



Caractérisation de la submersion marine en lien avec les franchissements par paquet de mer à l'échelle d'un territoire

Antoine FÉGNÉ¹, Julien BAILLS¹, Damien DAILLOUX¹,
Arnaud SALLABERRY¹

1. CASAGEC EGIS GROUP, 18 rue Maryse Bastié, Zone de Maignon, 64600 Anglet, France.

contact@casagec.fr

Résumé :

Les évolutions des réglementations pour la gestion du risque de submersion marine impliquent de devoir définir des valeurs acceptables de franchissements par paquets de mer. Devant la volatilité des résultats de débit de franchissement en lien avec les formules et outils permettant leur caractérisation et la difficulté de pressentir les conséquences d'un débit de franchissement, une approche pragmatique et opérationnelle basée sur le retour d'expérience est apparue nécessaire.

Ainsi, une méthode de calibration s'appuyant sur les conséquences des franchissements plutôt que sur les valeurs de débit de franchissement apparaît pertinente et en lien avec des objectifs quantifiables (emprise, hauteur de submersion, écoulements principaux...). Cet article propose un retour d'expérience de l'utilisation de cette méthode pour deux études récentes : analyse du risque submersion marine sur le territoire de Saint-Martin-de-Bréhal et définition du système d'endiguement de Saint-Jean-de-Luz.

Dans le cadre de ces études, une chaîne de modélisation a été mise en place permettant à partir des conditions de houle et de niveau d'eau « au large » de modéliser les écoulements à terre. Elle comprend les trois grandes étapes suivantes :

- a) Propagation des conditions de houle du large à la côte (modèle SWAN, 2024).
- b) Calcul des débits de franchissement au niveau de l'ouvrage (outils de « réseau neuronal », formulations de l'Eurotop II (VAN DER MEER *et al.*, 2018) et modèle vague à vague XBEACH, (ROELVINK *et al.*, 2009)
- c) Modélisation des écoulements au cœur du tissu urbain (TELEMAC-MASCARET, 2024).

L'article insistera sur les points forts et les points de vigilance associés à cette méthodologie en intégrant la pertinence des différents outils de calcul dans la mise en œuvre de cette approche.

Mots-clés :

Franchissements, Submersion, Calibration, Méthode opérationnelle.

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

1. Introduction

La tempête Xynthia et ses conséquences dramatiques ont accéléré les contraintes réglementaires pour la prise en compte du risque de submersion marine par les communes du littoral. Les principaux documents réglementaires permettant de caractériser ce risque sont : le Plan de Prévention des Risques (PPR, MEDDE (2014) et les Etudes de Dangers (EDD, CEREMA, 2018) pour les systèmes d'endiguement. Ces documents doivent permettre à la commune de réagir en gestion de crise via le Plan (Inter)Communal de Sauvegarde et d'adapter les règles d'urbanisme au travers de la révision du Plan Local d'Urbanisme.

Ce risque submersion peut être la conséquence : d'un débordement, de franchissements par paquets de mer, d'un contournement de l'eau ou d'une défaillance des ouvrages de protection. Cet article se concentre sur la submersion induite par les franchissements par paquets de mer.

Ces évolutions réglementaires impliquent donc de devoir définir des valeurs acceptables de franchissements par paquets de mer. Devant la volatilité des résultats de débit de franchissement en lien avec les formules et outils permettant leur caractérisation et la difficulté de pressentir les conséquences d'un débit de franchissement, une approche pragmatique et opérationnelle basée sur le retour d'expérience apparaît nécessaire. De plus, au-delà de l'outil de calcul, les valeurs de débit de franchissement sont très sensibles à l'ensemble des paramètres considérés lors de leur estimation : niveau d'eau, conditions de houle, vents, profil de plage...

Ainsi, une méthode de calibration s'appuyant sur les conséquences des franchissements plutôt que sur les valeurs de débits de franchissement apparaît pertinente et en lien avec des objectifs quantifiables (emprise de la submersion, hauteur d'eau, vitesses d'écoulement).

Cet article propose de détailler cette méthodologie de calibration au travers de deux études récentes : analyse du risque submersion marine sur le territoire de Saint-Martin-de-Bréhal (50) et définition du système d'endiguement de Saint-Jean-de-Luz (64). Elle consiste dans un premier temps à choisir un événement tempétueux de référence bien documenté puis de le modéliser via la mise en œuvre d'une chaîne de modélisation.

Une fois la chaîne de modélisation calibrée, ce sont les volumes d'eau de submersion et les surfaces submergées qui détermineront les débits de franchissements acceptables et permettront la définition des scénarios réglementaires.

