XVII[èmes] Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil
Chatou, 2022
DOI:10.5150/jngcgc.2022.034 *© Editions Paralia CFL*
disponible en ligne – http://www.paralia.fr – available online

OptiMorph : un modèle de morphodynamique du littoral par principe de minimisation. Analyse de sensibilité en 1D et application multi-1D

Ronan DUPONT [1,3], Frédéric BOUCHETTE [1,3], Bijan MOHAMMADI [2,3], Damien SOUS [3,4]

1. Géosciences Montpellier, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, France.
   ronan.dupont@umontpellier.fr; frederic.bouchette@umontpellier.fr
2. IMAG, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, France.
   bijan.mohammadi@umontpellier.fr
3. GLADYS, Univ Montpellier, CNRS, Le Grau du Roi, France.
4. SIAME, Univ. Pau & Pays Adour, E2S UPPA, Anglet, France.
   damien.sous@mio.osupytheas.fr

Résumé :
Le modèle numérique OptiMorph résout des problèmes morphodynamiques par une approche de transport optimal. Dans un premier temps, nous nous intéressons au comportement du modèle pour différents forçages et discrétisations spatiales et temporelles. Cette analyse permet de s'assurer de la consistance et de la stabilité du modèle. Ensuite, nous appliquons le modèle dans une configuration 'multi-1D'sur des données réelles. Il s'agit de positionner un tube en géotextile dans le Golfe d'Aigues-Mortes. L'analyse des résultats montre l'efficacité de ce tube lors d'une tempête de quelques jours, réduisant la hauteur d'une barre sédimentaire.

Mots-clés :
Hydro-morphodynamisme, Optimisation, Validation de modèle, Littoral, Approche variationnelle, Minimisation d'énergie, Transport optimal, Ondes.

1. Introduction

La morphodynamique littorale fait référence à l'évolution de la morphologie d'une plage au cours du temps, à savoir l'évolution de sa bathymétrie. Il existe de nombreuses méthodes pour calculer la morphodynamique, des approches empiriques aux modèles basés sur des processus physiques élémentaires. Les modèles peuvent être classés en plusieurs catégories, telles que i) les modèles d'évolution du profil de plage (1D), qui considèrent uniquement le transport transversal, ii) les modèles morphodynamiques 2D, qui requièrent le calcul des vagues et des courants éventuellement moyennés en profondeur pour modéliser le transport des sédiments ou iii) les modèles 3D et quasi-3D, qui déterminent l'évolution des sédiments en utilisant les variations horizontales et verticales des paramètres dérivés des vagues. Dans tous les cas, le transport sédimentaire,

et donc la morphodynamique sont abordés de manière locale, c'est-à-dire à partir de la paramétrisation du transport en chaque point de la grille de calcul à partir d'une loi plus ou moins complexe de remobilisation et remise en suspension/charriage du sédiment. À l'opposé de ces approches, le modèle Opti-Morph est basé sur le contrôle optimal, qui est une stratégie dite globale, dans la mesure où le lieu exact du transport n'est jamais décrit a priori par la méthode de calcul. Cette stratégie de résolution, héritée des sciences de l'optimisation, est née à Montpellier sur la base des idées de BOUCHETTE, MOHAMMMADI et AZERAD (ISEBE *et al*., 2008 ; BOUHARGUANE *et al*., 2010 ; MOHAMMADI & BOUHARGUANE, 2011); elle était initialement orientée vers l'optimisation de structures de protection du littoral.
En 2011, ces applications d'optimisation sur le littoral ont pris une dimension différente. La question qui s'est posée est celle de la résolution numérique du problème suivant : « Et si on ne cherchait pas la forme ou l'emplacement optimal d'une structure mais la forme optimale du fond, faisant l'hypothèse que le système naturel tend à prendre la meilleure forme possible par rapport à une grandeur caractéristique à minimiser » qui est une manière de formuler le problème de la morphodynamique des plages par calcul optimal. Cette question soulève de nombreux défis physiques et numériques. En particulier, il est nécessaire de définir un critère bien particulier à minimiser que l'on appellera fonction de coût $\mathcal{J}$. Une hypothèse a été aussi d'admettre que « le système naturel cherche à minimiser un certain état énergétique qui évolue selon la forme du fond ». Les développements de COOK *et al* ont été effectués sur cette base pour donner naissance à Optimorph (COOK *et al.*, 2021), qui est un code de calcul morpho-dynamique 1D reposant sur la théorie du transport optimal et nécessitant un nombre très réduit de paramètres physiques. Des premiers travaux de validation ont été effectués notamment en confrontant ce modèle à d'autres modèles très classiques comme XBeach (COOK *et al.*, 2021). La suite de cette validation sera présentée dans ce manuscrit à travers des analyses de sensibilité.

