

# Analyse des sorties hydro du modèle

Dans ce chapitre, nous étudions l'hydrodynamique de l'estuaire de la Van Uc, à partir de la configuration présentée et évaluée au chapitre précédent. Nous nous attachons à décrire le comportement de l'estuaire à différentes échelles de temps : le cycle tidal, le cycle mortes-eaux/vives-eaux et l'échelle saisonnière. L'objectif est de comprendre la réponse de l'estuaire à ses différents forçages, i.e. débit et marée, et de caractériser son comportement en fonction de ceux-ci, dans la lignée des travaux sur les données in situ de la campagne de 2022, rapportés dans la section TODO REF SECTION XX. Ce chapitre s'articule autour de l'analyse de l élévation de surface, des vitesses, de la salinité et de la stratification. La première partie reprend, cette fois en termes modélistiques, la propagation de la marée au sein de l'estuaire. Les champs de vitesses en situations contrastées de marée et de débits sont ensuite décrits. La troisième partie se concentre sur la salinité, d'une part en quantifiant l'intrusion saline, d'autre part en étudiant l'évolution de la stratification au cours du temps et en fonction du débit et des marées. Ces résultats sont discutés en regard de connaissances préalable de l'estuaire, ainsi que des estuaires plus généralement.

## 1. Méthode

Une partie de cette étude se base sur l'extraction de séries temporelles à certains points de l'estuaire, choisis selon les études réalisées précédemment. Il s'agit des points correspondants aux stations hydrographiques Trung Trang et Hon Dau (TT et HD), aux stations de la campagne Vanuc 2017 (S1, S2, S3), de la station fixe des campagnes de 2022 ("mouth"), et d'une station prise dans le canal en aval de l'embouchure. Par ailleurs, certaines analyses se basent sur une coupe longitudinale des paramètres. Cette extraction longitudinale est réalisée le long du thalweg, soit le chenal "central" le plus profond, partant des mailles du canal 2D-vertical (2DV, soit une dimension selon l'axe x et une dimension en profondeur) de la branche nord de la Van Uc et jusqu'à la fin du chenal située à l'aval de l'embouchure. Le thalweg est représenté en trait noir sur la Fig. Xloc, ainsi que sa bathymétrie (Fig. Xbathy\_Thalweg). Les distances mesurent l'écart à l'embouchure (dont l'emplacement est donné en Fig. Xloc), elles sont comptées positivement lorsque les distances sont situées en aval de l'embouchure, et négativement quand elles se rapportent à un point situé en aval de l'embouchure.

L'évolution de l'hydrodynamique selon le débit et la marée est étudiée. Pour cela, certains cycles sont extraits et étudiés pour leurs conditions de débits et d'amplitude de marée. Un cycle est délimité par deux marées basses. Les conditions choisies pour les amplitudes de marée faibles, médianes, fortes, sont les amplitudes de marée autour des valeurs du premier, deuxième, troisième quartile respectivement (déterminées sur les amplitude de marées de l'ensemble de l'année), à 0.15 m près, soit autour de 1.12 m, 1.82 m et 2.26 m. Le débit de la Van Uc, estuaire tropical, évolue dans une large gamme, notamment pour les débits élevés. Les études précédentes ont souligné le changement significatif de comportement de l'estuaire dans cette gamme de débit, singulièrement en cas de débits intenses  $> 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ . L'étude sur une série temporelle plus longue a montré que le débit et hautement variable d'une année à l'autre. 2017 étant une année dont les débits élevés sont

fréquents, nous avons choisi d'étudier les conditions situées autour des débits de la valeur du 10e, 50e et 90e percentile soit  $268 (+/- 50) \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $650 (+/- 50) \text{ m}^3/\text{s}$  et  $1889 (+/- 100) \text{ m}^3/\text{s}$ . On note que l'on utilise ici le terme de débit, et non d'écoulement, car il s'agit bien du débit forcé à l'amont du canal (bien que cette quantité soit calculé à partir de l'écoulement journalier mesuré à Trung Trang). Les conditions étudiées sont au nombre de neuf et cumulent donc les conditions à la fois du débit et de marée décrites plus haut. Soulignons que le nombre de cycles extraits peut être différent entre les différentes conditions.

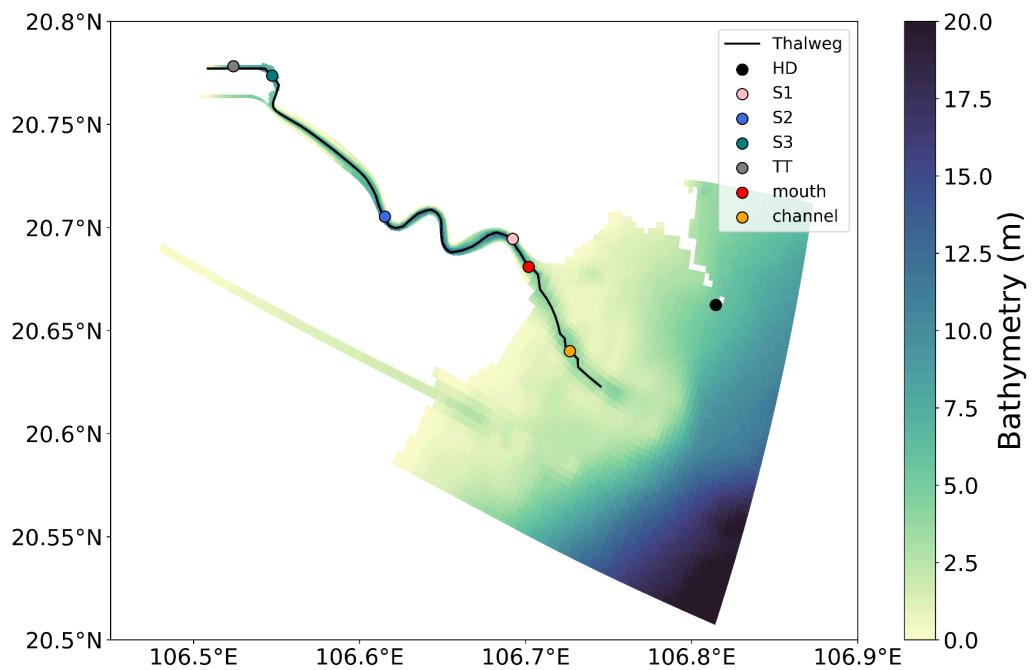


Figure Xloc : carte de la bathymétrie de l'estuaire de la Van Uc superposée avec la ligne (trait plein noir) du thalweg qui a servi de coupe longitudinale. Les points colorés représentent les stations auxquelles des séries temporelles de hauteur d'eau ont été extraites. Le point rouge est le point de référence dont la localisation est déterminée à 0 km, à partir de laquelle les distances en amont sont comptées négativement, et en aval positivement.

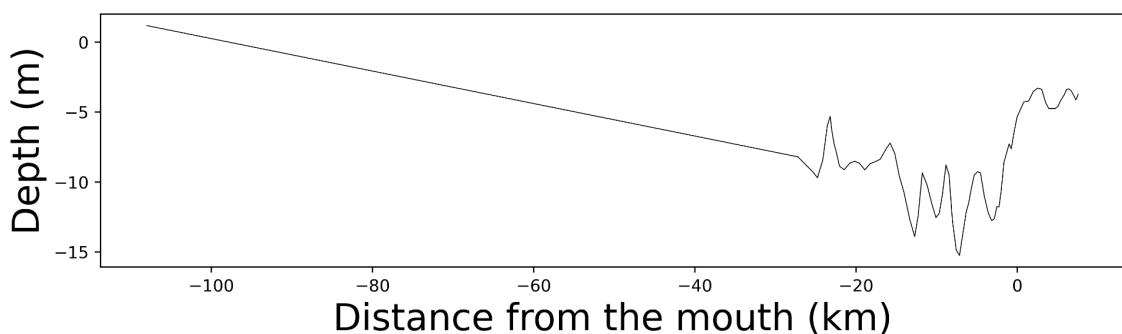


Figure Xbathy\_Thalweg : Coupe longitudinale de la profondeur du thalweg. La bathymétrie variable correspond à la rivière 3D, alors que la partie de la rivière représentée comme un canal 2DV correspond à la pente linéaire s'étendant de -30 à -100 km.

Afin de rendre compte du moment de la marée dans laquelle on se situe, le pourcentage de marée est utilisé, à l'instar de ce qui a été fait dans la partie TODO REF partie I. Cet indicateur, calculé à partir des hauteurs d'eau modélisées à l'endroit de Hon Dau, vaut 100 T% à la marée haute, et 0 T% à la marée basse (Fig. X\_calcul\_t%). Il est compté positivement sur la phase de flot, et négativement durant le jusant (les valeurs s'approchant de -99 T% sont celles près de la marée haute, et celles autour de -1 T% se situent autour de la marée basse).

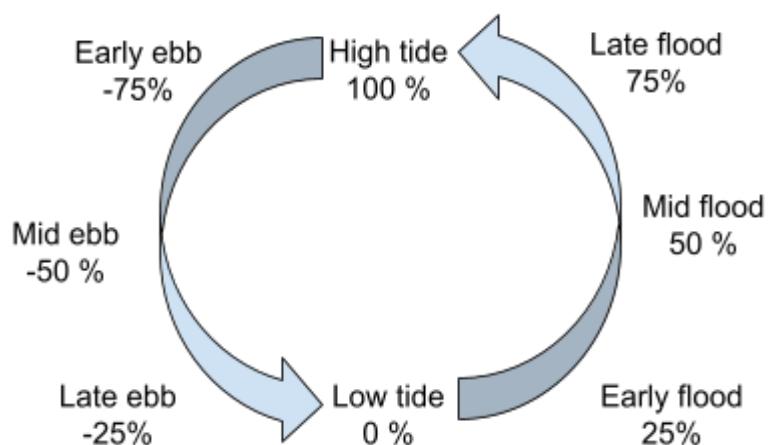


Figure X\_calcul\_t% : Schéma du pourcentage de marée calculé à partir des hauteurs modélisées à Hon Dau (T%)

## 2. Propagation de la marée : asymétrie de durée et atténuation de l'amplitude de marée

### a. Asymétrie de durée de marée

Le modèle a été validé avec les hauteurs d'eau des stations Trung Trang et Hon Dau (voir Fig. Xloc pour les localisations,  $r^2 > 0.98$ , sur l'ensemble de l'année 2017 entre données et modèle). Cette section quantifie l'asymétrie de marée de l'onde, dans la continuité de ce qui a été fait à partir des observations en partie TODO REF SECTION, en détaillant l'asymétrie sur le continuum spatial de l'estuaire, puis en mesurant l'impact du débit et du cycle de marée sur cette asymétrie. Le Tableau X1 répertorie les durées du flot et du jusant ainsi que le temps de propagation des basses mers et des pleines mers entre les stations de Hon Dau et de Trung Trang, à la fois pour les valeurs issues du modèle et des jeux de données horaires fournies par le NHMS (National Hydrographic Meteorological Service) sur la même année 2017.

i. Propagation de la marée le long de l'estuaire  
 1. Comparaison avec les données entre HD et TT

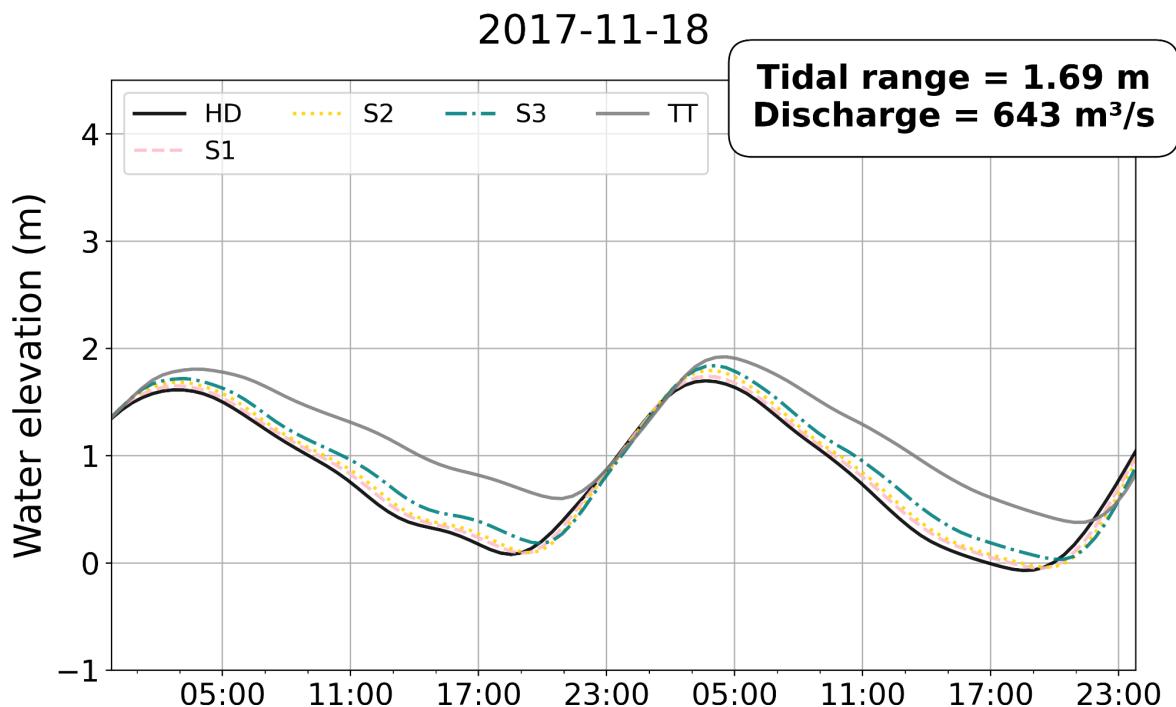


Figure Xpropagation : Série temporelle des hauteurs d'eau modélisées en différents points de l'estuaire (cf. Fig Xloc pour les localisations) sur 48h autour du 18 novembre 2017, jour aux conditions de débit et de marée autour des valeurs médianes.

Tableau X1 : Temps de propagation médian (et moyen entre parenthèse) des pleines mers et des basses mers donnée par le modèle et les données des stations hydrographiques sur l'année 2017

	Modèle	Données
Temps de propagation des pleines mers	1h26 (1h23)	2h00 (2h13)
Temps de propagation des basses mers	2h53 (2h43)	3h00 (3h19)
Durée du flot à HD	10h33 (10h48)	11h00 (11h39)
Durée du jusant à HD	14h24 (14h06)	13h00 (13h14)

<b>Durée du frot à TT</b>	9h07 (9h56)	10h00 (10h33)
<b>Durée du jusant à TT</b>	15h50 (16h01)	15h00 (14h23)

On s'intéresse dans un premier temps à la propagation des pleines mers et des basses mers, entre Hon Dau et Trung Trang pour comparer avec les données des stations. Le modèle simule bien une différence de propagation entre les crêtes et les creux de l'onde de marée (Fig. Xpropagation), cohérentes avec les données hydrographiques. La propagation des basses mers ne présente pas de changements notables entre les données et le modèle (2h53 avec le modèle contre 3h avec les données). Le modèle simule un temps de propagation des pleines mers plus faible que celui trouvé avec les données (médiane vaut 2h00 à partir des données, descendant à 1h26 avec le modèle, voir Tableau X1).

Les durées du frot et du jusant sont ensuite comparées pour chacune des deux stations. Les durées médianes du frot calculées à partir du modèle sont plus courtes que celles calculées à partir des données (Tableau X1), à la fois pour HD et pour TT. À TT, après la déformation de la propagation de l'onde marée dans l'estuaire, l'asymétrie de durée entre le frot et le jusant augmente. L'écart entre les durées médianes des données *in situ* et du modèle est d'environ 50 mn (frot de 9h07 selon le modèle, 10h00 selon les données). Les durées de jusant sont en contrepartie plus élevées dans les simulations (15h50 contre 15h dans les données).