2. Choix de l'évènement de référence

Le choix de l'évènement de référence dans le cadre de cette méthode de calibration est primordial. En effet, il doit pouvoir être rejoué et comparé le plus fidèlement possible. Pour cela, il faut à la fois modéliser l'évènement sur la base de conditions de houle et de niveaux d'eau connus mais aussi comparer les conséquences observées sur le territoire sur la base de retours d'expérience.

L'évènement de référence considéré dans notre étude pour la commune de Saint-Martin-de-Bréhal en matière de risque submersion est la tempête Eléonor de mars 2018. Cette tempête, relativement bien documentée, a servi de base à la calibration. Les données qui ont été utilisées sont détaillées en suivant :

- Houle et niveau d'eau de l'évènement issus respectivement de la base de données HOMERE (IFREMER, 2015) et du marégraphe de Saint Malo.
- Les vidéos et photographies disponibles de la commune et diffusées sur internet. Ces informations permettent de pressentir les débits de franchissements au niveau des ouvrages de protection et d'estimer les hauteurs d'eau de submersion (Figure 1a et Figure 1b). Des franchissements sont observés sur toute la moitié Nord du front de mer de la commune Saint-Martin-de-Bréhal. Les accès à la plage (escaliers et cales de mise à l'eau) sont des zones spécifiques d'accentuation des entrées d'eau.
- Une emprise approximative de la zone de submersion tracée par l'Associations Syndicales Autorisées (ASA) (Figure 1c).

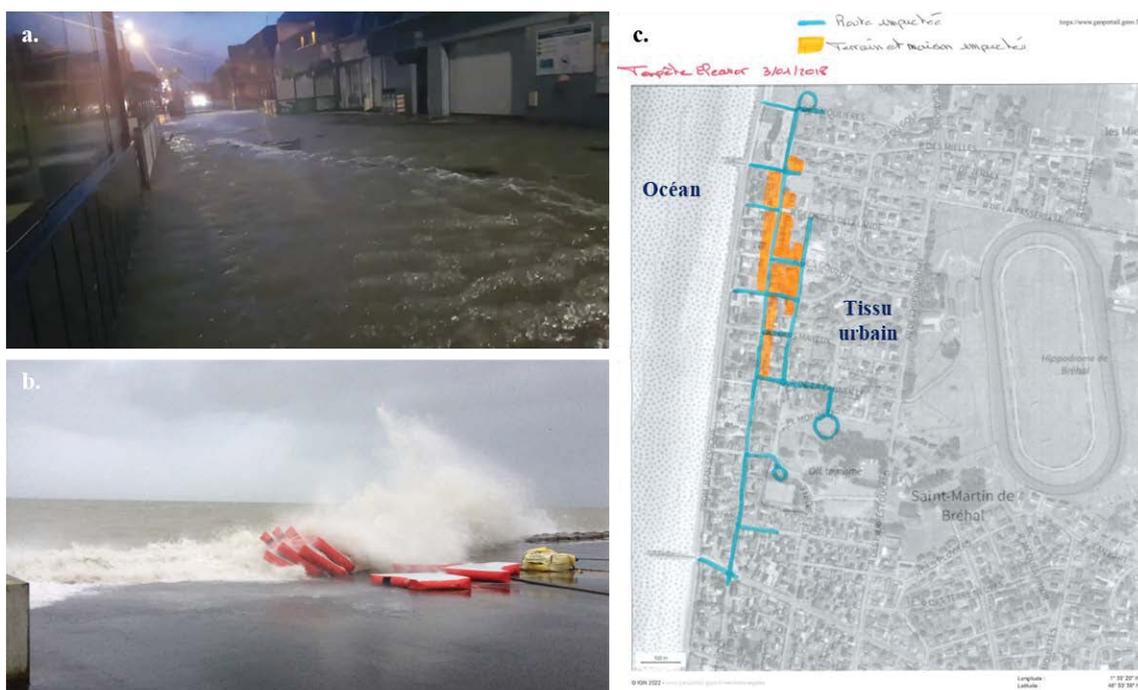


Figure 1. Conséquences observées pour l'évènement de référence Eléonor de mars 2018 sur le territoire de Saint-Martin-de-Bréhal.

