



Interactions marée-débit dans un estuaire tropical (Fleuve rouge, Vietnam)

**Juliette PENICAUD¹, Sylvain OUILLON^{1,2}, Marine HERRMANN^{1,2},
Florence TOUBLANC¹**

1. Université Paul Sabatier, LEGOS, UMR 556 IRD/CNES/CNRS/Université de Toulouse, 31400 Toulouse, France.
2. LOTUS Laboratory, University of Science and Technology of Hanoi (USTH), Vietnam Academy of Science and Technology (VAST), 18 Hoang Quoc Viet, Cau Giay, Hanoi, Viet Nam.

Résumé :

Les estuaires sont l'interface entre rivière et océan. Ils sont le lieu de nombreux échanges (eaux salées/douces, sédiments fluviaux/marins). Le delta du Fleuve Rouge (Nord Vietnam) est très densément peuplé et connaît une intensification d'activités anthropiques (ports, polders...). Cette zone est soumise à une mousson tropicale, a la particularité d'avoir une marée diurne, et est vulnérable aux événements extrêmes et à la montée des eaux. L'estuaire de la Van Uc River est l'un des principaux bras du Fleuve Rouge et son fonctionnement reste très peu connu. La marée et le débit fluvial sont deux éléments qui influencent la dynamique estuarienne. Dans cette étude, nous nous focalisons sur l'interaction entre ces deux composantes. Pour cela, nous avons mené 3 campagnes dans l'estuaire de la Van Uc en saison humide et vives eaux à différentes valeurs de débit en juin, juillet et août 2022, et récolté des données physico-chimiques (vitesse, salinité, température, turbidité). L'impact du débit sur la propagation de la marée est évalué en termes de hauteur d'eau, de déphasage et d'asymétrie, et la circulation est décrite et analysée.

Mots-clés :

Estuaire, Circulation estuarienne, Hydrodynamique, Marée, Vives eaux, Mortes eaux.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

1. Introduction

Les estuaires sont l'interface entre rivière et océan et sont donc soumis d'une part aux forces de marée et d'autre part, aux variations de débit de la rivière.

L'onde de marée se propage dans l'estuaire faisant varier au cours du cycle tidal la hauteur d'eau jusqu'à la limite amont de l'estuaire (DIONNE, 1963 ; FAIRBRIDGE, 1980). En se propageant le long de l'estuaire, l'onde de marée est déformée, créant une asymétrie tidale due à une distorsion non linéaire (AUBREY & SPEER, 1985). D'un autre côté, les fortes variations de débits dues au signal saisonnier (ou aux facteurs de plus haute fréquence) engendrent aussi des variations locales de niveau d'eau. Des interactions ont lieu entre ces deux composantes, avec des répercussions sur la dynamique et le mélange. Un fort débit est ainsi susceptible de diminuer le marnage et de ralentir l'onde de marée (GODIN, 1991 ; CAI *et al.*, 2012). En termes d'hydrodynamique, marée et débit sont deux des trois composantes pouvant gouverner la circulation en estuaire (DALRYMPLE *et al.*, 1992 ; BOYD *et al.*, 1992, les vagues étant le troisième élément, négligeable sur le site d'étude, situé dans un golfe semi-fermé peu ouvert à la houle).

La circulation en estuaire est pilotée par la différence de flottabilité entre eaux fluviales (flottabilité plus forte) et eaux marines, qui crée un gradient de pression horizontal, générant alors une circulation de densité appelée « circulation estuarienne » (PRITCHARD, 1952, 1956; CAMERON & PRITCHARD, 1963; DRONKERS, 1986; DYER, 1986 ; DYER, 1995 ; OFFICER 1976). Cependant, différents processus peuvent faire varier cette circulation. La marée intensifie le mélange vertical pouvant affecter la stratification : le cycle mortes eaux/vives eaux modifie en général la stratification en passant d'une colonne stratifiée en mortes eaux à plus mélangée en vives eaux, (SIMPSON *et al.*, 1990 ; JAY & SMITH, 1990). Le débit atténue la pénétration des eaux salées dans l'estuaire.

