



GLOBCOASTS : Un modèle conceptuel d'évolution du trait de côte pour une approche régional à globale

**Amélie ARIAS¹, Rafael ALMAR², Vincent REGARD³,
Patrick MARCHESIELLO², Dimitri VLAHOPOULOS²**

1. Université de Toulouse, UPS - LEGOS (UPS/CNES/CNRS/IRD), 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France.
amelie.arias@univ-tlse3.fr
2. Université de Toulouse, IRD (UPS/CNES/CNRS/IRD), 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France.
rafael.almar@ird.fr; patrick.marchesiello@ird.fr; vlahopoulosdimitri@gmail.com
3. Université de Toulouse, GET (CNRS/UPS/IRD/CNES), 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France.
vincent.regard@get.omp.eu

Résumé :

Prévoir l'évolution des côtes est un défi majeur face au changement climatique et à la montée du niveau de la mer, surtout en raison de l'érosion qui affecte de nombreuses régions densément peuplées. Mais cette érosion résulte à la fois de processus naturels et d'activités humaines telles que les aménagements côtiers et les modifications de l'apport sédimentaire des cours d'eau. Bien que de nombreuses études aient tenté de prédire les changements côtiers à différentes échelles, la plupart ne prennent pas en compte plusieurs facteurs ensemble, le niveau de la mer, les vagues et les rivières. Cette représentation de l'évolution des côtes est complexifiée par une compréhension partielle des processus et la difficulté à obtenir des données détaillées et à long terme. En intégrant de nouvelles observations par satellite des océans côtiers et réanalyses globales, GLOBCOASTS, un modèle d'évolution du trait de côte basé sur la prise en compte de processus, permet de mettre en évidence la sensibilité des côtes à leur principaux forçages. En réalisant des scénarios, il peut aussi servir à comprendre et anticiper les impacts des scénarios d'aménagement côtier, devenant ainsi un outil précieux pour la prise de décision.

Mots-clés : Modèle numérique, Rivières, Niveau de la mer, Satellite, Littoral, Erosion, Accrétion.

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

1. Introduction

Prévoir l'évolution côtière est un défi majeur lié au changement climatique, résultant de nombreux processus géologiques et hydrodynamiques se déroulant à différentes échelles spatio-temporelles (BERGSMA *et al.*, 2022). Les cycles d'érosion et d'accrétion côtière sont étroitement liés aux activités humaines, comme la construction de jetées et de barrages, qui modifient les caractéristiques hydrodynamiques et l'approvisionnement en sédiments terrestres. Cette complexité rend la prédiction de l'évolution côtière particulièrement difficile (PAYO *et al.*, 2016 ; VITOUSEK *et al.*, 2017).

De nombreuses régions densément peuplées à travers le monde sont affectées par l'érosion côtière. Environ 60 % de la population mondiale, soit 3,6 milliards de personnes, vivent à moins de 60 kilomètres du littoral. Il est donc crucial d'avoir des prévisions fiables de cette évolution à moyen terme afin de permettre la planification de l'adaptation du littoral (NICHOLLS *et al.*, 2015). Travailler sur cette échelle de temps nécessite de prendre en compte le forçage hydrodynamique, qui induit des modifications morphologiques à court terme, le forçage hydrologique avec la variation du niveau de la mer, ainsi que le forçage géologique responsable des changements côtiers chroniques (VITOUSEK *et al.*, 2017).

Les études sur les risques côtiers et les changements du littoral liés aux événements extrêmes s'appuient souvent sur des modèles numériques détaillés et coûteux (BARNARD *et al.*, 2014). Les modèles basés sur la physique peuvent simuler l'érosion à petite échelle (10–100 km) et à court terme mais en ce qui concerne les changements côtiers à grande échelle ou à long terme, ils nécessitent un temps de calcul très important et n'offrent pas de précision significative par rapport aux modèles simplifiés (FRENCH *et al.*, 2016). Ainsi, les modèles basés sur les processus dominants sont couramment utilisés, car ils sont simples, efficaces et rapides, bien qu'ils ne soient fiables qu'à des échelles interannuelles.