Sur le territoire de Saint-Jean-de-Luz, les cas de submersion à la suite de franchissements par paquets de mer sont limités. Ainsi, peu de données bibliographiques étaient disponibles afin de confronter les résultats de modélisation et les expériences de terrain. Les données qui ont été utilisées sont détaillées en suivant :

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

- a) Les données de conditions de houle, niveau d'eau sont issues de l'houlgraphe de Saint-Jean-de-Luz (base de données CANDHIS, (CEREMA, 2024) et du marégraphe de Socoa (base de données REFMAR, SHOM, 2024).
- b) Les retours d'expériences du personnel de la commune, les vidéos et photographies disponibles ont néanmoins permis d'identifier un secteur sensible aux franchissements par paquets de mer : un linéaire d'une centaine de mètres au niveau de l'ouvrage de protection de premier rang (nommé seuil de garantie). Cette analyse fait état d'entrées d'eau pour des tempêtes annuelles à vicennales. L'évènement de référence retenu est un évènement type de période de retour 20 ans (exemple de franchissements sur ce type d'évènement en Figure 2).



Figure 2. Conséquences observées pour différents évènements de période de retour de l'ordre de 20 ans sur le territoire de Saint-Jean-de-Luz (NONY64500, 2014).

Afin de faciliter la calibration de la chaîne de modélisation il est donc primordial de disposer de retours d'expérience relativement importants et quantifiables (emprise de la submersion, hauteur d'eau). Cependant, même en disposant de ces informations, il est délicat de s'assurer des conditions océano-climatiques précises associées (niveau d'eau, conditions de houle, vent, niveau de sable, ...).

3. Estimation des débits de franchissements

3.1 Introduction

Dans le cadre de cette méthode de calibration, deux chaînes de modélisations sont présentées dans cet article. Dans les deux cas, la houle est propagée du large à la côte avec le modèle SWAN2D (SWAN, 2024), puis le calcul des débits de franchissements sont réalisés :

- a) Avec différentes formules et outils de calcul sur le secteur de Saint-Martin-de-Bréhal. Les conditions de houle en pied d'ouvrage sont propagées avec l'outil SWAN1D (SWAN, 2024).
- b) Avec le modèle vague-à-vague XBEACH (ROELVINK *et al.*, 2009) sur le site de Saint-Jean-de-Luz.

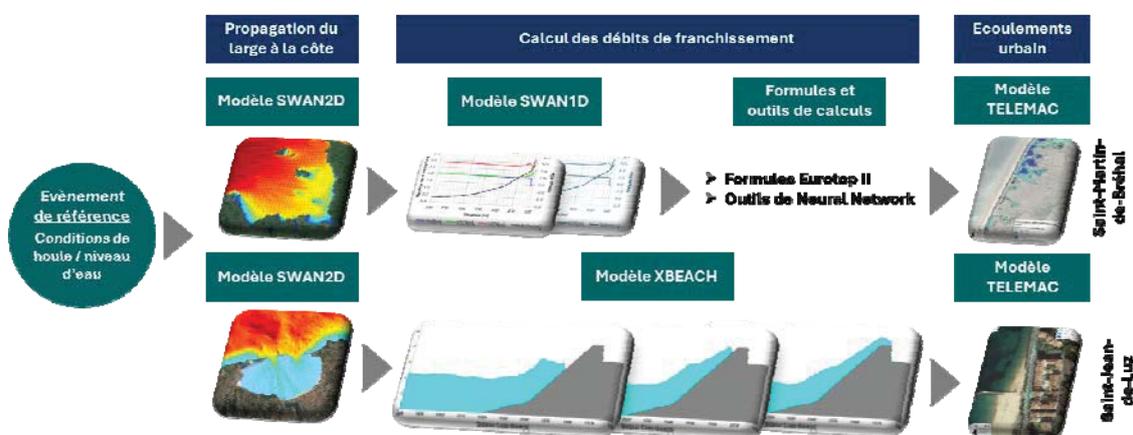


Figure 3. Chaines de modélisation mises en œuvre. N'est pas citée dans le texte

3.2 Formules et outils de calcul

L'utilisation d'outil de calcul pour la définition des débits de franchissements a été mise en œuvre lors de l'étude d'agitation de Saint-Martin-de-Bréhal.

Ces outils nécessitent de définir les conditions de houle en pied d'ouvrage. Pour cela, c'est l'outil SWAN1D (SWAN, 2024) qui a été utilisé. Le site a été découpé en cinq zones homogènes afin de tenir compte des variations morpho sédimentaires, dans le temps et dans l'espace. Quatre de ces cinq zones sont présentées en Figure 1, la cinquième zone correspondant à la zone Sud, la moins anthropisée.

