



Modélisation de l'influence d'un banc d'huitres plates sur la dynamique hydro-sédimentaire en baie de Quiberon

Alexis BEUDIN¹, Martin PERROT²

1. EGIS, Solutions Maritimes, 208 Quai de Paludate, 33800 Bordeaux, France.

alexis.beudin@egis-group.com

2. Seaboost, 889 Rue de la Vieille Poste, 34000 Montpellier, France.

martin.perrot@seaboost.fr

Résumé :

Dans le cadre du projet européen Climarest visant à promouvoir la restauration d'écosystèmes et les initiatives destinées à améliorer la résilience des régions côtières au changement climatique, une modélisation numérique couplée vagues-courants-sédiments basée sur la chaîne TELEMAC a été mise en œuvre pour évaluer le potentiel service écosystémique d'un programme de restauration d'huîtres plates vis-à-vis du phénomène d'érosion devant l'isthme de Penhièvre, en Baie de Quiberon.

Une attention particulière a été portée à la formulation du frottement de fond pour représenter la présence du banc d'huîtres.

Les résultats de modélisation témoignent d'une influence mesurable du banc d'huîtres sur les vagues, les courants et le transport sédimentaire qui en résulte. L'érosion de la plage simulée en période de tempête est réduite.

La paramétrisation restent à valider, mais l'outil offre une base de réflexion pour l'élaboration de scénarios de restauration.

Mots-clés :

Érosion, Hydro-sédimentaire, Modélisation, Frottement de fond, Huîtres plates, Restauration, Écosystèmes côtiers, Solutions basées sur la Nature, Éco-ingénierie.

1. Introduction

L'adoption de solutions naturelles ou fondées sur la Nature (SFN) est de plus en plus mise en avant dans les domaines du génie côtier et de la gestion intégrée des zones côtières, car elles ont le potentiel d'atténuer les risques côtiers (submersion, érosion) en fournissant de nombreux co-bénéfices (e.g., FEAGIN *et al.*, 2015 ; GIJSMAN *et al.*, 2021 ; IUCN, 2022 ; MORIS *et al.*, 2024).

Les bancs d'huîtres se présentent comme une composante importante du concept de « Living Shorelines » introduit dans les années 70 aux Etats-Unis par Edgar Garbisch. Ce concept repose sur l'alliance de principes d'écologie et d'ingénierie au service de la protection de rivages vulnérables et de la restauration du même coup des services écosystémiques (e.g., MORIS *et al.*, 2019).

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

Dans le cadre du projet européen CLIMAREST, la Baie de Quiberon (Bretagne Sud, France) héberge un programme de restauration de l’huître plate indigène européenne (*Ostrea edulis*) situé devant l’isthme de Penthièvre en érosion chronique. Alors que les autorités locales tentent de maintenir tant bien que mal les digues existantes, le projet de restauration offre l’opportunité d’explorer les capacités éco-ingénieures des bancs d’huîtres sous l’action des vagues et des courants.

Une première étape a consisté à mettre en œuvre un modèle numérique pour apprécier l’influence potentielle d’un banc d’huîtres sur différents aspects de la dynamique hydro-sédimentaire dans ce secteur de la baie de Quiberon. Une attention particulière a été portée sur le rôle que pourrait jouer la pleine colonisation d’une concession expérimentale gérée par le CRC Bretagne Sud sur la réduction du risque érosion le long de Penthièvre.

Finalement, cet outil de modélisation permet de construire un cadre pour la conception optimale de solutions basées sur la nature.

2. Contexte

L’étude se concentre sur le secteur Nord-Ouest de la baie de Quiberon (Figure 1). C’est un environnement méso- à macro-tidal (marnage compris entre 2 et 5 m), relativement abrité des houles du large par une presqu’île de 15 km de long.



Figure 1. (En haut) Location du site d’étude en Bretagne Sud, (en bas à gauche) Photographie de l’isthme de Penthièvre (LE TELEGRAMME, 2023), et (en bas à droite) Photographie du déploiement de récifs artificiels pour la restauration d’huîtres plates (NICLO FILMS pour SEABOOST, juillet 2023).

Dans les eaux peu profondes, les vitesses des courant de marée n’excèdent pas 0.3 m/s (SHOM, 2005). L’agitation est dominée par les houles résiduelles qui ont réfractées dans

la baie plus que le clapot car le vent souffle rarement du sud-est le long du plus long fetch (LATTEUX, 2006). Au droit du site de restauration, d'après une analyse statistique des données RESSOURCECODE (2022), la hauteur significative annuelle des vagues est comprise entre 0.6 et 0.8 m et associée à une période pic de 12-13 s.

Dans la zone subtidale, le fond présente une mosaïque sédimentaire de différents types : graviers, sables et vases (SHOM, 2023). Dans la zone intertidale, la surface du fond présente principalement des sables fins à moyens hormis lors des épisodes de tempêtes lors desquels affleurent des sables plus grossiers/graviers (ARTELIA, 2016).

La route littorale sur l'isthme de Penthièvre est exposée au risque d'érosion comme en attestent le mauvais état des digues (LE TELEGRAMME, 2023).

Le site de restauration d'une superficie de 35 ha est situé à ~1km devant l'isthme à une profondeur d'environ 4 m sous le niveau moyen près de la ligne de niveau de basse mer de vive-eau (voir Figure 4).