GLOBCOASTS est un modèle à vocation d'application globale basé sur les processus principaux et a pour objectif de reproduire puis par la suite de prédire l'évolution cross-shore du trait de côte. Il combine plusieurs modèles de transport de sédiments et de changement du littoral : (1) le changement morphologique dû aux vagues selon l'approche « one-line »; (2) la prise en compte des rivières, du flux sédimentaire mais aussi effet stérique, une nouveauté pour un modèle d'évolution de trait de côte; (3) le transport transversal dû aux variations du niveau marin total. Ces processus indépendants peuvent être combinés pour fournir un modèle d'évolution côtière complet et applicable à de larges échelles spatio-temporelles.

2. Description du modèle

2.1 Introduction

GLOBCOASTS est un modèle conçu pour comprendre l'influence des mécanismes principaux, naturels et anthropiques, sur l'évolution du trait de côte à l'échelle mondiale. Le trait de côte y est initialement défini grâce au jeu de données Global Self-consistent Hierarchical High-resolution Geography (GSHHG version 2.3.6) (WESSEL *et al.*, 1996). Par la suite, nous utilisons la ligne d'eau, interface terre-mer, comme définition du trait de côte à tout instant (ALMAR *et al.*, 2023). En raison de l'influence continue des marées, des surcotes de tempête et des vagues sur le trait de côte, la ligne d'eau est sujette à une large variabilité liée au niveau de la mer, en plus de l'évolution morphologique du trait de côte à un niveau d'élévation topographique constant. Aussi, différentes parties du profil de l'avant-plage sont susceptibles d'avoir des réponses contrastées aux facteurs de changement dans le temps et l'espace. Néanmoins, nous pensons que la ligne d'eau comme définition de la position du trait de côte est pertinente pour appréhender la vulnérabilité et le risque associés à l'érosion et aux inondations liées à la variabilité et au changement climatique. Elle est donc utilisée comme un indicateur du trait de côte dans GLOBCOASTS. GLOBCOASTS est un modèle basé sur plusieurs données d'entrée. Leur provenance est présentée dans le Tableau 1.

Tableau 1. Source des données d'entrée utilisées dans GLOBCOASTS, les données issues de satellites sont en gras.

<i>Données</i>	<i>Source</i>
<i>Trait de côte initial</i>	<i>GSHHG version 2.3.61 (WESSEL <i>et al.</i>, 1996)</i>
<i>Climat de vague</i>	<i>ERA5 (HERSBACH <i>et al.</i>, 2020)</i>
<i>Niveau marin</i>	<i>Anomalie du niveau marin SLA (m) : Produit CMEMS (C3S-Copernicus Climate Change Service, 2018) Corrections Atmosphérique Dynamiques DAC : SSALTO/DUACS (PUJOL <i>et al.</i>, 2016)</i>
<i>Débit des rivières</i>	<i>ISBA-CTRIP (DECHARME <i>et al.</i>, 2019)</i>

2.2 Equation générale

À chaque point de côte (X, Y), l'équation 1 est résolue en utilisant un schéma d'Euler explicite centré sur l'espace. Elle repose sur l'indépendance des processus considérés. En supposant que la position de la ligne d'eau à des échelles de temps intermédiaires est en fait la somme des processus morphologiques (2) et hydrologiques (3), l'équation générale est :

$$\frac{\partial Y_{sh}}{\partial t} = \text{Composante Morphologique} + \text{Composante hydrologique} \quad (1)$$

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

$$\text{Composante Morphologique} = - \frac{\partial Q}{\partial x * D_c} \quad [\text{m/mois}] \quad (2)$$

$$\text{Composante Hydrologique} = - \frac{\partial \text{Niveau de la mer total}}{\tan \beta * \partial t} \quad [\text{m/mois}] \quad (3)$$

où Y_{sh} est la position de la ligne d'eau (m). La composante morphologique inclut x la coordonnée transversale (m), D_c la profondeur de fermeture (m), ainsi qu'un bilan volumique (dQ), fonction lui-même du débit des fleuves vers la mer (m^3/an) et le transport longitudinal (LST, m^3/an). La composante hydrologique est fonction de la pente de la plage dynamique β (SUNAMURA, 1984 ; MELET *et al.*, 2020) et du niveau d'eau (m).