Une fois la houle propagée en pied d'ouvrage pour ces cinq zones homogènes, une comparaison des différentes formulations et outils permettant le calcul des débits de franchissements a été effectuée :

- Les formules de l'Eurotop II (VAN DER MEER *et al.*, 2018) : il s'agit de formulations empiriques définies sur la base de nombreux essais en laboratoire et dépendent de la typologie d'ouvrage. Pour chacun de ces calculs de franchissements, les approches moyennes et de dimensionnement sont considérées.
- Les outils de modélisation par réseau neuronal : les réseaux neuronaux sont des techniques qui permettent de modéliser des relations de cause à effet. Dans le cadre de l'estimation des débits de franchissements, ces outils s'appuient sur une base de données de plus de 10 000 résultats d'essais en laboratoire. Les différentes formes de l'outil disponibles et considérés dans le cadre de cette analyse sont les suivant : Overtopping Neural Network (DELTARES, 2024a ; VAN GENT, 2007), XGB-Overtopping (DELTARES, 2024b) et Bayonet GPE (HR WALLINGFORD (2019).

Pour faciliter la comparaison des résultats, les calculs ont été menés, dans un premier temps, uniquement à pleine mer. La Figure 4 présente les débits de franchissements pour l'évènement Eléonor et pour les cinq zones homogènes, au niveau de la protection en enrochements.

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

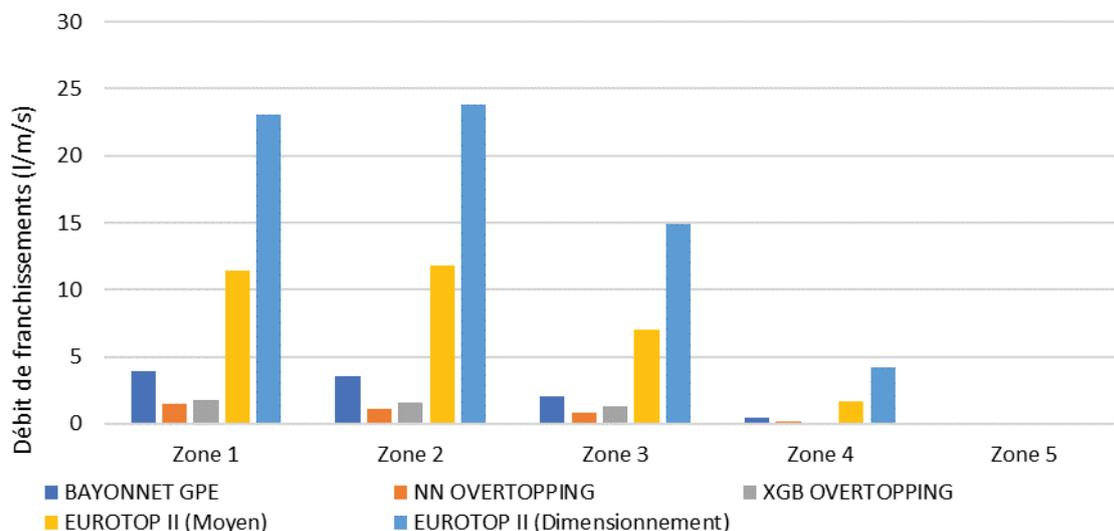


Figure 4. Débits de franchissements pour l'évènement Eléonor à Pleine Mer de la protection en enrochements.

Il ressort globalement de cette analyse que pour l'ouvrage en enrochements :

- Une homogénéité entre les résultats des outils de modélisation par réseau neuronal est relevée. L'outil Bayonet GPE donnant des résultats relativement plus importants.
- Les débits rencontrés avec les outils de modélisation par réseau neuronal semblent faibles vis-à-vis de ce qui a réellement pu être observé in-situ sur ce cas Eléonor.
- Les débits de franchissement obtenus avec les formules de l'Eurotop (VAN DER MEER *et al.*, 2018) sont cohérents avec les observations et vidéo réalisées lors de la tempête Eléonor.

Sur la base de cette analyse empirique, il a été décidé d'injecter dans le modèle d'écoulement TELEMAC (TELEMAC-MASCARET, 2024) les débits de franchissements issus des formules moyennes de l'Eurotop (VAN DER MEER *et al.*, 2018). Les résultats de cette modélisation présentés en section 4 ont permis de confirmer la pertinence de cette hypothèse. De plus, le caractère paramétrique de ces formules facilite leur intégration dans notre chaîne de modélisation.

3.3. Modélisation « vague à vague »

Une autre approche de calcul permet de définir les débits de franchissements en crête, il s'agit de modéliser la propagation de la houle en mode « vague à vague », le long d'un profil de plage.