3. Description du modèle

3.1 La chaîne de modélisation TELEMAC

En bref, le système de modélisation TELEMAC (<http://www.opentelemac.org/>) est une suite logicielle open-source incluant notamment le modèle hydrodynamique TELEMAC-2D (basé sur les équations Saint-Venant), le modèle de propagation de vagues TOMAWAC (modèle spectral de troisième génération) et un module de transport sédimentaire SISYPHE (incluant le calcul des évolutions de la hauteur du fond) tous basés sur des grilles non-structurées permettant des simulations d'écoulements complexes à différentes échelles. Pour plus de détails sur ce système de modélisation, se référer par exemple à VILLARET *et al.* (2013).

3.2 Configuration du modèle

La présente configuration du modèle TELEMAC (basée sur la version 8.2) couple sur le maillage illustré Figure 2 chacun des trois modèles :

- a) *Le module hydrodynamique TELEMAC-2D* qui vise à simuler la propagation de la marée dans la baie de Quiberon et la surélévation du niveau d'eau et les courants induits par le déferlement des vagues. Il repose sur un MNT compilé à partir de données topo-bathymétriques existantes (LIDAR, 2010 ; TANDEM, 2015). La marée est forcée à la frontière océanique à partir des composantes harmoniques de la base de données PREVIMER d'IFREMER. La rugosité du fond reflète une composition de fond sableux et coquillés (voir section 3.3). Le mélange horizontal suit l'expression d'Elder. Le maillage a une résolution de 500 m au large à ~1m au rivage (84k nœuds, 165k triangles). Le pas de temps est de 5 s (il faut une demi-heure pour simuler un cycle morte-eau/vive-eau sur 20 processeurs).

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

- b) *Le module de propagation de vagues TOMAWAC* qui vise à simuler les conditions de vagues devant l'isthme due aux houles qui entrent dans la baie par le sud-ouest et possiblement le clapot généré par le vent qui souffle sur la baie. Le modèle inclut notamment les processus de déferlement et de dissipation par frottement de fond (de façon uniforme avant la présente étude, voir section 3.3). La propagation des vagues est généralement influencée par les fluctuations du niveau d'eau et la réfraction induit par les courants. En retour, le déferlement des vagues peut générer une surélévation du niveau d'eau et des courants dans la zone de surf sous l'effet des contraintes de radiation. Les conditions de houle à la frontière océanique ont été imposées d'après une analyse statistique des données disponibles sur RESSOURCECODE (<https://ressourcecode.ifremer.fr/>). Les conditions annuelles ($H_s=2.4\text{m}$; $T_p=13\text{s}$; $D_m=20^\circ\text{N}$) sont retenus ici pour caractériser des conditions de tempêtes relativement fréquentes supposées conduire au transport de sédiment. D'autres simulations pourront élargir la gamme des hauteurs de vagues au large et de vitesse du vent pour appréhender davantage de conditions tempétueuses. Le pas de temps est aussi de 5 s. Le modèle de vagues a été couplé au modèle hydrodynamique tous les 10 pas de temps. Il faut environ 8 heures pour simuler 2 jours de modélisation couplée vagues-courants sur 20 processeurs.
- c) *Le module de transport sédimentaire SISYPHE* qui vise à calculer le taux de transport solide à partir de la formule du transport total sous l'action combinée des vagues et des courants selon SOULSBY-VAN RIJN (1997) appliquée à une classe de sable de diamètre médian $d_{50}=250\mu\text{m}$. SISYPHE lit les niveaux d'eau et les vitesses du courant de TELEMAC-2D et les contraintes de cisaillement près du fond générées par les vitesses orbitales par TOMAWAC, et renvoie les évolutions de la hauteur du fond. Le pas de temps est 5 s et la période de couplage 10.

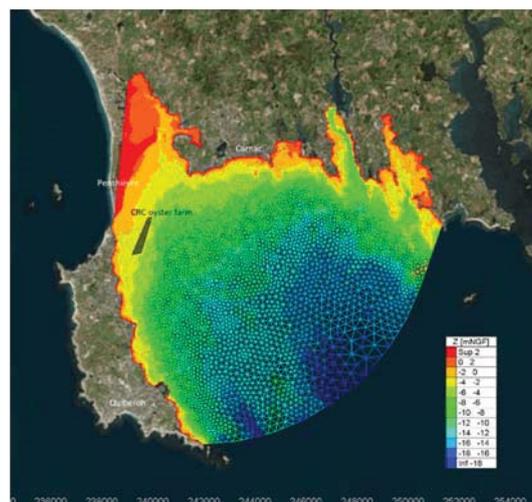


Figure 2. Domaine de calculs en Baie de Quiberon. Le banc d'huîtres plates étudié est situé dans le polygone gris.

3.3 Paramétrisation du banc d'huîtres

Le banc d'huîtres est représenté ici comme un substrat très rugueux dissipant l'énergie des courants et des vagues par frottement sur le fond.

L'expression de la dissipation due au frottement de fond fait généralement intervenir deux coefficients distincts selon qu'il s'applique à la vitesse du courant (au carré) ou à la densité de l'énergie des vagues. Le coefficient de traînée qui s'applique à la vitesse des courants dépend de la longueur de rugosité et de la profondeur (dans le cas d'un modèle intégré sur la verticale). Le coefficient de frottement qui s'applique à la densité de l'énergie des vagues dépend de la longueur de rugosité comparée à l'amplitude du mouvement orbital des vagues et du nombre de Reynolds qui dépend de la vitesse orbitale près du fond.