2.3 Composante morphologique

À long terme, l'évolution transversale de la ligne d'eau est principalement due à l'action des vagues sur le transport longitudinal (ROELVINK *et al.*, 2018). Dans GLOBCOASTS, la formule de transport utilisée est celle de KAMPHUIS (1991) (4,5) :

$$Q_{mass} = 2.33 \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} T_p^{1.5} \tan^{0.75} \beta D_{50}^{-0.25} H_s^{0.2} \sin^{0.6} (2\theta_{loc}) \quad (4)$$

$$Q_{vol} = 365 * 24 * 60 * 60 * \frac{Q_{mass}}{(\rho_s - \rho)(1-p)} \quad (5)$$

où ρ_s la densité du sable (kg/m^3), ρ la densité de l'eau (kg/m^3), p la porosité, T_p la période des vagues (s), β la pente de la plage ($^\circ$), D_{50} la taille moyenne des grains (m), H_s la hauteur significative des vagues au point de déferlement (m), et θ_{loc} l'angle local d'incidence entre la direction des vagues θ_{wave} ($^\circ\text{N}$) et l'orientation de la côte par rapport au nord $\theta_{shoreline}$ (rad) (6). Enfin Q_{mass} est exprimé en kg/s et Q_{vol} en m^3/an .

$$\theta_{loc} = \theta_{wave} - \theta_{shoreline} \quad (6)$$

$$\theta_{shoreline} = \text{atan}(dY, dX) \quad (7)$$

La plus grande partie des sédiments côtiers proviennent de l'érosion des continents via les rivières. A leur embouchure, une fraction est remobilisée par le transport longitudinal. Ce dernier est le principal responsable de l'évolution morphologique de la côte. Bien qu'il soit difficile d'estimer l'apport sédimentaire des rivières vers le littoral, une approximation est possible en combinant le flux liquide des rivières avec une estimation de la charge sédimentaire. Cet aspect est pris en compte dans le terme Q de l'équation (2).

2.4 Composante hydrologique

La composante hydrologique est la somme des processus affectant dynamiquement le niveau d'eau (8). Le niveau d'eau total à la côte est exprimé comme suit :

$$TWL = SLA + SU + RS \quad (8)$$

où SLA est l'anomalie du niveau de la mer (m) comprenant la DAC (storm surge), SU est le set-up des vagues (MELET *et al.*, 2020) Les anomalies du niveau de la mer (SLA) incluent les variations dues à la perte de masse de glace terrestre, aux changements dans les réserves d'eau terrestre, et aux surcotes de tempête, qui intègrent l'influence du vent et de la pression atmosphérique de surface (correction atmosphérique dynamique). Les vagues de surface océanique contribuent au niveau d'eau côtier via le setup pour la composante moyenne (MELET *et al.*, 2020). La contribution RS au niveau d'eau total est celle des rivières, dont les variations de débit en eau douce sont également connues pour influencer les niveaux d'eau côtiers en modifiant la densité de la colonne d'eau. RS correspond à l'effet stérique (i.e. densité) du fleuve sur le niveau de l'eau calculé via une régression linéaire entre le débit des rivières et l'anomalie du niveau marin (PIECUCH *et al.*, 2017).

2.5 Aspects numériques

GLOBCOASTS est implémenté en python et sera libre d'accès.

2.5.1 Discrétisation spatiale

Dans ce modèle, le trait de côte initial est représenté par des couples latitude/longitude, par exemple issus des vecteurs traits de côte de la NOAA à différentes résolutions (GSSHG - WESSEL *et al.*, 1996) ou dérivés d'observation satellites Landsat/Sentinel-2 (ALMAR *et al.*, 2023). Les équations présentées ci-dessus permettent de calculer une nouvelle position du trait de côte local en mètres dans la direction normale à la côte. Il est donc nécessaire de passer d'un repère géographique à un repère local (X,Y) orienté dans le sens de la côte. A chaque position, pour chaque pas de temps, l'évolution de la position du trait de côte est représentée par la position du même point au pas de temps suivant ($Y_{sh}^{t+1} = Y_{sh}^t + \partial S_h$) (1). Ainsi, bien que GLOBCOASTS soit un modèle avec application ciblée du régional au global, l'évolution du trait de côte est calculée de manière locale.