Cette approche, plus lourde que celle présentée précédemment en termes de capacité de calculs, permet d'apporter des précisions sur la géométrie du profil type et facilite la définition des débits de franchissements pour ces ouvrages de haut de plage. En effet, pour ces ouvrages en haut de plage, le pied d'ouvrage n'étant pas en eau, il est toujours délicat de trancher sur le point d'extraction à considérer pour la définition des

conditions de houle. L'approche « vague à vague » permet de tenir compte de la dynamique des remontées d'eau.

Dans la cadre de l'étude du seuil de garantie de Saint-Jean-de-Luz, un linéaire important du pied d'ouvrage n'est pas en eau et ceux pour des événements extrêmes. Ainsi, afin de conserver une approche homogène sur l'ensemble du secteur à l'étude, c'est cette approche « vague à vague » qui a été retenue, à l'aide du logiciel XBEACH (ROELVINK *et al.*, 2009). Les conditions de houle en entrée de profil sont issues des résultats du SWAN2D (SWAN, 2024).

Les modélisations ont été effectuées le long de différents profils de plage et pour le niveau d'eau haut de l'évènement de référence. Trois combinaisons représentatives de l'évènement de période de retour 20 ans ont été retenues : combinaisons « Houle dominante » (a), niveau d'eau dominant (c) et « moyenne » (b). Pour chaque combinaison, 10 répétitions de calcul représentatives de 2 h d'évènement tempétueux ont été effectuées afin de prendre en considération le caractère aléatoire de la génération des vagues. La moyenne des franchissements de ces 10 répétitions a été conservée.

Les résultats de ces modélisations au niveau du secteur sensible identifié en section 2 sont présentés dans le tableau 1.

*Tableau 1. Débits de franchissements en l/m/s issus de la modélisation XBEACH (ROELVINK *et al.*, 2009) pour trois combinaisons de houle/niveau d'eau.*

<i>Combinaison</i>	<i>Répétition</i>										<i>Moyenne</i>
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	
a	0,81	0,93	0,32	0,51	0,46	0,38	0,94	0,81	0,95	0,13	0,62
b	0,06	1,03	0,23	0,44	0,18	0,29	0,27	0,29	0,36	0,59	0,37
c	0,01	0,06	0,04	0,04	0,01	0,04	0,14	0,06	0,00	0,07	0,05

Les résultats obtenus sont en accord avec ce qui a été relevé dans le cadre de l'analyse des retours d'expérience. De plus, les emprises de submersion présentées en section 4 ont permis de confirmer la pertinence de ces valeurs de débits. Les débits de franchissements les plus importants sont pour la combinaison « Houle dominante ».

L'approche « vague à vague » se veut plus précise dans la caractérisation des débits de franchissements pour les ouvrages de haut de plage mais nécessite des temps de calcul bien plus importants que l'approche utilisant les formules et outils de calculs.

Dans le cadre de ces deux études, une analyse fine des niveaux de sable a été menée sur la base des dernières données topo-bathymétriques disponibles : analyse des gammes d'évolution et sensibilité sur les résultats de propagation de houle. Le niveau de sable joue un rôle majeur sur l'attaque de la houle en pied d'ouvrage et sur les franchissements induits. Malgré cela, il est rare de pouvoir caractériser avec précision le contexte morfo sédimentaire en amont d'une tempête que l'on souhaite rejouer. Ce

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

point spécifique peut exercer une influence non négligeable sur les résultats. Dans le cas de Saint-Martin-de-Bréhal, une forte variabilité des fonds est observée, une sensibilité spatiale et temporelle sur le niveau de sable a été réalisée comme évoqué en section 3.2.

4. Modélisation des écoulements

Le modèle d'écoulement considéré dans le cadre de cet article est le modèle TELEMAC (TELEMAC-MASCARET, 2024). Il est alimenté pour les différents évènements de référence par les résultats de débits de franchissements calculés à partir des formules moyennes de l'Eurotop II (VAN DER MEER *et al.*, 2018 ; exemple de Saint-Martin-de-Bréhal) et des résultats de la modélisation XBEACH (ROELVINK *et al.*, 2009 ; exemple de Saint-Jean-de-Luz).

Pour cela, un ensemble de points d'injection ont été définis en fonction de la nature de l'ouvrage de protection et de l'environnement topographique. Un linéaire d'application variable est associé à chacun de ces points.