Pour représenter la protubérance des huîtres de quelques centimètres au-dessus du fond (Figure 3), des valeurs spécifiques ont été attribuées à ces coefficients de frottement vis-à-vis des courants et des vagues.

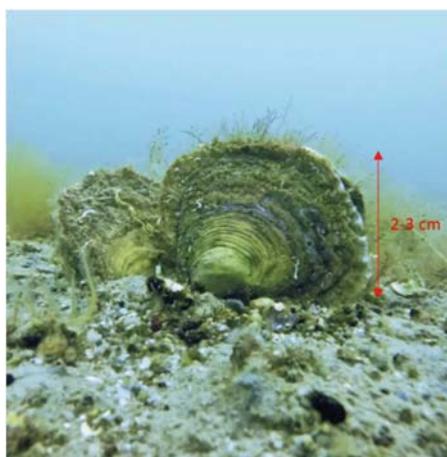


Figure 3. Photographie d'huîtres plates en Baie de Quiberon (courtoisie : S. POUVREAU, Ifremer).

Dans TELEMAC-2D, le coefficient de Strickler vaut $K=40\text{m}^{1/3}/\text{s}$ partout dans la baie (BRGM, 2017) sauf au niveau du banc d'huîtres où la valeur a été réduite à $K=20\text{m}^{1/3}/\text{s}$ d'après CAYOCCA (2008).

La routine *qfort1.f* de TOMAWAC a fait l'objet d'une modification pour prendre en compte la possibilité de prescrire un coefficient de frottement variable spatialement en fonction de la longueur de rugosité et des conditions de vagues (JONSSON, 1966 ; MADSEN *et al.*, 1988, SWART, 1974 ; NIELSEN, 1992). Les valeurs de longueur de rugosité de Nikuradse valent $k_s=9\text{mm}$ sur les fonds sableux (SOULSBY, 1997) et $k_s=60\text{mm}$ sur le banc d'huîtres (KERVELLA, 2010).

Dans SISYPHE, une distinction est faite entre le frottement de peau (relative à la rugosité des grains) qui induit la mise en mouvement des sédiments de fond et la force de traînée

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

(due aux macro-rugosités que constituent les agrégats d’huîtres) qui agit comme une résistance à l’écoulement.

L’emprise du banc d’huîtres a pour l’instant été considéré selon un scénario de recolonisation totale de la concession gérée par le CRC Bretagne Sud (Figure 4). Le banc d’huîtres est situé juste en dessous du niveau de basse mer de vive-eau (BMVE) à la transition entre un fond au large relativement pentu (8-10%) et une avant-plage moins pentu (2-3%).

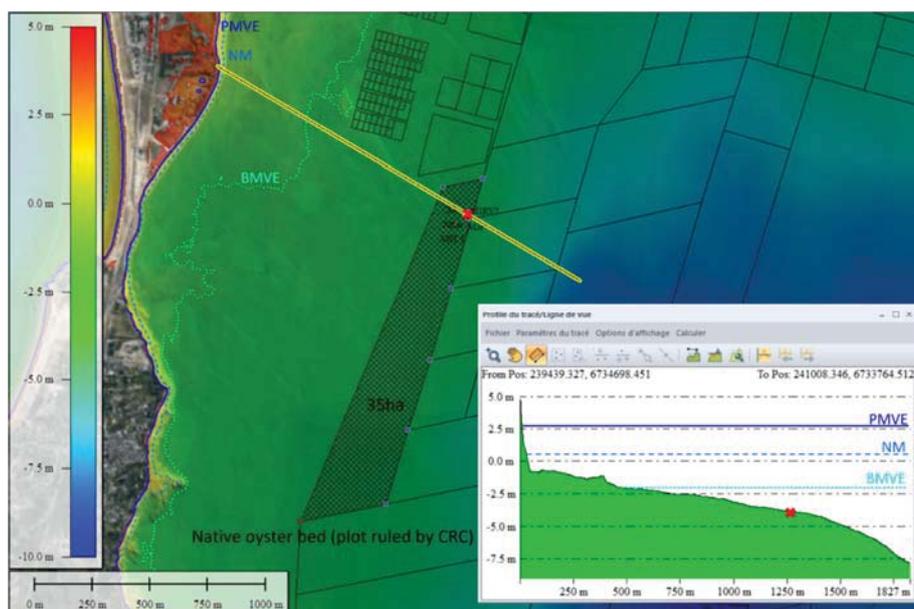


Figure 4. Localisation du banc d’essai de restauration d’huîtres plates et zoom sur la bathymétrie.

4. Résultats

Les principaux aspects de la dynamique hydro-sédimentaire du site sont présentés brièvement, et l’attention est portée sur la réponse à la présence du banc d’huîtres (en comparant les résultats du modèle avec et sans banc d’huîtres).

4.1 Influence du banc d’huîtres sur les courants de marée

Les courants de marée simulés (Figure 5) pointent alternativement vers le nord-ouest au flot et vers le sud-est au jusant. Les vitesses sont légèrement plus fortes au pic de flot (0.25-0.3 m/s) qu’au pic de jusant (0.15-0.2 m/s).

Le frottement (la contrainte de cisaillement sur le fond) est proportionnel à la vitesse du courant au carré. L’influence du banc d’huîtres est ainsi relativement plus importante lorsque les courants sont plus forts. En période de vive-eau, la vitesse moyenne sur la colonne d’eau peut être réduite de ~25% dans le sillage du banc d’huîtres. La diminution de la vitesse du courant au-dessus et derrière le banc va de paire avec une augmentation

sur les bords. L'écoulement (au flot et au jusant) est défléchi vers la gauche d'environ 10° au-dessus du banc.

