



## Contribution à la modélisation hydrosédimentaire des événements extrêmes de type Céline le long du littoral de Noirmoutier

Imane MEZIANE<sup>1</sup>, Marc ROBIN<sup>1</sup>, Paul FATTAL<sup>1</sup>

1. Nantes Université, CNRS, LETG, UMR 6554, 44000 Nantes, France.

*imane.meziane@univ-nantes.fr*

### Résumé :

La tempête Céline survenue le 28 octobre 2023, conjuguée à des phénomènes de grandes marées, a occasionné divers dégâts sur les littoraux de l'ouest de la France. Dans le contexte de cet événement, un modèle local de très haute résolution s'appuyant sur la suite logicielle MIKE de DHI a été développé autour de l'île de Noirmoutier afin de mieux appréhender l'impact de la tempête en matière de propagation des niveaux d'eau à la côte, d'énergie des houles et de spatialisation des transits sédimentaires résultants.

Le modèle permet de mieux comprendre les mécanismes influençant le transport sédimentaire, afin d'aider au choix de scénarios optimaux d'adaptation, ce qui est l'objectif de l'étude engagée.

### Mots-clés :

Modélisation hydrosédimentaire, Niveau d'eau, Houle, Transport sédimentaire, Tempête Céline, île de Noirmoutier, Suite logicielle MIKE de DHI.

### 1. Introduction

La tempête Céline s'est distinguée comme étant la plus morphogène de la saison tempétueuse 2023, frappant le nord-ouest de la France avec une intensité remarquable, mettant en lumière l'urgence de comprendre et d'atténuer les impacts de telles tempêtes sur les zones côtières vulnérables. La dépression est arrivée du sud-ouest de l'Irlande le 28 octobre, avec une pression en son centre estimée à 970 hPa. Des rafales de plus de 130 km/h ont été enregistrées sur l'île de Noirmoutier, atteignant des niveaux comparables à ceux de la tempête Xynthia en 2010. Elle a été marquée par un fort coefficient de marée (103) et une hauteur significative des vagues de 4,7 m à la bouée 08505 de Noirmoutier. Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est de simuler de manière précise cet événement afin d'approfondir la compréhension du fonctionnement hydrosédimentaire du littoral de l'île de Noirmoutier. Pour ce faire, une modélisation bidimensionnelle a été mise en œuvre, visant à représenter la propagation des niveaux d'eau, la dynamique de la houle et le transport sédimentaire résultant de cette tempête.

## *Thème 2 – Dynamique sédimentaire*

### **2. Méthodologie**

#### 2.1 Description du modèle

La modélisation hydrosédimentaire réalisée sur le site étudié repose sur l'utilisation du modèle MIKE21/3 FM, conçu par DHI. Cette approche intègre 3 modules principaux : le module hydrodynamique (MIKE HD), qui est chargé de calculer les niveaux d'eau en prenant en compte l'effet des vents locaux et le phénomène de surcote lié aux tempêtes ; le module propagation de la houle (MIKE SW), qui évalue la propagation de la houle en tenant compte également du vent réel, de la houle au large et des niveaux d'eau fournis par le module hydrodynamique ; et enfin, le modèle de transport sédimentaire non cohésif (MIKE ST), qui est responsable du calcul du transport de sable, à la fois en suspension et sur le fond, sous l'effet combiné des courants et de la houle. Le détail des formulations désignées dans chacun des modules est disponible dans la documentation scientifique (DHI, 2024).

#### 2.2. Emprise, maillage et bathymétrie

Le modèle s'étend de la pointe de Saint-Gildas jusqu'à l'île d'Yeu au Sud. Il se présente sous la forme d'un maillage triangulaire flexible avec une résolution variable. La résolution du maillage varie de 1,7 km au large à environ 7 à 9 m au plus près de la côte. Cette gradation dans la taille des mailles illustre l'approche adaptative adoptée pour capturer la complexité des phénomènes physiques tout en optimisant le temps de calcul. Les données bathymétriques utilisées pour élaborer ce modèle proviennent de la thèse de Baptiste LE MAUFF (2018) (chapitre 3, pages 131-133), complétée par des données plus récentes, notamment :