Le modèle donne donc une asymétrie plus prononcée dans le cas du modèle par rapport aux données. Ces différences de durée peuvent provenir de la plus haute résolution du modèle (~15 mn contre 1h pour les données *in situ*). En effet, le changement de résolution temporelle peut modifier la quantification de l'asymétrie TODO CITE Wunsche et al 2024.

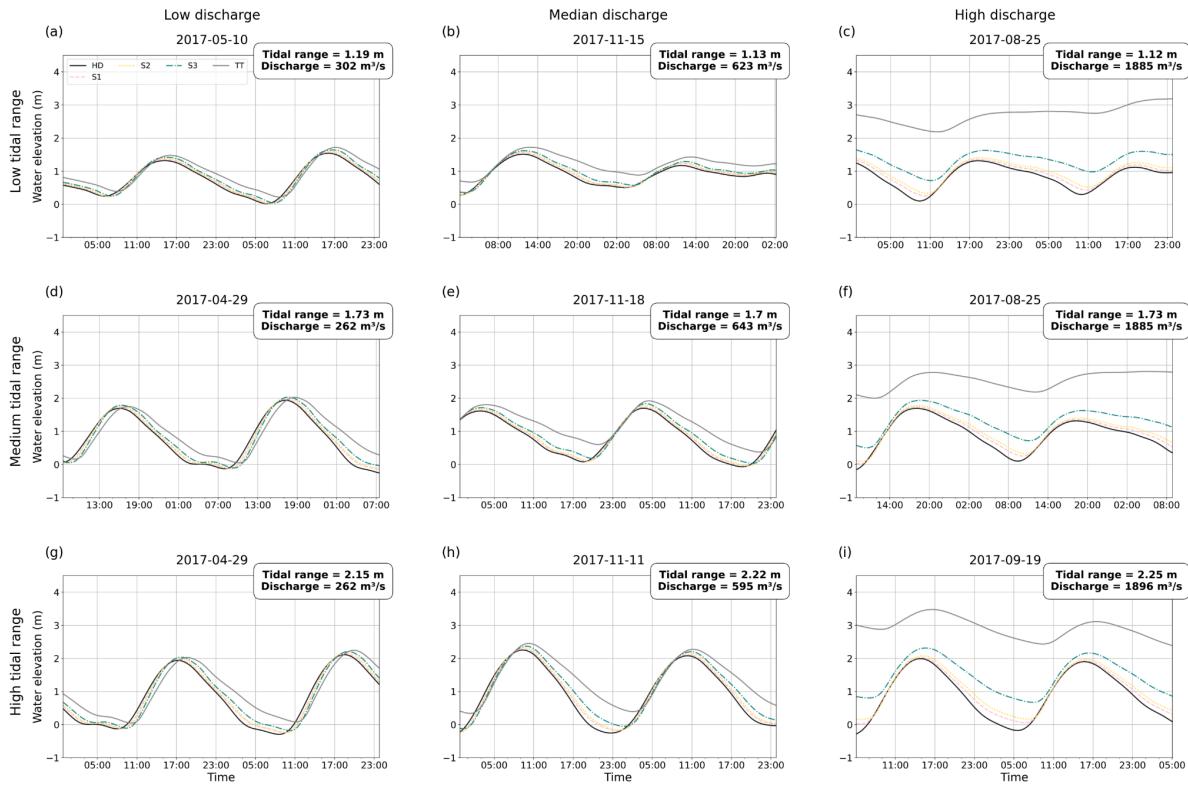


Figure Xcomp\_ssh : Exemples de séries temporelles de hauteurs d'eau aux stations Hon Dau (HD), S1, S2, S3 et Trung Trang (TT) pour des conditions de marée et de débits contrastés. Les amplitudes de marée similaires correspondent aux lignes tandis que les conditions de débits identiques se retrouvent dans les colonnes.

Tableau Xcorr : corrélation r et p-value du temps de propagation des pleines mers et basses mers avec le débit ou l'amplitude de marée entre chacune des stations S1, S2, S3 et TT avec la station HD (p-value indiquée seulement quand supérieure à 0.01). Les temps de propagation médians sont inscrits dans la dernière ligne de chaque tableau.

Pleines mers	S1-HD	S2-HD	S3-HD	TT-HD	TT-HD (données)
Débit	0.10 p>0.01	0.06 p>0.01	0.41	0.71	-0.19
Amplitude de marée	-0.09 p>0.01	-0.11 p>0.01	-0.1 p>0.01	-0.00 p>0.01	0.35
Temps de propagation médian	0h00	0h29	0h29	1h26	2h00 (2h10)

Basses mers	S1-HD	S2-HD	S3-HD	TT-HD	TT-HD (données)
Débit	0.18	0.25	0.36	0.38	0.20

Amplitude de marée	0.39	0.41	0.47	0.33	0.60
Temps de propagation médian	0h29	0h58	1h27	2h53	3h00 (3h05)

## 2. Temps de propagation de l'onde de marée le long de l'estuaire

Les durées médianes de la propagation de l'onde de marée le long de l'estuaire sont rapportées dans le tableau Xcorr pour les différentes stations. Le temps de propagation des pleines mers et des basses mers augmente le long de l'estuaire.

Le modèle ne capture pas de décalage entre les stations de HD et S1, ni entre S2 et S3, pour qui est des **pleines mers**, atteinte 29 mn après HD (valeur médiane). Cela peut être dû au pas de temps de 15 mn du modèle, ou bien au fait qu'il n'existe pas de décalage temporel entre ces stations, comme c'est le cas dans un estuaire idéal TODO CITE Savenije et al 2005. La distance entre S3 et HD est de 30 km, ce qui donne une vitesse 60 km/h, correspondant à l'ordre de grandeur donné par  $\sqrt{gH}$  pour H entre 10-20 m. La propagation est bien plus lente entre S3 et TT (1h d'écart, Tableau Xcorr).

Le décalage dans le temps de la propagation des **marées basses** est plus marqué, pour lesquelles la colonne d'eau est plus faible, augmentant donc le temps de propagation vers l'amont de l'estuaire ( $\sqrt{gH}$ ). La plus faible profondeur de la colonne d'eau est aussi sûrement plus sensible à la bathymétrie accidentée du thalweg (Fig. Xbathy\_Thalweg), dissipant plus l'énergie de l'onde de marée. En effet, le déphasage est déjà observable entre S1 et HD (0h29, Tableau Xcorr), et croît de manière linéaire jusqu'à S3 (1h27, Tableau Xcorr). Le temps de propagation des marées basses entre S3 et TT (espacées de 16 km) est notablement plus important : 1h30 en moyenne (2h53-1h27, Tableau Xcorr).

Le temps de propagation entre S3 et TT est plus fort que dans le reste de l'estuaire. Dans cette région, située plus en amont, l'influence du fleuve est plus forte, contrant la renverse des courants. Une diminution de la hauteur d'eau peut aussi être en cause, bien qu'aucune carte ne nous permette de l'affirmer. Par ailleurs, la pente du lit de la rivière doit aussi augmenter dans cette région, située à plus de 30 km de l'embouchure, dissipant plus la marée, d'autant plus en marée basse où la colonne d'eau est moins épaisse.

### ii. Impact de l'amplitude de marée sur le temps de propagation de la marée

Ce paragraphe détaille l'impact de l'amplitude de marée sur l'asymétrie de durée au sein de l'estuaire, sur différentes stations, permettant de compléter les séries temporelles des données in situ, qui sont limitées à deux stations.

La figure Xcomp\_ssh montre différentes situations de débits et d'amplitudes de marée aux différents points le long de l'estuaire. On observe une variation de la surface libre similaire

pour l'ensemble des stations lors des faibles amplitudes de marée (Fig. Xcomp\_ssh b), avec très peu de décalage temporel de Hon Dau jusqu'à S3, et un décalage temporel et un amortissement un peu plus marqué à Trung Trang. En vives-eaux (Fig. Xcomp\_ssh e et h) le temps de propagation de la marée basse augmente pour toutes les stations. De mortes-eaux à vives-eaux (Fig. Xcomp\_ssh b et h), le temps de propagation de la marée basse entre Hon Dau et Trung Trang passe de 2h à plus de 4h, à l'instar de ce qui avait été trouvé dans l'analyse des données de hauteur d'eau TODO REF SECTION.

Dans le modèle, la propagation des **basses mers** est significativement ralentie en vives-eaux, et ce, dans l'ensemble de l'estuaire ( $r>0.33$ , Tableau Xcorr). Il semble que ce ralentissement s'accentue en remontant l'estuaire (augmentation de la corrélation entre S1 et S3, de 0.39 et 0.47, Tableau Xcorr). En revanche, la valeur de la corrélation est plus faible à la station de TT, mais montrant tout de même une corrélation significative ( $r=0.33$ ). Cela peut s'expliquer par le passage à un canal 2DV entre S3 et TT, montrant une limite du modèle. Les corrélations trouvées sur la propagation des **basses mers** concordent entre les données in situ et les hauteurs d'eau simulées entre HD et TT ( $r=0.60$  et  $r=0.33$ ,  $p<0.01$ ). Cette augmentation du temps de propagation entre vives-eaux et mortes-eaux peut être dû à la variation de volume d'eau transporté par la marée. En mortes-eaux, ce volume est plus faible, donc plus sensible aux frottements, l'énergie est alors plus dissipée, retardant alors la propagation de l'onde plus qu'en vives-eaux.

Dans le modèle, le temps de propagation des **pleines mers** n'est corrélé à l'amplitude de marée en aucun point de l'estuaire ( $p\text{-value}>0.01$ ). À partir des données, une corrélation significative de la propagation des pleines mers était détectée à partir des observations. Cela peut être dû au pas de temps plus fin du modèle (15 mn), qui révèle que les variations détectées dans le pas horaire des données avec l'amplitude de marée ne sont finalement pas significatives TODO CITE Wunsche et al 2024, ou bien à une limite du modèle. Des investigations comparant plus finement les données et le modèle pourraient permettre d'affiner cette supposition.

### iii. Impact du débit fluvial sur la propagation de la marée

On observe une variation spatiale de l'impact du débit au sein de l'estuaire, qui ralentit la propagation à la fois des pleines et basses mers de manière plus marquée dans l'estuaire amont (stations S3 et TT) qu'aval (S1 et S2, Tableau Xcorr).

Les **basses mers** sont moins ralenties par le débit à l'aval par rapport à l'amont ( $r=0.18$  en S1,  $r=0.36$  à TT). Ces corrélations sont comparables aux résultats obtenus dans l'étude des données horaires TODO REF PARTIE, (Tableau Xcorr). En effet, le pas horaire permettait de voir une augmentation significative du temps de propagation (de 3h00 à 4h00 pour les quartiles 1 et 3), qui se retrouve dans le modèle (1h55 et 3h21 pour les premier et dernier quartiles).

Aucune tendance sur un décalage temporel des **pleines mers** dû au débit n'est observé dans l'estuaire aval ( $p>0.01$ ). En revanche, un ralentissement fort est obtenu plus en amont ( $r=0.41$  en S3,  $r=0.71$  à TT). Cependant, la corrélation calculée avec les données est négative et relativement faible :  $r=-0.19$ . Il est donc surprenant d'obtenir des corrélations opposées à TT entre les données et le modèle ( $r=-0.19$  et  $r=0.71$  respectivement). On note cependant que le temps de propagation des pleines mers évolue entre 2h14 et 2h00 (premier et dernier quartile de débit), montrant que, bien que significative, la corrélation

trouvée dans les données montre peu d'impact sur les valeurs des propagations des pleines mers. Dans le modèle, les valeurs des quartiles évoluent plus : de 0h58 pour le premier quartile à 1h55 pour le 3<sup>e</sup> quartile.

Dans le modèle, un débit faible accélère la propagation de l'onde de marée, ce qui n'était pas détecté dans les données. Le changement d'échantillonnage temporel entre les données et le modèle (1h vs 15 mn) peut expliquer la modification des detections des moments des minima et maxima, modifiant alors les durées TODO CITE Wunsche et al 2024. Cependant, l'écart entre les temps de propagation entre HD et TT du premier quartile de modèle (0h58) et données (2h00) laisse penser que le modèle surestime la vitesse de propagation de la marée.

**TODO CONCLURE 0h58 on aurait pu obtenir 1h avec les données. Dû au canal 2DV ??? Débit faible = hauteur d'eau faible dans le canal = plus de frottement = ralentit, et débit faible = peu d'opposition = moins de dissipation de l'énergie de l'onde de marée.**

Ainsi, le modèle propose une augmentation du temps de propagation lors d'une hausse du débit, à la fois pour les pleines mers et les basses mers, de manière plus évidente en amont de l'estuaire (au-dessus de S3).

## b. Atténuation de l'amplitude de marée

Nous étudions maintenant l'évolution de la hauteur d'eau le long de l'estuaire. La figure Xcomp\_ssh montre des exemples de cycles de marée dont les amplitudes de marée sont variées. La figure Xamplitude\_sto\_vs\_HD\_mod représente l'amplitude de marée en différents points de l'estuaire, et la figure Xamplification\_along\_transect montre l'évolution de l'amplification (rapport de l'amplitude de la station considérée sur l'amplitude de marée à Hon Dau) avec l'amplitude de marée à HD et le débit. Enfin, la figure Xamplitude\_along\_estuary présente l'évolution de l'anomalie de hauteur d'eau le long de l'estuaire pour différentes conditions.

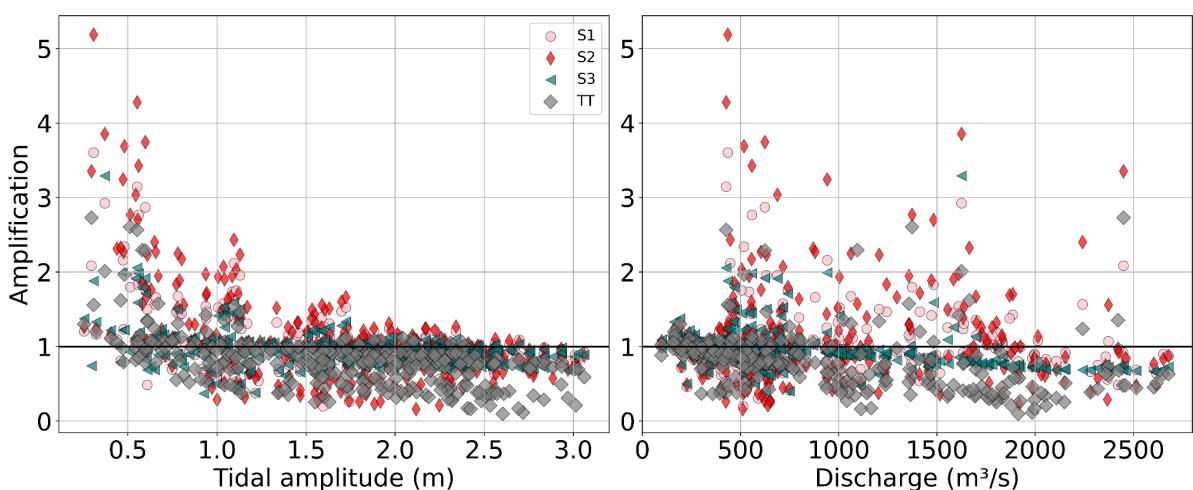


Figure Xamplification\_along\_transect : Amplification, i.e. rapport de l'amplitude de la station considérée sur l'amplitude de marée à Hon Dau, fonction de l'amplitude de marée à Hon Dau (gauche) et du débit, sur différentes stations le long de l'estuaire.