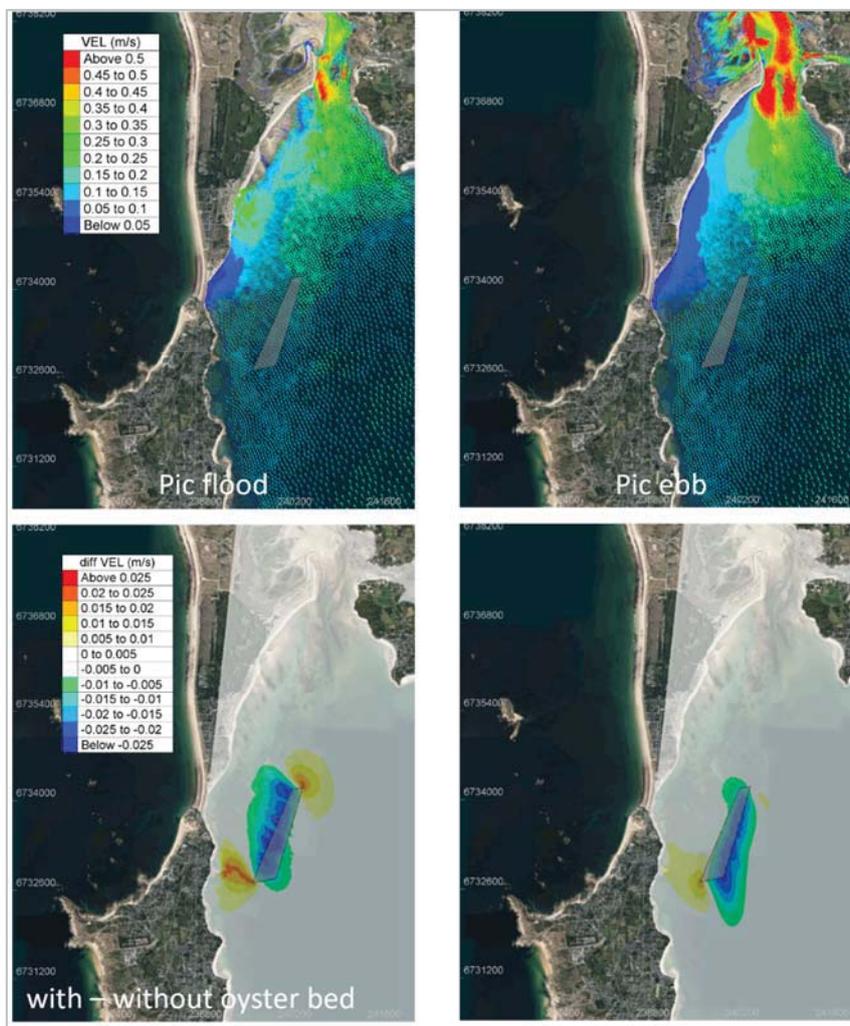


Figure 5. (En haut) Courants moyens sur la verticale au moment des pics de flot et de jusant d'une marée de vive-eau moyenne, (en bas) différences de vitesse du courant simulées avec et sans banc d'huîtres aux mêmes instants de la marée.

4.2 Influence du banc d'huîtres sur les hauteurs de vagues

Les résultats du modèle indiquent que les vagues sont globalement significativement affectées par les processus de déferlement et de frottement de fond en eaux peu profondes (contributions des termes à l'équation de conservation de l'action des vagues non figurées). Le banc d'huîtres a localement un effet d'amortissement, la hauteur des vagues est réduite dans son sillage (Figure 6). L'effet est relativement plus marqué à basse mer : les hauteurs significatives (H_s) sont réduites jusqu'à 20-30%. À pleine mer, la signature du banc d'huîtres sur le champ de vagues est moins intense (H_s diminue de ~5%) mais plus étendue vers le haut de plage.