2. Modèle hydro-morphodynamique 1D basés sur la minimisation d'énergie

Le nouveau modèle élaboré par (COOK *et al.*, 2021) est basé sur le principe que la nature cherche à minimiser l'énergie qu'elle dépense. La fonction de coût qui régit l'évolution du fond marin a été élaborée sur la base de l'expression de l'énergie totale $\mathcal{E}_H$ des vagues. Cette énergie est calculée à partir du modèle hydrodynamique qui, lui-même, est initialisé via les constantes usuelles : la période de vague T_0, le forçage H_0, la hauteur d'eau initiale h_0,... Le modèle fonctionne selon le diagramme suivant :

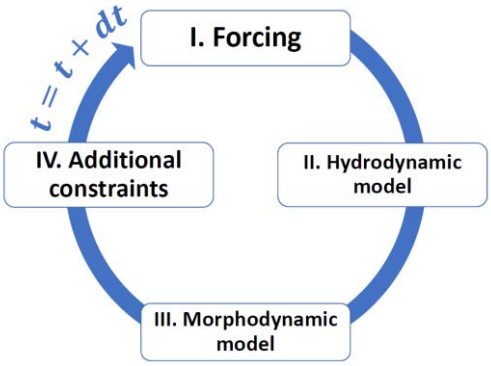

Figure 1. Diagramme de fonctionnement d'OptiMorph.

2.1 Modèle hydrodynamique

L'évolution en temps du profil bathymétrique est basée sur l'hypothèse que le fond évolue afin de minimiser l'énergie totale des vagues. Ainsi, un modèle hydrodynamique fournissant une description de l'état des vagues de surface est indispensable. Le modèle présenté ci-dessous détermine la hauteur significative des vagues, notée H le long du profil transversal à la plage, c'est-à-dire le domaine $\Omega = [0, x_{max}]$, où $x = 0$ est un point arbitraire en eaux profondes, et x_{max} est un point arbitraire au-delà du trait de côte. Le domaine Ω est divisé en deux sous-ensembles disjoints : la zone de shoaling Ω_S et la zone de déferlement Ω_B. La hauteur des vagues H sur Ω_S est basée sur l'équation de shoaling (1), où H_0 est la hauteur des vagues en eau profonde et K_S est un coefficient de shoaling calculé à partir de la théorie linéaire.

$$\begin{cases} H(x,t) = H_0(t)Ks(x,h) & x \in \Omega_S \quad (1) \\ H(x,t) = \gamma h(x,t) & x \in \Omega_B \quad (2) \end{cases}$$

Pour le déferlement dans la zone de Ω_B, le modèle se base essentiellement sur le critère de Munk γ (2) se basant sur la cambrure critique de la vague. Cependant, il a été régulièrement amélioré dans le modèle (muti-déferlement, mémoire vagues,…).

Ce modèle hydrodynamique est volontairement très simple et son choix repose sur 2 idées principales : a) il faut un modèle relativement facile à différencier analytiquement pour calculer le gradient $\nabla_\psi[\mathcal{J}(\psi, H)]$, nécessaire dans la résolution numérique du problème ; b) il doit fondamentalement être un outil de calcul ultra-rapide. À ce stade du projet, nous privilégions la rapidité sur la finesse de la restitution de l'hydrodynamique et vu les résultats déjà obtenus, nous montrons que le raffinement incessant de l'hydrodynamique n'a de sens que si l'approche de la morphodynamique est locale.