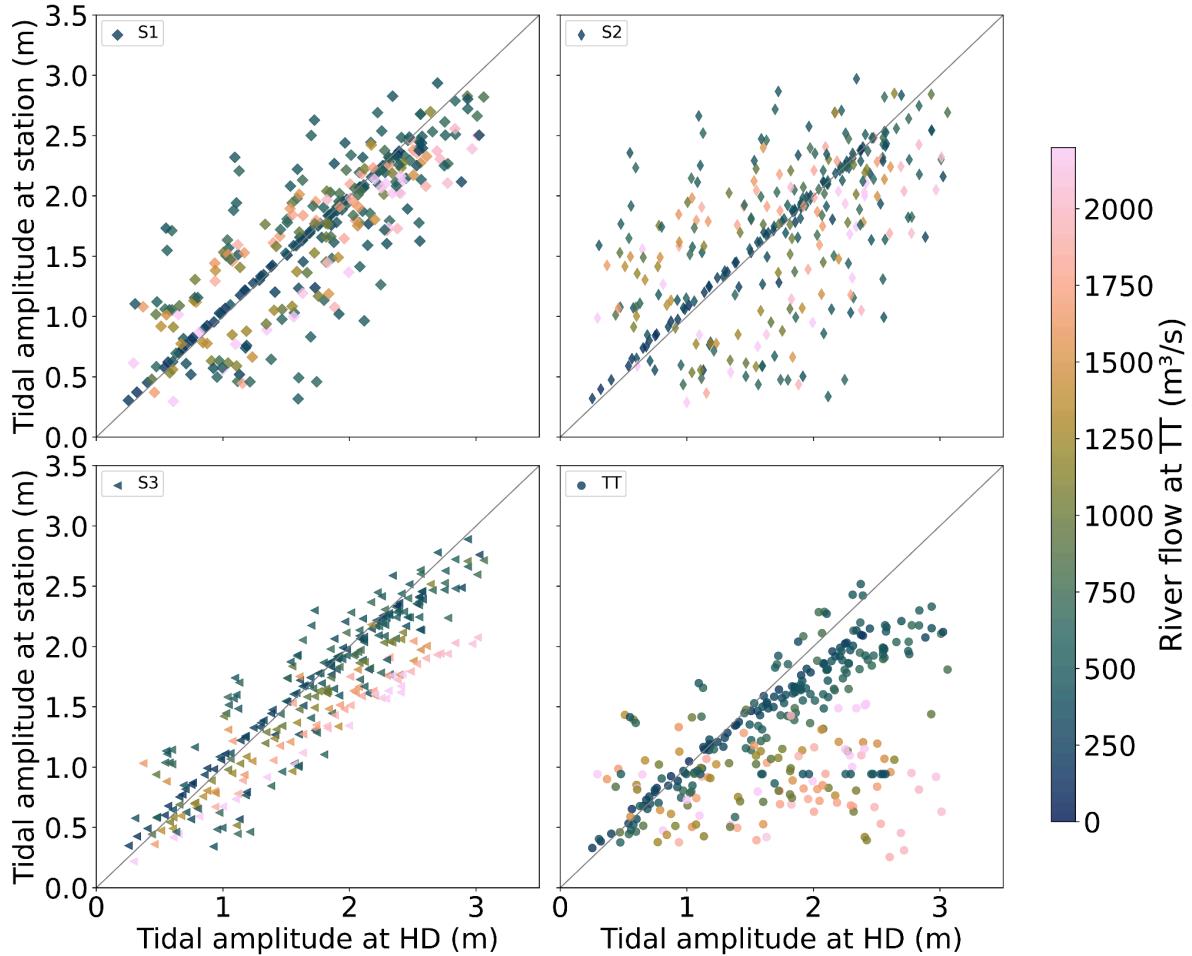


Figure Xamplitude\_sto\_vs\_HD\_mod : Amplitude de marée modélisée à la localisation de la station de différentes stations en fonction de l'amplitude de marée modélisée à Hon Dau. Les couleurs associées représentent les débits journaliers. La droite  $x=y$  est représentée en noir.

On ne distingue pas de tendance nette à l'amortissement ou à l'amplification aux stations S1 et S2 (dispersion homogène des points autour de la droite  $x=y$  dans la Fig. Xamplitude\_sto\_vs\_HD\_mod, haut), dont le comportement est très similaire sur l'ensemble des situations de la figure Xcomp\_ssh. L'amplitude de marée ne diffère que pour les très hauts débits (Fig. Xcomp\_ssh, dernière colonne) avec une amplitude de marée plus atténuée en S2 par rapport à S1. La station S3 présente un comportement plus homogène, maintenant l'amplitude de marée (faible dispersion des points autour de la droite  $x=y$ , Fig. Xamplitude\_sto\_vs\_HD\_mod) avec une tendance à l'amortissement détectable seulement pour les hauts débits (Fig. Xamplitude\_sto\_vs\_HD\_mod). Enfin, à TT, une tendance au maintien de l'amplitude ou à l'atténuation est observable (majorité des points situés sous la courbe  $y=x$ , Fig. Xamplitude\_sto\_vs\_HD\_mod).

Les mortes-eaux ont tendance à amener des facteurs d'amplification forts, surtout aux stations S1 à S3 (voir les faibles amplitudes de marée à Hon Dau dans la Fig. Xamplification\_along\_transect). Aucune tendance franche à l'atténuation ou à l'amplification avec le changement de l'amplitude de marée n'est détectée pour les stations S1 ni S2 ni S3 (Fig. Xamplification\_along\_transect, Xamplitude\_sto\_vs\_HD\_mod). À TT, on observe une

tendance à l'amortissement pour les vives-eaux, dès des amplitudes de marée de 2 m (Fig. Xamplitude\_sta\_vs\_HD\_mod S3), comme ce qui a été montré dans l'analyse des données in situ TODO REF SECTION.

Les hauts débits impactent l'amplitude de marée en S3 et à TT (Fig. Xamplitude\_sta\_vs\_HD\_mod et Xamplification\_along\_transect, panel droite). À S3, on n'observe ce comportement que pour des débits > 1800 m<sup>3</sup>/s, et surtout en vives-eaux. À TT, on note une tendance à l'amortissement très forte pour les hauts débits. Cependant, ce comportement est à mettre en rapport avec la localisation de la station (i.e. le canal 2DV) qui n'a, en cas d'augmentation forte du débit, que la hauteur d'eau comme variable d'ajustement. Un exemple est donné dans la figure Xcomparaison\_data\_mod où une augmentation brutale du débit se traduit par une augmentation abrupte de la hauteur d'eau à l'amont (Fig. Xcomparaison\_data\_mod a), se répercutant à TT et perturbant alors les oscillations dues à la marée. Les oscillations sont donc atténuées et ne peuvent alors pas rendre compte des valeurs de l'atténuation réelle. Il s'agit ici d'une limite de la configuration d'un canal 2DV, qui ne permet pas l'exploitation de l'atténuation de l'amplitude de marée sous haut débit, et qui souligne néanmoins l'intérêt d'avoir mis en place une rivière 3D. Cependant, le résultat à la station S3 n'est pas impacté par cette limitation, et est donc réellement informatif de la tendance à atténuer la marée à cet endroit avec les hauts débits.

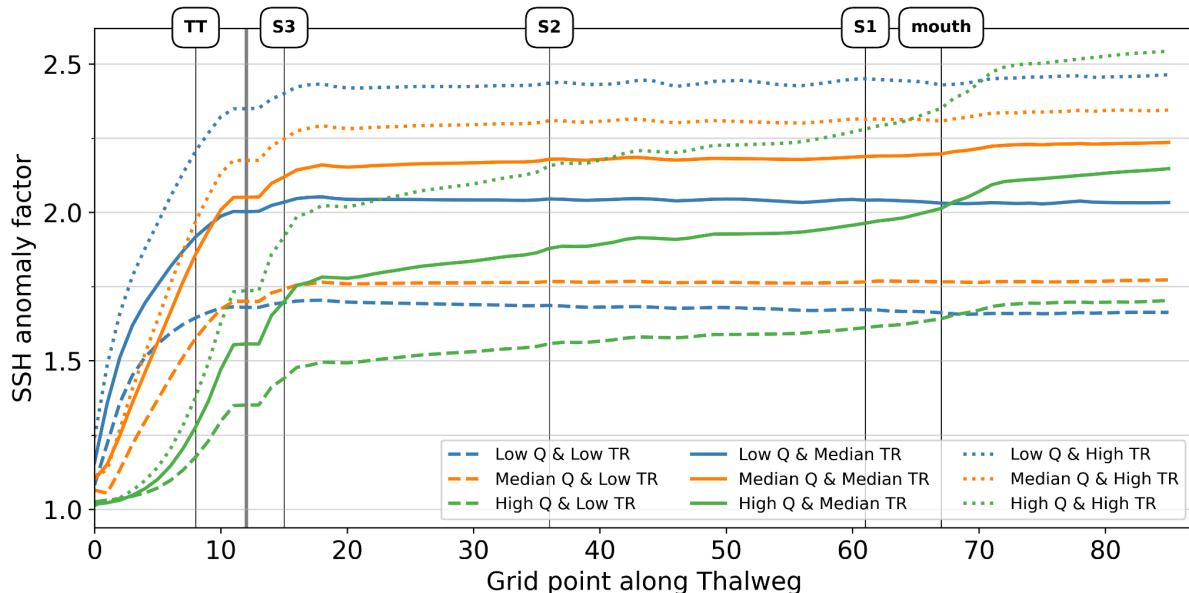


Figure Xamplitude\_along\_estuary: anomalie d'élévation de surface journalière (rapport de l'amplitude maximale de marée au cours d'un cycle de marée avec le niveau moyen au cours de ce cycle de marée, appelé SSH anomaly factor, calculé en chaque point) le long du thalweg, indiqué en points de grille. Différents cycles aux conditions d'amplitude de marée (faibles en traits discontinus, médianes en traits pleins et fortes en pointillés) et de débit (faible en bleu, médian orange, et fort en vert) sont représentés. Les positions de l'embouchure et des stations "mouth", S1, S2, S3 et Trung Trang (TT) (traits gris fins) ainsi que la transition entre la rivière 3D et le canal 2DV (trait gris épais) sont explicités.

Analysée le long du thalweg, l'évolution spatiale de l'amplitude de marée montre une sensibilité au débit. La figure Xamplitude\_along\_estuary montre en effet un maintien de l'amplitude de marée le long de l'estuaire dans le cas de débit faible (bleu) et médian

(orange alors qu'une tendance à l'atténuation est visible pour les forts débits (vert). Par ailleurs, la variation des conditions d'amplitude de marée ne semble pas impacter les débits plus faibles, alors que l'atténuation le long de l'estuaire est plus accentuée pour les fortes amplitudes de marée (traits pointillés). Une autre information à retirer de la Fig. Xamplitude\_along\_estuary est le lieu d'inflexion de la courbe d'anomalie d'élévation de surface, montrant le point de modification de l'équilibre des forces de frottement et de convergence. Il est de manière marquée située plus à l'amont pour les faibles débits (bleu), pour lesquels l'amplitude de marée est maintenue sur une plus grande partie de l'estuaire, que pour les forts débits (vert), pour lesquels l'atténuation débute dès le début du thalweg, et s'accentue plus fortement à partir de S3.

En dehors des très forts débits et sur sa partie aval, l'estuaire est synchrone (selon TODO CITE Le Floch 1961), ou idéal (selon TODO CITE Savenije 2005b), c'est-à-dire qu'il conserve l'amplitude de marée constante le long de l'estuaire, indiquant un équilibre entre friction et convergence. Dans la partie plus en amont (à partir de S3 et plus en amont), le signal de marée est à minima maintenu, et atténué dans le cas de débits intense et de vives-eaux. L'augmentation de l'atténuation observée lors des hauts débits peut s'interpréter comme la modification du rapport de friction et de convergence, avec une friction devenant prédominante et impactant la limite entre la partie de l'estuaire dominée par le fleuve et les frottements, et la partie aval dominée par la marée. **TODO CITE Dykstra et al 2024.**

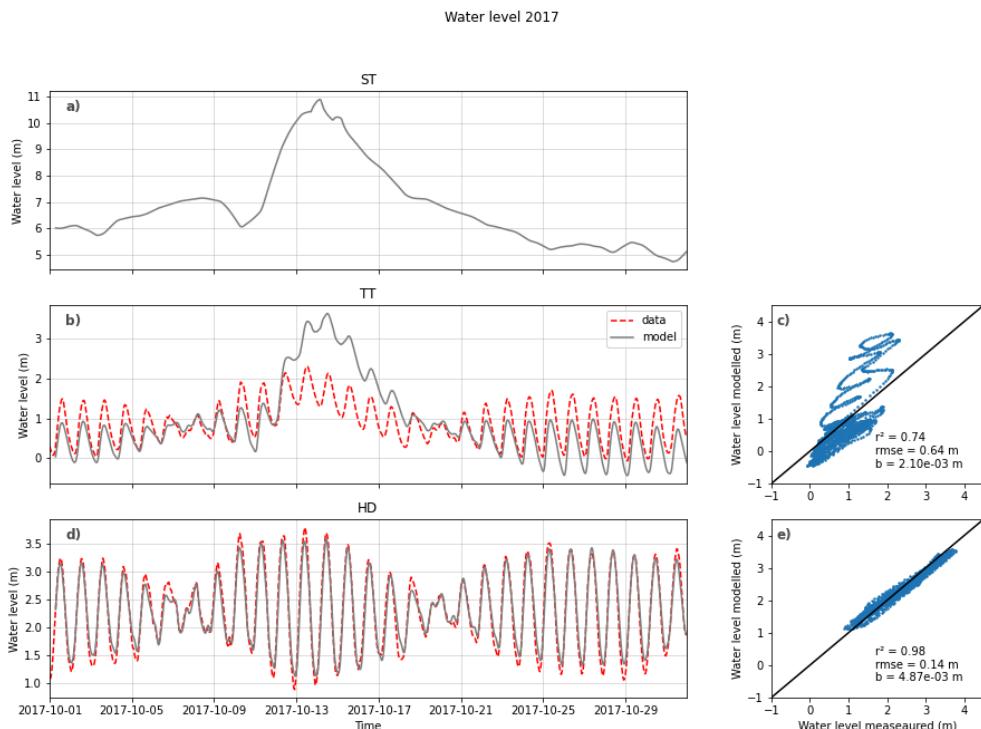


Figure Xcomparaison\_data\_mod : Niveau d'eau aux trois stations de l'amont vers l'aval Son Tay (ST, a), Trung Trang (TT, b) et Hon Dau (HD, d) modélisés (traits pleins gris) et issus des mesures in situ (traits pointillés rouges), ainsi que les corrélations associées (c et e).

Dans cette section, la propagation de la marée a été étudiée en terme temporel et d'amplitude. La haute résolution temporelle du modèle permet de mieux observer à fine échelle la propagation de la marée dans l'estuaire, complétant ainsi les données in situ. Le

modèle confirme l'augmentation significative du temps de propagation des marées basses avec le débit et l'amplitude de marée, et indique une absence de corrélation de la propagation des marées hautes avec le changement d'amplitude de marée, pourtant calculée avec les données horaires in situ. Dans le cas d'une augmentation du débit, la simulation indique un retard de la propagation de la marée haute seulement à l'amont de l'estuaire. Une tendance inverse avait été observée dans le cas des données. Le changement de résolution temporelle peut être responsable de ces modifications, ou bien la limite d'utilisation du modèle. **XXX CONCLURE**

Les stations S1 et S2 situées dans l'estuaire aval, ne montrent pas de tendance à l'amplification ou à l'atténuation du signal de marée. La station S3 montre plutôt une tendance à la conservation de l'amplitude, sauf pour les forts débits, pour lesquels on observe une atténuation. La station de Trung Trang reproduit, pour les faibles débits, la tendance observée dans les données in situ d'atténuation du signal de marée. Cependant, cette station se situe dans le canal 2DV pour qui la seule variable d'ajustement est la hauteur d'eau est donc très sensible aux variations de débit, qui, si elles sont brusques, peuvent déformer le signal de hauteur d'eau (Fig. Xcomparaison\_data\_mod.b). Cela ne permet donc pas de conclure sur l'impact du débit sur la hauteur d'eau à cet endroit. Cette discontinuité entre canal 2D et rivière 3D est une limite de cette configuration, qui met aussi en avant l'apport permis par la modélisation 3D de la rivière.

