



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Document à accès immédiat

Projet LIFE adapto – Baie d’Authie : Caractérisation des submersions marines pour différents scénarios d’aménagement

Rapport final

BRGM/RP-72630-FR

16 janvier 2023

Étude réalisée dans le cadre des projets de recherche

Luca Arpaia et Brivois Olivier

Vérificateur :

Nom : PAQUIER Anne Eléonore

Fonction : Ingénieure littoral

Date : 29/03/2023

Signature :

Approbateur :

Nom : DAVID Eric

Fonction : Responsable Unité R3C

Date : 30/03/2023

Signature :

Le système de management de la qualité et de l’environnement du BRGM
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



Conservatoire
du littoral



Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

Choisissez un élément.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire mis à votre disposition.

Mots clés : Adapto, changement climatique, Baie d'Authie, modélisation submersion marine, gestion souple, reconnexion marine, adaptation.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Luca Arpaia et Brivois Olivier (2023) – Projet LIFE adapto – Baie d'Authie : Caractérisation des submersions marines pour différents scénarios d'aménagement. Rapport final. **BRGM/RP-72630-FR**, 52p., 32 fig., 6 tab.

© BRGM, 2023, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-01/04/2021

Synthèse

Dans un contexte de changement climatique, les zones côtières basses sont potentiellement plus vulnérables à l'élévation du niveau de la mer ou aux événements climatiques extrêmes qui engendrent la submersion marine. Le projet adapto, initié par le Conservatoire du littoral, a pour objectif d'explorer des solutions possibles sur le littoral pour faire face aux effets du changement climatique, en intégrant les écosystèmes dans la gestion du trait de côte. Ainsi, 10 sites pilotes exposés à des problématiques côtières variées sont étudiés en France métropolitaine, Corse, et Guyane. Les réflexions concernant la mise en œuvre de ces solutions sont à des stades d'avancement différents sur les sites. En effet, pour certains sites tels que l'île Nouvelle et les polders de Mortagne-sur-Gironde respectivement dépoldérisés depuis 1999 et 2010, il s'agit de retour d'expériences. Pour d'autres sites en devenir, un accompagnement pluridisciplinaire est proposé de manière à faire émerger une stratégie prenant en compte les différents enjeux.

Le site de la Baie d'Authie, frontière littorale entre le Pas-de-Calais et la Somme, est l'un de ces sites en devenir, dans le cadre particulier d'une démarche PAPI (Programme d'Actions de Préventions des Inondations) en cours.

La zone d'étude s'est concentrée sur la partie sud et amont de la baie pour laquelle la dépoldérisation d'une parcelle rive droite a été actée et la dépoldérisation rive gauche, retenue dans le cadre du PAPI, était en cours de discussion.

Dans ce contexte un peu particulier, les objectifs de l'action furent modifiés afin de :

- Caractériser les zones reconnectées à la mer en termes d'altimétrie (ou de coefficient de marée) et de temps annuelle de submersion.
- Etudier différents scénarios d'aménagement, notamment en termes de position de la digue rétro-littorale et du polder amont en rive droite par simulation numérique, en évaluant les conséquences sur les niveaux d'eau et vitesses d'écoulement de ces différents scénarios.

Les travaux menés en Baie d'Authie ont permis de :

- Calculer la cote du zéro hydrographique par rapport à la cote du zéro IGN 69 (ZH/Ref) à l'observatoire secondaire « Berck Plage –Fort Mahon », cette donnée n'étant pas fournie directement par le RAM (Shom, 2019). Cette donnée est essentielle pour les deux tâches suivantes et permet d'accroître la précision des caractérisations réalisées.
- Caractériser les limites d'extension de la submersion marine en fonction des coefficients de marée. Cette donnée est très utile au Conservatoire du Littoral dans ses réflexions sur les types d'habitats qui vont se développer dans les zones reconnectées à la mer. Ainsi, le Conservatoire a préconisé de remblayer la zone reconnectée devant la digue de la Mollière en rive droite à un niveau similaire à l'estran environnant afin de favoriser le développement d'une végétation de type prés-salés.
- Caractériser les temps annuels de submersion en fonction de la topographie du site. Cette donnée est en effet nécessaire pour réaliser des cartographies prospectives d'habitats des zones reconnectées à la mer. Ces cartographies d'habitats, actuelle et prospective, sont ensuite utilisées pour évaluer un IQE (Indice de Qualité Ecologique) permettant une comparaison des habitats avant/après dépoldérisation en terme de fonctionnalités, diversité écologique et patrimonialité (voir Debue et al., 2022).