2.2 Modèle morphodynamique

Pour le modèle morphodynamique, il est supposé que le fond varie au cours du temps dans le but de minimiser une fonction de coût $\mathcal{J}$. Cette fonction de coût est définie comme

l'énergie potentielle des vagues en zone de shoaling, définie pour tout $t \in [0, T]$ par l'équation (3) suivante :

$$\mathcal{J}(\psi, t) = \frac{1}{16}\int_{\Omega_S} \rho_w g H^2(\psi, x, t) dx \quad [J.m^{-1}] \tag{3}$$

où H désigne la hauteur des vagues calculée par le modèle hydrodynamique, ρ_w est la densité de l'eau (kg.m−3), et g l'accélération gravitationnelle (m.s−2). Dans le but de décrire l'évolution du profil bathymétrique ψ, dont l'état initial est donné par ψ_0, la dynamique de ψ minimisant $\mathcal{J}$ est régie par le système de descente de gradient suivant :

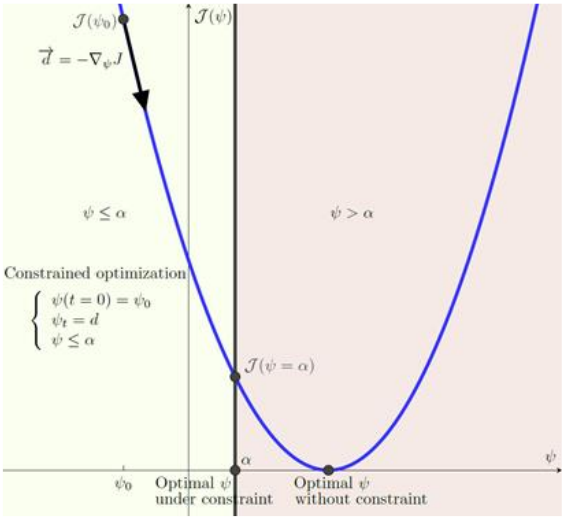

Figure 2. Illustration des contraintes de conservation sableuse et de pente avec $\psi \leq \alpha$. L'optimum ne correspond pas nécessairement au point critique $\nabla_\psi \mathcal{J} = 0$.

où ψ est l'évolution en temps du fond sableux m.s−1, Υ est la mobilité sédimentaire m.s.kg−1, Λ est l'excitation du fond sableux par les vagues, d est la direction de descente indiquant la manière dont le fond sableux varie, α les contraintes. Dans une configuration sans contrainte, il y aurait simplement $\psi_t = -\nabla_\psi \mathcal{J}$, qui par sa définition, indique la direction d'un minimum local de $\mathcal{J}$ par rapport à ψ comme illustré figure 2.

Des contraintes ci-dessous sont ajoutées au modèle pour incorporer les processus physiques nécessaires à l'obtention de résultats réalistes. Les forces motrices de l'évolution morphologique du profil bathymétrique sont décrites par la minimisation de la fonction de coût $\mathcal{J}$. Les processus secondaires sont exprimés par deux contraintes physiques.

- une contrainte de pente sableuse, qui empêche le sable de présenter des pentes irréalistes

$$\left|\frac{\partial \psi}{\partial x}\right| \leq M_{\text{slope}} \tag{4}$$

où le paramètre M_{slope} représente l'angle de talus critique du sable.

- la contrainte de stock sableux, obligeant la quantité de sable dans un bassin expérimental à rester constante au cours du temps (cette contrainte pouvant être relaxée ou transformée dans un système ouvert comme une plage naturelle).

$$\int_\Omega \psi(t,x)dx = \int_\Omega \psi_0(x)dx \; \forall t \in [0,T] \quad (5)$$

3. Stabilité et sensibilité

Une série de tests mathématiques et numériques sont réalisés pour analyser la sensibilité et la stabilité du modèle numérique. Nous montrons qu'OptiMorph est un code temporellement et spatialement stable et est réactif à différents types de forçages.

3.1 Convergence temporelle et spatiale du modèle

Nous avons calculé une simulation OptiMorph dite *de référence* caractérisée par un pas de temps très fin de 0.18 s ; cette simulation a été réalisée avec un profil bathymétrique linéaire de pente 1e-2 et les forçages d'une gaussienne de hauteur d'eau maximale $H_{max} = 2$ m. Cette simulation de référence peut être considérée comme une simulation idéale car le pas de temps choisi est plus fin que tout pas de temps qui serait choisi dans un modèle hydro-morphodynamique classique. En d'autres termes, nous supposons que, d'un point de vue numérique, ces simulations de référence décrivent la réalité aussi bien que possible (dans le cadre de validité des hypothèses physiques retenues). Évidemment, cela pourrait être faux car ces simulations ne sont pas entièrement validées par des données expérimentales. Mais, en ce qui concerne la dimension numérique, toutes les autres simulations avec un pas de temps plus dégradé devrait fournir des résultats moins précis. Nous avons ensuite effectué un ensemble de simulations OptiMorph avec différents pas de temps dont les résultats ont été comparés avec ceux de leur simulation de référence respective. Nous calculons la différence entre la simulation de référence et chaque simulation avec des pas de temps modifiés. Nous quantifions une erreur résiduelle avec la norme L^2 : $\mathcal{E}_{L^2} = ||\psi_{ref} - \psi||_{L^2}$ en mètres. ψ_{ref} est la référence numérique correspondant à la simulation exécutée à $\Delta t = 0{,}18\ s$, ψ le fond marin correspondant à la simulation exécutée au pas de temps actuel. Nous avons réalisé 10 simulations avec des pas de temps compris entre [0.18 ; 90] s et nous obtenons les résultats décrits dans la figure 3.a).