Dans le but de mieux comprendre l'hydrodynamique de l'estuaire de la Van Uc (Fleuve Rouge, Vietnam), nous cherchons à quantifier les interactions marée-débit. Dans le cadre de cette étude, nous analysons le marnage, l'asymétrie de marée, le déphasage dans la propagation des hauteurs d'eau, la pénétration des eaux salées et la renverse des courants dans l'estuaire de la Van Uc, ainsi que l'impact du marnage et du débit sur ces différents éléments.

2. Zone d'étude

Le delta du Fleuve Rouge est situé au nord du Vietnam, et constitue l'apport principal d'eau douce et de sédiments au golfe du Tonkin. Le delta connecte le nord du Vietnam, dont la capitale Hanoi au reste du monde, via Haiphong, 3^e ville et 2^e port du Vietnam. Il est constitué de 9 bras principaux, dont la Van Uc, 3^e rivière en termes d'apport d'eau et de sédiments (14,5 % d'après VINH *et al.*, 2014).

La région est soumise à une mousson donnant lieu à deux saisons très contrastées : une saison sèche (décembre à mars) et une saison humide (mai à octobre) responsable à elle seule de 90 % des pluies annuelles et 70,4 % du débit d'eau annuel (VINH *et al.*, 2014). La marée est diurne et mésotidale (entre 0,5m de marnage en mortes eaux et 4m en vives eaux).

3. Matériel et méthodes

Les données de deux stations hydrographiques sur deux ans (2021-2022) fournies par le National Hydro-Meteorological Service (NHMS) sont utilisées dans cette étude : les données horaires de hauteur d'eau de Hon Dau (HD), station située dans le domaine proche côtier et les données horaires de hauteurs d'eau et de débits mesurées à Trung Trang (TT), station localisée à 35km en amont de l'embouchure de la Van Uc et à 50km de HD. Les marnages des deux stations ainsi que les durées de flot et jusant sont calculées à partir des minima et maxima de hauteur d'eau. Le débit à TT est considéré comme un proxy de la vitesse. Le facteur d'amplification est le ratio entre le marnage à TT et le marnage à HD. Le marnage est amplifié si ce facteur est supérieur à 1 et atténué si inférieur à 1.

Ce jeu de données est complété par les données issues de 3 campagnes que nous avons réalisées à la saison humide en 2022 (Juin, Août et Octobre) et dont les débits sont contrastés (Tableau 1). Les campagnes ont permis de mesurer température, salinité, turbidité grâce à une CTD (Conductivity Temperature and Depth) et les vitesses grâce à un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler, RDI Workhorse monté sur le bateau en mode « bottom tracking »). Lors de chaque campagne, une station fixe à l'embouchure a été mise en place pendant 6h en juin et 24h en août et octobre, ainsi que des transects longitudinaux le long du gradient salin.

Tableau 1. Débit journalier (à TT) et marnage (à HD) lors des campagnes de 2022.

<i>Mois (2022)</i>	<i>Juin</i>			<i>Août</i>				<i>Octobre</i>			
<i>Jour</i>	<i>16</i>	<i>17</i>	<i>18</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Marnage moyen à HD (m)</i>	3.8	3.9	3.8	3.4	3.8	3.6	3.4	2.6	3.0	3.2	3.3
<i>Débit à TT (m³/s)</i>	1790	1736	1954	686	929	1577	1867	856	642	692	613