- Mettre en place et valider un modèle de submersion par débordement pour étudier et comparer 3 scénarios d’aménagement au sein de la zone d’étude pour des conditions marines extrêmes telles que définies dans le PAPI :
 - o Scénario 1 : reconstruction de la digue actuelle ;
 - o Scénario 2 : construction d’une digue de 2nd rang issue de la concertation ;
 - o Scénario 3 : construction d’une digue de 2nd rang telle que préconisée dans le PAPI.

Les résultats des simulations numériques ont permis de montrer que :

- Les conditions de vents considérées ont un effet très significatif sur le niveau marin au sein de la baie (augmentation du niveau marin de l’ordre de + 45 cm de l’aval vers l’amont).
- L’effet du resserrement/contraction de la baie, de l’aval vers l’amont, sur le niveau marin est moindre (de l’ordre d’une quinzaine de centimètres).
- Pour les conditions extrêmes de niveau marin considérées au large (+ 6.94 m NGF correspondant au niveau de marée haute pour un coefficient de 106 auquel s’ajoute une surcote marine et une surcote liée à l’action des vagues), les reconnections à la mer considérées dans les scénarios 2 et 3 ont relativement peu d’influence, en terme de zone d’expansion pour la submersion, sur les niveaux marins induits dans la baie.
- Quel que soit le scénario considéré, les vitesses d’écoulement maximales à Pont à Cailloux (limite de la contraction de l’estuaire), atteintes un peu avant l’étalement de la marée, sont très fortes (de l’ordre de 2 m/s ou plus suivant le scénario).

Les résultats de ces simulations (notamment sous forme de vidéos), présentées par le Conservatoire du littoral à diverses réunions en lien avec le PAPI, ont été appréciées par les acteurs locaux et ont contribué au choix d’une position de digue rétro-littorale intermédiaire entre le scénario 2 et le scénario 3.

Des travaux complémentaires sont en cours de discussion avec le Conservatoire du Littoral. En effet, il serait intéressant d’étudier et de comparer, par simulations numériques, les trois scénarios d’aménagement pour des conditions marines normales (hors tempête), actuelles et futures avec prise en compte de l’élévation du niveau marin due au changement climatique. Pour de telles conditions, les différents scénarios d’aménagement considérés devraient montrer des résultats plus contrastés, en termes de fonctionnement à l’amont de la baie (niveaux marins et vitesses d’écoulement). De telles simulations, en conditions marines normales, seraient également nécessaires pour étudier finement les différentes possibilités et les impacts des reconnections des polder l’Enclos et de la Petite Mollière.