Les formules de l'Eurotop II (VAN DER MEER *et al.*, 2018) permettent de définir un débit de franchissement pour chaque pas de temps et de niveau d'eau.

L'approche « vague à vague » est menée pour un unique niveau d'eau (niveau haut). Une hypothèse est ensuite retenue concernant la courbe de répartition des franchissements entre : le moment où les franchissements sont nuls et le pic de franchissements calculé. Cette hypothèse s'appuie sur les observations terrain et les résultats de modélisations d'un grand nombre de combinaisons de houle/niveau d'eau.

La Figure 5 illustre une chronique de franchissements au niveau d'un point d'injection à l'arrière de la protection en enrochements de Saint-Martin-de-Bréhal et du seuil de garantie de Saint-Jean-de-Luz (combinaison « houle dominante »).

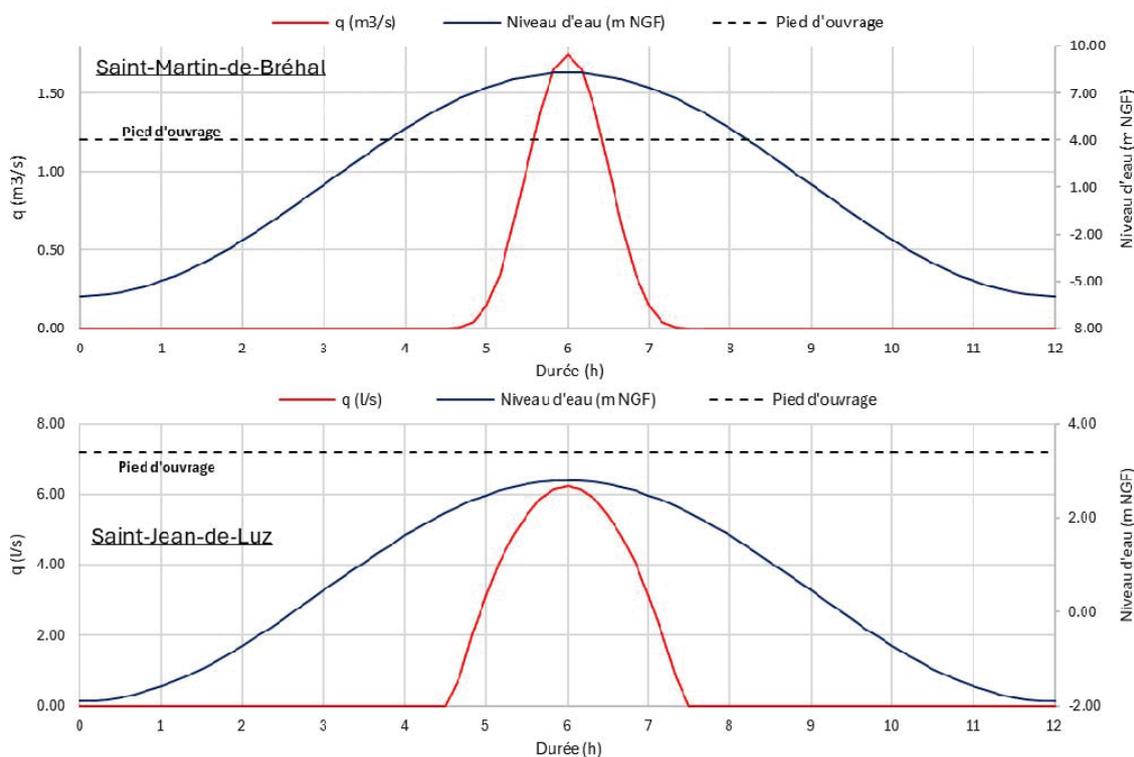


Figure 5. Exemple de chronique de franchissement pour un point d'injection sur chacun des deux sites.

Les résultats de ces calibrations (Figure 6) montrent que les dynamiques de submersion et les emprises rencontrées sont cohérentes avec les retours d'expériences, en termes d'emprise (tracé rouge sur la Figure 6) et de hauteurs d'eau (comparaison avec les retours d'expériences visuels). Ces résultats permettent de valider les approches méthodologiques présentées dans le cadre de cet article. Toutefois, certaines limites sont observées concernant cette méthodologie :

- Une difficulté ou l'impossibilité à modéliser certaines composantes dynamiques des franchissements au-dessus des ouvrages de protection telles que la poussée des masses d'eau par le vent.
- Les retours d'expérience donnent une tendance générale à un instant donné et ne sont pas toujours directement comparables avec les résultats de modélisation.
- Le contexte morfo sédimentaire au moment de ces évènements de référence n'est pas clairement connu.
- Il s'agit d'une approche opérationnelle qui ne permet pas de rentrer dans le détail du tissu urbain : murets, trottoirs, porosité de certains éléments, ...