Ces résultats montrent que le modèle converge dans le temps. On peut supposer que la solution semble acceptable à partir d'un pas de temps de $\Delta t \leq 10$ s correspondant à une erreur ≤ 1e-5 m. Ce pas de temps critique correspond à une erreur raisonnable et nous le considérons comme nouvelle référence pour la résolution temporelle dans le reste de l'étude. On effectue ensuite avec ce nouveau pas de temps de référence une convergence spatiale avec des valeurs de Δx évoluant dans l'intervalle [0.001 ; 2] m. Les résultats sont présentés sur la figure 3.b). Ces résultats montrent que le modèle converge aussi spatialement.

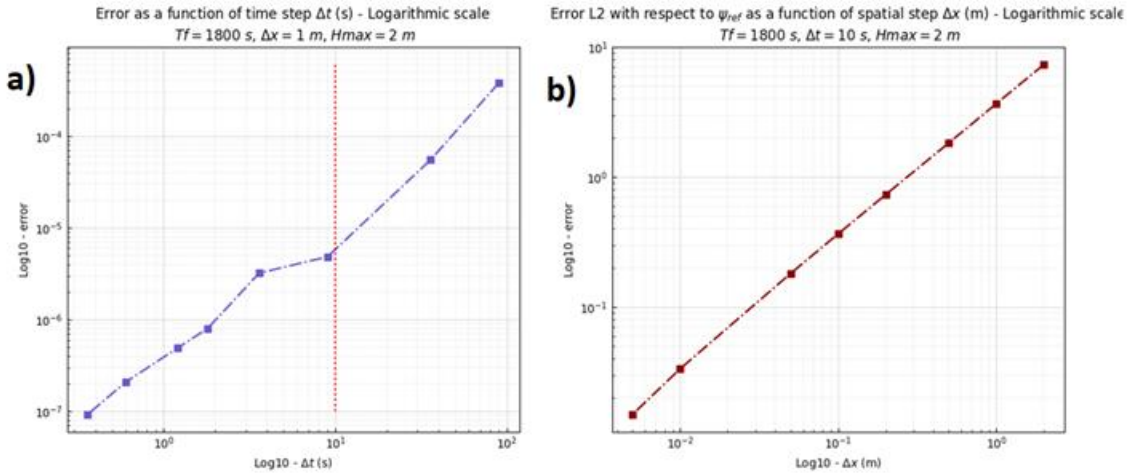

Figure 3. a) Convergence temporelle du modèle avec des Δt *dans [0.18, 90] s b) Convergence spatiale du modèle avec des* Δx *dans [0.001,2] m.*

3.2 Convergence sur les forçages du modèle

Une étape importante de l'analyse du comportement numérique du modèle est la validation de son comportement vis à vis des caractéristiques du domaine et par rapport aux forçages. Dans cette partie, on s'intéresse en particulier à la comparaison de simulations de l'évolution morphodynamique pour des forçages identiques mais des domaines différents. On étudie une tempête de plusieurs jours en faisant varier la longueur du domaine tout en gardant la même plage linéaire de pente 1e-2. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 4.a) et montrent la formation d'une barre réaliste stable pour des longueurs de domaine dans l'intervalle [600, 1200, 1800, 3000] m.

