS4, Mu2, P1, Mf, Mm, 2N2, Nu2, Nu2, O1, J1, Q1, M6) (phase et amplitudes) fournies par l'atlas global des marées FES2014 (LYARD *et al.*, 2006) Le pas de temps choisi pour les simulations est de 10 secondes. Cette étude a utilisé la loi de Strickler pour la friction du fond. Plusieurs tests ont été effectués en faisant varier les valeurs du coefficient de friction ($32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ à $75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) afin de faire correspondre les hauteurs d'eau prédites aux mesures d'observation.

3.2 Paramètres sédimentaires

Les paramètres sédimentaires ont été choisis après une série de tests de calibration et de sensibilité. Au vu de l'uniformité des sédiments de dragage, le choix a été fait de n'utiliser qu'une classe de sédiments, représentative des sédiments cohésifs vaseux. La

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

consolidation n'est actuellement pas prise en compte dans le modèle, et devra faire l'objet de développements futurs. La vitesse de chute des particules de 0,05 mm s⁻¹, le taux d'érosion de 0.0001 kg/m²/s et les tensions critiques de dépôt et d'érosion de 0.05 N m⁻² ont été calibrés afin de mieux faire correspondre les mesures d'observations de turbidités au modèle.

3.3 Validation du modèle

Plusieurs données ont été utilisées pour valider le modèle. Les variations de hauteur d'eau ont été validées grâce aux marégraphes du port de Douala des stations P2, P3 et P4, complété par la sonde YSI de la station P5. Enfin, les sondes YSI aux stations P3 et P5 mesurant la salinité et la turbidité ont été mises en place afin d'évaluer la performance du modèle vis-à-vis de ces paramètres.

4. Résultats

4.1 Calibration et validation du modèle hydrodynamique

L'analyse quantitative de la performance du modèle par les paramètres statistiques est résumée dans la figure 2. Elle révèle que le modèle reproduit bien l'oscillation verticale du niveau d'eau avec une erreur RMSE de 6 cm à la station la plus proche de la mer (P2). L'indice de compétence (skill) très proche de l'unité entre observations et résultats numériques montre que la marée se propage correctement sur l'ensemble de l'estuaire du Wouri.

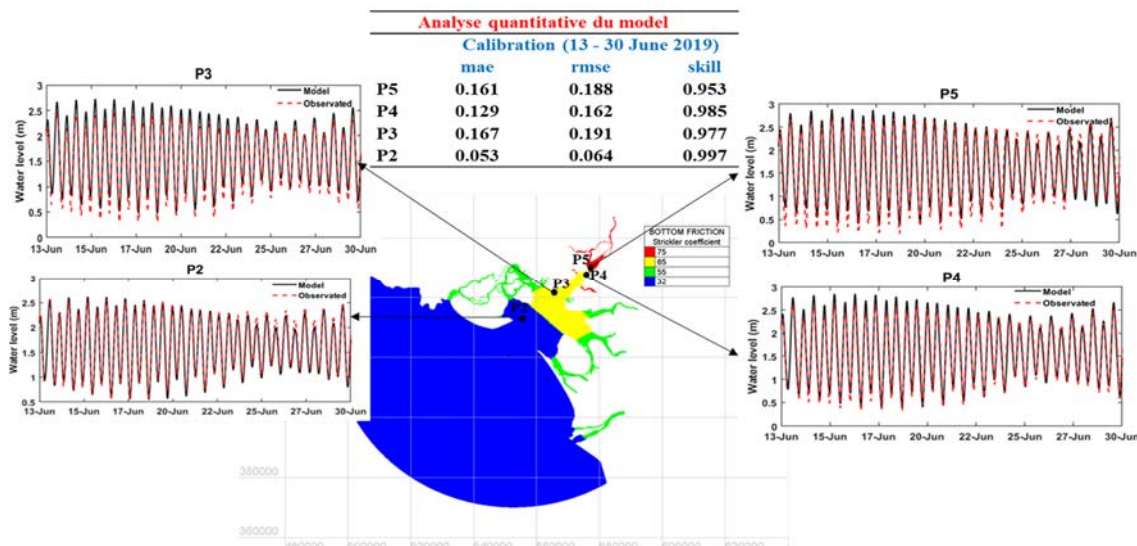


Figure 2. Distribution spatiale du coefficient de frottement du fond (Strickler) et validation des hauteurs d'eau.

