HAL
open science

LX-Shore : Un nouveau modèle d'évolution du trait de côte pour les littoraux sableux dominés par l'action des vagues.

Arthur Robinet, Déborah Idier, Bruno Castelle, Vincent Marieu

To cite this version:

Arthur Robinet, Déborah Idier, Bruno Castelle, Vincent Marieu. LX-Shore : Un nouveau modèle d'évolution du trait de côte pour les littoraux sableux dominés par l'action des vagues.. Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil (JNGCGC 2018), May 2018, La Rochelle, France. hal-01763196

HAL Id: hal-01763196

https://brgm.hal.science/hal-01763196v1

Submitted on 10 Apr 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LX-Shore : Un nouveau modèle d'évolution du trait de côte pour les littoraux sableux dominés par l'action des vagues

Arthur ROBINET [1], Déborah IDIER [1], Bruno CASTELLE [2], Vincent MARIEU [2]

1. Bureau de Recherches Géologiques et Minières,
   3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2, France.
   a.robinet@brgm.fr ; d.idier@brgm.fr
2. CNRS, Université de Bordeaux, UMR 5805 EPOC,
   Allée Geoffroy Saint-Hilaire, CS 50023, 33615 Pessac Cedex, France.
   bruno.castelle@u-bordeaux.fr ; vincent.marieu@u-bordeaux.fr

Résumé :
Comprendre et prévoir les évolutions du trait de côte est crucial pour informer et guider les gestionnaires du littoral. Jusqu'à très récemment la plupart des modèles de trait de côte ne permettaient pas de répondre à ces objectifs le long des littoraux sableux dominés par l'action des vagues du fait de limitations numériques et/ou physiques. Cette étude présente un nouveau modèle numérique à complexité réduite, nommé LX-Shore, permettant de simuler les évolutions du trait de côte le long de ces littoraux, sur des échelles de temps allant de l'heure à quelques décennies, et avec des temps de calcul très réduits. Ce modèle est applicable à la plupart des géométries de côtes sableuses (ex. : flèches sableuses, îles) et prend en compte l'existence de zones non-érodables (ex. : ouvrages de défense, caps rocheux). LX-Shore s'appuie sur une approche *one-line* originale, où les évolutions du trait de côte résultent non seulement des gradients de transport sédimentaire *longshore*, mais aussi du transport sédimentaire *cross-shore* dû à la variabilité temporelle de l'énergie des vagues incidentes. LX-Shore est couplé avec le modèle spectral de vagues SWAN pour simuler la transformation des vagues au-dessus de bathymétries complexes et assurer une rétroaction de l'évolution du trait de côte sur la propagation des vagues. Les cas d'application présentés montrent par exemple que LX-Shore est capable de simuler la formation d'instabilités du trait de côte (ex. : flèches sableuses) ou résultant de l'implémentation de structures en dur (ex. : épis et caps rocheux) sur une large gamme d'échelles temporelles. Cet outil ouvre la voie vers : (1) une meilleure évaluation des processus physiques contrôlant les évolutions du trait de côte et de leurs contributions respectives, (2) et la réalisation de projections.
Mots-clés : Modèle numérique, Complexité réduite, Trait de côte, Littoraux sableux, Transport sédimentaire, Transport *longshore*, Modèle *cross-shore* d'équilibre, Vagues, SWAN.

1. Introduction

Dans le contexte actuel de changement climatique et d'augmentation de la pression démographique en zone littorale, il devient crucial de bien caractériser les processus physiques à l'origine de la dynamique des littoraux sableux et d'être capable de prédire les évolutions futures du trait de côte sur une large gamme d'échelles spatio-temporelles.

Au cours des dernières décennies, de nombreux modèles morphodynamiques basés sur une description fine des processus physiques ont été développés pour simuler et prédire à terme les évolutions morphologiques de la zone littorale, incluant les évolutions du trait de côte. Pour le cas des littoraux sableux dominés par l'action des vagues, ces modèles complexes échouent encore à simuler les évolutions du trait de côte sur le moyen (année/décennie) et long-terme (siècle) du fait de limitations physiques et numériques (cascade d'erreurs au travers des échelles et temps de calcul très longs). Pour ces échelles, l'utilisation de modèles numériques de trait de côte à complexité réduite représente une alternative pour simuler des évolutions de manière fiable et avec des temps de calcul raisonnables (VITOUSEK *et al*., 2017).

Dans le cas des littoraux sableux dominés par l'action des vagues, les évolutions du trait de côte sont généralement dominées sur le moyen et long-terme par les gradients *longshore* spatiaux de transport sédimentaire *longshore*, et sur le plus court-terme par les processus *cross-shore* liés à la variabilité temporelle des caractéristiques des vagues incidentes. Cependant, les contributions respectives des processus *longshore* et des processus *cross-shore* dans les évolutions du trait de côte varient aussi avec le climat de vagues et les caractéristiques géologiques du site et leur quantification reste parfois problématique (HARLEY *et al*., 2015). Dans le cas de plages ouvertes, les évolutions induites sur le court terme par les processus *cross-shore*, avec une rapide érosion en période de tempête suivie d'une lente phase de reconstruction, cascadent parfois au travers des échelles temporelles et expliquent une part significative de la variabilité interannuelle et/ou de la tendance long-terme (ROBINET *et al*., 2016). La prise en compte des processus *longshore* et *cross-shore* dans les modèles de trait de côte devient une nécessité pour évaluer correctement les processus moteurs des évolutions du trait de côte et permettre les prédictions futures. Or, jusqu'à récemment, les processus *longshore* et *cross-shore* ont été traités séparément dans les modèles à complexité réduite.

Cette communication vise à présenter un nouveau modèle de trait de côte répondant à cette problématique et nommé LX-Shore (section 2). Plusieurs cas d'application sont présentés pour illustrer ses capacités (section 3). Une description plus exhaustive de LX-Shore est fournie dans ROBINET (2017) et ROBINET *et al*. (en révision).

2. Description du modèle

Les principales caractéristiques et l'architecture fonctionnelle de LX-shore sont illustrées sur la figure 1 et détaillées au travers des sous-sections suivantes.

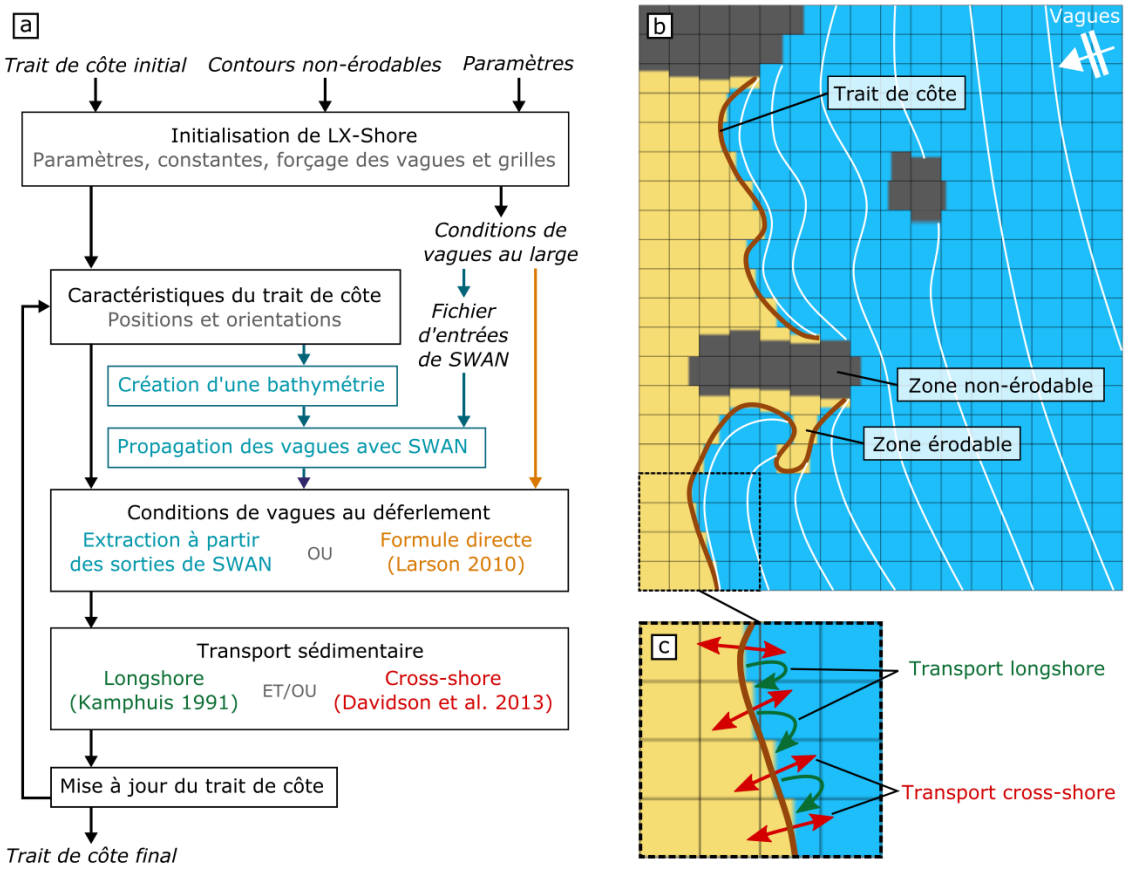

Figure 1. Principales caractéristiques et architecture fonctionnelle de LX-Shore. Adaptée de ROBINET (2017).

2.1 Principe

LX-Shore est un modèle cellulaire 2D en vue de dessus (figure 1b) qui s'inspire du modèle *one-line* CEM (ASHTON & MURRAY, 2006) et dans lequel le transport sédimentaire *longshore* est résolu à l'interface entre les cellules de calcul (figure 1c) par l'application directe d'une formule de transport *longshore* total intégré à l'échelle du profil de plage actif (jusqu'à la profondeur de fermeture). Il est fait l'hypothèse que tout gradient spatial *longshore* en transport *longshore* résulte en un dépôt ou arrachement uniforme et instantané de sédiments le long de ce profil, conduisant à une translation *cross-shore* du profil et de la position du trait de côte. La formule de KAMPHUIS (1991) est employée par défaut, mais, pour permettre l'application de LX-shore à des cas académiques existants, la formule du CERC peut aussi être utilisée.

LX-Shore intègre une adaptation du modèle ShoreFor (SPLINTER *et al*., 2014), impliquant un effet mémoire de la plage, qui permet de faire évoluer la position du trait de côte dans les cellules de calcul (figure 1c) en réponse à la variabilité de l'énergie des vagues incidentes des vagues. Tout déséquilibre entre les conditions instantanées et de l'historique proche des conditions de vagues génère alors une translation *cross-shore* de la position du trait de côte. Dans LX-Shore, le sens de la translation dépend du signe du déséquilibre calculé avec les conditions de vagues au large, tandis que son intensité est proportionnelle au déséquilibre et à la puissance instantanée des vagues au déferlement.

2.2 Fraction en sédiment et évolution du trait de côte

La spécificité de ce nouveau modèle qui diffère des approches *one-line* classiques, est que le modèle ne traite pas directement avec des positions de trait de côte (x,y) mais avec la valeur de fraction en sédiment (F) contenue dans chaque cellule de la grille morphologique de calcul qui discrétise le domaine de calcul en vue de dessus (figure 1b,c) et qui est composée de cellules carrées de résolution spatiale de ~ 100 m. Cette valeur F est interprétée comme la proportion de surface émergée dans chaque cellule ($0 \leq F \leq 1$). Les cellules d'eau (domaine marin) sont les cellules où $F = 0$, les cellules de trait de côte sont les cellules où $F > 0$ et ayant un contact de bordure latérale avec les cellules d'eau, et enfin les cellules de terre (domaine terrestre) sont les autres cellules.

A chaque itération modèle les gradients en transport *longshore* et le déplacement induit par les processus *cross-shore* sont calculés pour chaque cellule de trait de côte et sont ensuite exprimés en termes de variation de fraction en sédiment via des relations géométriques simples. Après mise à jour de la valeur de F dans toutes les cellules de trait de côte, des cas particuliers de cellules sur-accrétées ($F > 1$) ou sur-érodées ($F < 0$) peuvent apparaitre. De nombreuses lois de comportement ont été implémentées pour redistribuer les excès et les déficits de fraction en sédiment respectivement vers les cellules d'eau ou de terre adjacentes. Ainsi, la position des cellules de trait de côte dans la grille morphologique évolue au fil de la simulation avec la création et/ou suppression de cellules de trait de côte. L'application d'une méthode de reconstruction d'interface, proche de la méthode PLIC (*Picewise Linear Interface Calculation*), à la grille de fraction en sédiment permet de retrouver le trait de côte complet à chaque itération et de suivre son évolution au fil de la simulation. Enfin, des zones non-érodables peuvent être définies pour rendre compte de l'existence d'ouvrages de défense ou d'enrochements naturels (figure 1b), élargissant ainsi le champ d'application de LX-Shore.

2.3 Vagues et bathymétrie

Comme pour la plupart des modèles de trait de côte à complexité réduite, un modèle de vagues simple (ici formule directe de LARSON *et al*. (2010) combinée à une méthode d'ombrage linéaire) est utilisé pour obtenir les caractéristiques des vagues au déferlement (figure 1a) avec des temps de calcul très faibles. LX-Shore a aussi été

couplé dynamiquement avec le modèle spectral de vagues SWAN (figure 1a,b) pour permettre une application à des côtes complexes où la réfraction et/ou diffraction perturbent fortement les caractéristiques des vagues atteignant la côte. Une grille hydrodynamique ayant une résolution de ~ 10-20 m est utilisée pour réaliser les simulations SWAN. Ce choix garantit que la zone de surf couvre dans la direction *cross-shore* au moins deux à trois cellules hydrodynamiques pour des conditions morphogènes. SWAN propage les vagues au-dessus d'une bathymétrie idéalisée définie sur la grille hydrodynamique et qui est actualisée à chaque nouvelle itération de LX-shore selon une méthode similaire à celle utilisée par KAERGAARD & FREDSOE (2013) mais qui en plus tient compte de la présence de possibles contours de zones non-érodables (ROBINET *et al*., en révision).

3. Cas d'application

3.1 Processus *longshore* uniquement

Tout d'abord deux cas d'application (L1 et L2, figure 2) sont réalisés pour évaluer la capacité du modèle à reproduire des évolutions du trait de côte causées par les processus *longshore* sur le moyen/long-terme. Seul le transport *longshore* est utilisé et les conditions de vagues au déferlement sont déterminées avec le modèle de vagues simple.

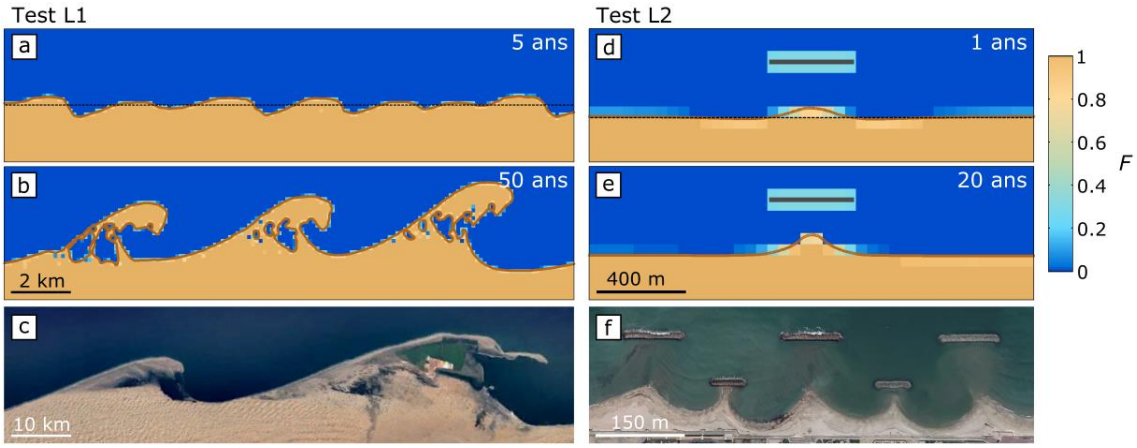

Figure 2. Evolutions simulées pour deux cas académiques (processus longshore uniquement et climats de vagues idéalisés). a,b Développement de flèches sableuses. c Côte Namibienne. d,e Effet de l'installation un brise-lame. f Plage de Palavas-les-Flots. Pointillés noirs : trait de côte initial. Adaptée de ROBINET et al. (en révision).

Le cas L1 (figure 2a,b) consiste à soumettre une plage initialement rectiligne à un climat de vagues susceptible de développer des instabilités de trait de côte (ondulations, flèches). Il est ici caractérisé par une dominance de vagues provenant de la gauche du domaine et par une forte obliquité à la côte (angle d'incidence > 45°). Le trait de côte

est initialement bruité pour exciter les instabilités morphologiques. La simulation est réalisée sur une période de 50 ans avec un pas de temps de 12 heures et une résolution de cellule de 100 m. Dans cette simulation, le trait de côte est instable et des perturbations initiales se développent (figure 2a). Celles-ci s'apparient pour s'auto-organiser dans une longueur d'onde régulière (régime non-linéaire). L'asymétrie du climat de vagues induit une migration *longshore* des instabilités et forme des flèches sableuses qui se reconnectent à la côte et cloisonnent des étendues d'eau (figure 2b).
Le cas test L2 (figure 2d,e) vise à simuler l'impact de la mise en place d'un brise lame au large d'une plage initialement rectiligne et exposée à un climat de vagues symétrique et comportant une faible proportion de vagues obliques. Une période de simulation de 20 ans, un pas de temps de 3 heures, et des cellules de 50 m sont utilisés. Un *salient* symétrique se forme progressivement dans la zone d'ombre du brise-lame résultant d'un gradient négatif en transport *longshore*, et dont l'extension vers large semble saturer à partir de 10 ans (~ 80 m), alors qu'un *tombolo* est formé si le brise-lame est situé plus près de la côte et/ou possède des dimensions longitudinales plus grandes.

3.2 Processus *cross-shore* uniquement

Un troisième cas d'application (C1) est conduit pour valider l'implémentation numérique et l'adaptation du modèle ShoreFor faite dans LX-Shore. Seul les processus *cross-shore* sont considérés. LX-Shore est appliqué à la plage du Truc Vert qui est un site pour lequel la contribution des processus *longshore* dans les évolutions du trait de côte sur le court et moyen-terme est supposée négligeable. Les vagues au déferlement sont déterminées avec le modèle de vagues simple car la côte est rectiligne et les iso-contours bathymétriques relativement parallèles à la côte sur le domaine de calcul. La simulation est réalisée sur une période de 9 ans (2005–2014) pour laquelle un jeu de données de validation complet (position du trait de côte et conditions de vagues au large) est disponible. Un pas de temps de 3 heures et une résolution de cellule de 100 m sont utilisés. Les résultats de simulation (non montrés) montrent que LX-Shore parvient à reproduire une grande part de la variabilité du trait de côte observées sur des échelles allant de l'évènementiel à l'interannuel et avec des performances (r^2 = 0.67, RMSE = 7.74 m) similaires à celles obtenues dans d'autres études où ShoreFor est directement appliqué à la plage du Truc Vert sur la même période (SPLINTER *et al.*, 2014). Des résultats très similaires sont obtenus lorsque les vagues sont propagées avec SWAN.

3.3 Plage en baie (processus *longshore* et *cross-shore*)

Un dernier cas d'application (figure 3) est réalisé pour montrer l'apport de LX-Shore dans l'étude de la dynamique du trait de côte sur des sites où les évolutions du trait de côte sont contrôlées à la fois par les processus *longshore* et par les processus *cross-shore*. Ce cas consiste en une plage initialement rectiligne bordée par deux caps rocheux (figure 3a) et exposée au climat de vagues du cas C1 sur la même période d'étude.

Un premier test (LC1) est réalisé en utilisant uniquement le transport *longshore* tandis que le second test inclue également les processus *cross-shore* (LC2). Les résultats de simulation (figure 3b,c) suggèrent que dans de telles conditions géologiques et hydrodynamiques, la prise en compte des processus *cross-shore* ajoutent une variabilité dans les évolutions du trait de côte du même ordre de grandeur que celle causée par les processus *longshore*, sur des périodes et des échelles de temps différentes. De plus, la comparaison des figure 3b et 3c montre que la rotation de la plage induite par les processus *longshore* domine les évolutions du trait de côte sur la première moitié de la simulation et que la contribution des processus *cross-shore* prédomine ensuite.

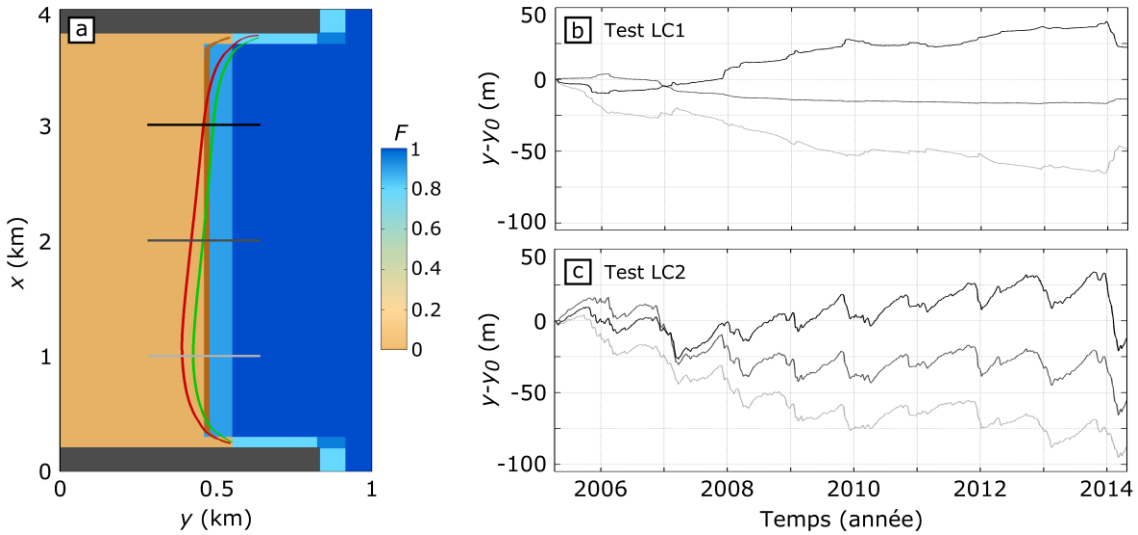

Figure 3. Evolutions d'une plage en baie idéalisée. a Etat initial la plage et du trait de côte (courbe marron). Courbes verte et rouge : traits de côte finaux respectivement associés à (b) et (c). Traits noir, gris et gris clair : transects d'extraction. b Evolution du trait côte aux transects d'extraction avec processus longshore seulement. c Idem que (b) avec processus cross-shore. Adaptée de ROBINET et al. (en révision).

4. Discussion et conclusions

Les cas d'application L1, L2 et LC1 montrent que LX-Shore peut simuler une variété d'évolutions du trait de côte liées à des processus *longshore* (ex. : instabilités du trait de côte, motifs d'érosion/accrétion résultant de l'implémentation d'ouvrages de défense) sur différentes échelles spatio-temporelles. Le cas C1 confirme que le module *cross-shore* de LX-Shore permet de reproduire fidèlement les évolutions induites par les processus *cross-shore* de l'évènementiel à l'interannuel. Enfin, le cas LC2 illustre l'intérêt de disposer d'un tel modèle pour étudier la dynamique du trait de côte pour des sites où les processus *cross-shore* et *longshore* coexistent. En effet, par son aspect modulaire et ses nombreuses fonctionnalités, LX-Shore permet de décortiquer la variabilité observée et d'évaluer les contributions respectives des différents processus

moteurs. Le faible ratio de temps de calcul sur temps simulé (10^{-4} à 10^{-3} avec SWAN sinon 10^{-6}) fait de LX-shore un outil plus adapté à la modélisation long-terme. Les travaux futurs impliqueront un travail de validation quantitative en s'appuyant notamment sur le jeu de données de la plage de Narrabeen (Australie).

5. Références bibliographiques

ASHTON A.D., MURRAY A.B. (2006). *High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 1. Modeling of sand waves, flying spits, and capes*. Journal of Geophysical Research, Vol. 111 (F4). http://dx.doi.org/10.1029/2005JF000422

SPLINTER K.D., TURNER I.L., DAVIDSON M.A., BARNARD P., CASTELLE B., OLTMAN-SHAY J. (2014). *A generalized equilibrium model for predicting daily to interannual shoreline response*. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 119 (9), pp. 1936–1958. http://dx.doi.org/10.1002/2014JF003106

HARLEY M.D., TURNER I.L., SHORT A.D. (2015). *New insights into embayed beach rotation: The importance of wave exposure and cross-shore processes*. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, Vol. 120 (8), pp 1470–1484. http://dx.doi.org/10.1002/2014JF003390

KAERGAARD K., FREDSOE J. (2013). *A numerical shoreline model for shorelines with large curvature*. Coastal Engineering, Vol. 74, pp 19–32. http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.11.011

KAMPHUIS J.W. (1991). *Alongshore Sediment Transport Rate*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 117 (6), pp 624–640, http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1991)117:6(624)

LARSON M., HOAN L.X., HANSON H. (2010). *Direct Formula to Compute Wave Height and Angle at Incipient Breaking*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 136 (2), pp 119–122. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000030

ROBINET A., CASTELLE B., IDIER D., LE COZANNET G., DEQUE M., CHARLES E. (2016). *Statistical modeling of interannual shoreline change driven by North Atlantic climate variability spanning 2000–2014 in the Bay of Biscay*. Geo-Marine Letters, Vol. 36(6), pp 479–490. http://dx.doi.org/10.1007/s00367-016-0460-8

ROBINET A. (2017). *Modélisation de l'évolution long-terme du trait de côte le long des littoraux sableux dominés par l'action des vagues*. Thèse Université de Bordeaux, Bordeaux. Disponible en ligne sur URL : https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/tel-01727831/

ROBINET A., IDIER D., CASTELLE B., MARIEU V. (en révision). *A reduced-complexity shoreline change model combining longshore and cross-shore processes: the LX-Shore model*. Environmental Modelling & Software

VITOUSEK S., BARNARD P.L., LIMBER P., ERIKSON L., COLE B. (2017). *A model integrating longshore and cross-shore processes for predicting long-term shoreline response to climate change*. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, Vol. 122(4), pp 782–806. http://dx.doi.org/10.1002/2016JF004065