4. Résultats et discussion

4.1 Evolution du marnage à TT en fonction du débit et du cycle mortes eaux et vives eaux

La Figure 1 présente les relations entre l'amplification du marnage et (a) le débit et (b) le marnage à HD. À HD, le débit a une influence négligeable sur le marnage (coefficient de corrélation $r=-0,006$). À TT, le débit a plus d'effet sur le marnage ($r=0,2$). Le facteur d'amplification est fortement corrélé au débit (Figure 1.a, $r=-0,52$), montrant que celui-ci atténue significativement le marnage. Plus le débit est important, plus le marnage à TT est faible comparé à celui de HD : le marnage à TT est environ de 80 % (amplification à 0,8) de celui de HD pour un débit d'environ 250 m^3/s alors que le marnage n'est que de 50 % celui de HD pour un débit autour de 2000 m^3/s (Figure 1.b). Le facteur d'amplification évolue pendant le cycle mortes eaux/vives eaux (Figure 1.a) : plus le marnage est important à HD, plus il est atténué à TT ($r=-0,69$). À TT, un marnage typique de vives eaux est plus atténué (facteur d'amplification de 0,65 pour un marnage à HD autour de 3,5m) qu'un marnage typique de mortes eaux (facteur de 0,9 pour un marnage autour de 0,5m à HD).

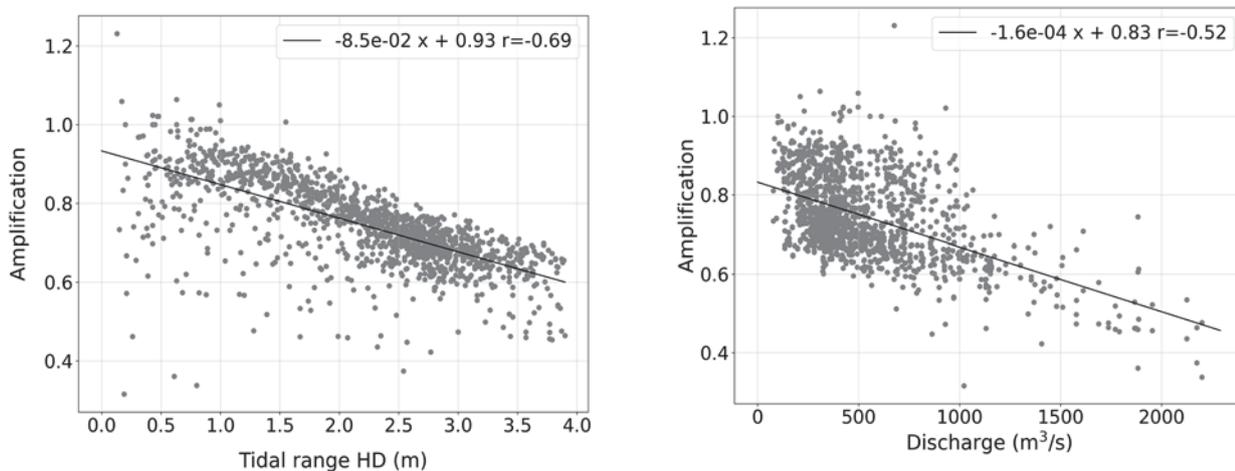


Figure 1. Amplification du marnage à TT en fonction de la marée à HD (a) et du débit (b), avec les droites de régression linéaires associées, ainsi que le coefficient de Pearson r (dont les p -value est inférieure sur toutes nos statistiques à 0,01 montrant des corrélations statistiquement significatives à 99 %).

4.2 Asymétrie de marée et influence du débit

La Figure 2 illustre les durées des flots et jusants à HD et TT ainsi que les hauteurs d'eau aux deux stations sur l'année 2022. Les deux stations ont une asymétrie dans les phases de flot et jusant avec un jusant plus long, et cette asymétrie est plus forte à TT. En moyenne sur les 2 ans de données, le flot dure 11h57 à HD et 11h02 à TT et le jusant dure

13h08 à HD et 14h03 à TT. Ni le débit ni le marnage n'ont d'effet sur cette asymétrie de marée à HD ($r < |0,08|$). En revanche, à TT, ces deux éléments influent davantage l'asymétrie mais de manière modérément significative ($|r|$ entre 0,14 et 0,3). Le débit tend à légèrement augmenter les durées de jusant (de 13 à 15h, $r = 0,22$) et diminuer les durées de flot (12h à 10h, $r = -0,14$). Le marnage à HD augmente aussi légèrement l'asymétrie de marée : avec un marnage qui augmente, les flots sont plus courts ($r = -0,25$) que les jusants ($r = 0,3$).