4.2 Validation du modèle de dynamique sédimentaire

Les résultats du modèle de dynamique sédimentaire sont comparés aux mesures réalisées aux points P3 et P5 (figure 3). Les phases de remise en suspension sont bien corrélées entre données *in-situ* et résultats numériques. Une surestimation est enregistrée en vive-eau de période d'étiage et inversement une sous-estimation en morte-eau pendant la période de crue. Cependant, les valeurs maximales de 0,8g/L et 1.2 g/L en concentrations simulées pour la période d'étiage et de crue, respectivement sont très proches de celles de mesurées ; soit respectivement 0,5g/L et 1g/L.

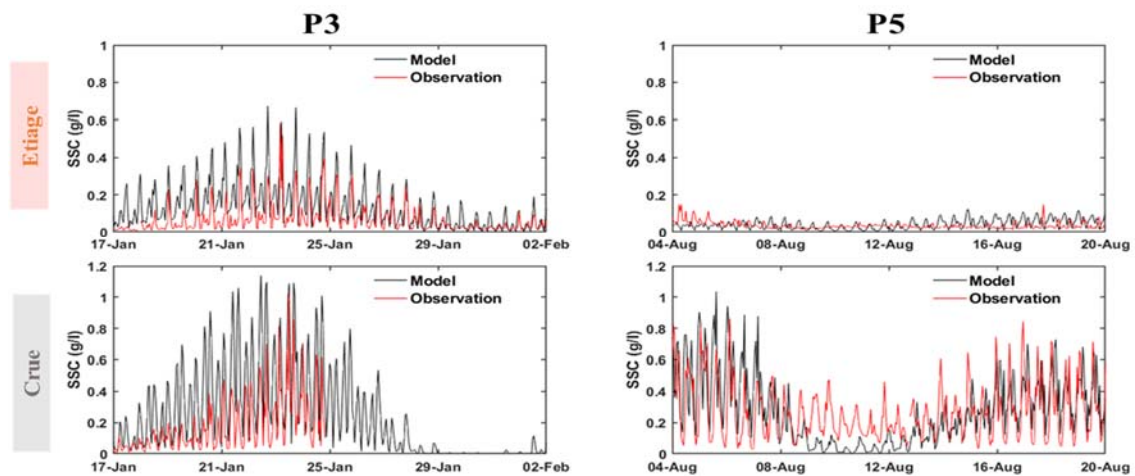


Figure 3. Comparaison entre la concentration de MES de surface mesurée et prédite aux deux stations de mesure P3 et P5 en période d'étiage (du 17 jan. – 02 fév.) et de crue (04 – 20 Août) de l'année 2019.

Dans l'estuaire du Wouri, le forçage induit par la marée montre que les concentrations maximales de sédiment obtenues en vive-eau sont plus de 4 fois supérieures à celles obtenues en morte-eau. Ces gradients de concentration de sédiment en suspension enregistrés montrent l'existence d'un bouchon vaseux en vive-eau important, particulièrement à marée haute contrairement à la morte-eau. Cette turbulence élevée en vive-eau permet le maintien en suspension des particules (DYER, 1997).