- Les levés bathymétriques de la plage de Luzéronde de 2003, fournis par la CCIN ;
- Les levés DGPS des platiers rocheux de la zone des Eloux de 2008, fournis par la CCIN ;
- Le modèle bathymétrique de la zone du Pays de Mont, issu de la campagne Lidar topo-bathymétrique OR2C (OSUNA-2018) ;
- Le modèle topo-bathymétrique de l'île de Noirmoutier, issu de la campagne Lidar topo-bathymétrique OR2C (OSUNA-2020) ;
- Les levés bathymétriques multifaisceaux et les levés au drone aérien de la zone des communes de Barbâtre et La Guérinière, provenant de la campagne MESURIS (2023), qui a été réalisée dans le cadre de cette étude ;
- Les levés bathymétriques du chenal de Fromentine, provenant de la campagne MESURIS (2023), fournis par le département.

La bathymétrie interpolée sur le maillage du modèle est présentée en figure 1.

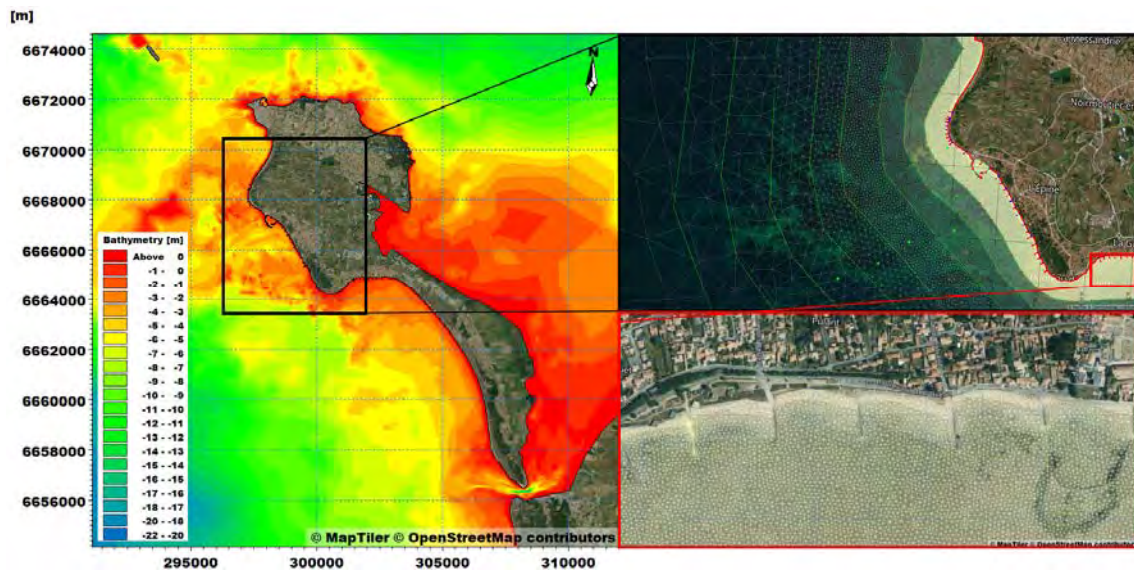


Figure 1. Maillage et bathymétrie (m NGF) du modèle de Noirmoutier.

### 2.3 Conditions de forçage du modèle couplé

- Marée astronomique : le modèle est forcé par le modèle global de marée DTU10 (Global Tide Model Data) développé par DTU Space (Technical University of Denmark). Ce modèle représente la plupart des composantes diurnes (K1, O1, P1 et Q1) et semi-diurnes (M2, S2, N2 et K2) de la marée avec une résolution spatiale de  $0.125^\circ \times 0.125^\circ$  basées sur les données altimétriques satellitaires TOPEX/POSEIDON (CHENG & ANDERSEN, 2011).
- Vent et pression atmosphérique : les conditions de vent et de pression atmosphérique sont appliquées de manière variable dans le temps et sur l'ensemble du domaine de calcul. Ces données proviennent de la réanalyse globale ERA-5 effectuée par le Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (ECMWF). Elles sont disponibles sous forme d'une grille avec une résolution de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  et englobent la période allant de 1950 jusqu'à aujourd'hui.
- Houle : les caractéristiques de la houle (hauteur significative, période, direction et étalement directionnel) appliquées aux limites marines du modèle des vagues sont issues de la base de données CANDHIS gérée par le CEREMA.
- Sédiments : les caractéristiques des sédiments se basent sur des données sédimentaires du fond marin provenant du SHOM (2022) et des diamètres médians calculés suite à des analyses granulométriques réalisées pendant la campagne de terrain en 2022 dans le cadre de cette étude. La granulométrie utilisée dans le modèle numérique a donc été fixée à un diamètre variable entre 0,22 mm et 0,88 mm en fonction du site considéré. Par ailleurs, le modèle intègre les platiers rocheux comme des surfaces non érodables.
- Rugosité de fond : Plusieurs tests de sensibilité ont été effectués afin de calibrer et d'ajuster la forme du signal de marée, ce qui a conduit au choix d'un coefficient de rugosité Manning de  $31 \text{ (m}^{1/3} \text{ /s)}$  pour l'ensemble du modèle.