2.5.2 Discrétisation temporelle

Le modèle utilise un schéma d'Euler explicite centré sur l'espace. La composante morphologique peut présenter des instabilités numériques basées sur la condition du nombre de Courant (9). L'espacement ΔX est ce qui nous permet de choisir le meilleur schéma numérique. GLOBCOASTS est actuellement construit avec une résolution de $0,5^\circ$, soit environ un ΔX de 50 km, ce qui est compatible avec un schéma d'Euler explicite.

$$\Delta t < \frac{\Delta X^2}{4Q_0} \quad (9)$$

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

3. Etude analytique

Des tests analytiques ont été faits afin de vérifier l'implémentation des équations principales ainsi que le schéma numérique. Par souci de brièveté, seule l'étude de diffusion linéaire est présentée ci-après.

3.1 Test de diffusion linéaire

Le premier test réalisé est le test de diffusion linéaire utilisé par VITOUSEK et BARNARD (VITOUSEK & BARNARD, 2015). Il consiste à comparer une solution analytique (10) pour l'équation de diffusion linéaire avec la composante morphologique du modèle (2). Le trait de côte initial est représenté comme une sinusoïde et la solution analytique de l'évolution du trait de côte proposée est :

$$y = a * \exp(-\nu * k^2 * t) * \cos(kx) \quad (10)$$

$$\nu = 2 * \frac{Q_0}{D_c} \quad (11)$$

$$k = 4 * \pi / L \quad (12)$$

Les paramètres utilisés lors du test sont donnés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Paramètres du test de diffusion linéaire.

Amplitude de perturbation du trait de côte a (m)	100
Longueur du domaine L (m)	5000
Angle d'incidence des vagues α (radians)	0
Profondeur de fermeture D_c (m)	10
Transport sédimentaire longshore idéal Q_0 (m^3/an)	10^5
Espacement des points de grilles Δx (m)	50
Durée de simulation totale (an)	30

Le pas de temps utilisé est déterminé en posant le nombre de Courant à 1, ce qui nous permet de déterminer à partir de la condition de stabilité $\Delta t < 2\nu/\Delta x^2$, un pas de temps fixe à 0,0625 ans. Pour effectuer ce test, le modèle a été lancé dans les mêmes conditions que celles présentées dans le Tableau 2. Sachant que c'est un test de diffusion linéaire, la composante hydrologique du modèle est mise à zéro.