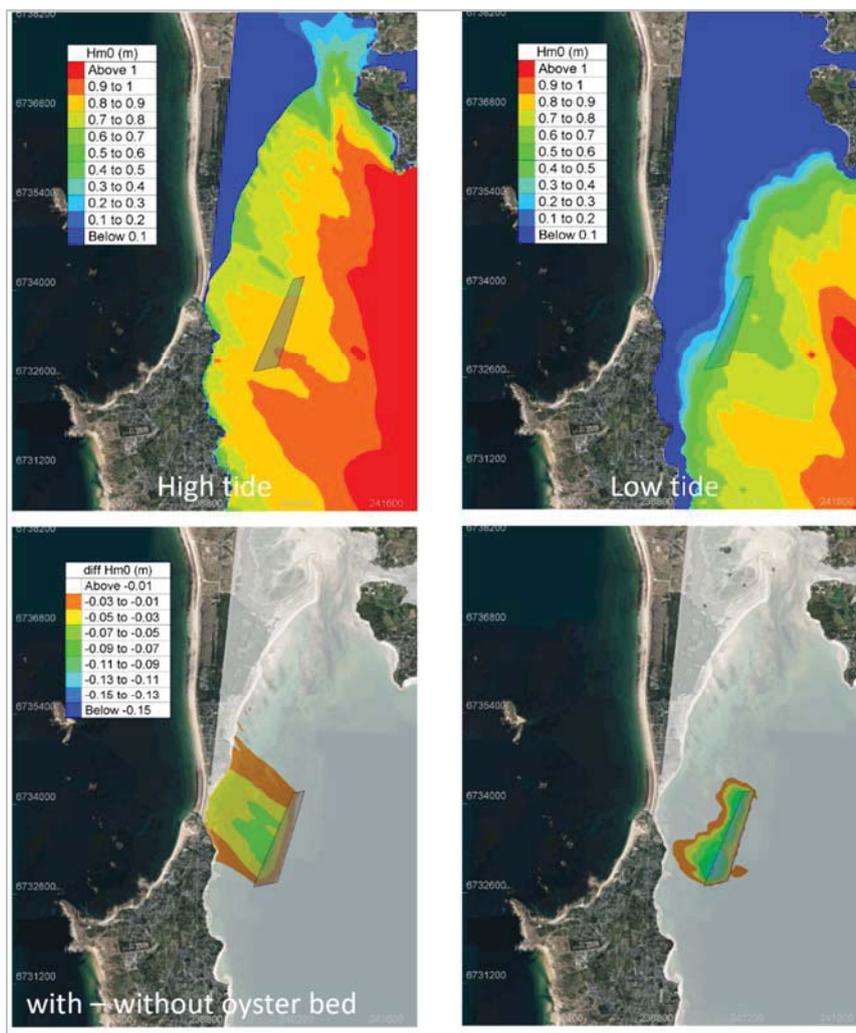


Figure 6. (En haut) Hauteurs significatives à marée haute et à marée basse d'une vive-eau moyenne, (en bas) différence de Hs avec et sans banc d'huîtres à ces mêmes instants de la marée.

4.3 Influence du banc d'huîtres sur les courants induits par les vagues

Le déferlement des vagues peut induire de forts gradients d'énergie des vagues à l'origine de forces agissant sur la masse d'eau (les contraintes de radiation) qui résultent dans la génération de courants. Les courants « longshore » sont générés par le déferlement des vagues qui arrivent obliques à la côte. Dans le cas présent, les houles du large (qui ont déjà réfractées) arrivent du sud-est et les courants le long du rivage pointent vers le nord (Figure 7). Le déferlement sur la plage à marée haute induit des vitesses du courant comprises entre 0.3 et 1 m/s. À marée basse, les vagues déferlent sur l'avant-plage relativement peu pentue résultant dans une zone de surf plus étendue mais au sein de laquelle les vitesses du courant sont moindres (0.1-0.2 m/s). La présence du banc d'huîtres induit une diminution de la vitesse des courants longitudinaux de 10 à 15% à pleine mer sur la plage et de 40-60% à marée basse au droit du banc.

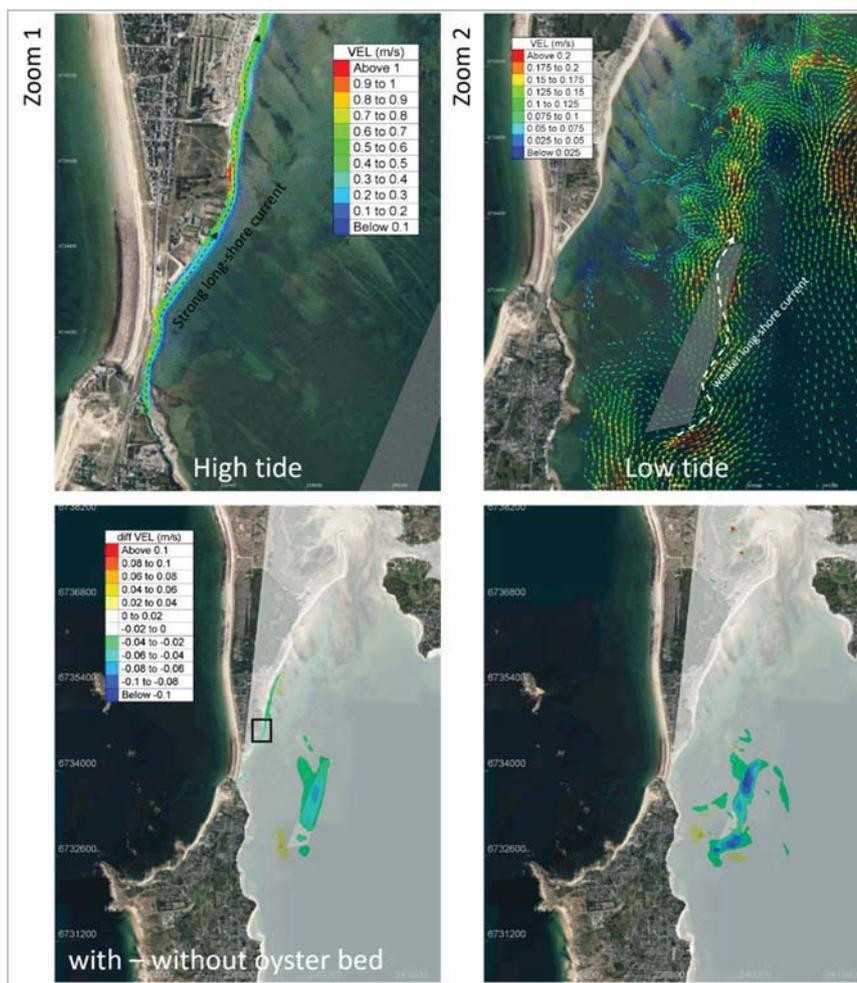


Figure 7. (En haut) Courants longitudinaux induits par le déferlement des vagues à marée haute et à marée basse d'une vive-eau moyenne, (en bas) différence de vitesse des courants induits par le déferlement des vagues avec et sans banc d'huîtres aux mêmes instants de la marée.