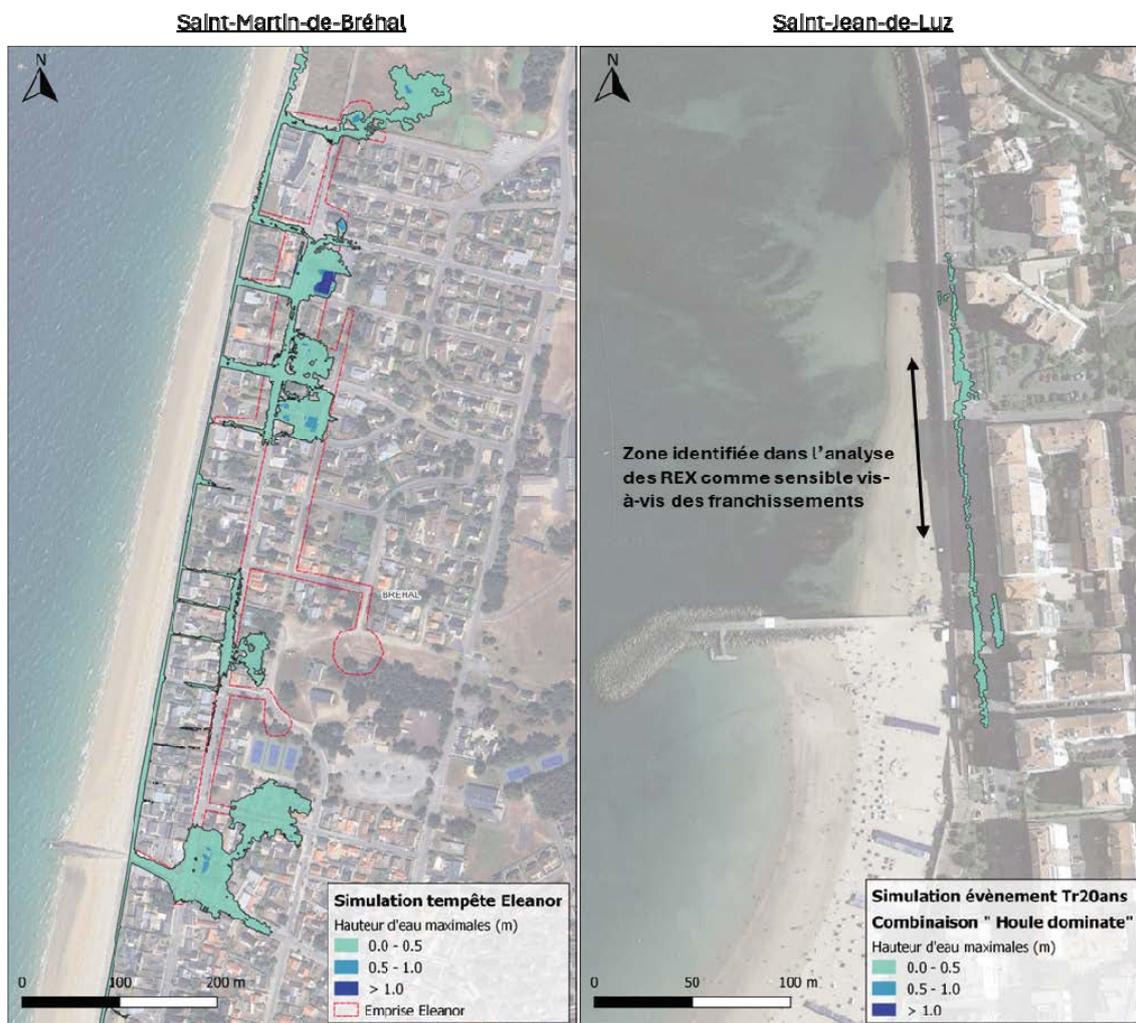


Figure 6. Résultats de modélisation.

5. Conclusion

De nombreuses communes souhaitent connaître l'impact des événements tempétueux sur le risque submersion. Cette analyse passe généralement par la modélisation d'un grand nombre de cas (variation de l'intensité de la tempête, évolution des niveaux de sable, augmentation du niveau d'eau en lien avec le dérèglement climatique, scénario d'aménagements). Devant cette demande, la mise en œuvre d'une approche pragmatique, telle que présentée dans cet article, est apparue nécessaire.