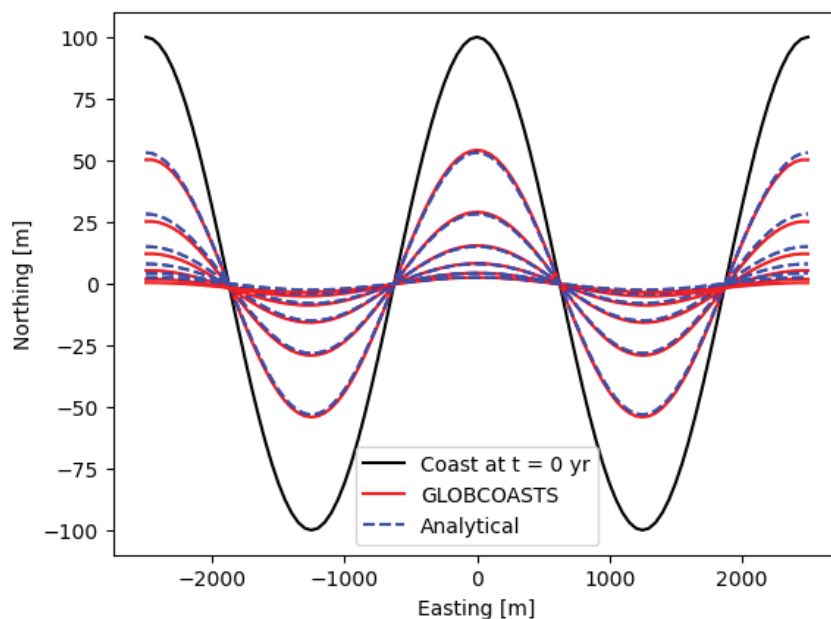


Figure 1. Résultats du test de diffusion linéaire montrés pour des intervalles de 6 ans. En trait pleins les résultats du modèle GLOBCOASTS, en pointillés les résultats de la solution analytique développée par VITOUSEK & BARNARD (2015). La ligne noire représente le trait de côte initial donné par l'équation $y = a * \cos(k * x)$.

Tableau 3. Analyse statistique du test de diffusion linéaire. Les résultats sont montrés pour des intervalles de 6 ans.

<i>Temps modèle</i>	<i>Corrélation de Pearson</i>	<i>Root Mean Square Error</i>
5	0.999	1.031
10	0.998	1.221
15	0.995	1.310
20	0.987	1.313
25	0.963	1.275
30	0.922	1.237

La Figure 1 montre que le modèle reproduit correctement la solution analytique, prouvé par l'étude statistique des résultats obtenus, présentée dans le Tableau 3, ce qui confirme que le schéma utilisé est correct. Les différences observées aux limites du domaine proviennent des conditions aux limites imposées, qui sont des conditions de bord de Neumann.

5. Conclusions

GLOBCOASTS est un modèle d'étude de sensibilité des facteurs principaux d'évolution du trait de côte, à vocation d'application à l'échelle régionale à globale, et dynamique basé sur des observations satellites. C'est un modèle en Python, libre, et peu coûteux en termes de temps de calcul. Il prend en compte trois processus majeurs de l'évolution du trait de côte : (1) le transport des sédiments via le transport longitudinal et les vagues ; (2) l'apport de sédiments via la décharge sédimentaire des rivières et leur influence stérique sur le niveau de la mer et (3) l'impact intégrée du niveau marin. L'indépendance de ces trois processus permet de les combiner malgré leurs échelles temporelles différentes et d'obtenir une dynamique d'évolution du trait de côte sur des échelles de temps intermédiaires. La création de GLOBCOASTS est motivée par le besoin de comprendre et de prédire l'évolution du littoral à grande échelle régionale à mondiale. L'utilisation de produits satellites permet de travailler à cette échelle et de combler le manque de données in situ, ce qui permet d'appréhender des zones jusqu'alors peu étudiées. A terme, GLOBCOASTS vise également à quantifier la part de cette évolution due à des facteurs naturels et celle due à des facteurs anthropiques. Pour l'instant, seuls les facteurs naturels sont pris en compte dans le modèle. La prochaine étape consiste à introduire les facteurs anthropiques, notamment l'impact des infrastructures sur le transport sédimentaire longitudinal ainsi que l'impact des barrages sur les apports en sédiments à l'embouchure des rivières. En raison de sa simplicité d'utilisation et de sa rapidité, GLOBCOASTS pourra être utilisé pour créer des scénarios de prédiction en fonction des projections climatiques, mais aussi comme un outil précieux pour l'étude de différents scénarios d'adaptation du littoral.

6. Références bibliographiques

- ALMAR R., BOUCHAREL J., GRAFFIN M., ONDOA ABESSOLO G., THOUMYRE G., PAPA F., RANASINGHE R., MONTANO J., BERGSMA E.W., BABA M.W., JIN F.F. (2023). *Influence of El Nino on the variability of global shoreline position*. Nature Communications, Vol. 14, pp 3133. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38742-9>
- BARNARD P.L., VAN ORMONDT M., ERIKSON L.H., ESHLEMAN J., HAPKE C., BERGSMA E. W., ALMAR R., ANTHONY E. J., GARLAN T., KESTENARE E. (2022). *Wave variability along the world's continental shelves and coasts: Monitoring opportunities from satellite Earth observation*. Advances in Space Research, Vol. 69(9), pp 3236-3244. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.02.047>
- C3S - Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, (2018). *Sea level gridded data from satellite observations for the global ocean from 1993 to present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.4c328c78>
- CARRERE L., LYARD F., CANCELET M., GUILLOT A. (2016). *Finite element solution FES2014, a new tidal model – validation results and perspectives improvements*. ESA Living Planet Conf.