4.4 Influence du banc d'huîtres sur les courants induits par les vagues

Les vagues et les courants génèrent une contrainte de cisaillement sur le fond (τ) qui est la force à l'origine de la mobilité des sédiments. Les sorties du modèle numérique (Figure 8) indiquent que la contribution des vagues (dans ce contexte de tempête annuelle) est plusieurs fois supérieure à la contribution des courants dans la zone. La variabilité liée à la marée est importante, avec les plus fortes contraintes de cisaillement simulées sur la plage à marée haute et dans l'ensemble un τ plus important au flot qu'au jusant (le taux de dissipation de l'énergie des vagues étant réduit avec un courant dans le même sens que la direction de propagation des vagues, et inversement).

La présence du banc d'huîtres induit une réduction de τ de 5-15% dans son sillage (principalement en lien avec la dissipation de l'énergie des vagues).

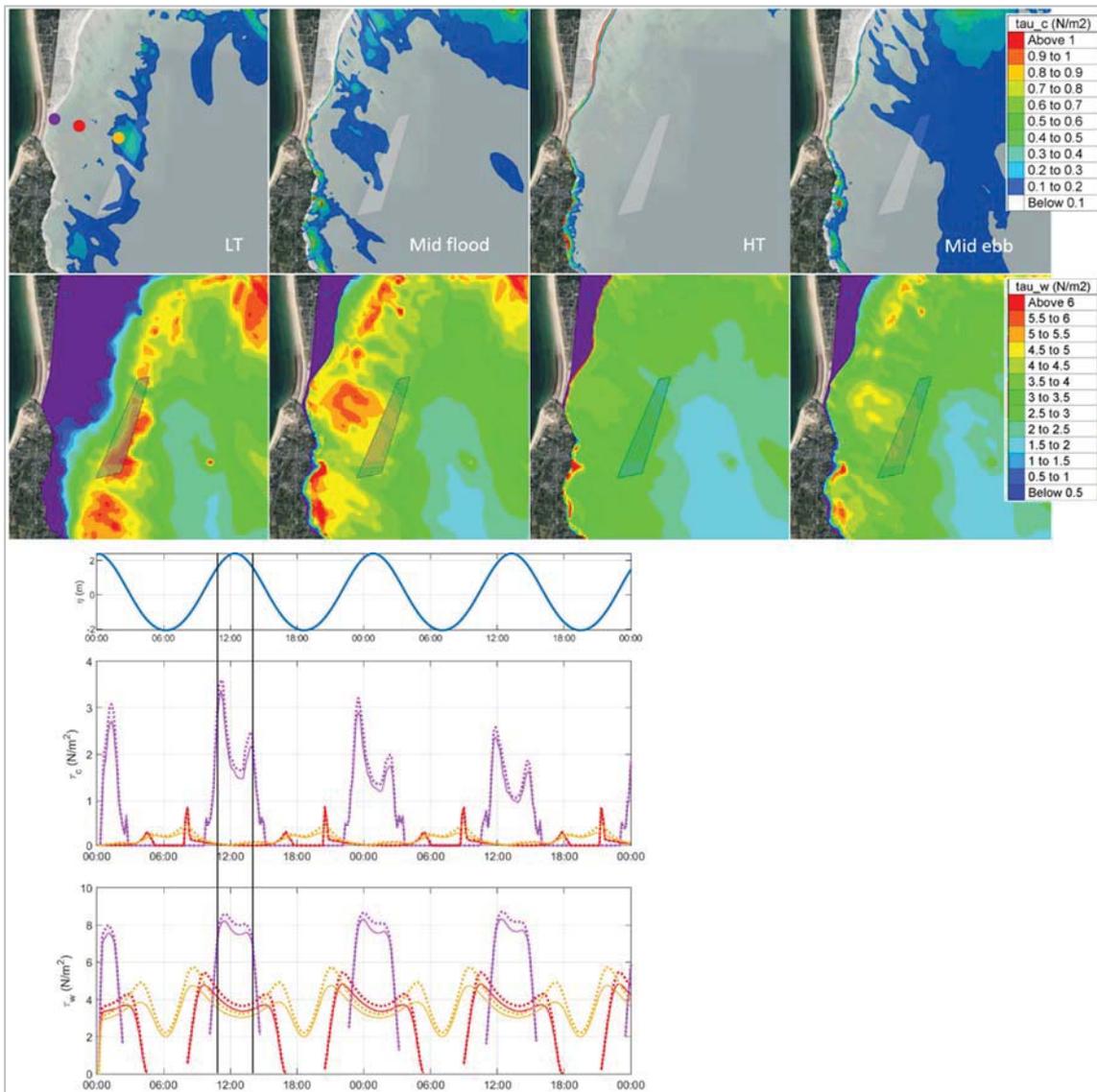


Figure 8. Contraintes de cisaillement sur le fond τ induites par les courants (τ_c) et par les vagues (τ_w) extraites en trois points le long du profil de plage (voir location sur la carte en haut à gauche) pendant 4 cycles de marée de vive-eau. Les courbes pointillées représentent τ sans huître et la ligne pleine avec le banc d’huîtres.