4.2 Evolution des sédiments en suspension au cours d'un cycle de marée

4.2.1 Période d'étiage

A l'échelle d'un cycle de marée en période d'étiage, la variabilité spatiale et verticale des concentrations de sédiments en suspension montre une disparité remarquable d'évolution de la zone de turbidité maximale (bouchon vaseux) (figure 4). A l'étale de la pleine mer, l'estuaire présente une zone de turbidité maximale située vers P4 (P5). Avec la descente de la marée, cette zone est poussée de plus en plus vers la partie inférieure de l'estuaire (P3), montrant des concentrations maximales de 2g/l vers le fond. Ce phénomène

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

enregistré est dû à la remise en suspension par des courants forts de jusant et à la diminution de la hauteur d'eau qui concentre les sédiments. L'extension maximale est obtenue 3 heures après la marée haute (PM+3). A l'étape de la basse mer, une zone de turbidité maximale est visible vers le fond dans la partie inférieure de l'estuaire. Une partie des sédiments est déposée pendant cette période. Avec l'augmentation des hauteurs d'eau, les courants de flot sont forts, le déplacement progressif du bouchon vaseux vers l'amont est observé, avec des concentrations fortes dans sa partie inférieure (en moyenne 2g/L). Les courants de flot continuent de remettre en suspension les sédiments déposés. Cinq heures après la marée basse, le bouchon vaseux est situé plus en amont de l'estuaire (P4). La limite du noyau du bouchon vaseux montre déjà une diminution des concentrations en suspension, témoignant d'une baisse des vitesses de courant. Ce bouchon vaseux en amont de l'estuaire résulte de la marée dynamique.

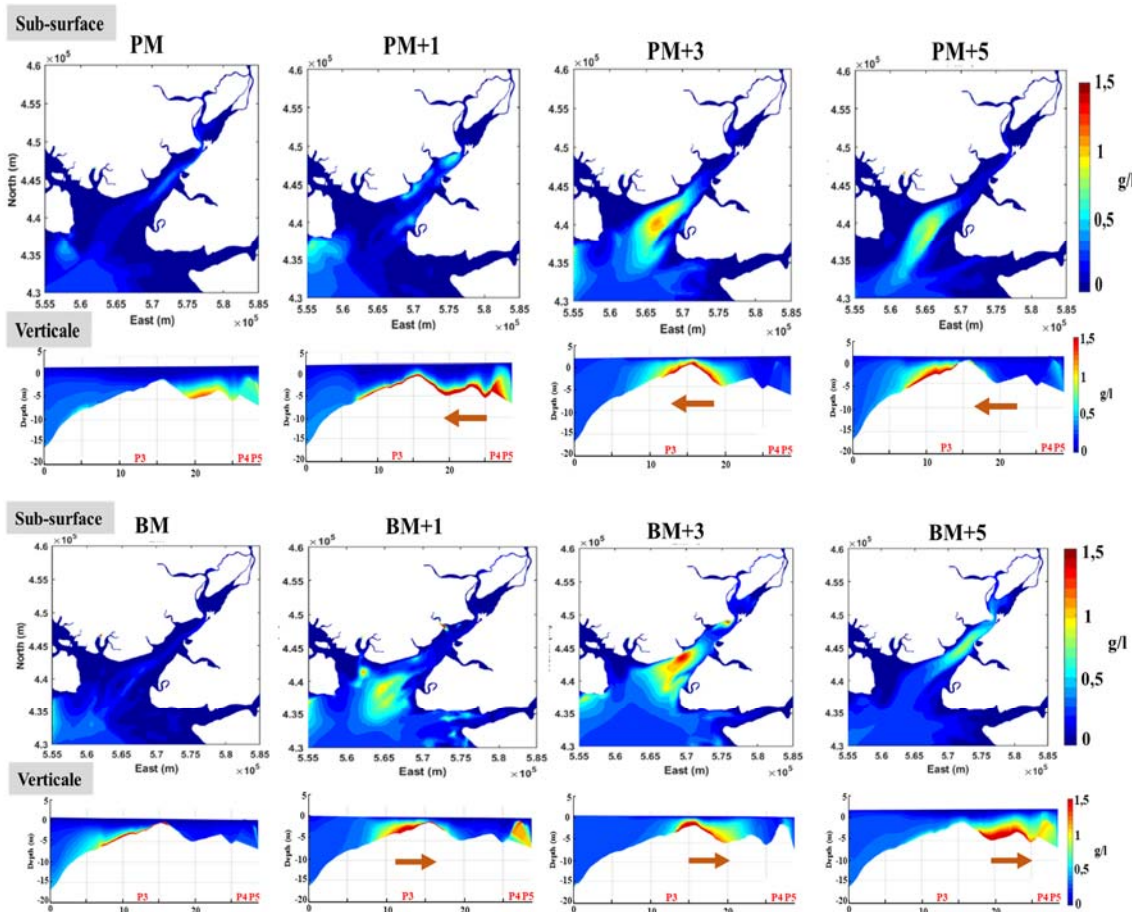


Figure 4. Distribution spatiale et verticale de la concentration des sédiments en suspension (SPM) en période d'étiage pendant le flot et le jusant.

