



Caractérisation de l'hydrodynamisme des plages et des petits fonds du littoral au sud de l'estuaire de la Gironde à partir de mesures *in situ*

Marine VANDENHOVE ^{1,2}, Bruno CASTELLE ¹, Alexandre NICOLAE LERMA ²,
Vincent MARIEU ¹, Ivana MINGO ^{1,2}, Arthur ROBINET ², Kévin MARTINS ⁴,
Stéphane BUJAN ¹, Vincent MAZEIRAUD ³

1. Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, EPOC, UMR 5805, F-33600 Pessac, France.
2. BRGM, Direction Régionale Nouvelle-Aquitaine, Parc Technologique Europarc, 24 avenue Léonard de Vinci, 33600 Pessac, France.
3. Communauté de Communes Médoc Atlantique, 9 rue du Maréchal d'Ornano, 33780 Soulac-sur-Mer, France.
4. UMR 6250 LIENSs CNRS-Université de La Rochelle, Institut du Littoral et de l'Environnement, 2 rue Olympe de Gouges, 17000 La Rochelle, France.

Résumé :

Le littoral Nord-Médoc, situé au sud de l'estuaire de la Gironde, est soumis à des conditions hydrodynamiques complexes, résultant de l'interaction entre des houles énergétiques et des courants tidaux intenses au sein d'un environnement alternant platiers rocheux, bancs de sables et chenaux de marée. La résultante est un gradient hydrodynamique latitudinal influençant fortement l'évolution morphologique de la côte. Une campagne de mesures de deux semaines a été menée en automne 2022 pour caractériser pour la première fois *in situ* cette dynamique. Les données ont été collectées le long de trois profils cross-shore s'étendant des petits fonds à l'estran. Les résultats issus de courantomètres profileurs (i.e. ADCP, Aquadopp) et de capteurs de pression ont pu montrer une prédominance des courants tidaux sur l'ensemble du site d'étude (i.e. courants longitudinaux), avec une intensification notable du nord vers le sud. Cette tendance se caractérise par une dominance des courants de flot au Nord, tandis que le jusant domine au sud et au centre du domaine d'étude. Les observations sur les vagues et les courants, en plus d'apporter des éléments de compréhension inédits sur les dynamiques hydro-sédimentaires, constituent une base de données indispensable à la validation des modèles de circulation et les prévisions d'évolution du trait de côte dans cette région soumise à une érosion chronique.

Mots-clés :

Mesures *in situ*, Hydrodynamique, Erosion côtière, Large embouchure, Estuaire de la Gironde, Nord Médoc.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

1. Introduction

Les littoraux sableux adjacents aux embouchures représentent des environnements d'un intérêt majeur, non seulement pour le développement urbain côtier, mais également pour les activités récréatives. Ils sont typiquement caractérisés par des évolutions morphologiques beaucoup plus rapides et complexes que les littoraux ouverts (CASTELLE *et al.*, 2022). Ces évolutions sont le résultat de l'interaction entre des forces externes telles que les vagues et les marées avec des processus internes tels que la migration de bancs de sable (FITZGERALD, 1984; ELIAS *et al.*, 2019). La zone littorale Nord-Médoc (Sud-Ouest de la France) étudiée ici s'étend sur un linéaire côtier de 14,5 km au sud de l'estuaire macrotidal de la Gironde. La compréhension de la variabilité spatiale et temporelle de ces forçages hydrodynamiques, particulièrement à l'échelle des cycles de marée, demeure encore largement incomplète. Une campagne de mesures ambitieuse a été entreprise au niveau des petits fonds et de l'estran, dans le but de mettre en lumière la variabilité spatiale des forçages hydrodynamiques.