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 1. DESCRIPTION DU SITE ET OBJECTIFS DE L’ETUDE | 9 |
| 1.1. CONTEXTE ET DESCRIPTION DU SITE | 9 |
| 1.1.1. <i>Le projet LIFE adapto</i> | 9 |
| 1.1.2. <i>Description du site d’étude : la Baie d’Authie</i> | 10 |
| 1.2. RAPPELS THEORIQUES SUR LES PHENOMENES DE SUBMERSION MARINE | 10 |
| 1.2.1. <i>Processus physiques</i> | 10 |
| 1.2.2. <i>Types de submersion marine</i> | 12 |
| 1.3. OBJECTIF DE L’ACTION | 13 |
| 2. DONNEES DISPONIBLES | 15 |
| 2.1. DONNEES TOPOGRAPHIQUES ET BATHYMETRIQUES | 15 |
| 2.1.1. <i>Données topographiques</i> | 15 |
| 2.1.2. <i>Données bathymétriques</i> | 16 |
| 2.1.3. <i>Création du MNT topo-bathymétrique</i> | 17 |
| 2.2. OCCUPATION DU SOL | 18 |
| 2.3. CARACTERISTIQUES MARINES ET FONCTIONNEMENT HYDROSEDIMENTAIRE ACTUEL | 19 |
| 2.3.1. <i>Marées et Références altimétriques</i> | 19 |
| 2.3.2. <i>Surcotes et niveaux marins extrêmes</i> | 21 |
| 2.3.3. <i>Houles</i> | 22 |
| 2.3.4. <i>Fonctionnement hydrosédimentaire actuel</i> | 23 |
| 3. CARACTERISATION DES LIMITES D’EXTENSION DE SUBMERSION EN FONCTION DES COEFFICIENTS DE MAREE ET DES TEMPS DE SUBMERSION ANNUELS | 25 |
| 3.1. CARACTERISATION DES LIMITES D’EXTENSION DE SUBMERSION EN FONCTION DES COEFFICIENTS DE MAREE | 25 |
| 3.1.1. <i>Méthode</i> | 25 |
| 3.1.2. <i>Résultats</i> | 26 |
| 3.2. CARACTERISATION DES TEMPS DE SUBMERSION ANNUELS | 28 |
| 3.2.1. <i>Méthode</i> | 28 |
| 3.2.2. <i>Préparation des données</i> | 28 |
| 3.2.3. <i>Traitement des marégrammes créés</i> | 29 |
| 4. SIMULATION NUMERIQUE DE LA SUBMERSION MARINE | 31 |
| 4.1. MISE EN PLACE DU MODELE | 31 |
| 4.1.1. <i>UHAINA</i> | 31 |
| 4.1.2. <i>Emprise et résolution spatiale du domaine de calcul</i> | 32 |
| 4.1.3. <i>Prise en compte des éléments structurants</i> | 32 |
| 4.1.4. <i>Prise en compte de la rugosité</i> | 33 |
| 4.2. SCENARIOS ETUDIES | 34 |
| 4.2.1. <i>Conditions marines</i> | 34 |
| 4.2.2. <i>Scénarios d’aménagement</i> | 36 |
| 4.3. RESULTATS DES SIMULATIONS NUMERIQUES | 40 |
| 4.3.1. <i>Validation du modèle</i> | 40 |
| 4.3.2. <i>Comparaison des différents scénarios</i> | 42 |
| 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES | 47 |
| 6. BIBLIOGRAPHIE | 49 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Principales actions du projet adapto et localisation des 10 sites du projet (d’après https://www.lifeadapto.eu/); le site de la Baie d’Authie, objet du présent rapport, est représenté par un point rouge sur la carte. | 9 |
| Figure 2 : Schéma des différentes contributions au niveau du plan d’eau lors d’une tempête (surcotes) jusqu’au rivage. | 11 |
| Figure 3 : Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer / dégradation des ouvrages / débordement, ©BRGM). | 12 |
| Figure 4 : Carte IGN de la Baie d’Authie (d’après Géoportail). | 13 |
| Figure 5 : Zones de reconnexion à la mer considérées dans la présente étude. | 14 |
| Figure 6 : Représentation des données topographiques utilisées (source RGEALTI®, IGN 2011). | 16 |
| Figure 7 : Représentation des données bathymétriques utilisées (HOMONIN, SHOM). | 17 |
| Figure 8. Principe de l’assemblage des données topographiques et bathymétriques : la ligne pointillée représente la zone de jonction entre les deux sources de données. Les lignes continues localisent les 3 profils topo-bathymétriques présentés à droite. Sur ces profils sont représentés les données bathymétriques (pointillés bleus), les données topographiques (pointillés rouges) et le résultat de leur assemblage, après lissage (trait continu noir). | 17 |
| Figure 9 : Occupation du sol dans la Baie d’Authie, issue des données CLC (2012) et BD TOPO (IGN). | 18 |
| Figure 10 : Port de référence et ports ou observatoires secondaires de la zone d’étude « Abords de Boulogne-sur-Mer » (Source : SHOM, 2019). | 19 |
| Figure 11 : Illustration des données Bathyelli v2.0 autour de Berck Plage – Fort Mahon (source : data SHOM). | 20 |
| Figure 12 : Roses des houles au large de la Baie de Somme, réalisées à partir des données BoBWA de 1958 à 2010 (BOBWA-X, Bulteau et al, 2013 | 22 |
| Figure 13 : Authie : Champs de houle centennale ($H_{m0} = 7.3m$, $T_p = 11s$, $Dir = 270^\circ N$, niveau centennal) et comportement de la houle sur une coupe transversale Sud-Ouest/Nord-Est (axe porté sur la figure en bas) avec identification des surcotes liées à la houle (d’après Artélia, PAPI BSA 2015). | 23 |
| Figure 14 : Fonctionnement hydrosédimentaire de la baie d’Authie (d’après Artélia, PAPI BSA 2015). | 24 |
| Figure 15 : Enveloppe des hauteurs de pleine mer (m NGF) par coefficient de marée en 2015 à Berck Plage – Fort Mahon (données issue du logiciel SHOMAR du SHOM). | 25 |
| Figure 16 : Limite d’extension de la submersion en fonction du coefficient de marée. | 27 |
| Figure 17 : Marégramme à Berck Plage –Fort Mahon en 2015 (SHOMAR, © SHOM). | 29 |