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

### 2.4 Calage et validation

La validation des données météorologique (vent et pression atmosphériques) a été réalisée en comparant les données de Météo-France mesurées in situ à Noirmoutier et à l'île d'Yeu avec celles fournies par ERA-5 sur la période du 27 au 30 octobre 2023 (figures 2, 3 et 4). Cette comparaison révèle que les données de vents issues d'ERA-5 ont été sous-estimées par rapport aux observations, étant donné qu'elles sont elles-mêmes issues d'un modèle. Cela souligne la nécessité d'appliquer une correction de 60 % (vitesse de vent\*1,6) afin de refléter plus précisément les observations réellement enregistrées. En revanche, la pression atmosphérique mesurée à l'Île d'Yeu a montré une bonne corrélation avec les données d'ERA-5, suggérant que les surcotes générées par les variations de pression sont fidèlement reproduites par le modèle hydrodynamique. La station de Noirmoutier, ne disposant pas d'enregistrements de pression, n'a pas été incluse dans cette validation.

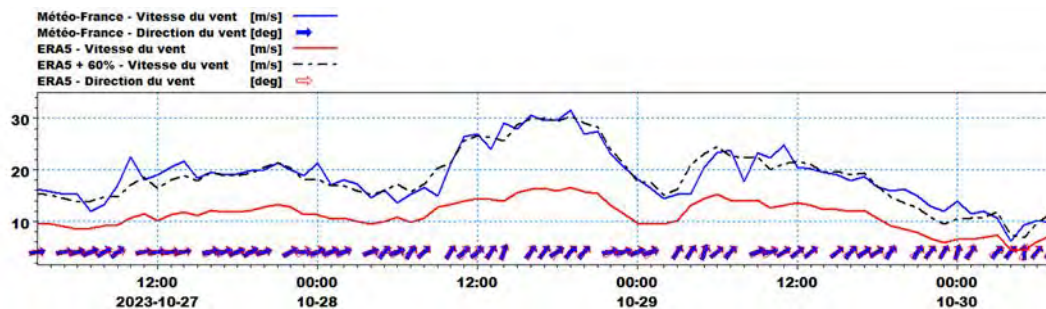


Figure 2. Comparaison des données de vent entre ERA5 et les observations de Météo-France à l'île d'Yeu pour la période du 27 au 30 octobre 2023.

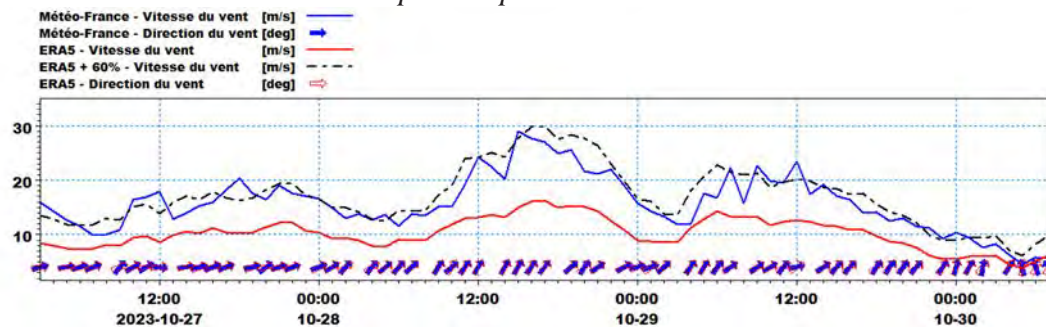


Figure 3. Comparaison des données de vent entre ERA5 et les observations de Météo-France à Noirmoutier pour la période du 27 au 30 octobre 2023.