L'évènement de référence permet de calibrer la chaîne de modélisation puis de comparer ces résultats à ceux issus des autres scénarios dans le but d'atteindre les objectifs fixés dans le cadre de l'étude.

D'autres approches plus complètes pourraient permettre une analyse plus fine des phénomènes intégrant à la fois la modélisation des débits de franchissement ainsi que les écoulements : une modélisation de type SWASH 2D ou des essais en modèle physique. Toutefois, étant donné les temps de calcul et les coûts associés, ces approches

ne sont généralement pas adaptées au planning et budget de cette typologie de projet intégrant un grand nombre de cas à étudier. Cependant, ces études plus poussées restent soumises à la difficulté de définir avec précision les conditions océano-météo et les fonds marins spécifiquement associés à l'évènement. De ce fait ces outils comporteront également des limites et incertitudes

Ainsi, la méthodologie présentée dans le cadre de cet article au travers des communes de Saint-Martin-de-Bréhal et Saint-Jean-de-Luz donne des tendances générales satisfaisantes pour une mise en œuvre relativement simple et rapide. Sur la base de cette calibration nous avons pu extrapoler cette méthodologie à des conditions plus défavorables afin de répondre aux attentes de ces études (prise en compte notamment l'élévation du niveau de la mer en lien avec le dérèglement climatique).

Pour la suite, les pistes d'améliorations suivantes sont fléchées :

- a) Prise en considération des effets dynamiques liés aux phénomènes de franchissement (vagues et vents) au niveau des points d'injection dans le modèle d'écoulement.
- b) L'amélioration de la caractérisation du tissu urbain et de son influence sur les écoulements.
- c) La prise en considération / connaissance des fonds marins et des profils de plages lors des évènements tempétueux.

6. Références bibliographiques

CEREMA (2018). *Étude de dangers de systèmes d'endiguement. Concepts et principes de réalisation des études*. 62 p.,

https://www.cerema.fr/system/files/documents/2018/06/Rapport_%C3%89tude%20de%20dangers%20de%20syst%C3%A8mes%20d%E2%80%99endiguements.pdf

CEREMA (2024). *Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ CANDHIS*. <https://candhis.cerema.fr/>

DELTAIRES (2024a). *Overtopping Neural Network*. <https://dserie.deltaires.nl/NNOvertopping/default.aspx>

DELTAIRES (2024b). *XGB-Overtopping*. <https://dserie.deltaires.nl/XGBOvertopping/overtopping.aspx>

HR WALLINGFORD (2019). *Bayonet GPE*. <https://www.overtopping.co.uk/>

IFREMER (2015). *Base de données HOMERE*, doi:10.12770/cf47e08d-1455-4254-955e-d66225c9dc90

MEDDE (2014). *Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux-PPRL*, Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, et de l'Énergie, 169p., https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Guide_m%C3%A9thodo_PPRL_%202014.pdf

NONY64500 (2014). *Tempête à Saint-Jean-de-Luz, (01-02-2014)*, vidéo, mise en ligne le 04/02/2014, Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=86fnl4yd_IE

ROELVINK D., RENIERS A., VAN DONGEREN A., VAN THIEL DE VRIES J., MCCALL., LESCINSKI J. (2009). *Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands*. Coastal Engineering, Volume 56 (11-12), pp. 1133-1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>

Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

SHOM (2024). *REFMAR, REseaux MARégraphiques français*. <https://refmar.shom.fr/>

SWAN (2024). *Modèle Simulating WAVes Nearshore, User manual*, SWAN Cycle III version 41.45AB, Delft University of Technology, 154p. <https://swanmodel.sourceforge.io/>

A vérifier?

TELEMAC-MASCARET (2024). *Modèle TELEMAC*, ARTELIA, BAW, CEREMA, Daresbury Laboratory, EDF, HR Wallingford, <http://www.opentelemac.org/> A vérifier?

VAN DER MEER J.W., ALLSOP N.W.H., BRUCE T., DE ROUCK J., KORTENHAUS A., PULLEN T., SCHÜTTRUMPF H., TROCH P., ZANUTTIGH B. (2018). *EurOtop Manual on wave overtopping of sea defences and related structures - An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application*. Second Edition December 2018. Completed by an Errata of November 2019, www.overtopping-manual.com

VAN GENT M.R.A., VAN DEN BOOGAARD H.F.P., POZUETA B., MEDINA J.R. (2007). *Neural network modelling of wave overtopping at coastal structures*, Coastal Engineering, Vol.54, pp. 586-593. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.12.001>