2. Campagne de terrain

2.1 Site d'étude

Le littoral du Nord Médoc est une côte sableuse qui s'étend de la Pointe de Grave à la Pointe de la Négade (Figure 1), à proximité de l'estuaire de la Gironde, un estuaire à grande emprise spatiale. Le régime de marée y est semi-diurne et macrotidal avec un marnage variant de 1,5 m en mortes eaux à 5,5 m en vives eaux (CASTAING & ALLEN, 1981). Le volume du prisme de marée est estimé de $1,1 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ lors des marées de mortes eaux et de $2 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ lors des marées de vives eaux (ALLEN *et al.*, 1974). Ceci entraîne des courants de marée atteignant des vitesses allant jusqu'à 1 m/s près de la côte (HOWA, 1987). Ce littoral est également soumis à l'action de vagues énergétiques en provenance de l'Atlantique Nord, dont l'intensité varie selon les saisons. Les mesures et modèles numériques de vagues indiquent une direction dominante O-NO (O) en juillet (janvier), avec une hauteur significative moyenne des vagues de 1,1 m (2,4 m) à la bouée Cap-Ferret (CASTELLE *et al.*, 2017). En raison d'un plateau continental plus large et peu profond, et de la présence de formations rocheuses sous-marines au large et de bancs sableux d'embouchure, les conditions de vagues à la côte sont fortement influencées par la morphologie des petits fonds. L'angle des vagues dominant entraîne une dérive littorale nette dirigée vers le N-E (IDIER *et al.*, 2013 ; HOWA, 1997) au niveau du littoral Nord-Médoc, divergeant au niveau de la Pointe de la Négade (Figure 1), pour que cette dernière soit globalement dirigée vers le Sud, sur le reste de la côte de Gironde.

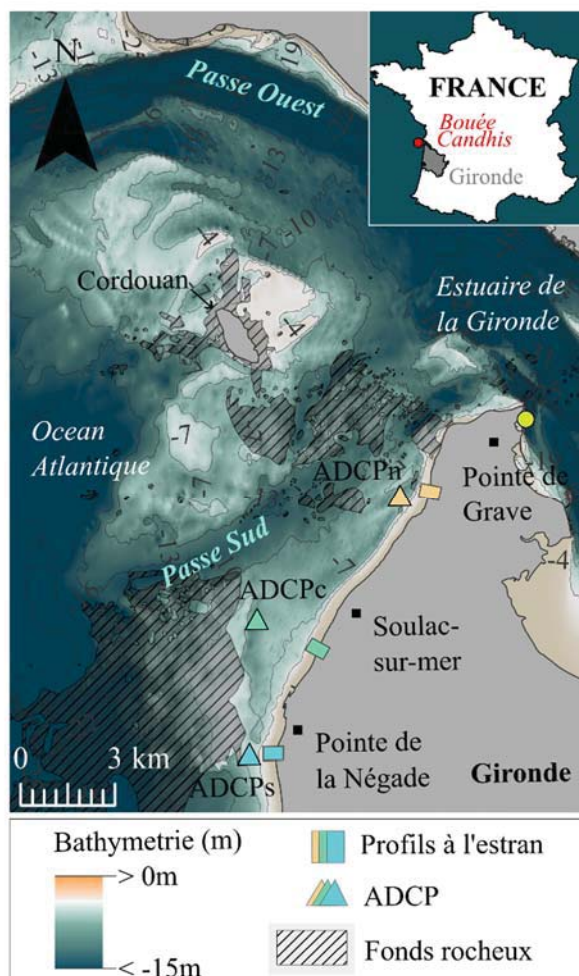


Figure 1. Carte du site d'étude avec bathymétrie de 2016 (source: SHOM). Les bancs rocheux y sont représentés en rayé noir. Les zones d'expérimentation y sont localisées (profil nord: orange; profil central: en vert ; profil sud : en bleu). Les instruments au niveau des petits fonds sont représentés grâce aux triangles et ceux au niveau de l'estran (capteurs de pression et Aquadopplers profileurs) sont réunis sous la forme de rectangles à la côte. Le marégraphe de Port-Bloc est indiqué par le rond jaune.

2.2 Protocole expérimental

Une campagne de mesure a été menée du 12 au 26 septembre 2022, couvrant à la fois les zones des petits fonds et de l'estran sur trois transects distribués le long de la côte (Figure 1). Pendant cette période et sur chacun des transects, un profileur de courant acoustique *Acoustic Doppler Current Profilers* (ADCP) a été déployé au fond à environ 9-10 m en dessous du niveau moyen des mers. Dans la continuité de chacun des transects, un deuxième profileur de courant acoustique (« *Aquadopp* ») a été positionné au niveau de l'estran, accompagné de trois capteurs de pression. Un quatrième capteur de pression est venu compléter les mesures au niveau du profil central. L'ADCPc, l'ADCPs ainsi que les capteurs de pression ont enregistré en continu à une fréquence de 2 Hz. L'ADCPn, ayant