| | |
|--|----|
| Figure 18 : Emprise et maillage du domaine de calcul (gauche : emprise globale ; droite : détails sur 2 zones du domaine au sein de la Baie)..... | 32 |
| Figure 19 : Ligne d’ouvrage et maillage avec les arrêtes alignées le long des ligne d’ouvrage pour deux secteur différents de l’emprise du domaine de calcul..... | 33 |
| Figure 20 : Carte des coefficients de Manning utilisés pour prendre en compte l’occupation du sol et la rugosité associée..... | 34 |
| Figure 21 : Illustration de la méthode utilisée pour générer le signal imposé au large du domaine de calcul..... | 35 |
| Figure 22 : Positions des digues pour les trois scénarios d’aménagement considérés (fond de carte : SCAN 25, IGN)..... | 36 |
| Figure 23 : Cotes des digues prévues en rive droite amont de l’Authie (PAPI BSA). | 37 |
| Figure 24 : Digues rehaussées et digues arasées sur le MNT pour les 3 scénarios considérés (fond de carte : SCAN 25, IGN). | 38 |
| Figure 25 : Indice d’Etat Mécanique (IEM) du système d’endiguement (PAPI BSA). | 39 |
| Figure 26 : Modifications du système d’endiguement considérées pour les scénarios 2 et 3 (fond de carte : SCAN 25, IGN). | 39 |
| Figure 27 : Niveau d’eau maximal atteint durant la tempête au niveau de la digue de l’Enclos (valeurs bleues issues du modèle 2DH, tenant compte de la marée, du vent et de + 1.20 de surcote ; valeurs rouges : niveaux d’eau tenant compte de la surcote liée aux vagues (valeurs précédentes + wave setup)). | 40 |
| Figure 28 : Niveau d’eau maximal modélisé pour le scénario 1. | 41 |
| Figure 29 : Amplification du niveau d’eau maximal (en mètre) par rapport au niveau imposé au large. Chaque incrément de couleur correspond à +2,5cm. Gauche : simulation sans l’effet du vent ; Droite : simulation avec l’effet du vent..... | 41 |
| Figure 30 : Cartes de niveau d’eau maximal obtenues pour les 3 scénarios de position de digue. | 43 |
| Figure 31 : Position des jauges considérées au sein du domaine de calcul..... | 44 |
| Figure 32 : Niveau d’eau (en m NGF) et norme de la vitesse (en m/s) extraits aux jauges 23, 24, 25, 26 et 27 (de haut en bas, et donc de l’aval vers l’amont) ; S1, S2 et S3 représentent les différents scénarii considérés. | 46 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Références altimétriques maritimes au port ou observatoire secondaire de Berck Plage – Fort Mahon (SHOM, 2019). | 20 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Tableau 2 : Correspondance des niveaux de marée en m NGF et cote marine à Berck Plage – Fort Mahon. | 21 |
| Tableau 3 : Surcote extrêmes estimées à Boulogne-sur-Mer (P.A Pirazzoli, 2008). | 21 |
| Tableau 4 : Niveaux extrêmes de pleine-mer sur le secteur de la Baie d’Authie (SHOM/CETMEF, 2008). | 21 |
| Tableau 5 : Hauteurs actuelles minimales, maximales et moyennes (en m NGF) des pleines mers (PM) en fonction du coefficient de marée pour l’année 2015 à Berck Plage – Fort Mahon. | 26 |
| Tableau 6 : Durée cumulée annuelle de submersion par tranche altimétrique, calculée par rapport aux références altimétriques de Berck Plage – Fort Mahon pour l’année 2015 (SHOMAR édition 2014-2015). | 30 |