En dehors des hauts débits, l'observation le long de la rivière 3D a montré que l'amplitude de marée reste constante jusqu'à la station S3, indiquant un estuaire idéal. Durant les vives-eaux, l'amplitude de marée est atténuée à Trung Trang, indiquant l'entrée dans la partie amont de l'estuaire. En cas de haut débit, les amplitudes de marée sont atténuées, car les frottements augmentent, dissipant la marée sur l'ensemble de l'estuaire.

### 3. Vitesses

Cette section décrit le comportement du champ de vitesses ainsi que ses variations au cours du cycle mortes-eaux/vives-eaux et selon le débit, dans l'estuaire et dans la zone côtière de la Van Uc. Pour cela, l'analyse est faite sur des profils de vitesses en plusieurs points de l'estuaire (e.g. Fig. Xvelocity\_vs\_time\_different\_point), sur des cartes 2D de la région estuarienne de l'intensité des vitesses moyennées sur la colonne d'eau (Fig. Xmean\_current\_med\_TR\_med\_Q), sur des vitesses résiduelles à l'embouchure (Fig. Xresidual\_velocity) et enfin sur profils de vitesses issus de différents cycles aux conditions de débit et de marée contrastés (Fig. Xvelocity\_different\_conditions). On rappelle ici la convention concernant les vitesses, qui sont positives quand elles sont dirigées vers le large et négatives quand elles remontent l'estuaire.

#### a. Champ de vitesses à l'échelle du cycle de marée

La Figure Xvelocity\_vs\_time\_different\_point représente l'évolution des vitesses (moyennes, de surface et de fond) au cours de plusieurs cycles situés dans des conditions médianes de débit et d'amplitude de marée, en différents points de l'estuaire. Les figures Xmean\_current\_med\_TR\_med\_Q et Xmean\_current\_med\_TR\_med\_Q2 sont des illustrations du champ des vitesses moyennées sur la colonne d'eau pour un cycle au débit

et à l'amplitude de marée médiane. Les vitesses résiduelles sont calculées sur un cycle de marée et présentées dans la Figure Xresidual\_velocity.

### i. Evolution de la vitesse au cours du cycle de marée

Les vitesses maximales de jusant (vitesses positives) sont atteintes à la fin du jusant sur l'ensemble des stations observées (Fig. Xvelocity\_vs\_time\_different\_point, proche du trait plein vertical gris). La renverse des courants de jusant à courants de flot (vitesses positives à négatives) se produit dans la première moitié du flot, soit entre 3 et 6h après la marée basse (Fig. Xvelocity\_different\_conditions). Les vitesses maximales de flot, i.e. les vitesses minimales, sont atteintes en suivant, à partir de la mi-flot à l'aval et un peu plus tard dans le flot à l'amont (Fig. Xvelocity\_vs\_time\_different\_point). La renverse des courants de flot à jusant (vitesses négatives à positives) a lieu à la marée haute (trait en trait-point), légèrement plus tôt dans les stations en amont. Nous observons que les valeurs des vitesses pics de jusant (positives) sont toujours plus élevées que les vitesses de flot (négatives), et de manière plus évidente dans la couche de surface. Il existe donc une asymétrie entre les vitesses (en valeur absolue) du flot qui sont plus faibles que les valeurs du jusant en tout point du thalweg.

Enfin, les vitesses résiduelles en conditions médianes de débit (courbes oranges, Fig. Xresidual\_velocity) présentent des valeurs plus élevées en surface (0.2-0.5 m/s) que dans le reste de la colonne d'eau (< 0.2 m/s), montrant une large gamme de vitesses résiduelles dans la couche de fond, et montrant la présence d'une circulation estuarienne.

## Median Q Median TR

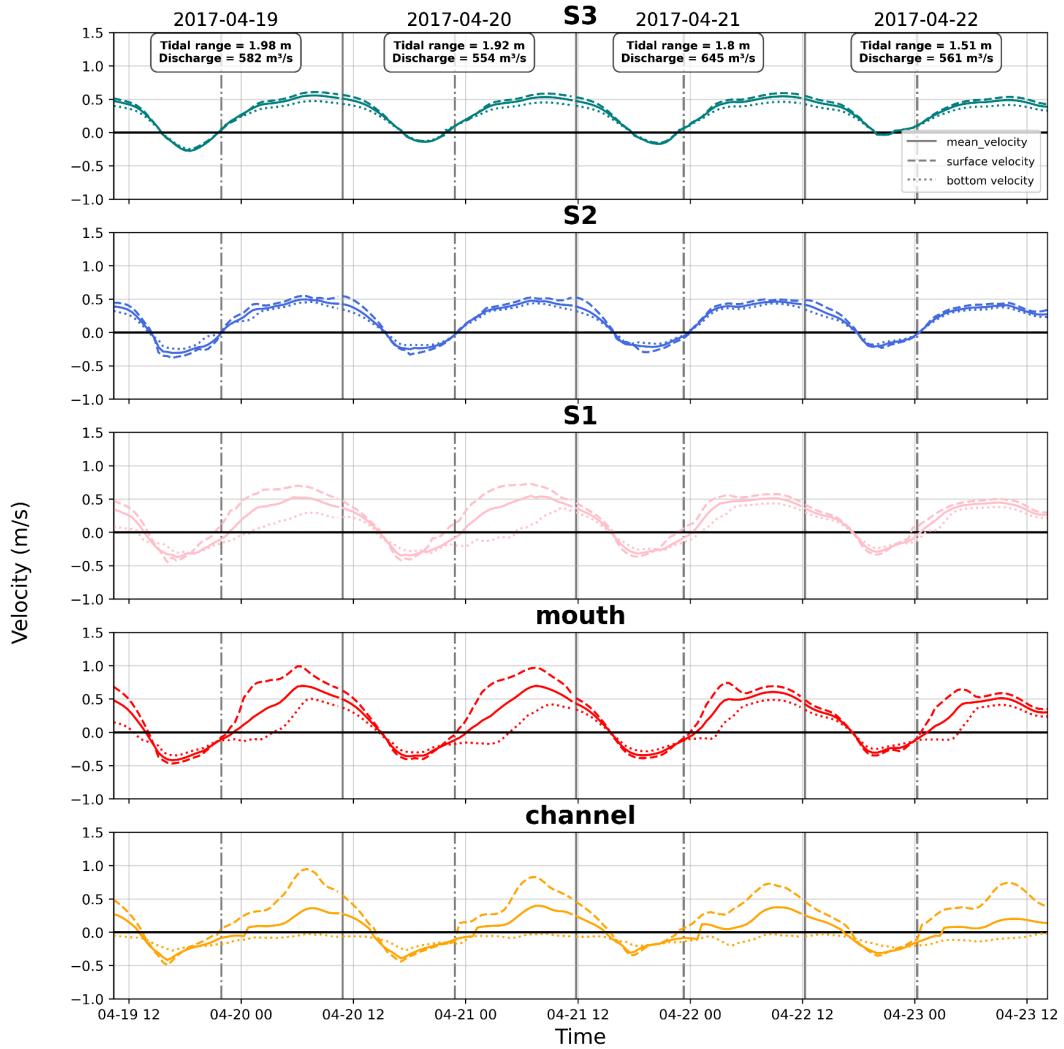


Figure Xvelocity\_vs\_time\_different\_point : Vitesse de surface (traits discontinus), de fond (traits pointillés) et moyennées sur la colonne d'eau (traits pleins) au cours de 4 cycles situés autour des conditions médianes de débit et d'amplitude de marée dont les conditions journalières sont inscrites dans les encadrés situés sous les dates du panel du haut, pour plusieurs stations situées dans le thalweg, ordonnées de l'amont (S3) à l'aval ("channel") (voir Fig. Xloc pour les emplacements des points). Le trait noir horizontal est la vitesse nulle, et les traits verticaux gris indiquent la marée basse (trait plein) et la marée haute (trait en trait-point).

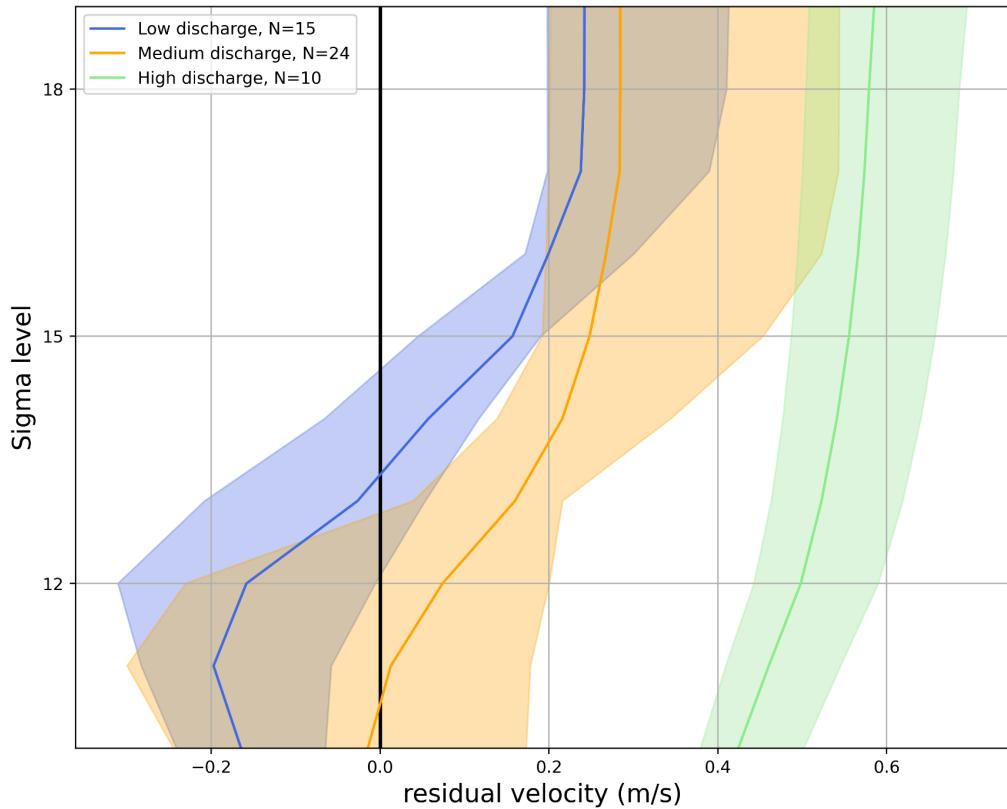


Figure Xresidual\_velocity : Vitesses résiduelles à l'embouchure le long de la colonne d'eau groupées pour des cycles de marées aux conditions de débit semblables (faible en bleu, médian en orange et forts en vert) et d'amplitudes de marée prises dans les 3 conditions (faibles, médianes et fortes). Le trait continu montre la vitesse médiane calculée pour un nombre N de cycle (indiqué dans la légende), et chaque zone colorée constitue les valeurs extrêmes prises pour les cycles de marées agrégés autour du débit. L'ordonnée est indiquée en niveaux sigma, la surface étant en haut, et le fond en bas.

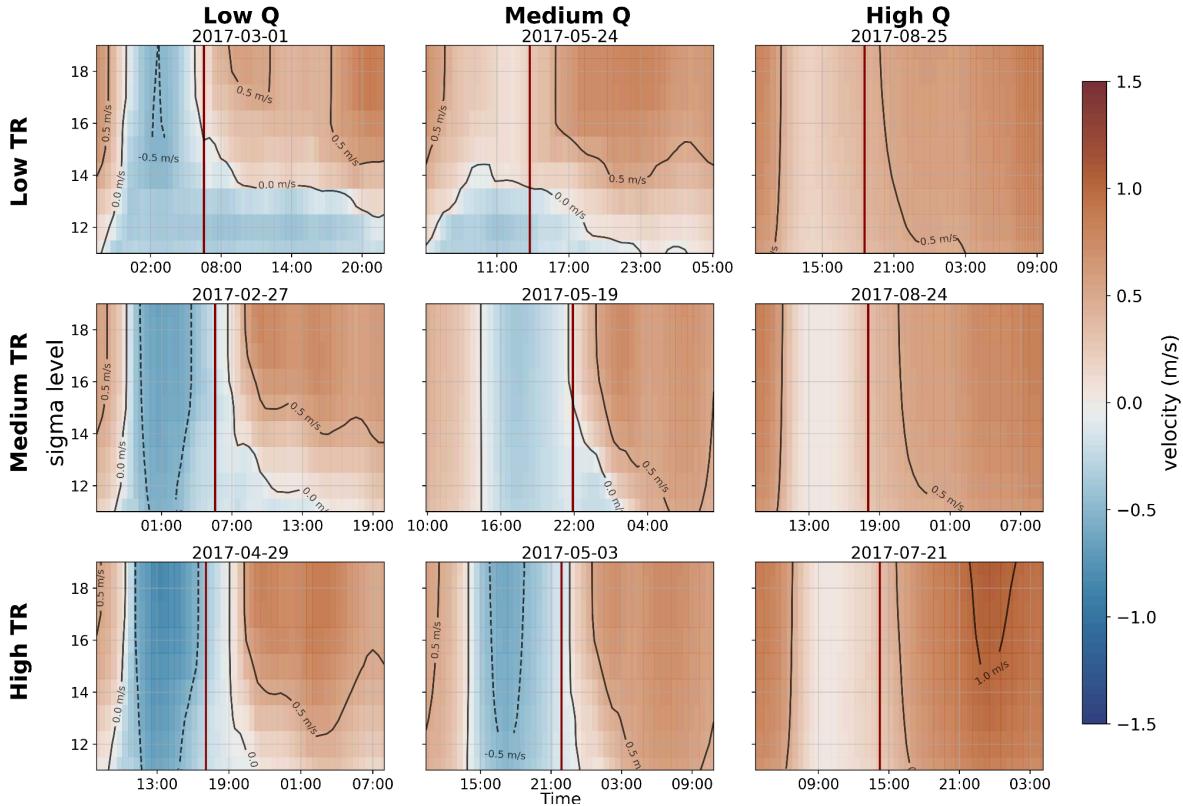


Figure Xvelocity\_different\_conditions : Profils des vitesses instantanées à l'embouchure au cours d'un cycle de marée (de marée basse à marée basse). Les vitesses positives sont celles sortant de l'estuaire, les négatives sont les vitesses entrantes. Les colonnes correspondent à des cycles de débit faible (1ere colonne), médian (2d) et fort (3e), et les lignes présentent des conditions d'amplitude de marée faible (1e), médiane (2d) et haute (3e).

## ii. Evolution spatiale le long du thalweg

De l'amont à l'aval, on observe un comportement différent du champ de vitesse, que ce soit au niveau des durées des courants de flots et de jusants, ou dans la différence entre les vitesses de fond et de surface (Fig. Xvelocity\_vs\_time\_different\_point).

La durée des courants de flots (vitesses négatives) moyennés sur la colonne d'eau (traits pleins) est plus longue à l'aval qu'à l'amont, avec une durée presque nulle dans le cycle du 2017-04-22 en S3 (Fig Xvelocity\_vs\_time\_different\_point). La renverse des courants arrive aussi plus tard à l'amont par rapport à l'aval (~2h plus tard en S3 qu'à l'embouchure "mouth", Fig. Xvelocity\_vs\_time\_different\_point).