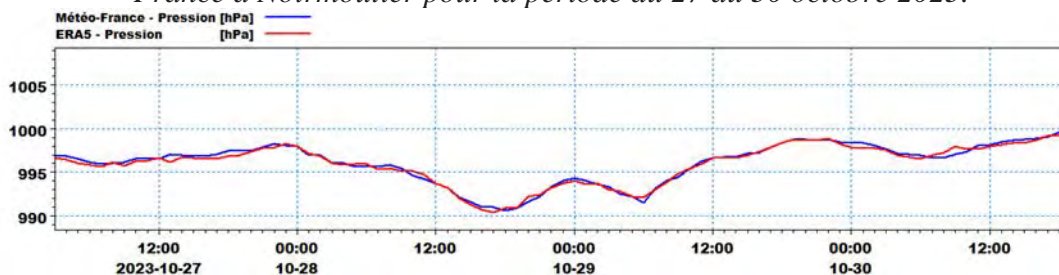


Figure 4. Comparaison des données de pression entre ERA5 et les observations de Météo-France à l'île d'Yeu pour la période du 27 au 30 octobre 2023.

La validation du modèle des houles MIKE 21 SW a été réalisée en comparant les caractéristiques de la houle observées pendant l'événement Céline, mesurées par le CEREMA lors des campagnes CANDHIS, avec celles modélisées au large de Noirmoutier au niveau de la bouée "08505" (figure 5). Les résultats représentant les hauteurs significatives, les directions moyennes et les périodes de pic montrent que le modèle correspond bien aux données observées avec un indice d'accord de 0,91 et un RMSE de 0,22 m.

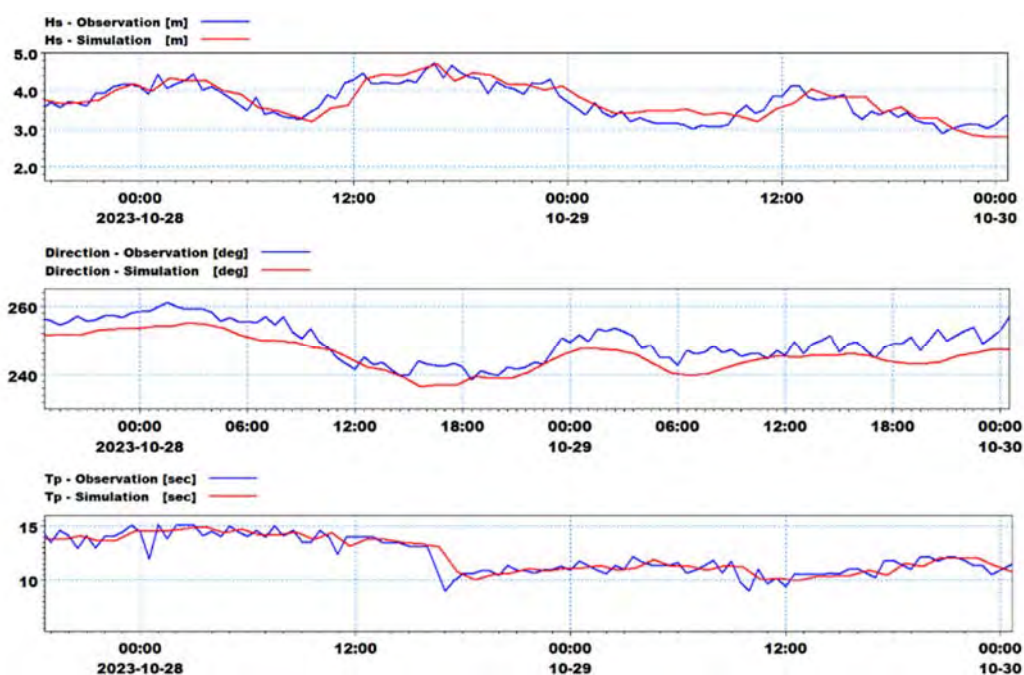


Figure 5. Comparaison des séries temporelles des états de mer modélisés par le modèle MIKE 21 SW et mesurés par CANDHIS à la bouée Noirmoutier sur la période du 27 au 30 octobre 2023. Haut : Hauteur significative (m) ; Milieu : Direction moyenne (°) ; Bas : Période pic (s).