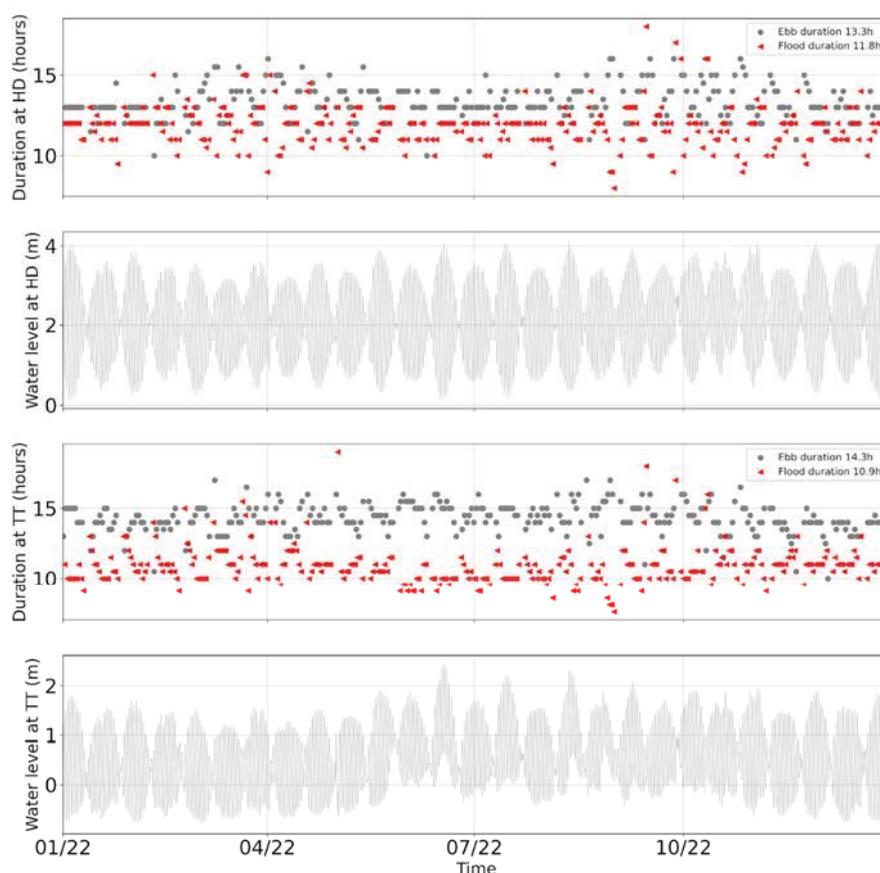


Figure 2. Durée du flot et du jusant à Hon Dau (a) et Trung Trang (c) et les hauteurs d'eau de Hon Dau (b) et Trung Trang (d) sur l'année 2022.

4.3 Propagation de la marée : déphasage entre les niveaux d'eau à Hon Dau et Trung Trang

La propagation de la marée dynamique (hauteur d'eau) entre les deux stations et l'effet du débit est étudié dans cette section. La Figure 3 montre le déphasage entre HD et TT de la propagation des maxima (jaune) et minima de hauteur d'eau (gris) pendant 10 jours en vives et mortes eaux. En moyenne, à TT les minima (resp. maxima) de hauteur d'eau se produisent 3h06 (resp. 2h12) après HD. Le débit influence peu ces déphasages, diminuant le déphasage pour les maxima de hauteur d'eau ($r = -0,19$) et augmentant le

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

déphasage pour les minimas de hauteur d'eau ($r=0,19$). Le marnage à HD influence plus fortement le déphasage entre les hauteurs d'eau : une augmentation du marnage tend à augmenter le déphasage ($r=0,36$ pour les maxima et $r=0,62$ pour les minima).