Par ailleurs, les vitesses sont plutôt homogènes sur la colonne d'eau dans les stations à l'amont (S2 et S3, Fig. Xvelocity\_vs\_time\_different\_point) avec une intensité vitesse de surface (traits discontinus) très légèrement supérieure aux vitesses de fond (traits pointillés), et des renverses de courants se produisant au même moment en surface et en profondeur. Pour les stations S1, "mouth" et "channel", on note un comportement différent entre la couche de surface et la couche de fond, différence qui s'accentue en allant vers l'aval (entre S1 et "channel"). Dans la couche de fond, la durée des courants de flot augmente, jusqu'à

être négative en permanence dans la station “channel” (Fig. Xvelocity\_vs\_time\_different\_point, bas). À la station S1 et à l’embouchure, l’écoulement de la couche de fond est orienté vers l’amont sur plus de la moitié du cycle de marée, et une circulation bidirectionnelle avec une couche de surface s’écoulant vers la mer et une couche de fond vers la terre a lieu entre la marée haute et la mi-jusant.

Les vitesses de flots sont légèrement plus faible à l’amont qu’à l’aval (voir le dernier cycle entre S1 et mouth), et leurs valeurs sont similaires sur l’ensemble de la couche. Au contraire, et en raison de la circulation estuarienne existant à l’aval de l’estuaire, les vitesses pics de flots sont très distinctes entre le fond et la surface. Par ailleurs, les valeurs des vitesses pics se produisant à la fin du jusant connaissent une forte variabilité spatiale. Les vitesses de surface sont bien plus élevées à l’embouchure qu’à l’amont (<0.5 m/s en S1, >0.8 m/s à l’embouchure).

### iii. Changements spatiaux dans la zone côtière

À l’échelle de la zone côtière près de l’embouchure, on observe une grande différence entre la région des bancs découvrants et celle de la rivière et du chenal (Fig. Xmean\_current\_med\_TR\_med\_Q). Les vitesses moyennes sont plus élevées dans la rivière et son chenal prolongeant sa partie aval, correspondant aux zones plus profondes (voir la bathymétrie sur Fig. Xloc). Sur différents cycles aux conditions identiques, on observe aussi plus de variabilité dans la circulation sur la région peu profonde, qui est plus sensible au vent, par exemple. La marée haute est la période montrant le plus de variabilité dans l’orientation des vitesses instantanées (Fig. Xmean\_current\_med\_TR\_med\_Q2 et Fig. Xmean\_current\_med\_TR\_med\_Q2 à marée haute), où les faibles intensités de vitesses rendent les vitesses plus soumises au vent et aux vagues locales.

L’intensité des vitesses est minimale autour de la marée haute sur l’ensemble de la zone. Au contraire, les autres périodes illustrées montrent des vitesses plus fortes dans la rivière et dans son prolongement, qui correspond au chenal plus profond. Les vitesses sont orientées vers le sud-est, soit vers le large, de manière semblable pour la mi-jusant et à marée basse (Fig. Xmean\_current\_med\_TR\_med\_Q). Au contraire, durant la mi-flot et la marée haute, la circulation sur la région peu profonde est orientée plutôt vers le sud-ouest, bien que bien moins intense à marée haute. A la mi-flot, les vitesses remontent le chenal et rentrent dans la Van Uc. Hormis la circulation à marée haute, ces constats sont similaires pour l’ensemble des cycles aux conditions médianes observées (e.g. Fig. Xmean\_current\_med\_TR\_med\_Q et Fig. Xmean\_current\_med\_TR\_med\_Q2).

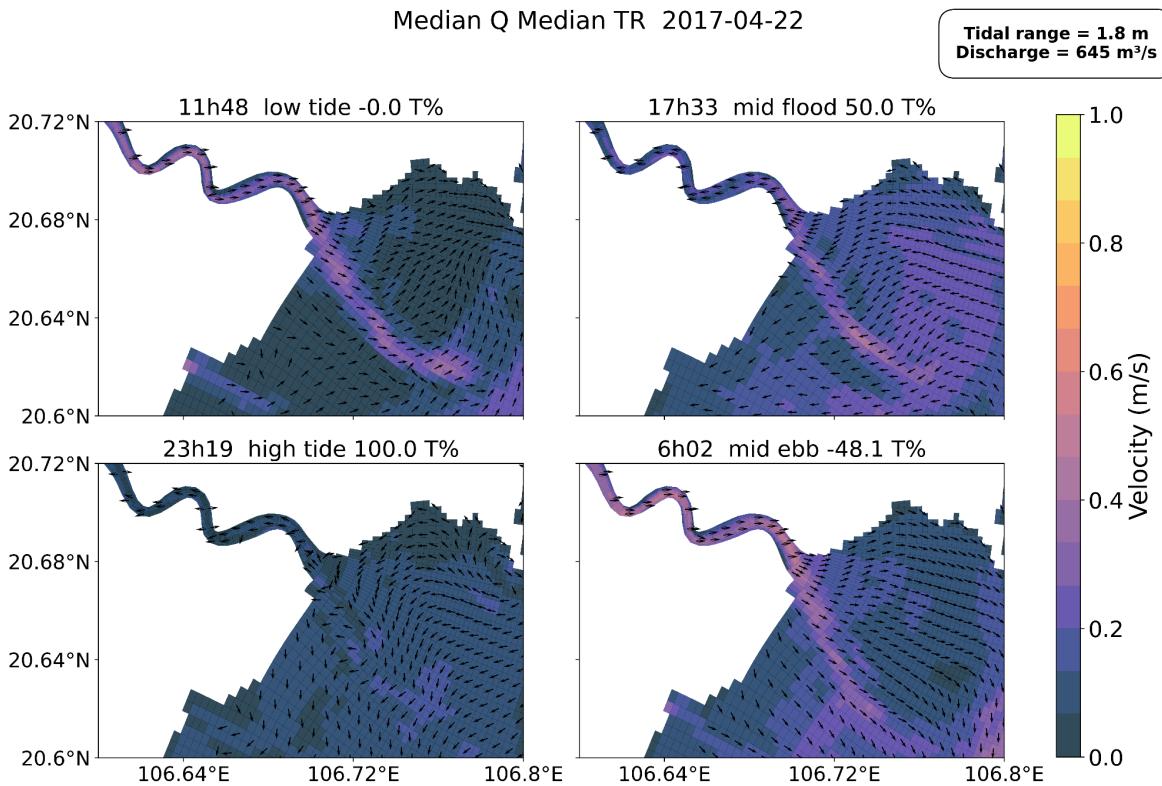


Figure Xmean\_current\_med\_TR\_med\_Q : Vitesses instantanées lors de la marée basse, mi-flot, marée haute et mi-jusant pour un cycle de marée aux amplitudes de marée et débit médian. La couleur représente l'intensité du champ de vitesse et les flèches montrent l'orientation des vitesses.

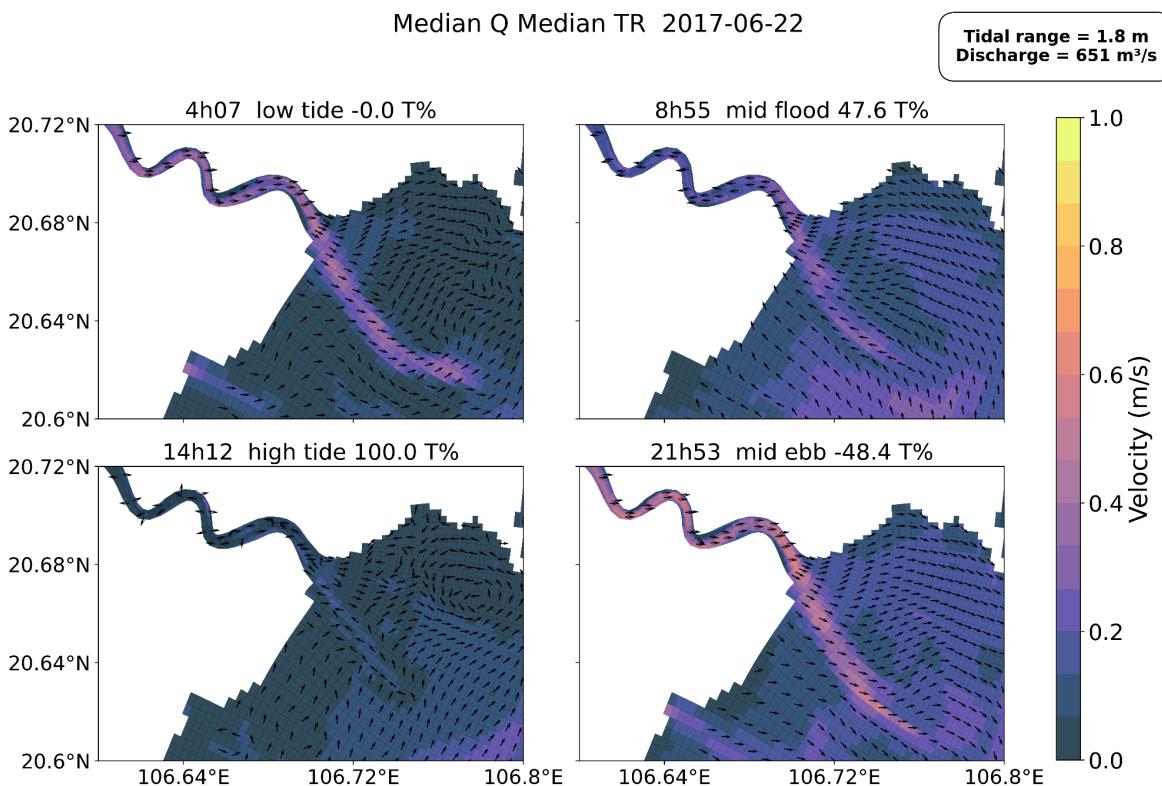


Figure Xmean\_current\_med\_TR\_med\_Q2 : Pareil à Xmean\_current\_med\_TR\_med\_Q, pour un autre cycle aux conditions de marée et de débit médianes.

Dans des conditions de débit et de marée médianes, l'estuaire de la Van Uc connaît une renverse des courants sur les 30 km étudiés. Les vitesses de flot sont plus faibles que les vitesses de jusant sur l'ensemble du thalweg. La durée des courants de flot est aussi plus courte que la durée des courants de jusant pour les vitesses moyennées sur la colonne d'eau. Il existe donc une asymétrie entre les durées de courants de flot et de jusant, avec un flot plus court et des vitesses plus faibles que les valeurs du jusant, en valeur absolue, ce en tout point du thalweg. On distingue aisément une partie amont de l'estuaire (ici, S2 et S3), où la marée a moins d'influence : les courants de flot sont plus faibles en intensité, plus courts et plus tardifs, et les vitesses sont homogènes sur l'ensemble de la colonne d'eau. A partir de la station S1 et plus en aval, la marée a plus d'influence. Les courants de flots durent plus longtemps pour l'ensemble des couches, et les couches de surface et de fond ont des comportements différents. La vitesse de surface est plus élevée que la vitesse de fond, et la renverse est bien plus tardive dans la couche de fond, les courants de jusant y sont donc bien plus courts par rapport à la couche de surface. À la station située dans le chenal, en aval de l'embouchure, dans les conditions médianes, les courants de fond sont toujours orientés vers le large. Il existe donc une circulation bidirectionnelle sur une partie du cycle de marée pour ces stations en aval.

## b. Vitesses à l'échelle du cycle mortes-eaux/vives-eaux

Les cycles présentés dans la figure Xvelocity\_vs\_time\_different\_point\_severalTR montrent cinq cycles de marée dans des conditions de débits autour des valeurs médianes (bien que plus faibles sur les derniers cycles) et des conditions d'amplitude de marée évoluant de vives-eaux vers les mortes-eaux.

Alors qu'une forte amplitude de marée augmente à la fois l'intensité des vitesses de flot et la durée des courants de flots (premier cycle), une faible amplitude de marée tend à réduire les oscillations de vitesses au cours du cycle de marée, ne produisant pas forcément de retournement de courant à l'amont, montrant la dominance du débit fluvial par rapport à la marée à cet endroit. Les vitesses sont faibles (<0.5 m/s sur l'ensemble des stations), et uniformément orientées vers l'aval sur la colonne d'eau pour les stations amont S2 et S3. À partir de la station S1, les derniers cycles montrent une couche inférieure dont l'écoulement est orienté vers l'amont en continu, probablement car les mortes-eaux génèrent moins de mélange et encourage une plus forte stratification, et permettant à une circulation estuarienne de se mettre en place. À l'embouchure, une circulation bidirectionnelle est en effet installée pour des amplitudes de marée faibles ou médianes, illustré dans les panels d'amplitude de marée faibles et médianes de la Fig. Xvelocity\_different\_conditions.

Dans des conditions de débit médian, l'amplitude de marée est responsable d'une forte dispersion des vitesses résiduelles à l'embouchure (non montré). Les vives-eaux ont des vitesses résiduelles plus homogènes sur la colonne d'eau et généralement positives, que les mortes-eaux, pour lesquelles les vitesses de surface vont de 0.2 à 0.5 m/s, et les vitesses de la couche de fond sont autour de -0.1 m/s.

Durant les mortes-eaux, une circulation bidirectionnelle est observée sur la partie aval de l'estuaire sur une grande partie du cycle de marée, avec une reverse des courants se

produisant sur la couche de surface. La période des vives-eaux est elle propice à une renverse des courants sur l'ensemble de la colonne d'eau et sur l'ensemble du thalweg.

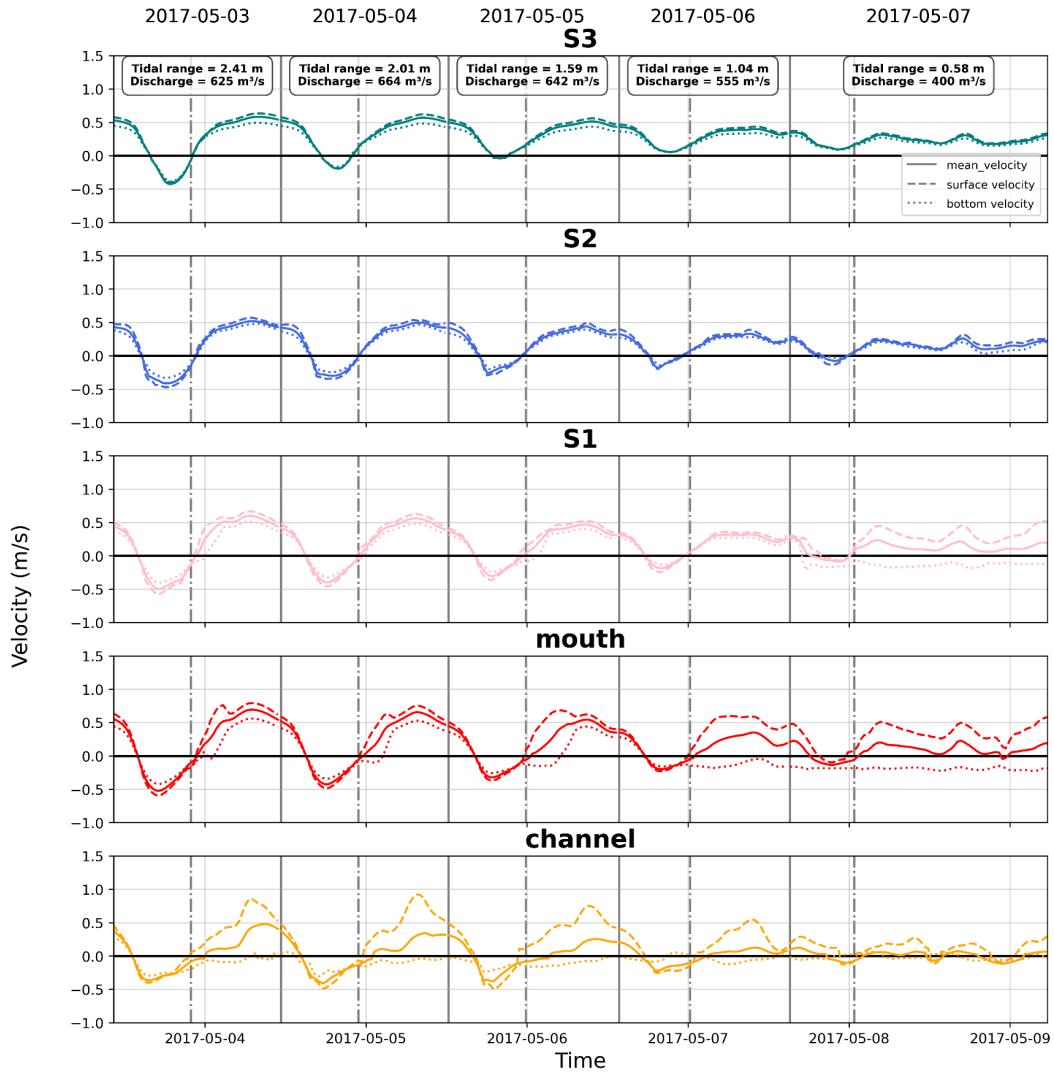


Figure Xvelocity\_vs\_time\_different\_point\_severalTR : Vitesse de surface (traits discontinus), de fond (traits pointillés) et moyennées sur la colonne d'eau (traits pleins) au cours de 5 cycles situés autour des conditions médianes de débit et des amplitudes de marées variant entre 2.41 m (vives-eaux) et 0.58 m (mortes-eaux) (les conditions journalières sont inscrites dans les encadrés situés sous les dates du panel du haut), pour plusieurs stations situées dans le thalweg (voir Fig. Xloc pour les emplacements des points). Le trait noir horizontal est la vitesse nulle, et les traits verticaux indiquent la marée basse (trait gris plein) et la marée haute (trait en trait-point gris).