Globalement, les valeurs des concentrations de sédiments en suspension enregistrées pendant cette période restent faibles. Deux phénomènes peuvent expliquer ce

comportement : le forçage induit par les fleuves en amont est considérablement réduit et la remise en suspension associée est donc plus faible. Le bouchon vaseux est nettement plus étalé et donc moins concentré, car moins contraint par l'écoulement fluvial.

4.2.2 Période de crue

En période de crue (figure 5), à l'étape de la pleine mer, un bouchon vaseux est visible à une concentration moyenne de 0.8g/l. Ce bouchon vaseux est clairement visible vers les profondeurs avec une position la plus aval. Ici, La chute des particules se poursuit une heure après la pleine mer, alors que l'extension du bouchon vaseux change peu. A PM+3, les concentrations de sédiment en suspension augmente, en se déplaçant très peu vers la partie supérieure de l'estuaire. A PM+5, la concentration du bouchon vaseux augmente, les valeurs sont supérieures à 2 g/l, les valeurs maximales atteignent plus de 4g/l. Ce phénomène est dû à la fois à la remise en suspension par des courants forts de jusant et à la fois par la diminution de la hauteur d'eau qui concentre les sédiments.

L'extension maximale est obtenue 3 heures après la marée haute de même qu'en étiage.

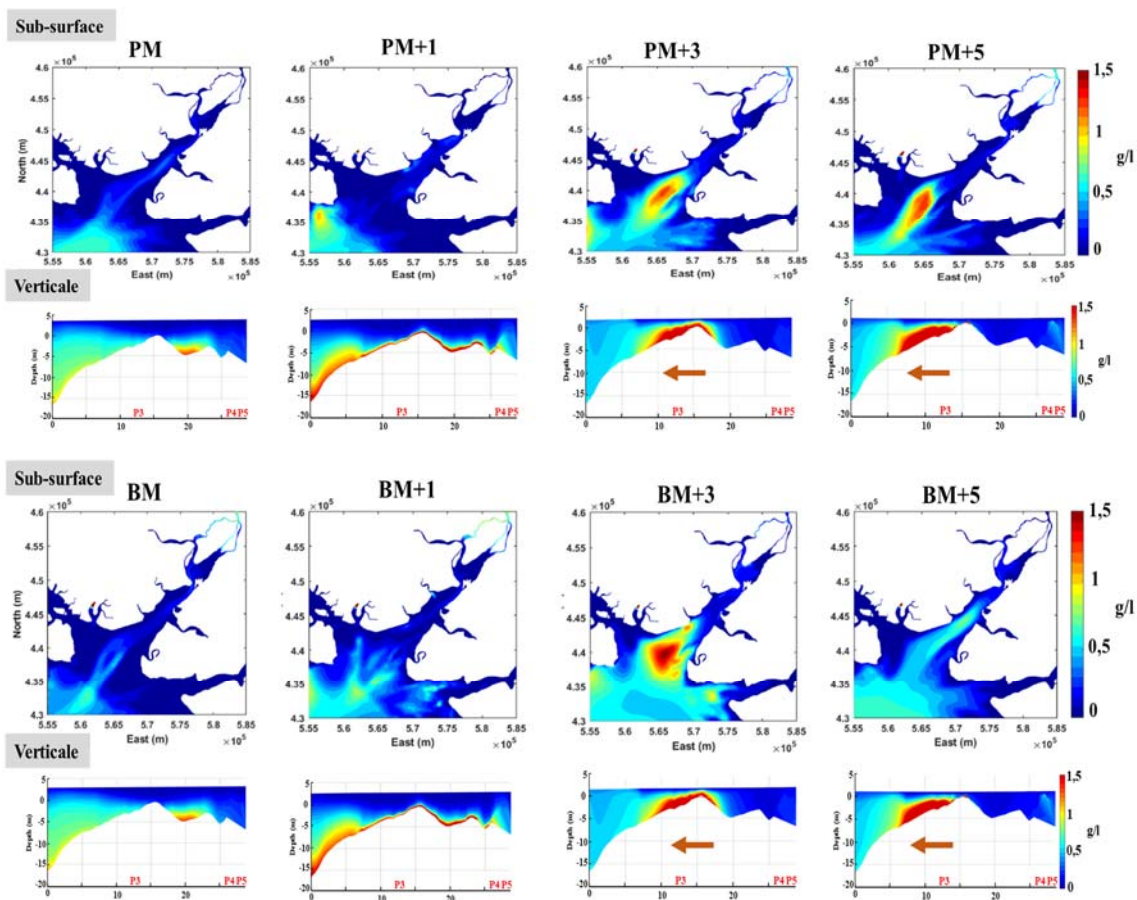


Figure 5. Distribution spatiale et verticale de la concentration des sédiments en suspension (SPM) en période d'étiage pendant le flot et le jusant.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

A l'étale de la basse mer, on note également la présence d'un bouchon vaseux situé dans une position inférieure de l'estuaire. L'augmentation des hauteurs d'eau, avec la montée des eaux va permettre une dispersion prononcée des sédiments. Trois heures après, les courants de flot sont forts, ils continuent de remettre en suspension les sédiments déposés. Le déplacement progressif du bouchon vaseux vers la partie intermédiaire est observé, avec des concentrations élevées (en moyenne 2g/L). Cinq heures après, le bouchon vaseux est situé vers P3, non loin de partie intermédiaire. Cependant, on peut remarquer qu'en crue, le bouchon vaseux, résultant de la dynamique des marées est situé dans la partie inférieure de l'estuaire.