La calibration du modèle hydrodynamique MIKE 21 HD a été réalisée en trois phases, en se concentrant d'abord sur les ondes de marée, sans prendre en compte d'autres influences météorologiques. Pour cela, les niveaux d'eau astronomiques, dérivés du modèle de marée DTU10, ont été imposés aux limites du modèle. Dans une seconde phase, les prédictions de marées astronomiques fournies par le SHOM pour le port de l'Herbaudière, couvrant la période de janvier à octobre 2023, ont été analysées à l'aide du programme Matlab T\_Tide (PAWLOWICZ *et al.*, 2002). Cette analyse a permis de reconstruire un signal de marée en utilisant les mêmes composantes harmoniques que celles intégrées dans le modèle DTU10. Les résultats de simulation ont ensuite été comparés avec le signal de marée prédite reconstruit à partir des données marégraphiques du SHOM. Il en ressort que le modèle reproduit correctement le signal de marée prédite, avec une erreur RMS de 12 cm sur une période simulée du mois d'octobre. Dans une troisième phase, les données

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

de vent et de pression atmosphérique ont été intégrées sur l'ensemble du modèle pour modéliser les conditions climatiques réelles de la tempête Céline. La validation du modèle HD a été faite en comparant les résultats de simulations aux observations. Les évolutions de la surface libre observées par le SHOM, issues des données validées en temps différé, au port de l'Herbaudière et modélisées au pas horaire sont présentées sur la figure 6. Le niveau d'eau au repos (le niveau de la marée + la surcote météorologique) modélisé pendant la tempête Céline est très bien reproduit (3,70 m NGF observé et 3,69 m NGF modélisé).

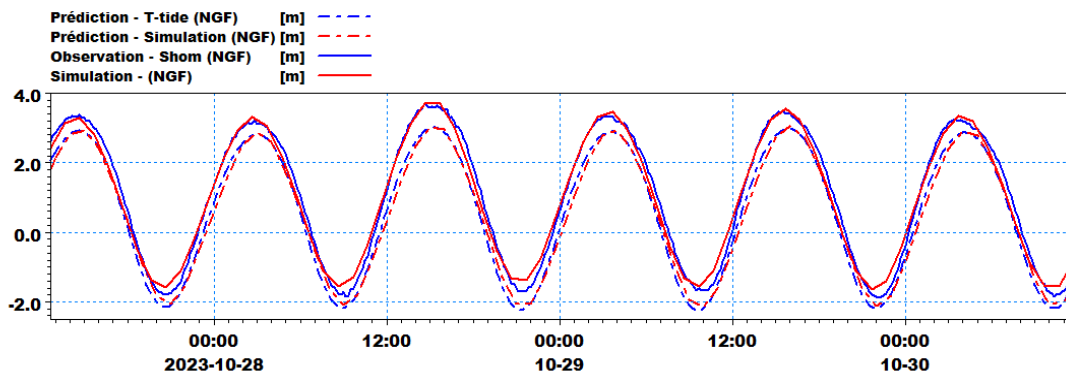


Figure 6. Comparaison des niveaux d'eau à l'Herbaudière du 27 au 30 octobre 2023 : Niveaux astronomiques modélisés (courbe rouge pointillée) et analyse harmonique T-Tide (courbe bleue pointillée) avec les niveaux d'eau au repos modélisés (courbe rouge continue) et observés (courbe bleue continue).

L'absence de données de terrain sur le transport sédimentaire pendant l'événement Céline limite la capacité à calibrer et valider le modèle sédimentaire MIKE 21 ST.