### c. Echelle saisonnière : l'impact du débit

Cette partie s'attache à comprendre les variations induites par le débit. Pour cela, les cycles présentés dans les figures Xvelocity\_vs\_time\_different\_point\_medTR\_lowQ,

Xvelocity\_vs\_time\_different\_point et Xvelocity\_vs\_time\_different\_point\_medTR\_highQ sont utilisés, car présentant des conditions médianes d'amplitude de marée, et des débits contrastés, de faible à forts. Les vitesses résiduelles agrégées par conditions de débit de la figure Xresidual\_velocity sont aussi comparées.

### i. Conditions de faibles débits

En condition de faible débit et amplitude de marée moyenne, on observe une renverse des courants à tous les cycles (Fig. Xvelocity\_vs\_time\_different\_point\_medTR\_lowQ). Les vitesses pics de flot sont identiques entre les stations, et l'intensité des vitesses pics des vitesses moyennées sur la colonne sont égales entre jusant et flot (0.5 m/s en valeur absolue). Le champ des vitesses est identique sur la colonne d'eau pour la station S3. On observe la même chose sur les deux premiers cycles de marée de S2. Durant les deux derniers cycles de marée représentés en Fig. Xvelocity\_vs\_time\_different\_point\_medTR\_lowQ, en S2, on observe une couche de fond moins rapide que la couche de surface, dont le comportement se rapproche plus des stations situées plus en aval. L'amplitude de marée diminuant, l'augmentation de la différence entre les vitesses des couches de fond et de surface, observé en section TODO REF SECTION se propage plus à l'amont. Les stations à l'aval (S1, "mouth" et "channel") ont toujours une vitesse de surface supérieure à la vitesse de fond, et on observe une vitesse de fond < 0.25 m/s, qui est même souvent négative, signifiant une circulation bicouche et bidirectionnelle sur la durée du cycle, hormis lorsque la couche de surface est orientée vers l'aval (c'est-à-dire environ 6h).

On observe une augmentation à la fois de la durée des courants de flots et une augmentation de l'intensité des vitesses de flot pour les conditions de débit faible par rapport à des conditions de débit médian. Cela correspond à une diminution de l'asymétrie existante sur la durée et sur les valeurs pics de vitesse en condition de débit médiane. Les vitesses de jusant restent du même ordre (~0.5 m/s) entre les situations de débit médian ou faible. Il y a aussi une différence plus forte entre les couches de surface et de fond dans les stations à l'aval, avec une couche de fond aux valeurs très faibles et souvent négatives jusqu'à la station S1. Les conditions de faible débit, en diminuant grandement la vitesse de la couche de fond, ont donc tendance à accentuer la différence entre les couches de fond et de surface, et instaurent une circulation bidirectionnelle sur les stations aval, dès la station S1. Ainsi, les faibles débits déplacent la limite de circulation bicouche plus en amont : ces conditions amènent la situation rencontrée à la station "channel" en condition de débit médians, à la station S1, soit 8 km plus en amont.

## Low Q Median TR

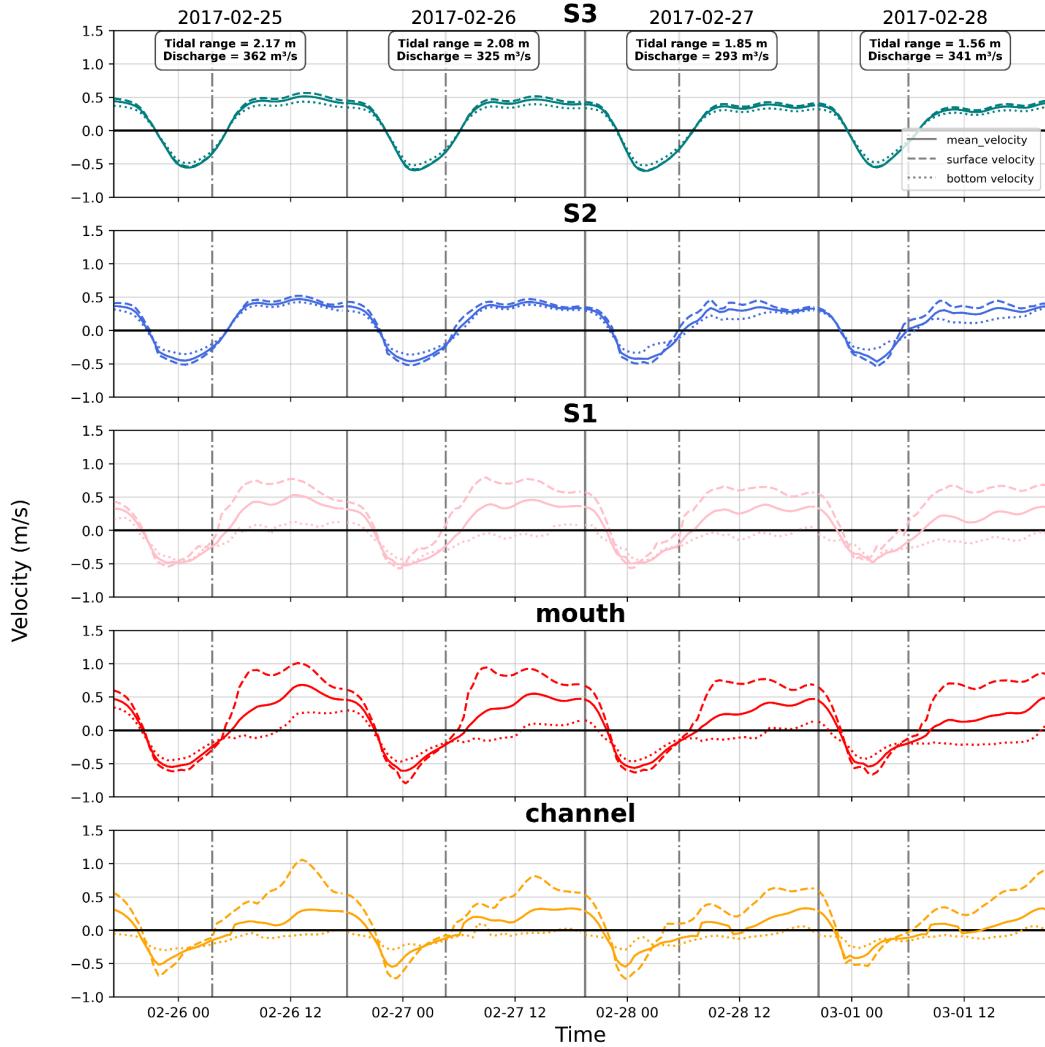


Figure `Xvelocity_vs_time_different_point_medTR_lowQ` : Pareil à Figure `Xvelocity_vs_time_different_point_medTR_highQ`, mais en conditions de débit faible et amplitude de marée médiane.

### ii. Conditions de forts débits

En condition de très haut débit, les variations du champ de vitesse dû à la marée sont lissées sur l'ensemble des stations, quoique plus fortement à l'amont (Fig. `Xvelocity_vs_time_different_point_medTR_highQ`). On n'observe donc que très peu de différence d'amplitude entre les vitesses minimales et maximales, situées entre 0.7 m/s et 1.1 m/s pour la station S3, et 0.0 et 1.0 m/s à l'embouchure. Les vitesses sont positives pour l'ensemble des cycles présentés entre l'embouchure et S3. Les cycles présentés ici représentent tout de même des conditions de marée contrastées, entre 0.46 m et 2.38 m. On observe donc une influence plus prononcée de la marée, comme ce qui a été décrit dans

**TODO REF paragraphe précédent**, avec plus de variations dans le cas du 21 juillet 2017 avec une amplitude de marée de 2.38 m.

La différence de vitesse des couches de surface et de fond est faible, bien que l'on continue d'observer une vitesse de surface > vitesse de fond, surtout à l'aval.

Les vitesses de la station située dans le chenal sont faibles, < 0.5 m/s par rapport à des conditions de débit médian. La couche de fond possède toutefois des vitesses négatives sur la totalité des deux premiers cycles. Avec l'augmentation de l'amplitude de marée, passant à > 1.88 m, des renverses de courants s'opèrent, sur environ 6h du cycle, entre la fin du jusant et le début du flot.

Les vitesses résiduelles à l'embouchure sont très influencées par le débit : un fort débit résulte en des vitesses positives élevées (0.4 m/s sur la couche de fond et 0.6 m/s sur la partie supérieure de la colonne d'eau). Un débit faible résulte en des vitesses résiduelles de 0.2 m/s pour la couche supérieure et de -0.15 m/s pour les niveaux de la couche inférieure.

## High Q Median TR

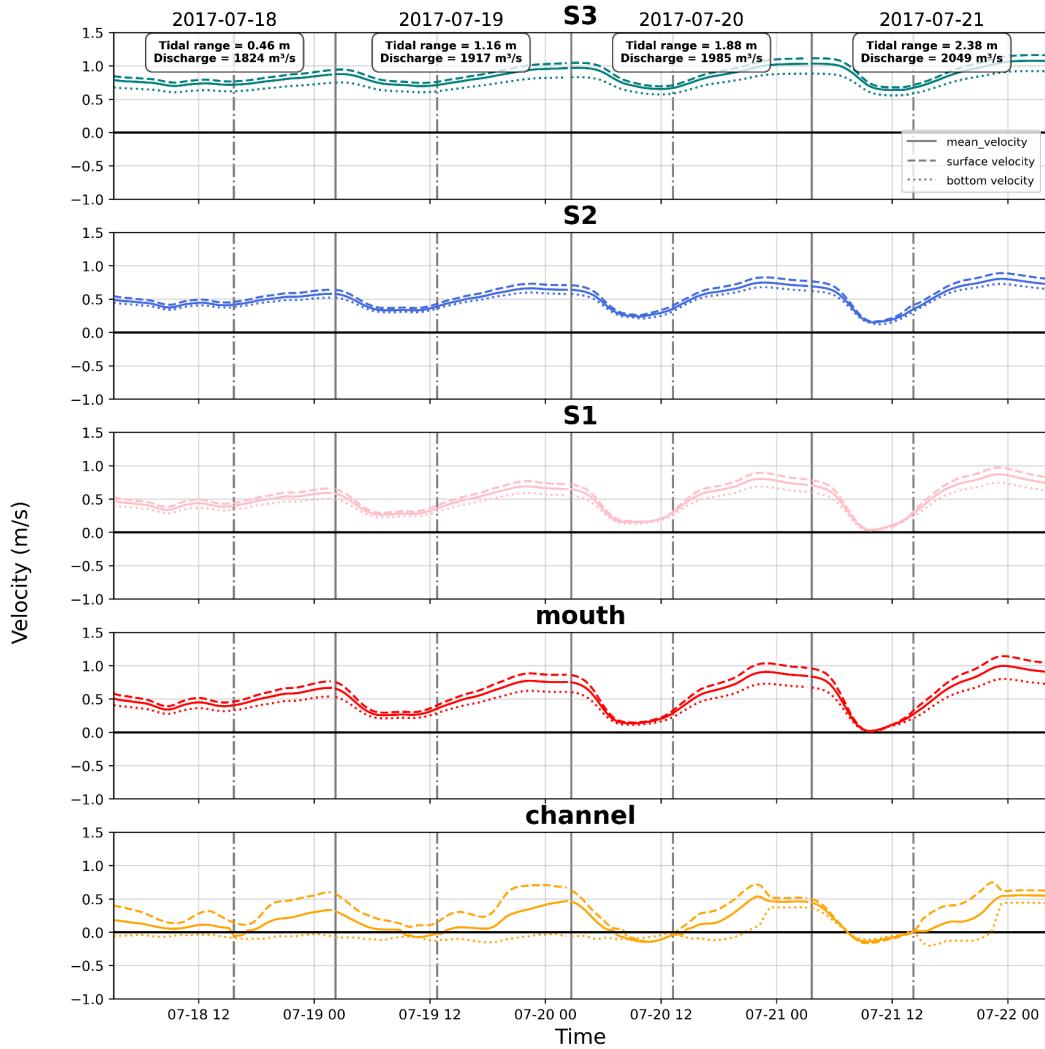


Figure Xvelocity\_vs\_time\_different\_point\_medTR\_highQ : Pareil à Figure Xvelocity\_vs\_time\_different\_point\_highTR, mais en conditions de débit fort et amplitude de marée médiane.

## 4. Salinité

L'étude du champ de la salinité s'est faite en deux temps : l'analyse de l'intrusion saline dans un premier temps, et la stratification ensuite. Les indicateurs utilisés sont les valeurs médianes des paramètres étudiés et le coefficient de variation CV, dont la formule est la suivante :

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} * 100 \% \quad (1)$$

avec  $\sigma$  l'écart-type et  $\mu$  la moyenne.

## a. Intrusion saline

L'intrusion saline est la distance de pénétration de la salinité de la couche de fond dans l'estuaire dans le chenal principal. La valeur seuil prise est 1 PSU (TODO CITE Uncles et Stephens, 1993). La **longueur d'intrusion saline** donne donc la distance de la maille la plus amont pour laquelle la salinité est supérieure ou égale à 1 PSU. Cette valeur est calculée le long du thalweg (trait noir, Fig. Xloc) pour la couche de fond, à chaque pas de temps, afin de déterminer le moment de la marée pour laquelle l'intrusion saline est maximale. La figure Xhovmoller présente l'évolution de la salinité sur l'année simulée le long du thalweg. L'autre paramètre étudié est l'excursion de la salinité, c'est-à-dire la dynamique de l'incursion de la salinité, soit la différence entre la longueur d'intrusion minimale et maximale au cours du même cycle, qui est appelée **excursion saline**. Cette partie s'attache à étudier les variations de la salinité avec l'amplitude de marée et le débit à l'échelle du cycle de mortes-eaux/vives-eaux et à l'échelle annuelle.