4.5 Influence du banc d’huîtres sur les taux de transport de sable et les flux résiduels

Le transport sédimentaire a lieu lorsque la contrainte de cisaillement de peau (« skin friction ») excède le seuil de mise en mouvement des grains de sable considéré. Le calcul du taux de transport solide (flux de matière par unité de largeur) prend en compte différentes catégories de mouvement, du charriage à la suspension. On considère ici qu’un régime d’équilibre est établi localement, et que le flux effectivement transporté est égal à la capacité de transport de l’écoulement, indépendamment de la disponibilité en sable. Les vagues en période de tempête jouent un rôle important dans la remise en suspension

des sédiments de fond (Figure 9). Il en résulte que la plupart du transport de sable pendant une tempête (ici annuelle) se produit plus ou moins une heure autour de la pleine mer. D'après les résultats du modèle, la présence du banc d'huîtres réduit la quantité de sédiment transporté d'environ 25%.

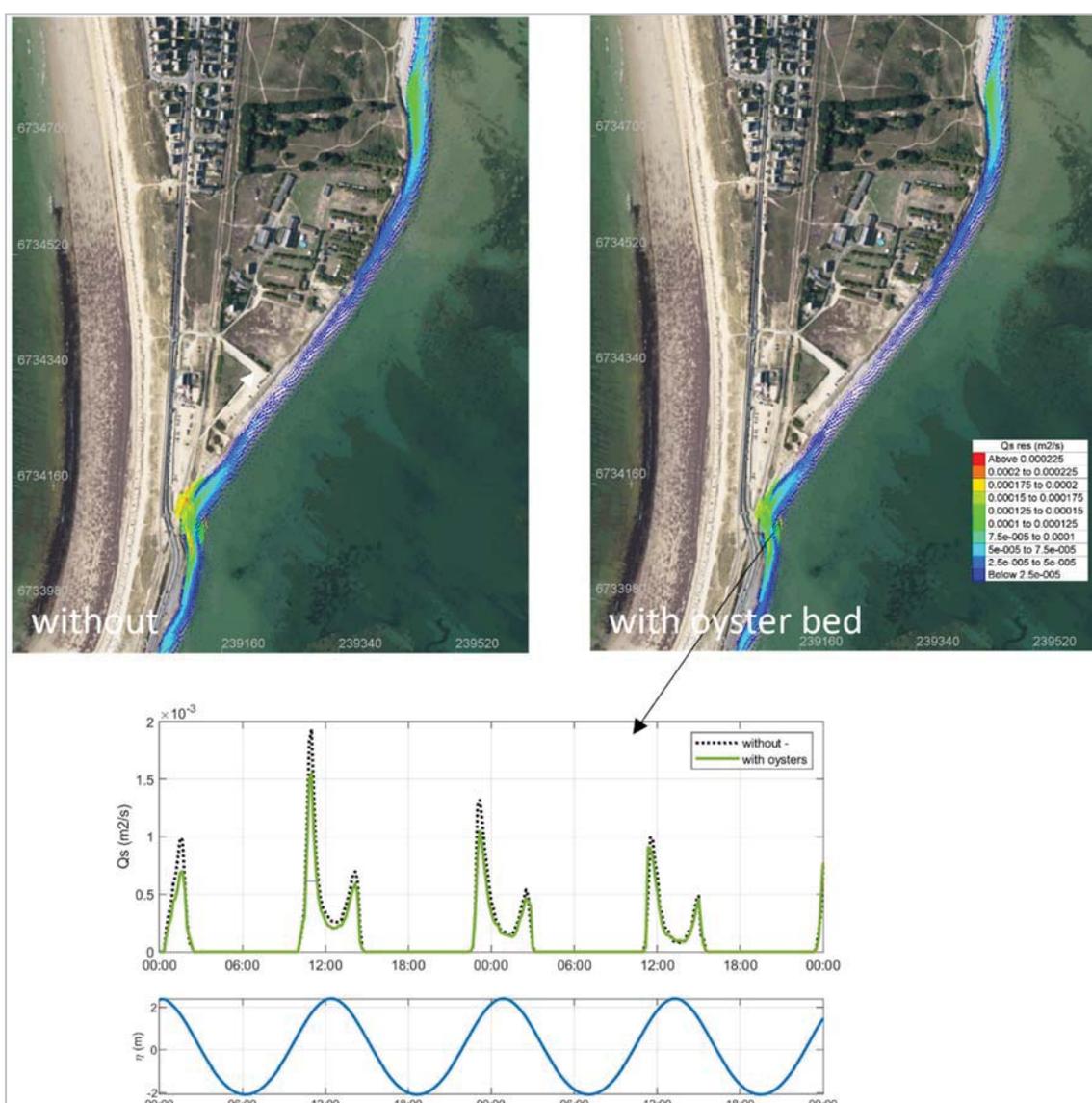


Figure 9. (En haut) Flux de transport résiduel (moyenné sur un cycle de marée de vive-eau), (en bas) taux de transport avec (ligne pleine) et sans (ligne pointillée) banc d'huîtres en un point situé sur la plage pendant 4 cycles de marée de vive-eau.

4.5 Influence du banc d'huîtres sur les évolutions du niveau du fond

Le modèle a simulé une érosion de quelques dizaines de centimètres sur le haut de plage lors d'une tempête annuelle de 24 h (Figure 10). Le banc d'huîtres ne modifie pas sur une

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

si courte période les motifs d'évolution du fond, mais réduit l'érosion de 5 à 15% (qui va de pair avec une réduction du dépôt en bas de plage).