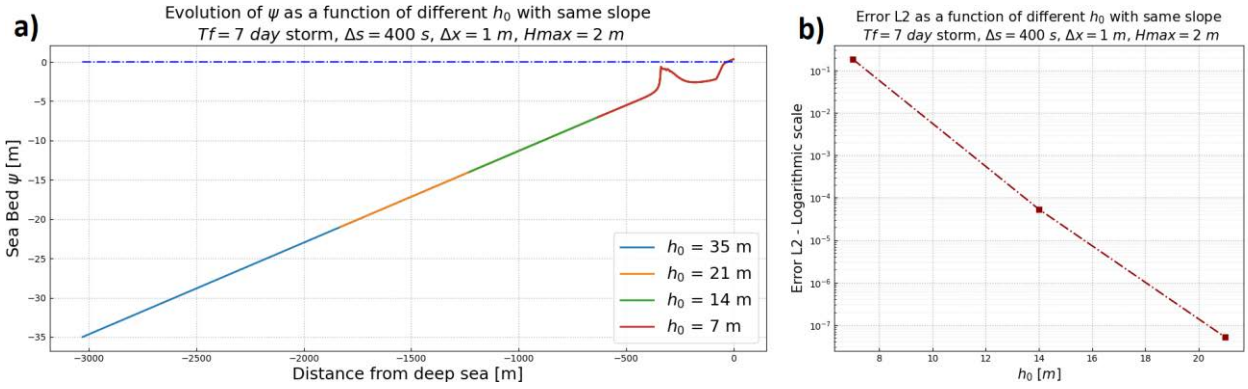

Figure 4. a) Affichage des différents profils de fond finaux pour des domaines de tailles [600, 1200, 1800, 3000]m correspondant à des hauteurs d'eau au large de h= [7, 14, 21, 35] m. La représentation est tronquée à 7 m de profondeur. b) Erreur L2 en comparant chaque simulation à la solution de référence correspondant au domaine de 3000 m (le plus long, représente les conditions en eau profonde).

La figure 4.b) expose la convergence de la solution en fonction du changement de longueur du domaine. Comme pour la convergence sur la résolution spatiale, on considère une simulation de référence qui est celle d'un domaine de longueur 3000 m. La convergence observée assure donc que quelle que soit la taille du domaine, le passage en houle en eau peu profonde se fait toujours au même point et que la réponse morpho-dynamique se fait de la même manière.

4. Applications à un cas Multi-1D sur le Golfe d'Aigues-Mortes

Les travaux de (ISEBE *et al.*, 2008 ; COOK *et al.*, 2021) se sont également intéressés à la recherche de la position optimale de géotubes (solutions de protection) sur un profil transversal pour maximiser leur effet en tant qu'atténuateur de houles. Ayant ce type de démarche en tête, on souhaite réaliser un ensemble de simulations multi-1D en plaçant un géotube sur un ensemble de profils morphologiques transversaux réels (Golfe d'Aigues-Mortes ; Figure 5). On veut calculer la réponse morphologique de ce domaine multi-1D en présence de ce type d'ouvrage semi-immergé.

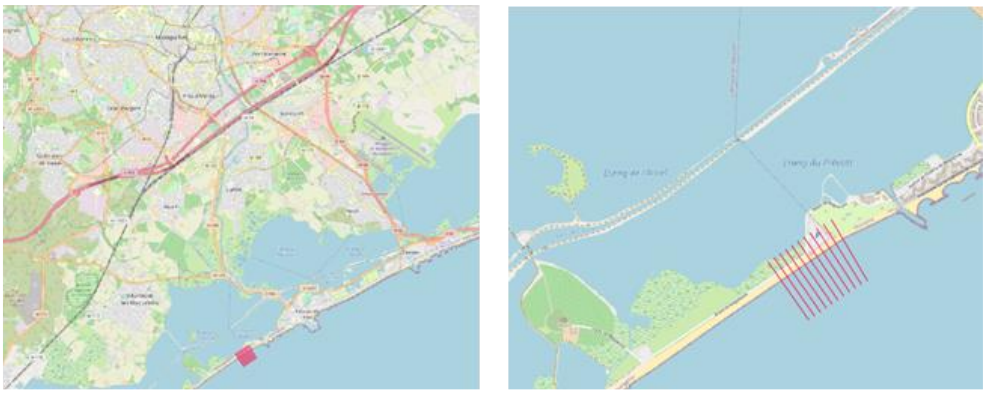

Figure 5. Géographie de la simulation sur le Golfe d'Aigues-Mortes.

On réalise la simulation d'un cas extrême multi-1D (sur l'ensemble des profils); cette simulation correspond à une tempête de quelques jours avec des vagues d'une hauteur maximale de 2 m. On ajoute sur le domaine un géotube sous la forme d'une gaussienne (dont les caractéristiques varient d'un profil à l'autre ; figure 6.a). Des simulations parallélisées (calculateur HPC) sont lancées et s'achèvent en moins de 5 minutes quel que soit le nombre de transects (modulo la limite de cœurs sur le cluster). Les résultats sont présentés sur la figure 6.b).