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

des spécificités techniques particulières, a effectué des mesures toutes les 30 minutes, à 1 Hz pendant 10 minutes, puis à 2 Hz pendant 20 minutes. En outre, les *Aquadop* installés au niveau de l'estran ont enregistré en continu à 1 Hz, mais ont fourni des données moyennées en interne pour obtenir une seule valeur toutes les 10 minutes. Le système de positionnement par satellites GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) a été utilisé en début et en fin de campagne pour déterminer la position des instruments avec précision et mener des relevés topographiques. Ce système a également été utilisé à chaque marée basse pour obtenir les variations d'élévation de la plage à travers un profil par jour. A marée basse, la hauteur entre chaque capteur et le niveau de la plage a aussi été mesurée tous les jours.

2.3 Courants

Les données de courants ont été obtenues grâce aux profileurs de courant, *ADCP* et *Aquadop*, mesurant les vitesses in situ le long de la colonne d'eau à des positions fixes. Afin de permettre une analyse locale des courants longitudinaux et transversaux, les vitesses, initialement mesurées dans un système de coordonnées Nord-Est (i.e. *ENU*), ont été converties en un système de coordonnées local u , v , aligné sur la direction maximale des courants pour les stations au large et sur la direction de la côte pour celles au niveau de l'estran. Enfin, une moyenne glissante de 10 minutes a été appliquée aux mesures d'*ADCP* pour estimer les courants moyens et s'aligner avec les données des *Aquadop*, déjà moyennées en interne sur cette période.

2.4 Vagues

Les variations d'élévation de la marée, de la hauteur significative de vagues ainsi que de la période pic des vagues, ont été calculées grâce aux capteurs de pression, après reconstruction de la surface libre. Basée sur les principes de la théorie linéaire des vagues, une méthode de reconstruction hydrostatique a été utilisée pour estimer les variations temporelles de l'élévation de la surface de libre due à la marée pour tous les capteurs de pression (i.e. 10 instruments) dont ceux compris au sein des courantomètres (i.e. 6 instruments). Ceci permet d'obtenir les variations de profondeur dans le temps, corrigées de la hauteur des capteurs par rapport au fond. Une méthode linéaire non hydrostatique (i.e. la fonction de transfert) a été appliquée sur les trois capteurs de pression des *ADCP* dans les petits fonds. Au niveau de l'estran, la méthode non linéaire de BONNETON *et al.*, (2018) a été utilisée. Les paramètres spectraux des vagues : hauteur significative H_{m0} (m) et période pic associée T_p (s), ont ensuite été calculés sur des fenêtres de 20 min à partir des élévations reconstruites de la surface libre. L'angle d'incidence des vagues θ a également été estimé par la méthode d'HERBERS *et al.*, (1999).