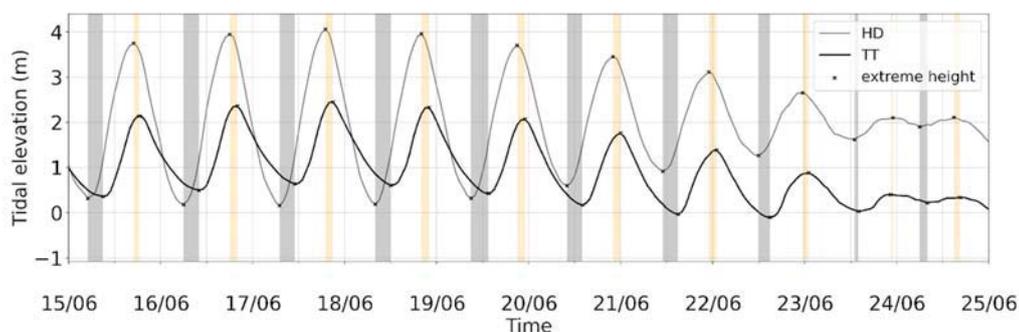


Figure 3. Illustration du déphasage dans les maxima (jaune) et minima (gris) de hauteurs d'eau entre Hon Dau (courbe grise) et Trung Trang (courbe noire) sur la période 15-25/06/22.

4.4 La circulation estuarienne

Les trois campagnes effectuées ont été réalisées pendant la saison humide à des niveaux de marnages similaires (Tableau 1) dans les gammes de débit élevées de la Van Uc, mais présentent tout de même trois débits différents (Tableau 1). Ces campagnes mettent en avant les similitudes et différences principalement dues au débit en termes de moment de la vitesse de retournement, de stratification et d'arrivée du coin salé. La renverse des courants de reflux à flux se produit autour de mi-flot, et d'abord dans la couche de fond. Le débit semble retarder ce retournement de plus de 2h vers la marée haute. Les 3 campagnes ont montré une stratification évoluant d'une colonne d'eau homogène non salée à stratifiée (et même partiellement mélangée dans le cas échantillonné en août) au cours du cycle tidal, atteignant 25 psu dans la couche de fond. L'arrivée du coin salé se produit vers la fin du flot. Une variation est visible avec le débit : un débit plus important retarde l'arrivée du coin salé (qui se produit alors plus tard, plus vers la marée haute).

5. Conclusions

Cette étude a permis de mieux comprendre le fonctionnement de la dynamique de l'estuaire de la Van Uc, ainsi que les variations induites par le cycle mortes eaux/vives eaux et le débit sur la propagation de la marée dans l'estuaire. À TT, le marnage est fortement atténué par l'augmentation du débit et par l'augmentation du marnage de HD. La phase de jusant dure plus longtemps dès la station de HD, et cette asymétrie est d'autant plus accentuée dans l'estuaire jusqu'à la station de TT. De plus, cette asymétrie semble davantage accrue par l'augmentation du marnage que par une augmentation de débit. La propagation des hauteurs d'eau est affectée par le marnage : les crêtes et les

creux se propagent plus rapidement, i.e. le déphasage est moins important avec des marnages plus faibles. L'influence du débit sur les hauteurs d'eau est moindre, mais tend à augmenter le décalage entre les minima de hauteurs d'eau et à le diminuer dans le cas des maxima. Les campagnes de terrain ont montré le rôle du débit sur la dynamique de l'estuaire pour des coefficients de marée similaires, avec un retardement du retournement des courants et un retardement de l'arrivée du coin salé (et donc de la stratification) à plus fort débit. La modélisation 3D hydrosédimentaire de cet estuaire (en cours) permettra de compléter les résultats issus des observations et d'investiguer à haute fréquence et haute résolution l'hydrodynamique de la Van Uc, en s'appuyant pour la calibration/validation sur le continuum de mesures que nous avons construit le long de l'estuaire.

Remerciements :

Les auteurs remercient le booster TESS qui a partiellement financé les campagnes sur le terrain. L'Université de Toulouse est également remerciée. Toutes les personnes ayant participé aux mesures du terrain sont remerciées.