### i. Variations avec la marée

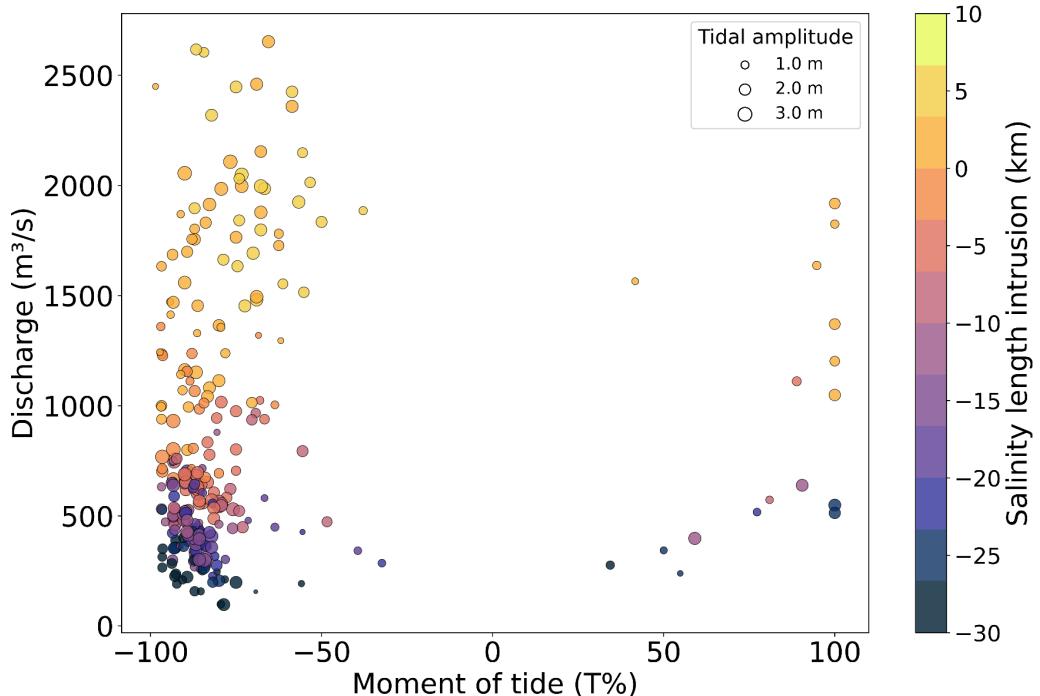


Figure Xmoment\_max\_intrusion : Moment de la marée pour laquelle l'intrusion saline est maximale en fonction du débit. Les couleurs représentent le débit et la taille des cercles l'amplitude de marée.

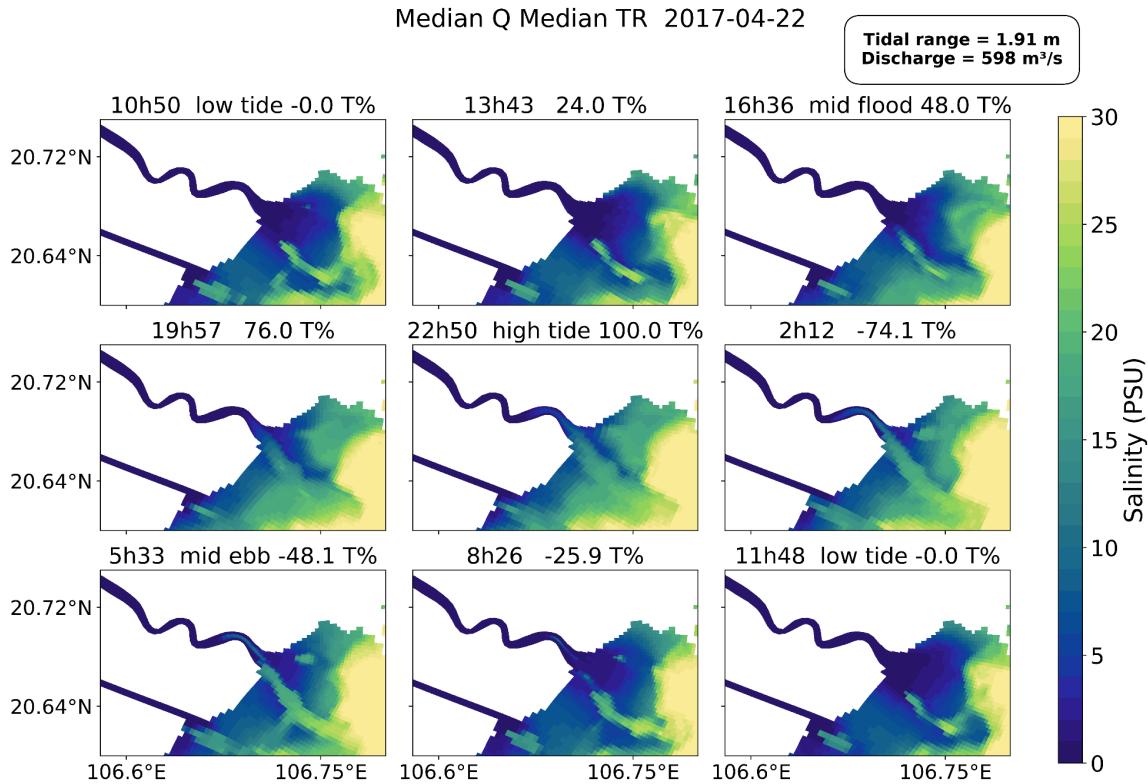


Figure Xsalinité\_map : Carte 2D de la salinité de la couche de fond dans la zone de l'embouchure de la Van Uc à différents moments d'un cycle de marée aux conditions médianes de débit et d'amplitude de marée.

La figure Xmoment\_max\_intrusion rapporte le moment et la longueur de l'intrusion maximale, si un maximum au cours d'un cycle de marée existe, en fonction du moment de la marée (en T%) et de l'amplitude de marée.

À l'échelle de la marée, l'intrusion saline est maximale au moment en début de jusant (-85 T%, Fig. Xmoment\_max\_intrusion), et minimal autour de la marée basse. Le moment correspondant de la marée évolue peu avec l'amplitude de la marée (taille des cercles, Fig. Xmoment\_max\_intrusion).

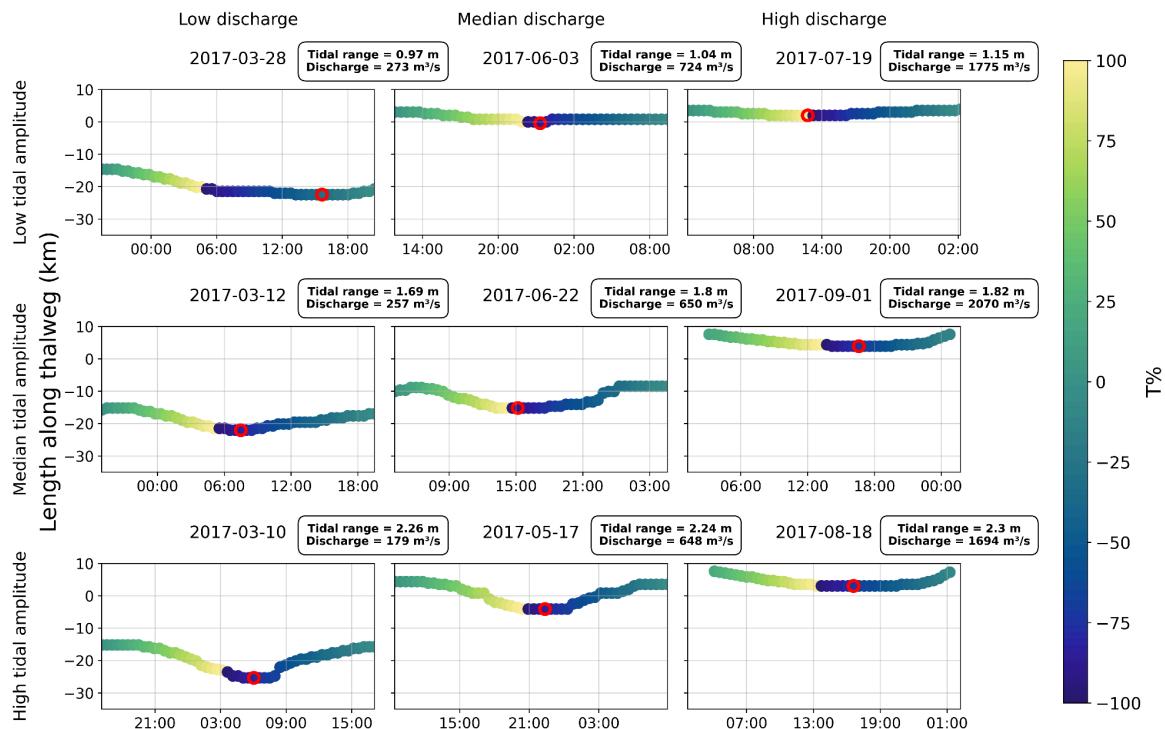


Figure Xintrusionlength\_along\_cycle : Intrusion saline au cours d'un cycle de marée (de marée basse 0T% à la marée basse suivante) pour des situations contrastées en débit (colonne) et l'amplitude de marée (lignes). Les débits faibles/médians/forts sont ceux correspondant aux valeurs des percentiles des 10/50/90 % de l'année (+/-50 m<sup>3</sup>/s) et les amplitudes de marée sont calculés autour des quartiles 0.25/0.5/0.75 (+/- 0.15 m). Le cercle rouge montre la longueur maximale d'intrusion saline. Les distances sont comptées négativement quand elles remontent dans l'estuaire, positivement quand elles sont en aval de l'embouchure, déterminée sur la Fig. Xloc.

La figure Xintrusionlength\_along\_cycle montre des exemples d'évolution d'intrusion saline en conditions contrastées de marée et de débit sur l'année 2017. La dynamique de l'incursion de la salinité, soit la différence entre la longueur d'intrusion minimale et maximale au cours du même cycle appelée **excursion saline**, varie d'un cycle à l'autre de la marée. En effet, dans certains cycles, l'intrusion saline évolue de plusieurs kilomètres avec la marée, surtout lors des vives-eaux et faible débit (Fig. Xintrusionlength\_along\_cycle colonne), dans d'autres, le front salin reste à peu près au même endroit, notamment en cas de faibles amplitudes de marée (Fig. Xintrusionlength\_along\_cycle ligne 1) et de fort débit (dernière colonne). La sensibilité à ces facteurs est discutée ensuite.

## ii. Sensibilité au cycle de mortes-eaux vives-eaux

L'excursion saline est relevée pour un certain nombre de cycles aux conditions de marées et de débit différents, et les médianes calculées pour chaque cycle de marée sont répertoriées dans le tableau Xexcursion. Pour des conditions similaires, l'excursion est relativement proche sur les différents cycles (CV < 50 %). Elle est plus grande durant les vives-eaux, quel que soit le débit, évoluant par exemple entre 4.2 km en faible amplitude de marée et 9.7 km

en forte amplitude de marée en condition de débit médian (Tableau Xexcursion, Fig. Xintrusionlength\_along\_cycle, colonne du milieu).

Tableau Xexcursion : Médiennes et coefficient de variation des excursions calculées pour des conditions de marée et de débit variées, ainsi que le nombre de cycles comptabilisés (N) pour chaque type de conditions.

Discharge conditions	Low Q		Median Q		High Q	
Tidal amplitude condition	N	Excursion (km) / CV (%)	N	Excursion (km) / CV (%)	N	Excursion (km) / CV (%)
Low tidal amplitude	8	5.4 / 22.4	8	4.2 / 44.3	2	2.1 / 7.7
Median tidal amplitude	6	7.3 / 16.5	8	7.6 / 23.1	5	4.0 / 9.6
High tidal amplitude	5	10.2 / 8.0	10	9.7 / 32.3	4	4.1 / 14.1

Généralement, la longueur d'intrusion saline, i.e. la position du front salin, est plus grande durant les marées de vives-eaux, en comparaison des mortes-eaux pour l'ensemble des conditions de marées (Fig. Xintrusionlength\_along\_cycle). Par exemple, l'illustration proposée dans la figure Xintrusionlength\_along\_cycle pour des conditions de débit médian (autour de 650 m<sup>3</sup>/s), la position maximale du front salin est de 0 km à amplitude de marée faible et de -5 km en cas de forte amplitude (colonne du milieu de la Fig. Xintrusionlength\_along\_cycle).

Concernant la longueur maximale de l'intrusion saline, la position absolue évolue beaucoup d'un cycle à l'autre, selon le débit, comme présenté dans le paragraphe suivant. Par ailleurs, l'évolution de l'intrusion saline due au cycle mortes-eaux/vives-eaux est visible sur la figure Xhovmoller à la fréquence de 14 jours, que l'on voit apparaître de manière plus marquée durant la saison sèche.

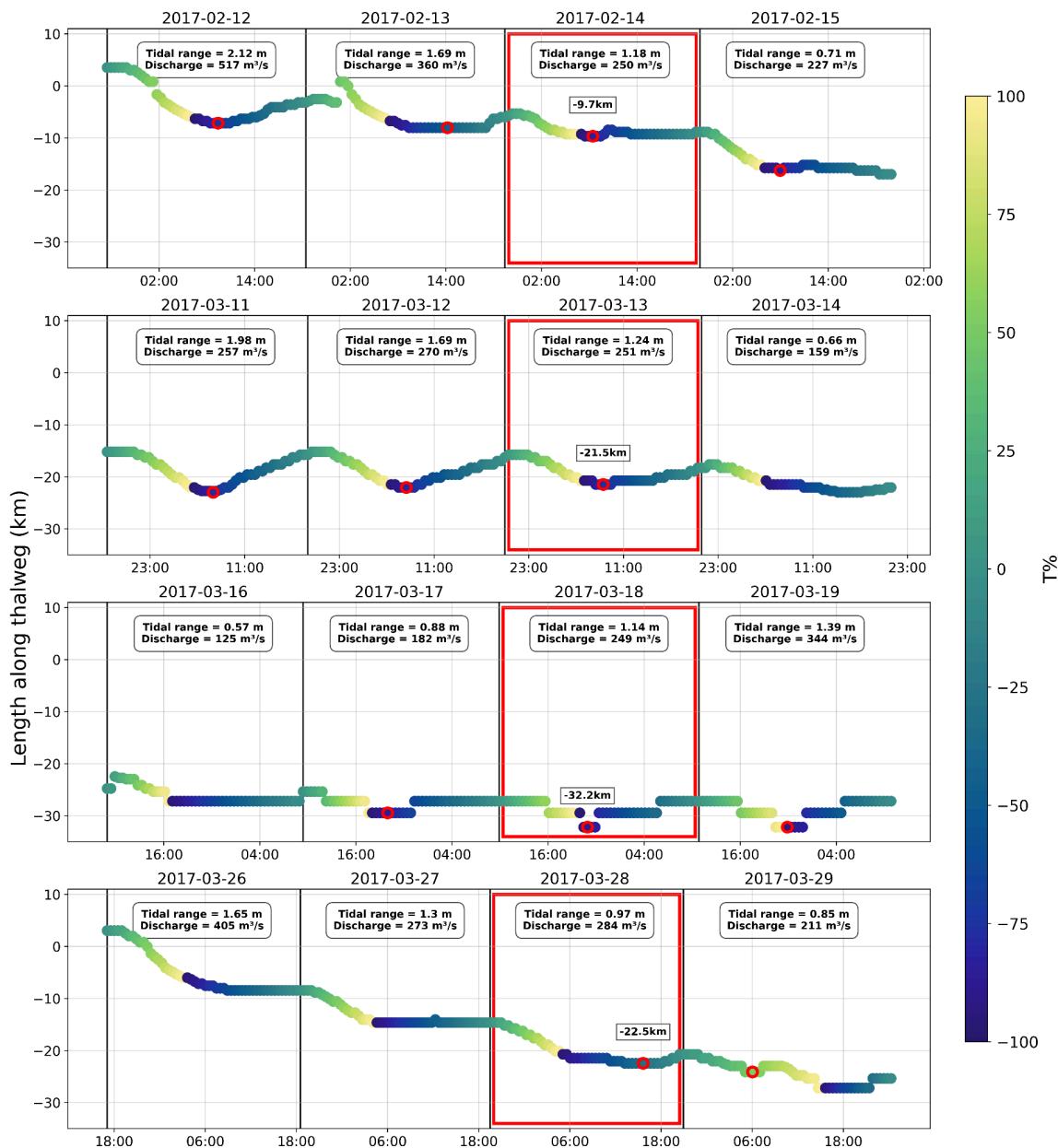


Figure Xdifferent\_same\_conditions : Évolution de l'intrusion saline de plusieurs cycles de marée consécutifs amenant à des conditions similaires lors du 3e cycle de marée (encadré rouge) pour lesquels les excursions de la salinité sont semblables, mais avec des positions maximales du front salin différentes. Les marées basses sont marquées par les axes verticaux noirs, et les conditions de marée et de débit de chaque cycle sont inscrites dans les encadrés.