2.5 Données contextuelles disponibles

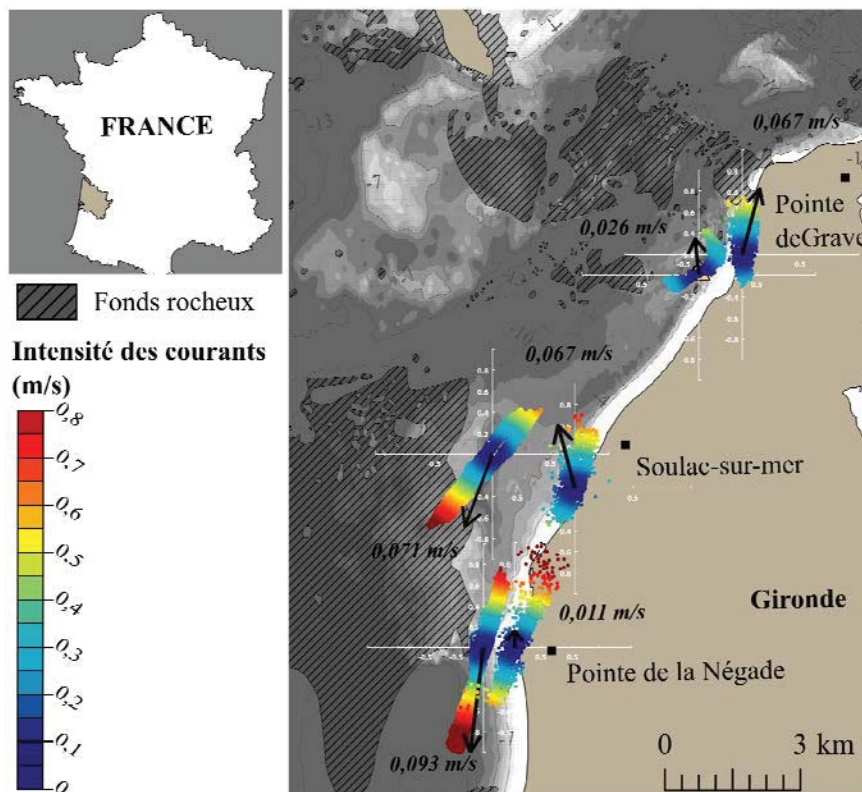
Des données provenant d'autres projets ou organismes scientifiques ont été utilisées pour enrichir notre base de données. Tout d'abord, la carte bathymétrique de 2016, réalisée lors du projet TANDEM (SHOM) et qui couvre l'ensemble de l'estuaire externe, a été essentielle pour élaborer en amont la stratégie de déploiement et constitue un support à l'analyse. Des cartes bathymétriques plus récentes (2019 et 2021) de la passe sud, mises à disposition par la communauté de communes Médoc Atlantique (CDCMA), ont permis de confirmer les principales caractéristiques géomorphologiques observées sur celle de 2016. La cartographie des bancs rocheux, en Figure 1, a également été fournie par la CDCMA. Des données de niveau d'eau obtenues au marégraphe situé au nord du site d'étude (Port Bloc), ont également été utilisées. Enfin, les valeurs d' H_{m0} , T_p et D_p (direction associée à la fréquence pic) au large, ont été fournies par la bouée directionnelle n°01704 (Oléron) du réseau CANDHIS, située à 30 km au nord-ouest de notre site d'étude, par 50 mètres de profondeur.

3. Résultats

La Figure 2 illustre les données de courants totaux mesurés pendant la campagne de mesures. Les données révèlent un gradient latitudinal marqué de l'intensité des courants, avec des valeurs plus élevées au sud et diminuant vers le nord. Les courants longitudinaux dominent par rapport aux courants transversaux au niveau de toutes les stations de mesure. Cependant, ce sont les courants longitudinaux dans le sens du jusant (Nord-Sud) qui prévalent pour les stations au niveau des petits fonds au centre (ADCPc) et au sud (ADCPs), alors que ce sont ceux dans le sens de flot (Sud-Nord) qui dominent pour la station Nord (ADCPn) et les stations au niveau de l'estran. Ainsi les mesures indiquent des valeurs moyennes de jusant (flot) offshore, de 0,41 m/s (0,28 m/s) à la Station Sud, 0,36 m/s (0,27 m/s) à la Station Central, et 0,13 m/s (0,14 m/s) à la station Nord. Au niveau des estrans, les valeurs de jusant (flot) sont quant à elles de 0,22 m/s (0,30 m/s) au Sud, 0,15 m/s (0,21 m/s) au centre et 0,09 m/s (0,17 m/s) au Nord. Les vitesses des courants résiduels sont représentées dans la Figure 2 et s'alignent sur les tendances explicitées ci-dessus. Pour des marnages similaires, la durée de la marée montante est de 6,40 h au Sud, contre une durée de marée descendante de 6,00 h. A la station centrale (ADCPc), la durée de la marée montante est de 6,37 h et celle de la marée descendante de 6,04 h. Au Nord, celles-ci sont de 6,36 h et de 6,04 h, respectivement pour la marée montante et la marée descendante. Enfin au niveau du marégraphe de Port-Bloc (voir Figure 1), la marée montante dure 6,27 h contre 6,13 h de marée descendante. Concernant les vagues (non illustré), elles proviennent principalement de directions O-NO (bouée Oléron). Les directions des vagues mesurées aux stations des petits fonds (ADCPn, ADCPc et ADCPs) varient légèrement par rapport à celles au large. Par ailleurs, les vagues arrivent avec un angle d'incidence par rapport à l'orientation locale de la côte plus important au Sud. Les valeurs de H_{m0} au large atteignent un maximum de 1,70 m pendant