6. Références bibliographiques

- AUBREY D.G., SPEER P.E. (1985). *A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems Part I: Observations*. Estuarine, Coastal and Shelf science. Elsevier, Vol. 21, n° 2, p. 185-205, [https://doi.org/10.1016/0272-7714\(85\)90096-4](https://doi.org/10.1016/0272-7714(85)90096-4)
- BOYD R., DALRYMPLE R., ZAITLIN B.A. (1992). *Classification of clastic coastal depositional environments*. Sedimentary Geology. Elsevier, Vol. 80, n° 3-4, p. 139-150, [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(92\)90037-R](https://doi.org/10.1016/0037-0738(92)90037-R)
- CAI H., SAVENIJE H.H.G., YANG, Q., OU S., LEI Y. (2012). *Influence of river discharge and dredging on tidal wave propagation: Modaomen estuary case*. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 138, n° 10, 885-896. doi 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000594
- CAMERON W., PRITCHARD D. (1963). *Estuaries*, volume 2. Hill MN (ed) The Sea. John Wiley & Sons, New York.
- DALRYMPLE R.W., ZAITLIN B.A., BOYD R. (1992). *Estuarine facies models; conceptual basis and stratigraphic implications*. Journal of Sedimentary Research. SEPM Society for Sedimentary Geology, Vol. 62, n° 6, p. 1130-1146, <https://doi.org/10.1306/D4267A69-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- DIONNE J.-C. (1963). *Définition du terme d'estuaire*. Annales de géomorphologie. Gebrüder Borntraeger, Vol. 7, p. 36.
- DRONKERS J. (1986). *Tidal asymmetry and estuarine morphology*. Netherlands Journal of Sea Research. Elsevier, Vol. 20, n° 2-3, 117-131. [https://doi.org/10.1016/0077-7579\(86\)90036-0](https://doi.org/10.1016/0077-7579(86)90036-0)
- DYER K.R. (1995). *Sediment Transport Processes in Estuaries*. Chapter 14 in : Developments in Sedimentology. Vol. 53 [S. I.] : Elsevier, 423-449, doi 10.1016/S0070-4571(05)80034-2

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

- DYER K.R. (1986). *Coastal and estuarine sediment dynamics*. Disponible à l'adresse : <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282269921820544>
- FAIRBRIDGE R.W. (1980). *The estuary: its definition and geodynamic cycle*. Chemistry and biochemistry of estuaries. Cato, John Wiley, 1-35.
- GODIN G. (1991). *Frictional effects in river tides*. Tidal hydrodynamics. John Wiley & Sons, Vol. 379, 402p.
- JAY D.A., SMITH J.D. (1990). *Circulation, density distribution and neap-spring transitions in the Columbia River Estuary*. Progress in Oceanography. Elsevier, Vol. 25, n° 1-4, 81-112. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(90\)90004-L](https://doi.org/10.1016/0079-6611(90)90004-L)
- OFFICER C.B. (1976). *Physical oceanography of estuaries (and associated coastal waters)*. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282273126721024>
- PRITCHARD D.W. (1952). *Salinity distribution and circulation in the Chesapeake Bay estuarine system*. https://elischolar.library.yale.edu/journal_of_marine_research/763/
- PRITCHARD D.W. (1956). *The dynamic structure of a coastal plain estuary*. https://elischolar.library.yale.edu/journal_of_marine_research/862/
- SIMPSON J.H., BROWN J., MATTHEWS J., ALLEN G. (1990). *Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification*. Estuaries. Springer, Vol. 13, 125-132, <https://doi.org/10.2307/1351581>
- VINH V.D., OUILLOIN S., THANH T.D., CHU L.V. (2014). *Impact of the Hoa Binh dam (Vietnam) on water and sediment budgets in the Red River basin and delta*. Hydrology and Earth System Sciences. Vol. 18 (10), 3987-4005. doi 10.5194/hess-18-3987-2014