En comparaison de la période d'étiage, les résultats en crue montrent des concentrations élevées en suspension globalement étalées dans la partie inférieure de l'estuaire contrairement aux faibles concentrations enregistrées en amont de l'estuaire en étiage. Ce fait de variabilité saisonnière responsable du contrôle des changements de la position de la ZTM (amont et aval) montré est également observé dans les estuaires de la Loire, la Seine et la Gironde (GUEZENNEC *et al.*, 1999; JALON-ROJAS *et al.*, 2016).

5. Conclusion

La dynamique sédimentaire dans l'estuaire du Wouri est fortement dépendante des forçages tidal et fluvial. La modélisation numérique tridimensionnelle a notamment permis de montrer que dans le cas d'un débit moyen, les gradients de concentration de sédiment en suspension élevée en vive-eau permettent le maintien en suspension des particules (bouchon vaseux). En morte-eau, l'existence d'un bouchon vaseux à part entière semble contestable, les concentrations étant relativement très faibles. Cependant, dans les conditions de marée de vive-eau sur un cycle de marée avec les débits d'étiage et de crue, le bouchon a clairement été identifié. En période d'étiage, les concentrations sont considérablement réduites avec un bouchon vaseux situé dans la partie amont. En période de crue, les concentrations plus élevées sont enregistrés dans la partie inférieure de l'estuaire montrant l'existence d'une zone de forte dynamique, associée à l'érosion maximale. Le débit fluvial a donc une influence non négligeable sur la localisation du Bouchon vaseux. Plus le débit du fleuve est faible, plus les courants intenses de flot induisent une turbidité maximale essentiellement liée par la marée donc en migration vers l'amont. De même que la morphologie de l'estuaire qui influence la localisation du bouchon vaseux entre l'amont et l'aval ; ceci en induisant une convergence localisant la ZTM entre les courants de marée montante orientés vers l'amont et ceux de marée descendante orientés vers l'aval.