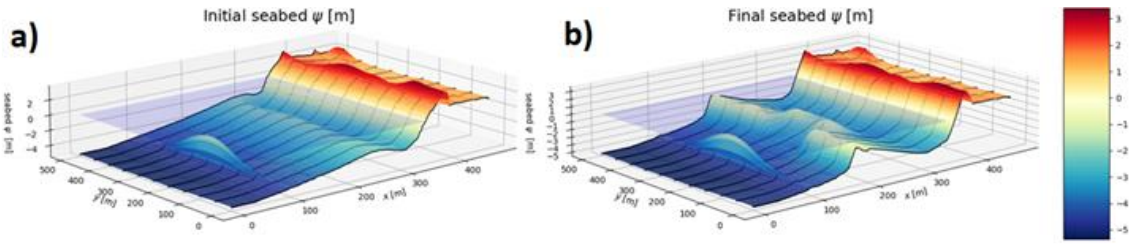

Figure 6. a) Bathymétrie initiale sur le Golfe d'Aigues-Mortes en ajoutant un géotube en forme de gaussienne avec une hauteur maximale de 3m. b) Bathymétrie finale après simulation d'une tempête de plusieurs jours.

Les résultats montrent la formation d'une fosse à l'arrière de la partie la plus haute et épaisse du géotube. Ces résultats sont encourageants car ils sont très similaires à ceux relevés dans la campagne expérimentale COPTER menée en 2018 en bassin à houle 3D (fond mobile).

5. Conclusion

OptiMorph est un modèle numérique permettant des simulations morphodynamiques rapides donc offrant la possibilité de s'intéresser au temps long et à des domaines de grande taille. Sa faible complexité permet des temps de réponses environ 100 fois plus courts que les modèles classiques basés sur le transport local de sédiments. Il a été démontré que ce code est robuste, aussi bien par rapport aux perturbations numériques (convergence spatiale et temporelle) que physique (forçages).

OptiMorph peut être exécuté en parallèle sur des ensembles de profils 1D sur un cluster HPC et est donc compatible avec une approche Multi-1D. Dans la configuration présentée, on observe des résultats très proches de ceux obtenus lors d'essais en bassin.

6. Remerciements

Nous remercions le CNRS et son financement MITI pour la thèse de DUPONT R. Nous remercions le réseau GLADYS (www.gladys-littoral.org) pour les équipements, les workshops, le financement de la mobilité, les conditions de travail offertes par ce réseau.

7. Références bibliographiques

ISEBE D., AZERAD P., BOUCHETTE F., IVORRA B., MOHAMMADI B. (2008). *Shape optimization of geotextile tubes for sandy beach protection.* International Journal for Numerical Methods in Engineering, 74(8) :1262-1277. https://doi.org/10.1002/nme.2209

ISEBE D., AZERAD P., MOHAMMADI B., BOUCHETTE F. (2008). *Optimal shape design of defense structures for minimizing short wave impact.* Coastal Engineering, 55(1) :35-46. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.06.006

BOUHARGUANE A., AZERAD P., BOUCHETTE F., MARCHE F., MOHAMMADI B. (2010). *Low complexity shape optimization & a posteriori high fidelity validation.* Discrete & Continuous Dynamical Systems - B, 13(4) :759-772.
https://doi.org/10.3934/dcdsb.2010.13.759

MOHAMMADI B., BOUHARGUANE A. (2011). *Optimal dynamics of soft shapes in shallow waters.* Computers & Fluids, 40(1) :291-298.
https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2010.09.031

ISEBE D., AZERAD P., BOUCHETTE F., MOHAMMADI B. (2014). *Design of Passive Defense Structures in Coastal Engineering.* International Review of Civil Engineering (IRECE), 5(2) :75. https://doi.org/10.15866/irece.v5i2.2029

MOHAMMADI B., BOUCHETTE F. (2014). *Extreme scenarios for the evolution of a soft bed interacting with a fluid using the Value at Risk of the bed characteristics.* Computers & Fluids, 89 :78-87. https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.10.021

COOK M. (2021). *Calcul optimal pour la modélisation de la dynamique naturelle des plages sableuses et la conception d'ouvrages de défense du littoral à faible impact anthropique*. Thèse Université de Montpellier. Disponible en ligne sur URL : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03615087