Figure 10. Evolutions de la hauteur du fond (+rouge : dépôt, -bleu : érosion) après 4 cycles de marée, associés à une tempête annuelle sans et avec le banc d'huîtres.

5. Conclusions et perspectives

L'influence du banc d'huîtres rugueux simulée au nord-ouest de la Baie de Quiberon est mesurable sur les vagues, les courants et le transport sédimentaire qui en résulte.

Il est trop tôt pour affirmer qu'un tel banc d'huîtres pourrait avoir une influence positive sur l'évolution du trait de côte, mais les simulations indiquent qu'il tend à réduire l'érosion de la plage. À court terme, la présence du banc d'huîtres pourrait réduire le coût (augmenter la pérennité) d'un rechargement de plage.

Cette étude pose la première brique d'un cadre de travail visant à évaluer les services écosystèmes rendus par la restauration de l'huître plate.

Le modèle devra faire l'objet d'une validation au regard de mesures sur site, et vraisemblablement être augmenté d'une description plus détaillée des agrégats d'huîtres en intégrant, par exemple, les effets de porosité et des aspects dynamiques associés à la vie de l'espèce (recrutement, croissance, survie) avant de pouvoir explorer des simulations à long-terme (quelques années).

Plusieurs optimisations restent donc à prévoir, mais c'est encourageant d'observer à travers les résultats d'un modèle basé sur des processus physiques qu'un banc d'huîtres de cette dimension puisse être bénéfique au problème d'érosion littorale.

6. Références bibliographiques

ARTELIA (2016). *Analyse des phénomènes hydrodynamiques et sédimentaires de l'isthme de Penthièvre à la baie de Plouharnel*. Rapport d'étude pour la DDTM du Morbihan.

CAYOCCA F., BASSOULET P., LE HIR P., JESTIN H., CANN P. (2008). *Sedimentary processes in a shellfish farming environment, Mont Saint-Michel Bay, France*. Sediment and Ecohydraulics, Proceedings INTERCOH 2005, pp. 431-446.

<https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/6278/>

FEAGIN R.A., FIGLUS J.F., ZINNERT J.C., SIGREN J., MARTINEZ M.L., SILVA R., SMITH W. K., COX D., YOUNG D.R., CARTER G. (2015). *Going with the flow or against the grain? The promise of vegetation for protecting beaches, dunes, and barrier islands from erosion*. *Frontiers in Ecology and the Environment* 13(4): 203–210, doi:10.1890/140218

GIJSMAN R., HORSTMAN E.M., VAN DER WAL D., FRIESS D.A., SWALES A., WIJNBERG K.M. (2021). *Nature-based engineering: a review on reducing coastal flood risk with mangroves*. *Frontiers in Marine Science* 8, doi: 10.3389/fmars.2021.702412

JONSSON I.G. (1966). *Wave boundary layers and friction factors*. Proc. 10th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, 127-148, <https://doi.org/10.9753/icce.v10.9>

KERVELLA S. (2010). *Impact des installations ostréicoles sur l'hydrodynamique et la dynamique sédimentaire*. Thèse de doctorat, Université de Caen, 326 p.

LATTEUX B. (2006). *Problème posés par la dynamique sédimentaire dans la baie de Plouharnel/anse du Pô*. Rapport d'étude pour Pays d'Auray, 113 p.

LE TELEGRAMME (29/09/2023). <https://www.letelegramme.fr/morbihan/auray-56400/a-isthme-de-penthièvre-les-digues-ne-protègent-plus-contre-les-submersions-marines-6438772.php>

MADSEN O.S., POON Y.-K., GRABER H.C. (1988). *Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory*. Proc. 21th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, 492-504, <https://doi.org/10.9753/icce.v21.34>

MORRIS R.L., BILKOVIC D.M., BOSWELL M.K., BUSHET D., CEBRIAN J., GOFF J., KIBLER K.M., LA PEYRE M.K., MCCLENACHAN G., MOODY J., SACKS P., SHINN J.P., SPARKS E.L., TEMPLE N.A., WALTERS L.J., WEBB B.M., SWEARER S.E. (2019). *The application of oyster reefs in shoreline protection: Are we over-engineering for an ecosystem engineer?* *Journal of Applied Ecology* 56(7), doi: 10.1111/1365-2664.13390

MORRIS R.L., CAMPBELL-HOOPER E., WATERS E., BISHOP M.J., LOVELOCK C.E., ROWE R.J., STRAIN E.M.A., BOON P., BOXSHALL A., BROWNE N.K., CARLEY J.T., FEST B.J., FRASER M.W., GISALBERTI M., GILLANDERS B.M., KENDRICK G.A., KONLECHNER T.M., MAYER-PINTO M., POMEROY A.W.M., ROGERS A.A., SIMPSON V., VAN ROOIJEN A.A., WALTHAM N.J., SWEARER

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

- S.E. (2024). *Current extent and future opportunities for living shorelines in Australia*. Science of the Total Environment 917, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.170363
- NIELSEN P. (1992). *Coastal bottom boundary layers and sediment transport*. World Scientific.
- SWART D.H. (1974). *Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles*. Technical report, Delft Hydraulics Laboratory, Delft.
- VILLARET C., HERVOUET J.-M., KOPMANN R., MERKEL U., DAVIES A.G. (2013). *Morphodynamic modeling using the Telemac finite-element system*. Computers & Geosciences (53): 105-113. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.10.004>