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

la période étudiée pour une moyenne de 1,00 m et une période pic moyenne de 9,0 s. Elles diminuent en moyenne de 49% à 63% au niveau des trois stations de petits fonds (ADCPn, ADCPc et ADCPs). Il en résulte un gradient latitudinal des hauteurs significatives maximales des vagues allant du Nord (1,55 m), vers le Centre (1,35 m) puis les plus petites valeurs au Sud, atteignant au maximum (1,15 m). Cependant, ces hauteurs de vagues sont en moyenne plus importantes au Centre (0,63 m) qu'au Nord (0,53 m) et sont les plus faibles au Sud (0,49 m). Pour ces trois stations, la période pic moyenne varie de 10,2 s à 11,7 s, avec un maximum atteint entre 19,7 s et 21,8 s et un minimum de 3,1 s à 3,3 s.



4. Discussion et conclusions

Les résultats présentés ci-dessus montrent l'importance des courants tidaux longitudinaux au niveau du littoral proche de l'embouchure de l'estuaire de la Gironde. Cependant, contrairement à ce qu'il serait attendu à proximité d'une embouchure, i.e. une intensité augmentant à mesure que la distance avec l'embouchure diminue (e.g. SIEGLE *et al.*, 2004), on observe ici un gradient inversé. Au niveau de la moitié Sud de la zone (Figure 1), un chenal longeant la côte s'est mis en place depuis les années 2000 (VANDENHOVE *et al.*, 2024). La disposition des ADCP dans ce chenal montre une intensification des

courants longitudinaux du Nord vers le sud. Ce phénomène est plus intense pour la station de mesures où la section du chenal est la plus petite (i.e. ADCPs) du fait du rétrécissement de la section de ce chenal. Cette contrainte bathymétrique génère ainsi une asymétrie de l'onde de la marée avec une durée de la marée descendante plus courte que celle de la marée montante (comparables aux cas étudiés par WALTON, 2002 ; GONG *et al.*, 2016). Cette diminution de la durée de la marée descendante pour une masse d'eau équivalente, explique les courants de jusant plus intenses observés (ALLEN *et al.*, 1980). En opposition, les courants de flot y sont moins intenses du fait de l'élargissement de la section vers le Nord. Le marégraphe au Nord du site d'étude (Port-Bloc), soit la station la plus éloignée du chenal (Figure 1), ne montre aucune asymétrie, ce qui est en adéquation avec les études sur l'estuaire de la Gironde, indiquant une symétrie de l'onde de la marée à l'embouchure (ALLEN *et al.*, 1980). La station sud au niveau de l'estran (As) voit ses courants tidaux également intensifiés par la présence du chenal ici positionné au plus proche de la plage. Cependant, malgré d'intenses courants de jusant (vers le Sud), la dérive littorale dominante reste orientée vers le Nord sur la période étudiée. Le résiduel de courant pour l'ensemble des stations sur les plages est orienté vers le Nord, en cohérence avec l'étude de IDIER *et al.*, (2013). Il est maximal lorsque les vagues sont plus intenses (en début de campagne), ainsi qu'à la station la plus au Sud, du fait d'angles d'incidence à la côte plus importants. Ces résultats montrent des gradients nord-sud importants et complexes à la fois sur les vagues et les courants induits par les vagues et la marée.

En plus d'apporter des éclaircissements sur le comportement des littoraux adjacents à l'embouchure de la Gironde ces mesures vont notamment permettre de valider des modèles de circulations sur la zone et de calibrer la paramétrisation de modèles à complexité réduite du trait de côte appliqués en parallèle sur cette zone.

5. Remerciements

Ce travail fait partie du projet ESTOC, cofinancé par la Région Nouvelle-Aquitaine, la Communauté de Communes (CCMA), le BRGM and EPOC (Université de Bordeaux - CNRS). B. CASTELLE a reçu une subvention de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) avec le numéro ANR-21-CE01-0015 (SHORMOSAT).