### 3. Résultats du modèle

Les champs des niveaux d'eau statiques (niveaux d'eau au repos + wave set-up), des hauteurs significatives de houles et de capacité de transport sédimentaire au moment du pic de la tempête sont présentés sur la figure 7. À 14h40 TU, le niveau d'eau maximal calculé autour de l'île de Noirmoutier sur toute la durée de simulation est de 3,83 m NGF. Dans la baie de Bourgneuf, une légère amplification de l'onde de marée est estimée à quelques centimètres, augmentant le niveau à 4 m NGF. Au large de l'île de Noirmoutier, la houle atteint une hauteur significative de 4,7 m. Cette houle est largement atténuée à l'approche de la côte sous l'effet de la réfraction sur les platiers rocheux qui s'accompagne aussi de la convergence des vecteurs de direction sur la pointe de l'Herbaudière, du Devin, et sur celle de la Loire (diffraction). Sur la côte Ouest, bien exposée de Noirmoutier, les houles obtenues ont une hauteur qui décroît de Nord au Sud de 1,5 à 0,5 m. En revanche, les houles sur la côte Est sont moins élevées, car elles dissipent une bonne partie de leur énergie en se propageant dans la baie de Bourgneuf. Ces houles en provenance du secteur Sud-Ouest entraînent des déplacements de

sédiments vers le Nord entre la pointe du Devin et la pointe de l'Herbaudière. Sur la zone située entre la plage des Eloux et la plage du Camping, la capacité de transport sédimentaire ne dépasse pas  $4e-4$  m<sup>3</sup>/s/m et s'effectue en direction du Nord en raison d'une recirculation des courants. Cependant, au niveau de la Pointe de la Loire, les courants de dérive divergent au niveau des roches de la Loire, favorisant un déplacement de sable vers l'Est en direction de l'Anse de la Guérinière, ainsi qu'un transport vers le large. Sur la partie Sud-Ouest de l'île, la dynamique est complexe : le transport se dirige d'abord vers le Sud puis vers le large près de la plage de Midi. À proximité du chenal, le transport s'intensifie, avec une orientation vers le Nord le long du littoral de Barbâtre. Sur les bancs du Boisvinet, le mouvement des sédiments est modulé par la combinaison des courants de dérive et des marées, les dirigeant ensuite vers le chenal. Quant à la côte Est de l'île, le mouvement des sédiments est principalement dirigé vers l'Est, de la Pointe de l'Herbaudière à la Pointe des Charniers. Entre la Pointe des Charniers à la Pointe du Cob, ce mouvement se divise en deux directions : une partie se dirige vers le Sud-Est, tandis qu'une autre portion se déplace vers le Nord-Est. Enfin, au niveau de la Plage des Sableaux, située au Sud de la Pointe du Cob, le déplacement des sédiments se fait en direction du Nord.