Remerciements

Les auteurs remercient le laboratoire LIENS (CNRS/Université de La Rochelle) et le Shom (Brest), conformément à la convention d'accueil à l'Université Shom de Douala -

article 3, pour leur soutien dans la réalisation de ces travaux et Yves Mimbeu, doctorant de l'Université de Douala (Douala) pour son aide précieux dans les campagnes de mesure de terrain.

6. Références bibliographiques

- DIN N., SAENGER P., JULES P.R., SIEGFRIED D.D., BASCO F. (2008). *Logging activities in mangrove forests: A case study of Douala Cameroon*. Afr. J. Environ. Sci. Technol. 2, 022–030. <https://doi.org/10.4314/ajest.v2i2>
- DYER K.R. (1997). *Estuaries: a physical introduction*. 2nd edition, John Wiley, Chichester; New York, 210p. ISBN: 978-0-471-97471-0
- ELLISON J.C., ZOUH I. (2012). *Vulnerability to climate change of mangroves: Assessment from Cameroon, Central Africa*. Biology 1, 617–638. <https://doi.org/10.3390/biology1030617>
- FOSSI FOTSI Y. (2014). *Etudes des paramètres hydrodynamiques de contrôle de la sédimentation dans l'estuaire du Wouri au Cameroun*. Master's thesis, University of Douala, Cameroun.
- FOSSI FOTSI Y., BRENON I., POUVREAU N., ONGUENE R., FERRET Y., DJOMBE D., COULOMBIER T., ETAME J. (2020). *Dynamique du maximum de turbidité dans le système estuarien du Wouri (Cameroun)*, XVI^{ème} Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, Le Havre, Editions Paralia, pp. 221–232. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2020.025>
- FOSSI FOTSI Y., POUVREAU N., BRENON I., ONGUENE R., ETAME J. (2019). *Temporal (1948–2012) and dynamic evolution of the Wouri estuary coastline within the Gulf of Guinea*. J. Mar. Sci. Eng. 7, 343. <https://doi.org/10.3390/jmse7100343>
- GUEZENNEC L., LAFITE R., DUPONT J.-P., MEYER R., BOUST D. (1999). *Hydrodynamics of suspended particulate matter in the tidal freshwater zone of a macrotidal estuary (the Seine Estuary, France)*. Estuaries 22, pp. 717–727. <https://doi.org/10.2307/1353058>
- HERVOUET J.-M. (2000). 4.2: *Etudes pluridisciplinaires dans le domaine de l'environnement*. Le système Telemac. Journ. Hydraul. 26, pp. 97–104.
- JALON-ROJAS I., SCHMIDT S., SOTTOLICHIO A. (2016). *Evaluation of spectral methods for high-frequency multiannual time series in coastal transitional waters: advantages of combined analyses*. Limnol. Oceanogr. Methods 14, pp. 381–396. <https://doi.org/10.1002/lom3.10097>
- LYARD F., LEFEVRE F., LETELLIER T., FRANCIS O. (2006). *Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004*. Ocean Dyn. 56, pp. 394–415. <https://doi.org/10.1007/s10236-006-0086-x>
- NDONGO B., MBOUENDEU S.L., TIRMOU A.A., NJILA R.N., DALLE J.D.M. (2015). *Tendances pluviométriques et impact de la marée sur le drainage en zone d'estuaire : cas du Wouri au Cameroun*. Afr. Sci. Rev. Int. Sci. Technol. 11, 173–182. <https://doi.org/10.4314/afsci.v11i2>

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

OLIVRY J.C. (1986). *Fleuves et rivières du Cameroun*. Monographies hydrologiques ORSTOM.

ONGUENE R., PEMHA E., LYARD F., DU-PENHOAT Y., NKOUE G., DUHAUT T., NJEUGNA E., MARSALEIX P., MBIAKE R., JOMBE S., ALLAIN D. (2014). *Overview of tide characteristics in Cameroon coastal areas using recent observations*. *Open J. Mar. Sci.* 5, pp. 81–98. <https://doi.org/10.4236/ojms.2015.51008>