- DECHARME B., DELIRE C., MINVIELLE M., COLIN J., VERGNES J.P., ALIAS A., SAINT-MARTIN D., SEFERIAN R., SENESI S., VOLDOIRE A. (2019). *Recent changes in the ISBA-CTRIIP land surface system for use in the CNRM-CM6 climate model and in global off-line hydrological applications*. Journal of Advances in Modeling Earth Systems. Vol. 11(5), pp 1207–1252. <https://doi.org/10.1029/2018MS001545>.
- FRENCH J., PAYO A., MURRAY B., ORFORD J., ELIOT M., COWELL P. (2016). *Appropriate complexity for the prediction of coastal and estuarine geomorphic behaviour at decadal to centennial scales*. Geomorphology Vol. 256, pp 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.10.005>.
- HERSBACH H., BELL B., BERRISFORD P., *et al.* (2020). *The ERA5 global reanalysis*. Q. J. R. Meteorol. Soc. 146, pp 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- KAMPHUIS J.W. (1991). *Alongshore sediment transport rate*. Waterw. Port Coast. Ocean Eng. Vol 117, pp 624-640. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1991\)117:6\(624\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1991)117:6(624))
- MELET A., TEATINI P., LE COZANNET G., JAMET C., CONVERSI A., BENVENISTE J., ALMAR R. (2020). *Earth Observations for Monitoring Marine Coastal Hazards and Their Drivers*. Surveys in Geophysics Vol. 41, pp 1489–1534, <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09594-5>.
- NICHOLLS R.J., FRENCH J., MAANEN B.V., BURNINGHAM H., PAYO A., WALKDEN M., THRONHILL G., BROWN J., LUXFORD F., SIMM J., HORRILLO-CARABALLO J.M. (2015). *Improving decadal coastal geomorphic predictions*. Geomorphology Vol. 256, pp 1-2. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.10.015>
- PAYO A., HALL J.W., FRENCH J., SUTHERLAND J., VAN MAANEN B., NICHOLLS R.J., REEVE D.E. (2016). *Causal loop analysis of coastal geomorphological systems*. Geomorphology Vol. 256, pp 36–48. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.048>
- PIECUCH C.G., HUYBERS P., TINGLEY M.P. (2017). *Comparison of full and empirical Bayes approaches for inferring sea-level changes from tide-gauge data*. Journal of Geophysical Research : Oceans, Vol 122(3), pp 2243-2258, <https://doi.org/10.1002/2016JC012506>
- PUJOL M.A., FAUGERE Y., TABURET G., DUPUY S., PELLOQUIN C., ABLAIN M., PICOT N. (2016). *DUACTS DT2014 : the new multi-mission altimeter data set reprocessed over 20 years*. Ocean Science, Vol. 12, pp. 1067–1090, <https://doi.org/10.5194/os-12-1067-2016>.
- ROELVINK D., HUISMAN B., ELGHANDOUR A. (2018). *Efficient modelling of complex coastal evolution at monthly to century time scales*. Sixth International Conference on Estuaries and Coasts, August 20-23, 2018, Caen, France.
- SUNAMURA T. (1984). *Quantitative predictions of beach-face slopes*. Geological Society of America Bulletin Vol. 2(B4), pp 242–245, [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1984\)95<242:QPOBS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1984)95<242:QPOBS>2.0.CO;2)

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

VITOUSEK S., BARNARD P.L. (2015). *A nonlinear, implicit one-line model to predict long-term shoreline change*. The Proceedings of the Coastal Sediments 2015.

https://doi.org/10.1142/9789814689977_0215

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: CoSMoS-COAST*. J. Geophys. Res. Earth Surf. Vol. 122, pp 782–806.

<https://doi.org/10.1002/2016JF004065>

WESSEL P., SMITH W.H.F. (1996). *A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database*. J. Geophys. Res. Vol. 101(B4), pp 8741–8743, doi:10.1029/96JB00104.