1. Description du site et objectifs de l’étude

1.1. CONTEXTE ET DESCRIPTION DU SITE

1.1.1. Le projet LIFE adapto

Le projet LIFE adapto, initié par le Conservatoire du Littoral, a pour objectif d’explorer, sur des territoires littoraux naturels, des solutions douces pour faire face aux effets du changement climatique qui se manifeste par l’élévation du niveau de la mer et l’augmentation de la fréquence des évènements climatiques extrêmes.

Sur 10 sites pilotes (Figure 1), appartenant au Conservatoire du littoral, le projet adapto vise à démontrer l’intérêt et l’efficacité d’une **gestion souple du trait de côte**. Ces dix sites expérimentaux, neuf en métropole et un en Guyane, représentent un panel de 5 types de milieux littoraux différents : côtes basses et sableuses atlantiques, côtes basses atlantiques poldérisées, lidos méditerranéens, salins méditerranéens, mangroves.

Sur chacun des 10 sites, le projet adapto amène les collectivités, les gestionnaires et les usagers concernés à construire leur **projet de territoire**. Pour ce faire, adapto propose une approche pluridisciplinaire (économique, risques naturels, sociologique, biodiversité, perception sociale, etc. ; voir Figure 1), afin de comparer différents modes de gestion face aux conséquences attendues de l’élévation du niveau de la mer sous l’effet du changement climatique.

Dans ce projet LIFE, le BRGM, bénéficiaire associé au Conservatoire du Littoral, met en œuvre différentes approches sur les 10 sites d’application du projet visant principalement, soit à caractériser les aléas naturels d’érosion ou de submersion, soit à suivre l’évolution morphologique de la bande côtière suite à la réalisation d’opérations de gestion.