6. Références bibliographiques

- ALLEN G.P., BONNEFILLE R., COURTOIS G., MIGNIOT C., (1974) *Processus de sédimentation des vases dans l'estuaire de la Gironde Contribution d'un traceur radioactif pour l'étude du déplacement des vases*, La Houille Blanche, 60:1-2, 129-136, doi: 10.1051/lhb/1974013
- ALLEN G.P., SALOMON J.-C., BASSOULLET P., DU PENHOAT Y., DE GRANDPRE C. (1980). *Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in*

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

- macrotidal estuaries*. *Sedimentary Geology*, 26(1-3), 69-90. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(80\)90006-8](https://doi.org/10.1016/0037-0738(80)90006-8)
- BONNETON P., LANNES D., MARTINS K., MICHALLET H. (2018). *A nonlinear weakly dispersive method for recovering the elevation of irrotational surface waves from pressure measurements*. *Coastal Engineering* 138, 1–8. doi :10.1016/j.coastaleng.2018.04.005.
- CASTAING P., ALLEN G.P. (1981). *Mechanisms controlling seaward escape of suspended sediment from the Gironde: A macrotidal estuary in France*. *Marine Geology* 40, 101–118. doi:10.1016/0025-3227(81)90045-1.
- CASTELLE B., BUJAN S., FERREIRA S., DODET G. (2017). *Foredune morphological changes and beach recovery from the extreme 2013/2014 winter at a high-energy sandy coast*. *Marine Geology* 385, 41–55. doi:10.1016/j.margeo.2016.12.006.
- CASTELLE B., RITZ A., MARIEU V., NICOLAE LERMA A., VANDENHOVE M., (2022). *Primary drivers of multidecadal spatial and temporal patterns of shoreline change derived from optical satellite imagery*. *Geomorphology* 413, 108360. doi:10.1016/j.geomorph.2022.108360.
- ELIAS E.P., VAN DER SPEK A.J., PEARSON S.G., CLEVERINGA J. (2019). *Understanding sediment-bypassing processes through analysis of high-frequency observations of a land inlet, the Netherlands*. *Marine Geology* 415,105956. doi:10.1016/j.margeo.2019.06.001.
- FITZGERALD D.M., (1984). *Interactions between the ebb-tidal delta and landward shoreline: Price Inlet, South Carolina*. *SEPM JSR Vol. 54*. doi:10.1306/212F85C6-2B24-11D7-8648000102C1865D
- GONG W., SCHUTTELAARS H., ZHANG H. (2016). *Tidal asymmetry in a funnel-shaped estuary with mixed semidiurnal tides*. *Ocean Dynamics*, 66, 637-658. <https://doi.org/10.1007/s10236-016-0943-1>
- HERBERS T.H.C., ELGAR S., GUZA R.T. (1999). *Directional spreading of waves in the nearshore*. *J. Geophys. Res.* 104:7683–7693. doi: 10.1029/1998JC900092
- HOWA H. (1987). *Le littoral du Nord Medoc, (Gironde) - Evolution d'une cote sableuse en érosion*. Thesis University of Bordeaux I, Soc. Geol. France, 258.
- HOWA H. (1997). *Sediment budget in the southern inlet of the Gironde Estuary (SW France)*. *Physics and Chemistry of the Earth* 22, 373–375. doi:10.1016/S0079-1946(97)00160-2.
- IDIER D., CASTELLE B., CHARLES E., MALLET C. (2013). *Longshore sediment flux hindcast: spatio-temporal variability along the SW Atlantic coast of France*. *Journal of Coastal Research* 165, 1785–1790. doi:10.2112/SI65-302.1.
- SIEGLE E., HUNTLEY D.A., DAVIDSON M.A. (2004). *Physical controls on the dynamics of inlet sandbar systems*. *Ocean Dynamics*, 54, 360-373, doi:10.1007/s10236-003-0062-7
- VANDENHOVE M., CASTELLE B., NICOLAE-LERMA A., MARIEU V., DALET E., HANQUIEZ V., MAZEIRAUD V., BUJAN S., MALLET C. (2024) *Secular shoreline response to large-scale estuarine shoal migration and welding*. *Geomorphology*, vol. 445, p. 108972. doi:10.1016/j.geomorph.2023.108972

*XVIII^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil
Anglet 2024*

WALTON Jr, T.L. (2002). *Tidal velocity asymmetry at inlets*. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development, Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, MS, US, 16p. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA588869.pdf>

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière