

Modélisation à complexité réduite de l'impact du phénomène de bypass sédimentaire sur la dynamique des plages de poche

Elsa DURAND^{1,2,4}, Bruno CASTELLE¹, Déborah IDIER², Vincent MARIEU¹,
Arthur ROBINET³, Thomas GUÉRIN⁴

1. Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, EPOC, UMR 5805, Pessac, France.
*elsa.durand@u-bordeaux.fr ; bruno.castelle@u-bordeaux.fr ;
vincent.marieu@u-bordeaux.fr*
2. BRGM, 3 Avenue Guillemin, Orléans, France.
d.idier@brgm.fr
3. BRGM, 24 Avenue Léonard de Vinci, Pessac, France.
a.robinet@brgm.fr
4. WMC (Waeles Marine Consultants), Brest, France. *thomas.guerin@wm-consultants.fr*

Résumé :

Le phénomène de *bypass* sédimentaire peut considérablement influencer la dynamique des plages de poche à moyen et long terme. Cependant, il n'est encore que partiellement inclus dans les modèles d'évolution du trait de côte à complexité réduite. Ici, une paramétrisation du flux de sédiments qui contourne (« *bypass* ») un obstacle rocheux est implémentée dans le modèle LX-Shore. Les simulations effectuées sur le cas académique d'une plage initialement rectiligne bordée par deux épis rocheux montrent que le transport des sédiments autour de l'obstacle dans la colonne d'eau (ou « *full bypassing* », FB) impacte significativement la forme moyenne et la variabilité spatiale du trait de côte par rapport au *bypass* se produisant uniquement lorsque le trait de côte franchit la pointe de l'ouvrage (ou « *shoreline bypassing* », SB). L'angle de rotation de la plage est réduit d'environ 1/3, en particulier en cas de climat de vagues peu obliques et asymétriques. La courbure de la plage est également significativement réduite, surtout en cas de forçage très oblique et asymétrique. Enfin, le maximum d'érosion en aval de l'ouvrage est surestimé jusqu'à 30% en configuration SB par rapport à FB. Ces résultats soulignent l'importance de l'influence du mode de *bypass* sédimentaire sur la dynamique des plages de poche et la nécessité d'intégrer des paramétrisations de ce phénomène dans les modèles à complexité réduite.

Mots-clés :

Bypass sédimentaire, Modélisation à complexité réduite, Plages de poche, Rotation, Courbure.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

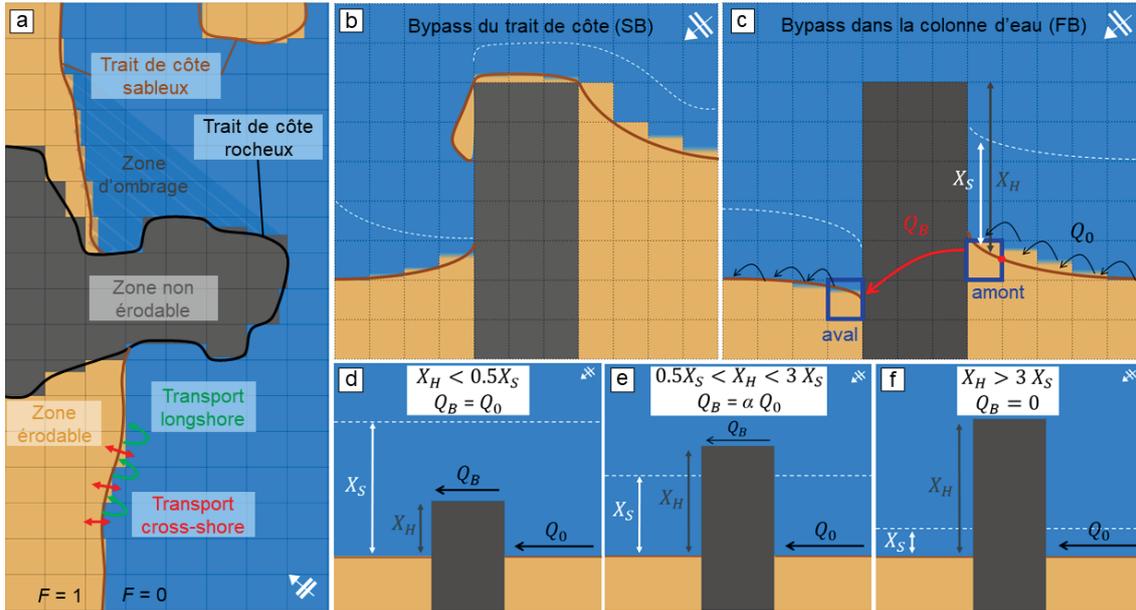
1. Introduction

Les plages de poche, omniprésentes sur de nombreux littoraux dans le monde, sont des étendues de sable délimitées par des frontières physiques qui peuvent être des caps rocheux naturels ou des ouvrages artificiels perpendiculaires à la côte. Leur dynamique est profondément impactée par la présence de ces obstacles formant des barrières totales ou partielles au transport sédimentaire longitudinal. L'un des facteurs clés influençant la morphologie et la dynamique des plages de poche à moyen et long terme est le *bypass* sédimentaire, défini comme le transport de sable autour des obstacles rocheux (KLEIN *et al.*, 2020). Ces dernières années, une nouvelle génération de modèles d'évolution du trait de côte à complexité réduite a vu le jour (VITOUSEK *et al.*, 2017 ; ROBINET *et al.*, 2018 ; ROELVINK *et al.*, 2020). Ces derniers s'appuient sur une sélection des processus dominants, sur des paramétrisations et des lois de comportement, et se distinguent des modèles dits « basés sur les processus » plus complexes qui s'appuient typiquement sur les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Cependant, les effets du *bypass* ne sont pas toujours pris en compte dans les modèles à complexité réduite, et quand ils le sont, c'est parfois uniquement lorsque le trait de côte atteint le sommet de l'ouvrage (processus dénommé ci-après « *shoreline bypassing* » ou SB), comme dans LX-Shore (ROBINET *et al.*, 2018). Or, le *bypass* a également lieu au large des obstacles rocheux dans la colonne d'eau, et ce, même si le trait de côte ne franchit pas le sommet du cap (VIEIRA DA SILVA *et al.*, 2016). Ce processus est appelé ici « *full bypassing* » (FB). Récemment, McCARROLL *et al.*, (2021) ont développé une paramétrisation du *bypass* (FB) induit par les vagues. Ici, cette formulation est généralisée et implémentée dans LX-Shore, puis l'effet de la prise en compte du *bypass* sur la dynamique du trait de côte (rotation, courbure et maximum d'érosion) est évalué en comparant les simulations considérant le « *shoreline bypassing* » (SB) et le « *full bypassing* » (FB).

2. Modèle numérique et setup

2.1 LX-Shore

LX-Shore est un modèle hybride d'évolution du trait de côte qui calcule l'évolution d'une fraction en sédiments F au sein de chaque cellule d'une grille 2D (figure 1.a). A chaque pas de temps, F est mise à jour en tenant compte des transports de sédiments *cross-shore* (non pris en compte dans la présente étude) et *longshore*. Pour une description des bases physiques et numériques du modèle, le lecteur est invité à se référer à ROBINET *et al.* (2018). LX-Shore permet de modéliser l'évolution des littoraux sableux dominés par l'action des vagues avec des temps de calcul réduits. Cependant, dans sa version initiale, le sable ne contournait un obstacle rocheux que lorsque le trait de côte franchissait le sommet de l'ouvrage (« *shoreline bypassing* », figure 1.b).



2.2 Implémentation du bypass sédimentaire

McCARROLL *et al.* (2021) ont développé une paramétrisation du flux de sédiments qui contourne un obstacle rocheux, dérivée de plus de 1000 simulations réalisées avec XBeach (ROELVINK *et al.*, 2009) pour diverses conditions de vagues ou morphologies de caps rocheux. Ce flux Q_B dépend du flux longitudinal de sédiments Q_0 et du rapport entre l'extension *cross-shore* du cap rocheux X_H et la largeur de la zone de surf X_S :

$$Q_B = \text{sgn}(A)p_1A^2 + p_2A \quad (1)$$

$$\text{avec } A = Q_0 \exp(-b_1(X_H / X_S)^{b_2}) \quad (2)$$

où p_1 , p_2 , b_1 et b_2 sont des coefficients ajustés par calibration.

Cette expression est valable pour $0.5 < X_H/X_S < 3$ (McCARROLL *et al.*, 2021). Si $X_H/X_S < 0.5$, l'obstacle n'impacte pas le transport sédimentaire longitudinal, donc $Q_B = Q_0$ (figure 1.d). Au contraire, si $X_H/X_S > 3$, le transport *longshore* est bloqué par l'obstacle et $Q_B = 0$ (figure 1.f). L'expression utilise quatre coefficients calibrés pour une valeur de $Q_0 \approx 1.2 \text{ m}^3/\text{s}$, mais inadaptés si elle est appliquée pour d'autres conditions de vagues sans nouvelle calibration de p_1 , p_2 , b_1 et b_2 . La formule suivante, plus générique, est donc proposée ici (équation (3)) :

$$Q_B = \alpha Q_0, \text{ avec } \alpha = 1 \text{ si } X_H/X_S < 0.5, \quad (3)$$

$$\alpha = \exp(a(X_H/X_S) + b) - c \text{ si } 0.5 < X_H/X_S < 3,$$

$$\text{et } \alpha = 0 \text{ si } X_H/X_S > 3.$$

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

Cette expression ne présente qu'un seul paramètre ajustable, a , puisque b est déduit de a , et c est déduit de a et b . Une valeur de $a = -2.9$ a été choisie ici afin d'obtenir la meilleure concordance avec la courbe du flux Q_B obtenue avec l'expression développée par McCARROLL *et al.* (2021). Afin d'implémenter cette expression basée sur une approche globale dans un modèle cellulaire, les cellules adjacentes à l'épi rocheux (encadrées en bleu sur la figure 1.c) sont préalablement identifiées automatiquement, tandis que le coefficient α est calculé à chaque pas de temps. Le flux Q_B est calculé au niveau de la bordure amont de la cellule de sable en amont de l'épi (point rouge sur la figure 1.c) afin d'éviter l'effet du fort angle de trait de côte au contact de l'obstacle rocheux.

2.3 Configuration du modèle

Après implémentation de cette paramétrisation dans le code LX-Shore, celui-ci a été exécuté sur le cas académique d'une plage de 500 m initialement rectiligne et bordée par deux épis rocheux rectangulaires (figure 2). Les simulations ont été effectuées sur une période d'un an (forçages stationnaires) ou de 5 ans (forçages instationnaires), avec un pas de temps constant de 2 h et au sein d'une grille composée de mailles de 10 m.

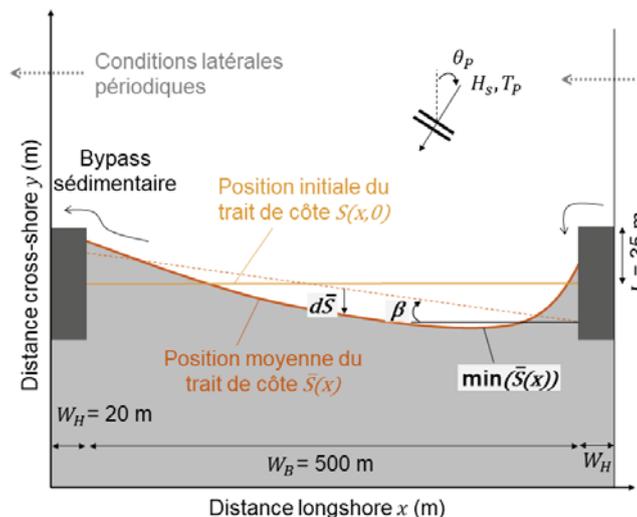


Figure 2. Schéma de la configuration du modèle et variables utilisées pour l'analyse. La ligne en pointillés représente la droite de régression linéaire du trait de côte moyen.

Les conditions latérales sont périodiques, la fraction en sédiment quittant le domaine par la gauche le réintègre donc par la droite, et vice-versa. La taille des grains de sable est fixée à $D_{50} = 0.22$ mm et la profondeur de fermeture $D_C = 5$ m, atteinte à environ 90 m au large du trait de côte initial. Les caractéristiques des vagues au déferlement ont été calculées avec la formule analytique de LARSON *et al.*, (2010) combinée avec une procédure d'ombrage. La hauteur et la période des vagues au large sont fixées

respectivement à $H_S = 1$ m et $T_P = 10$ s. Pour les simulations effectuées avec un angle d'incidence variable dans le temps, la distribution de θ_P est basée sur deux paramètres : A pour l'asymétrie du climat de vagues (proportion de vagues arrivant de la droite, i.e. si $A=0.2$, 20% des vagues viennent de la droite et 80% de la gauche), et U pour son obliquité (proportion de vagues arrivant avec de forts angles d'incidence, i.e. $\theta_P > 45^\circ$ ou $\theta_P < -45^\circ$). Plus de 800 simulations ont été réalisées en couvrant toute la gamme de A et de U (entre 0 et 1) avec un pas de 0.05, et ce, pour les deux types de *bypass*, « *shoreline bypassing* » (SB) et « *full bypassing* » (FB). Les simulations pour lesquelles la variabilité du trait de côte est dominée par des instabilités morphodynamiques physiques résultant de l'effet de vagues très obliques ($U > 0.55$ et simulations grisées sur les figures 4 et 5.a) ont été exclues de l'analyse. La variabilité spatiale du trait de côte a été étudiée via trois variables (figure 2) : l'angle de rotation moyen de la plage (pente de la droite de régression du trait de côte moyen, β), la position cross-shore du maximum d'érosion du trait de côte moyen ($\min(\bar{S}(x))$), et la courbure de la plage (écart-type du trait de côte moyen par rapport à sa droite de régression, $\sigma(d\bar{S})$).

3. Résultats

3.1 Forçages de vagues stationnaires

En configuration SB (figures 3.a et 3.c), le trait de côte atteint le sommet de l'épi puis contourne, formant une accumulation de sable en aval de l'obstacle dont la taille augmente avec l'angle d'incidence des vagues (10° figure 3.a, 30° figure 3.c).

En configuration FB (figures 3.b et 3.d), le trait de côte « s'arrête » environ 10 m avant le sommet de l'ouvrage, où $X_H/X_S \approx 0.5$. On a donc $Q_B = Q_0$ et tout le sable transporté par la dérive littorale contourne l'obstacle. Le *bypass* subaquatique influence donc significativement la position du trait de côte en amont et en aval de l'épi rocheux.

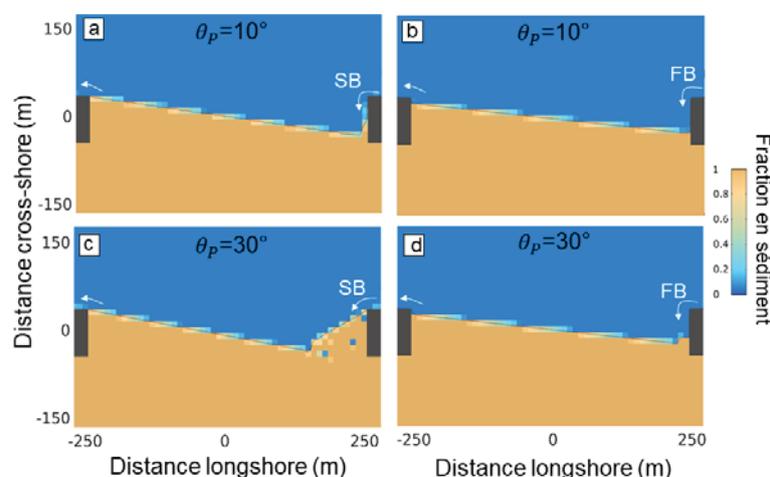


Figure 3. Forme de la plage après un an pour des angles de vagues de 10° (a,b) et 30° (c,d), en configuration SB (a,c) et FB (b,d).

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

3.2 Forçages de vagues instationnaires

La figure 4 montre la position moyenne du trait de côte (ligne noire) et son enveloppe (zone grise autour) pour les simulations considérant le SB (figure 4.a) et le FB (figure 4.b). Dans l'ensemble, les traits de côte moyens en configuration FB montrent une rotation et une courbure moindres et un maximum d'érosion moins extrême qu'en configuration SB, quelles que soient l'asymétrie et l'obliquité du climat de vagues. Cet impact a été quantifié plus en détails en analysant la distribution des différences entre SB et FB en terme de rotation (figure 5), courbure et maximum d'érosion (non montré ici) afin d'identifier les climats de vagues pour lesquels l'impact de FB est le plus fort.

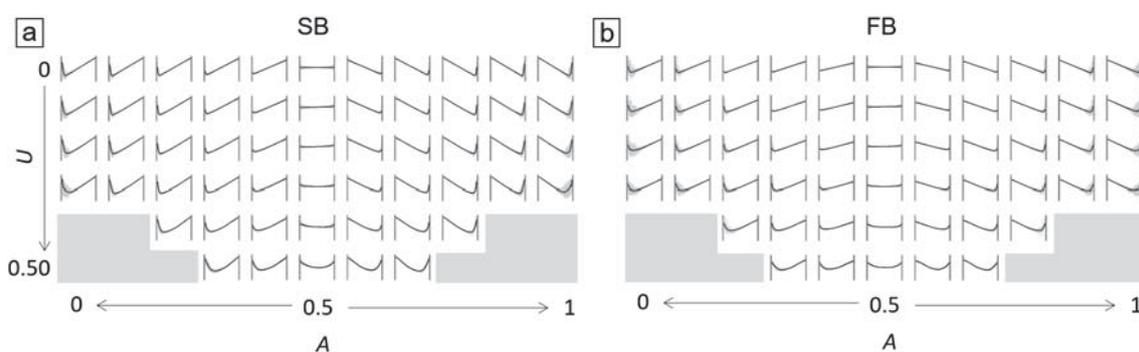


Figure 4. Vue d'ensemble du trait de côte moyen (ligne noire) et de son enveloppe (zone grise autour) pour chaque simulation réalisée pour tout le panel de A et de U, (a) en configuration SB et (b) en configuration FB. Une colonne et une ligne sur deux sont représentées. Les simulations grisées ont été exclues de l'analyse (voir section 2.3).

La différence d'angle de rotation de la plage β entre SB et FB est maximale (2.5°) pour des climats de vagues peu obliques et peu asymétriques (figure 5.a). Cela correspond aux simulations pour lesquelles le FB se produit, mais pas le SB.

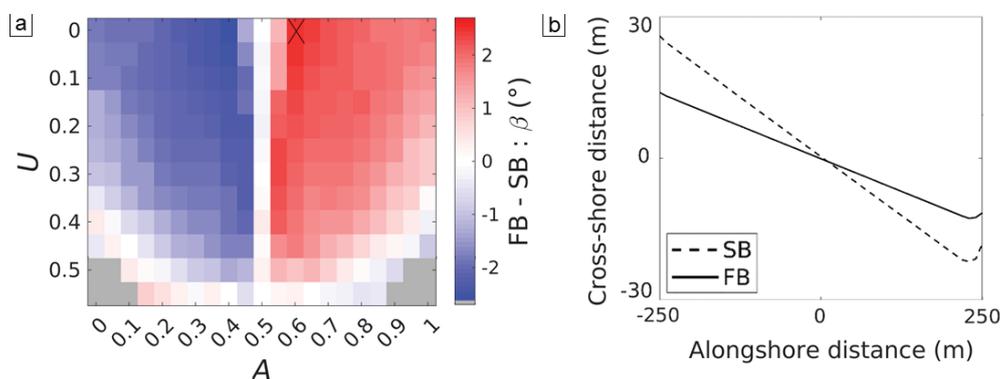


Figure 5. (a) Distribution des différences d'angle de rotation de la plage (β) entre SB et FB. (b) Position moyenne du trait de côte en SB et FB pour un climat de vagues caractérisé par $A=0.6$ et $U=0$, simulation indiquée par une croix sur le panel (a).

La figure 5.b montre que la position moyenne du trait de côte au contact de l'épi rocheux (en amont ou en aval) peut différer jusqu'à 10 m entre des simulations considérant SB et FB. Les différences de $\sigma(d\bar{S})$, utilisé pour caractériser la courbure de la plage, atteignent 6 à 7 m entre SB et FB pour les simulations avec forçage de vagues fortement oblique et asymétrique. Enfin, la position cross-shore du maximum d'érosion du trait de côte ($\min(\bar{S}(x))$) est réduite d'environ 10 m, en particulier dans le cas de climats de vagues fortement asymétriques. L'érosion en aval de l'obstacle rocheux peut donc être surestimée jusqu'à environ 30% en SB par rapport à FB.

4. Discussion et conclusion

Les simulations montrent que le trait de côte n'atteint pas le sommet de l'épi lorsque l'on considère le *bypass* subaquatique, et que ce processus peut impacter à la fois la forme moyenne des plages de poche et la variabilité spatiale du trait de côte. Ces résultats sont en accord avec des travaux antérieurs montrant que le *bypass* est essentiel dans la forme moyenne et la dynamique des plages de poche, ainsi que des observations de terrain indiquant la présence de *bypass* alors que le trait de côte n'a pas franchi la pointe de l'ouvrage (VIEIRA DA SILVA *et al.*, 2016). La prise en compte du *bypass* subaquatique est donc nécessaire pour simuler l'évolution des plages de poche réelles. L'application à des sites réels nécessitera d'exploiter un modèle spectral de vagues, ce qui est possible ici grâce au couplage de LX-Shore avec SWAN (BOOIJ *et al.*, 1999). Des développements supplémentaires pourront également être réalisés afin de prendre en compte des configurations de plages plus complexes (e.g. définition d'un nouveau proxy pour le calcul de la longueur du cap rocheux). Enfin, des paramétrisations plus génériques du *bypass* peuvent être développées, comme celle de KING *et al.*, (2021) qui prend en compte d'autres paramètres impactant la quantité de sable qui contourne un obstacle rocheux (taille et forme du cap rocheux, effet de la marée...).

En conclusion, une paramétrisation générique du *bypass* sédimentaire a été implémentée dans un modèle hybride de trait de côte, LX-Shore. Les résultats sur un cas académique indiquent que le *bypass* sédimentaire subaquatique impacte significativement la dynamique des plages de poche, en particulier en termes de rotation, courbure et position cross-shore du maximum d'érosion. Cet impact est plus ou moins important selon l'asymétrie et l'obliquité du climat de vagues. L'utilisation de paramétrisations génériques du *bypass* sédimentaire dans les modèles hybrides doit être encouragée afin d'améliorer la compréhension globale des modes de variabilité spatio-temporels du trait de côte dans les plages de poche.

5. Remerciements

Ce travail est financé dans le cadre d'un contrat ANRT/CIFRE (n°2021/0579) entre la SAS Waeles Marine Consultants, l'Université de Bordeaux et le BRGM, et est réalisé dans le cadre du projet ANR SHORMOSAT (n°ANR-21-CE01-0015).

6. Références bibliographiques

- BOOIJ N., RIS R., HOLTHUIJSEN L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- KING E., CONLEY D., MASSELINK G., LEONARDI N., MCCARROLL R., SCOTT T., VALIENTE N. (2021). Wave, Tide and Topographical Controls on Headland Sand Bypassing. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(8). <https://doi.org/10.1029/2020JC017053>
- KLEIN A., VIEIRA DA SILVA G., TABORDA R., DA SILVA A., SHORT A. (2020). Headland bypassing and overpassing: Form, processes and applications. In *Sandy Beach Morphodynamics* (557–591). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102927-5.00023-0>
- LARSON M., HOAN L., HANSON H. (2010). Direct Formula to Compute Wave Height and Angle at Incipient Breaking. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 136(2), 119–122. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000030](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000030)
- MCCARROLL R., MASSELINK G., VALIENTE N., KING E., SCOTT T., STOKES C., WIGGINS M. (2021). An XBeach derived parametric expression for headland bypassing. *Coastal Engineering*, 165, 103860. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103860>
- ROBINET A., IDIER D., CASTELLE B., MARIEU V. (2018). A reduced-complexity shoreline change model combining longshore and cross-shore processes: The LX-Shore model. *Environmental Modelling & Software*, 109, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.08.010>
- ROELVINK D., HUISMAN B., ELGHANDOUR A., GHONIM M., REYNS J. (2020). Efficient Modeling of Complex Sandy Coastal Evolution at Monthly to Century Time Scales. *Frontiers in Marine Science*, 7, 535. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00535>
- ROELVINK D., RENIERS A., VAN DONGEREN A., VAN THIEL DE VRIES J., MCCALL R., LESCINSKI J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11–12), 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
- VIEIRA DA SILVA G., TOLDO E., KLEIN A., SHORT A., WOODROFFE C. (2016). Headland sand bypassing—Quantification of net sediment transport in embayed beaches, Santa Catarina Island North Shore, Southern Brazil. *Marine Geology*, 379, 13–27. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.05.008>
- VITOUSEK S., BARNARD P., LIMBER P., ERIKSON L., COLE B. (2017). A model integrating longshore and cross-shore processes for predicting long-term shoreline response to climate change: CoSMoS-COAST. *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, 122(4), 782–806. <https://doi.org/10.1002/2016JF004065>