### iii. L'impact du saisonnier, i.e. du débit sur l'intrusion saline

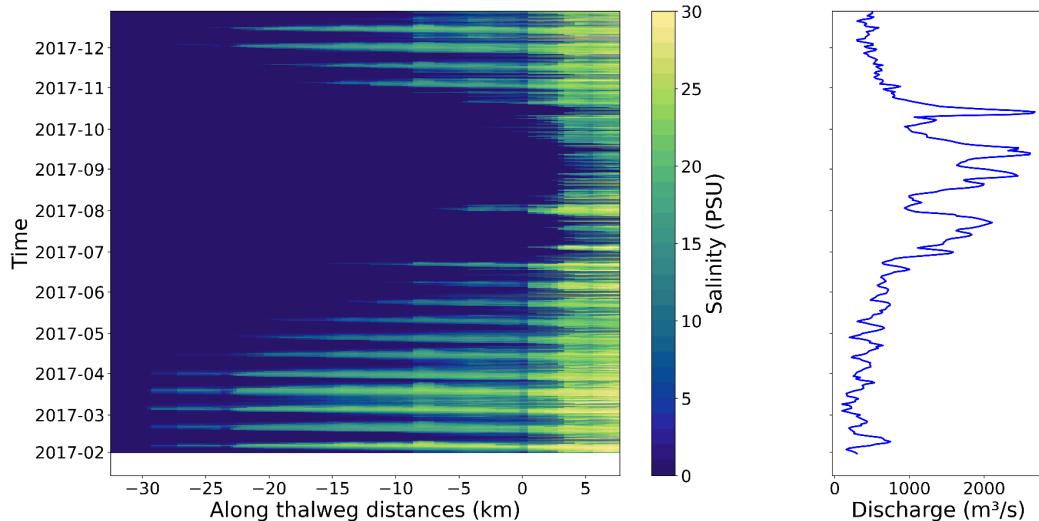


Figure Xhovmoller : Diagramme de Hovmoller de l'évolution de l'intrusion saline sur l'année 2017 sur une coupe longitudinale de l'estuaire de la Van Uc (a) et le débit journalier à la station de Trung Trang (b).

L'excursion saline est sensible au débit, dont les valeurs sont plus grandes à débit faible et médian, qu'en haut débit. En effet, les hauts débits réduisent grandement l'excursion de la salinité, la réduisant à moins de 4.1 km pour les différentes conditions de marée étudiées (Fig. Xintrusionlength\_along\_cycle, Tableau Xexcursion).

Le débit module fortement la longueur d'intrusion saline (Fig. Xmoment\_max\_intrusion), allant jusqu'à confiner la salinité à l'extérieur de l'estuaire (distances > 0 km) pour les débits particulièrement forts (juillet à octobre, Fig. Xhovmoller, Fig. Xintrusion\_salinevsdischarge). Le débit est le premier moteur de l'intrusion saline, et on comptabilise 96 cycles de marées sur les 319 (30.0 % des cas) où la salinité ne dépasse pas l'embouchure (Fig. Xloc). À l'inverse, sur l'année, la longueur d'intrusion saline maximale est de 35 km, correspondant à un débit particulièrement faible (< 150 m<sup>3</sup>/s) (Fig. Xintrusion\_salinevsdischarge). Pour un débit < 250 m<sup>3</sup>/s, les longueurs d'intrusion saline sont toutes supérieures à 20 km dans l'estuaire.

Cependant, même à conditions équivalentes, la longueur maximale d'intrusion saline diffère d'un cycle à l'autre. En effet, les jours précédents les cycles étudiés impactent beaucoup la position du front salin, et c'est ainsi que l'on explique que l'intrusion en condition médiane de débit et de marée présente une intrusion maximale plus élevée que l'intrusion en condition de forte amplitude de marée dans la figure Xintrusionlength\_along\_cycle.

La figure Xdifferent\_same\_conditions présente quatre exemples de cycle à faible amplitude de marée et faible débit, avec les cycles précédents et suivant le cycle sélectionné. Alors que le front salin du premier exemple est positionné à -9.7 km, les deuxième et quatrième cycle ont un front positionné autour de -22 km. Les débits sont en effet plus forts les jours précédents le premier cycle (> 360 m<sup>3</sup>/s) par rapport aux deux autres cycles (< 273 m<sup>3</sup>/s le jour précédent) et donc le front salin ne peut pas remonter jusqu'à la position de 22 km. À

l'inverse, le troisième cycle (qui se produit d'ailleurs juste après le second temporellement parlant) cumule six jours à un débit  $< 260 \text{ m}^3/\text{s}$ , et enregistre donc une position maximale du front salin bien plus en amont dans l'estuaire (-32.2 km).

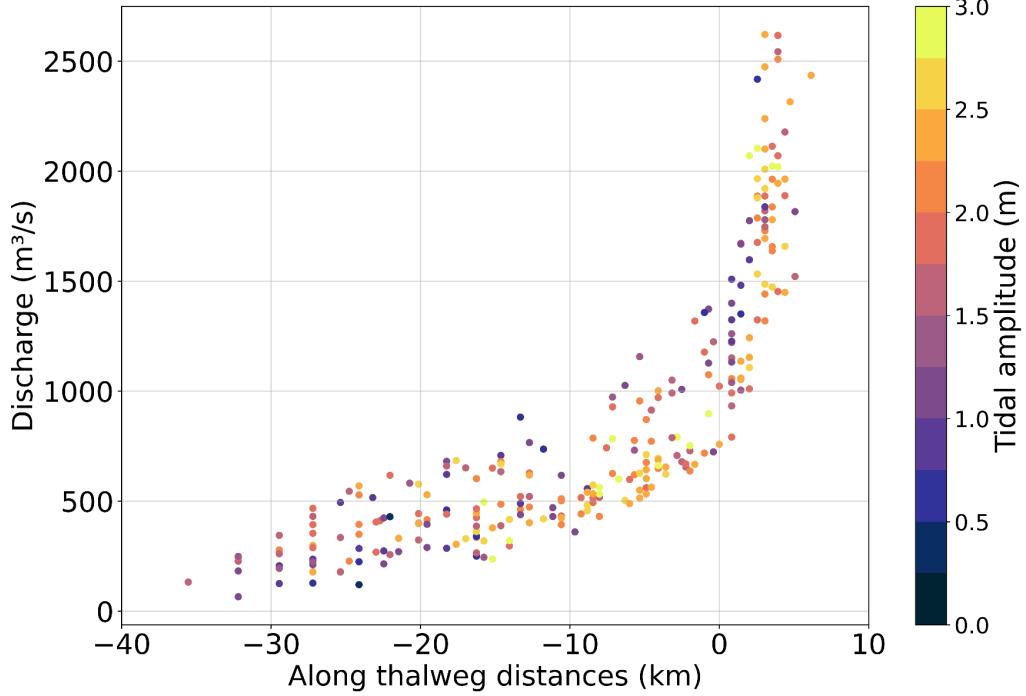


Figure Xintrusion\_salinevsdischarge : Longueur d'intrusion saline maximale par cycle en fonction du débit. Les amplitudes de marées sont indiquées en couleurs.

Dans l'estuaire de la Van Uc, l'intrusion saline est pilotée à la fois par le débit et par la marée. Un fort débit réduit l'excursion saline ( $< 4\text{km}$ ) tandis qu'une augmentation de l'amplitude de marée l'augmente ( $\sim 10\text{ km}$  en condition de débit médiane ou faible). En augmentant l'excursion saline, les fortes amplitudes de marée tendent donc à repousser la limite d'intrusion saline plus en amont. Le débit a cependant un rôle prépondérant sur la position du front salin dans l'estuaire, les forts débits pouvant interdire l'entrée de la salinité au-delà dans l'embouchure (30 % des cycles étudiés). On remarque d'ailleurs un comportement similaire pour des débits  $> 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ , pour lesquels la salinité reste autour de 5 km en aval de l'embouchure (Fig. Xintrusion\_salinevsdischarge). À l'inverse, c'est lors des faibles débits que l'on retrouve les longueurs d'intrusion saline les plus élevées ( $> 20\text{ km}$ ). Les longueurs d'intrusion maximales se produisent lors de débits faibles durant plusieurs jours, montrant ainsi l'importance des cycles précédents sur la position du front salin.

Lors des campagnes de 2022, nous avons suivi le front salin. Pour des conditions de vives-eaux identiques entre les campagnes, mais plus fortes que les vives-eaux de 2017 \cite{piton2020seasonal} (TODO REF SECTION) et autour de la marée haute, nous avons en effet observé une limite du front salin très différente. Durant ces campagnes, les positions du maximum d'intrusion saline sont tout de même mesurée en amont de l'embouchure, allant de 13 km dans l'estuaire pour des conditions de débit de 649 et 930  $\text{m}^3/\text{s}$ , à 4 km pour un débit de 1737  $\text{m}^3/\text{s}$  (pourtant précédé de 25 jours aux débits  $> 860 \text{ m}^3/\text{s}$ ). On rappelle que l'année 2017 présente des amplitudes de vives-eaux faibles par rapport à 2022, pouvant

expliquer que l'on ne trouve pas la limite de l'intrusion saline en aval de l'embouchure lors des campagnes de juin 2022.

## b. Stratification

La stratification est étudiée à partir de deux indicateurs : la différence entre le fond et la surface, présenté dans les figures Xcarte\_diff\_sal\_surf\_bot, et des radiales à différentes conditions de marées. Là encore, les échelles temporelles d'intérêt sont celles du cycle de mortes eaux et vives-eaux, et les variations saisonnières.

- i. Variations avec la marée
- ii. Sensibilité au cycle de mortes-eaux vives-eaux
- iii. Variations saisonnières de la stratification

## 5. Conclusion

Le modèle a permis d'approfondir les connaissances sur l'estuaire de la Van Uc, complétant celles acquises à partir des campagnes de mesures in situ de 2017 et 2022.

La propagation de la marée dans l'estuaire, étudiée dans la section TODO SECTION, concorde avec le modèle, et confirme une asymétrie de marée, dépendante de l'amplitude de marée au premier ordre, et fortement impactée par les très forts débits.

L'intrusion saline a été trouvée être maximale en début de jusant ( $X_h$  après la marée haute dans X% des cas), ce paramètre étant/n'étant pas modulé par l'amplitude de marée ou le débit. Le cycle mortes-eaux/vives-eaux s'est trouvé efficace pour moduler d'environ  $X_{km}$  en moyenne cette intrusion. Au niveau annuel, les campagnes de mesure avaient déjà mis en lumière une forte sensibilité au débit sur la longueur d'intrusion saline (pas d'intrusion saline dans l'estuaire durant les campagnes de saison humide de 2017 et une intrusion remontant à plus de 30 km de l'estuaire en saison sèche et vives-eaux). Le modèle a permis, sur l'ensemble de l'année 2017, d'estimer/quantifier? l'intrusion saline maximale à l'échelle saisonnière, s'affranchissant des aléas de la mesure et révélant clairement une dépendance de cette longueur au débit au premier ordre.

La haute résolution à la fois spatiale et temporelle du modèle nous a permis de suivre l'évolution de la stratification au sein de l'estuaire. Les variations saisonnières nettes de la stratification en différents points de l'estuaire, montrées par \cite{piton202}, sont largement confirmées par le modèle, lié aux variations de l'intrusion saline décrites précédemment. Les campagnes de 2017 avaient montré un changement de stratification significatif à l'échelle du cycle mortes-eaux/vives-eaux, de très stratifié sur l'ensemble du cycle tidal en mortes-eaux à une alternance entre des conditions homogènes non salé et partiellement mélangé. Le modèle reproduit bien ces changements, et nous a permis de quantifier le rôle du débit et de la marée dans cette stratification, déterminant ainsi la stratification dominante de l'estuaire.

Cette étude a mis en exergue que le débit est un acteur majeur de l'hydrodynamique de cet estuaire tropical. Les variations de débit qui dirigent l'intrusion saline et donc la stratification, et qui impactent la propagation de la marée, sont dépendantes d'une part du forçage

climatique et d'autre part des activités anthropiques (notamment les barrages qui régulent le débit). Le forçage climatique évolue à plusieurs échelles de temps : au niveau interannuel, des années sèches ou humides sont observées en lien avec la mousson sud asiatique et l'ENSO (TODO CITE Vinh et al 2014, Gao et al 2015) ; au niveau long terme, le changement climatique tendrait vers une augmentation des pluies sur le bassin versant du Fleuve Rouge (\cite{Cooper\_Houghton\_McCarthy\_Metz\_2002} IPCC, 2001 TODO CITE), résultant en une augmentation significative du débit du Fleuve Rouge en saison humide (+25% en juillet et août) (\cite{Duong\_Nauditt\_Phong\_2016}).

Cette étude a permis d'approfondir les connaissances sur le comportement de l'estuaire à différentes échelles à la fois temporelle et spatiale, et sert de base pour un autre volet de caractérisation de l'estuaire, car l'hydrodynamique pilote le transport sédimentaire estuaire.

Dans cette partie, nous avons montré l'impact du débit et de l'amplitude de marée sur l'hydrodynamique de l'estuaire de la Van Uc. Le chapitre TODO REF montrait quant à lui la variabilité de ces deux facteurs de variabilité dans la région de la Van Uc. Une modélisation sur l'échelle interannuelle permettrait de quantifier la variation induite par ces variations. À des fins opérationnelles, de telles simulations pourraient permettre de prédire le nombre de jours avec une longueur d'intrusion saline supérieure à un certain seuil.

Cette échelle serait aussi intéressante dans le travail de transport sédimentaire, montrant les années aux tendances à l'import ou export de sédiment, et l'impact d'une année sur l'autre. Les variations des temps de résidence des sédiments pourraient aussi montrer des motifs sur le plus long terme. Les résultats de cette étude pourraient constituer une base de travail sur les contaminants, certains de ceux-ci s'adsorbant sur les sédiments.

POUR autre chapitre :

Le travail sur le transport sédimentaire peut répondre à des questions pratiques et à des besoins de gestion côtière ou portuaire, comme la navigabilité de l'estuaire, sa tendance à l'accrétion ou à l'érosion, les périodes préférentielles d'export ou d'import de sédiments etc.

La quantité de sédiments transportée par le Fleuve Rouge a très fortement diminué depuis la mise en place de barrages depuis le milieu du 20e siècle (\cite{vinh2014impact}, \cite{lu2015sediment}).