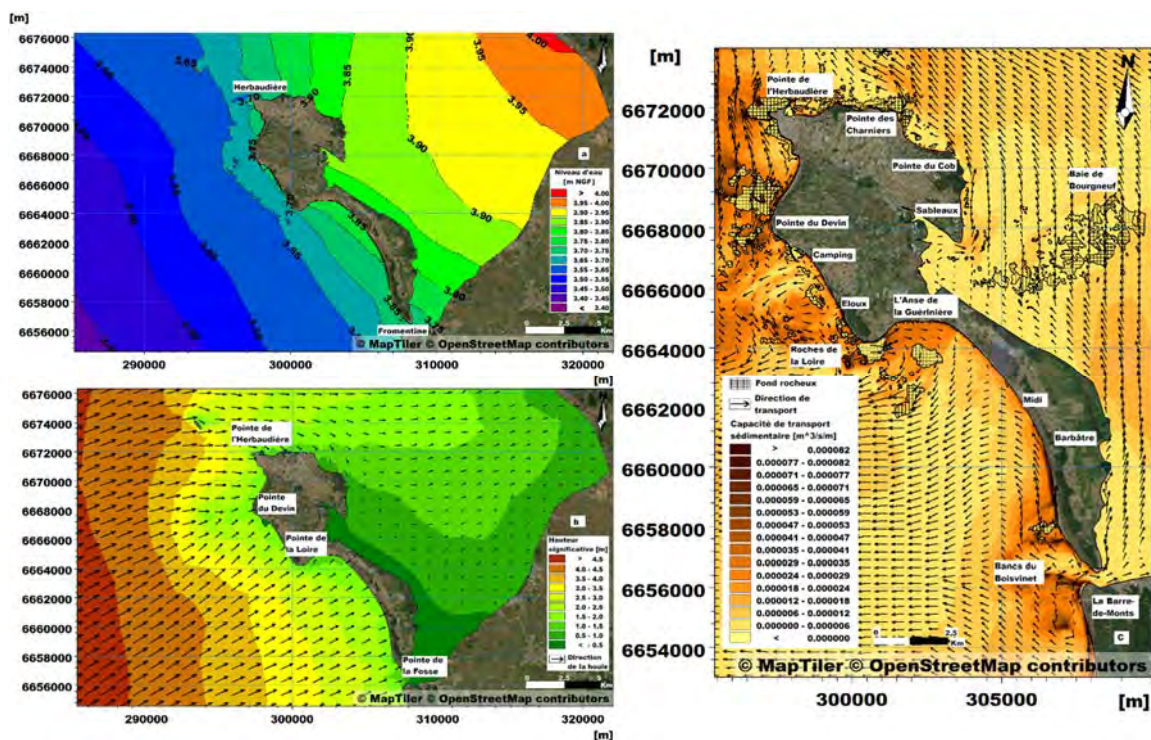


Figure 7. Résultats du modèle couplé pendant le pic de l'évènement Céline :  
(a) Niveaux d'eau statiques, (b) Hauteur significative et direction des houles,  
(c) Capacité et direction de transport sédimentaire.

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

### 4. Conclusion

Un modèle hydro-sédimentaire bidimensionnel a été mis en place autour de l'île de Noirmoutier à l'aide de la suite MIKE de DHI sur une période de trois jours, du 27 octobre à 12h40 au 30 octobre 2023 à 7h40. Les résultats présentés dans cet article mettent en lumière l'efficacité de la modélisation haute résolution pour comprendre la climatologie des états de la mer au niveau local. Cette étude a abouti à la création d'un modèle local calibré et validé, qui servira de base, par ailleurs, à l'évaluation de différents scénarios d'aménagement futur dans les zones à risque d'érosion. En intégrant également l'élévation du niveau de la mer dans le contexte du changement climatique, ce modèle devient un outil précieux pour anticiper et planifier les mesures nécessaires pour faire face à ces défis.

### Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'UMR 6554 LETG-Nantes (Nantes Université), l'OR2C (Observatoire Régional des Risques Côtiers en Pays de la Loire) et la communauté de commune de l'île de Noirmoutier pour leur soutien et la mise à disposition d'équipements de recherche, ainsi que le CCIPL (Centre de calcul intensif des Pays de la Loire) pour les ressources fournies. Un merci spécial à Benjamin Hervy pour son aide précieuse dans le lancement de nos simulations sur le CCIPL.

### 5. Références bibliographiques

- CHENG Y., ANDERSEN O.B. (2011). *Multimission empirical ocean tide modeling for shallow waters and polar seas*. Journal of Geophysical Research, 116 (C11). <https://doi.org/10.1029/2011JC007172>
- DHI (2024). *MIKE 21 Spectral Wave Module scientific documentation*. [https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Coast\\_and\\_Sea/M21SW\\_Scientific\\_Doc.pdf](https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Coast_and_Sea/M21SW_Scientific_Doc.pdf)
- DHI (2024). *MIKE 21 Flow Model FM scientific documentation*. [https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Coast\\_and\\_Sea/MIKE\\_21\\_Flow\\_FM\\_Scientific\\_Doc.pdf](https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Coast_and_Sea/MIKE_21_Flow_FM_Scientific_Doc.pdf)
- DHI (2024). *MIKE 21 Sand Transport Module scientific documentation*. [https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Coast\\_and\\_Sea/MIKE\\_FM\\_ST\\_Scientific\\_Doc.pdf](https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Coast_and_Sea/MIKE_FM_ST_Scientific_Doc.pdf)
- LE MAUFF B. (2018). *Les dynamiques hydro-sédimentaires du Goulet de Fromentine, de la Baie de Bourgneuf et des plages adjacentes*. Thèse de doctorat, Université de Nantes. <https://theses.hal.science/tel-02130141v1>
- PAWLOWICZ R., BEARDSLEY B., LENTZ S. (2002). *Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE*. Computers and Geosciences, pp 929-937. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4)
- SHOM (2022). *Références Altimétriques Maritimes (RAM). Ports de France métropolitaine et d'outre-mer. Côtes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée*. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.