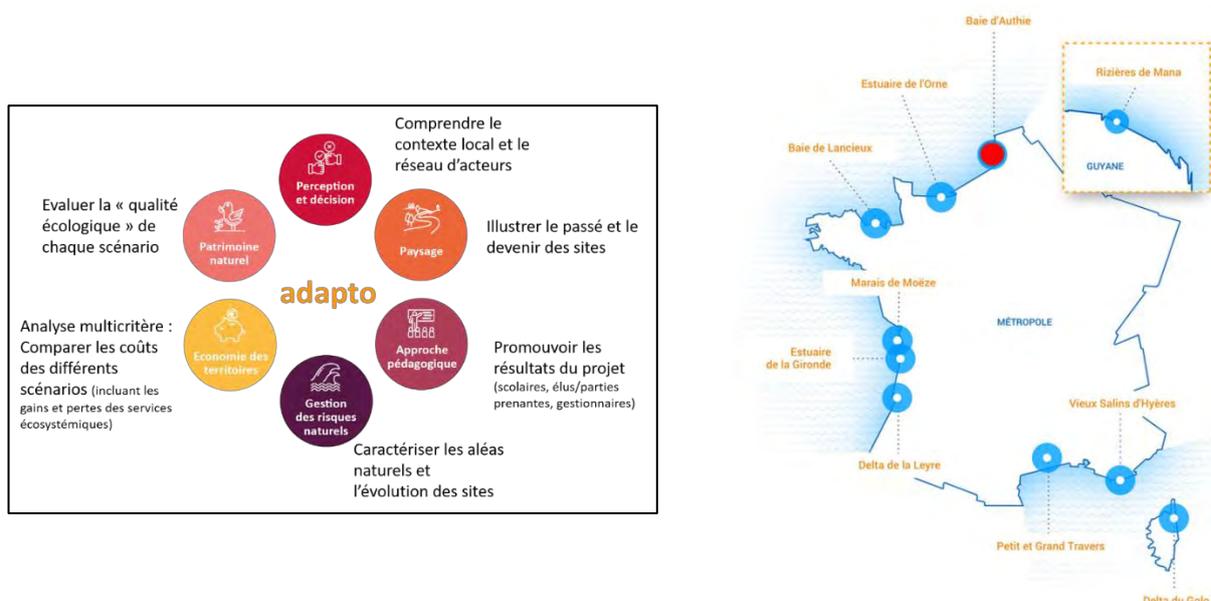


Figure 1 : Principales actions du projet adapto et localisation des 10 sites du projet (d’après <https://www.lifeadapto.eu/>); le site de la Baie d’Authie, objet du présent rapport, est représenté par un point rouge sur la carte.

Les réflexions concernant la mise en œuvre de ces solutions douces sont à des stades d’avancement différents suivant les sites. En effet, pour certains sites tels que l’île Nouvelle et les polders de Mortagne-sur-Gironde, respectivement dépoldérisés depuis 2010 et 1999, il s’agit de retour d’expériences. Pour d’autres, un accompagnement pluridisciplinaire est proposé de manière à faire émerger une stratégie de gestion de la bande côtière prenant en compte les différents enjeux. C’est le cas du site de la Baie d’Authie, limite entre les départements du Pas-de-Calais et de la Somme au sein de la Région Hauts-de-France, sur lequel nous nous concentrons ici (Figure 4).

1.1.2. Description du site d’étude : la Baie d’Authie

La Baie d’Authie, frontière littorale entre le Pas-de-Calais et la Somme, est un estuaire de type picard. Elle est constituée d’une rive en accrétion (le poulier, rive sud) et d’une rive opposée présentant des tronçons en forte érosion (le musoir, rive nord).

Entre 1258 et 1862, au fur et à mesure de l’accrétion du Poulier (rive sud), l’homme a construit des digues (localement appelées « renclôtures ») pour gagner progressivement des terres cultivables sur les prés-salés. A l’opposée, la rive nord a connu (et continue de connaître) une forte érosion, particulièrement marquée et visible à l’anse des sternes, au massif dunaire entre le bois des sapins et le bec du perroquet. La surface de schorre (ou prés-salés), quant à elle, progresse par un lent phénomène de comblement de la baie.

Sur la rive nord, l’érosion du cordon dunaire fait craindre une possible brèche qui menacerait de submerger les terres basses situées à l’arrière (cf : Plan de Prévention des Risques Littoraux). Cette érosion résulte de la combinaison de différents facteurs : l’évolution naturelle du système poulier/musoir sous l’effet de l’action des vagues et du vent, la divagation du lit majeur de l’Authie dans sa baie, et les différents ouvrages construits par les hommes au cours des derniers siècles. La mer et l’Authie modèlent en continu le trait de côte.

Cet estuaire est inscrit dans une démarche PAPI (Programme d’Actions de Préventions des Inondations). Afin d’anticiper l’élévation du niveau de la mer liée au changement climatique, différents scénarios ont été étudiés favorisant l’adoption d’une gestion adaptative :

- Cibler les aménagements indispensables à la sécurité des personnes et les localiser de façon efficace.
- Reconnecter certains polders avec l’estuaire pour mieux accompagner l’évolution du trait de côte.
- Concevoir les aménagements en prenant en compte leurs effets de façon globale afin que les protections instaurées à un endroit ne renforcent pas l’érosion ailleurs.

1.2. RAPPELS THEORIQUES SUR LES PHENOMENES DE SUBMERSION MARINE

1.2.1. Processus physiques

« Les submersions marines sont des inondations temporaires de la zone côtière par la mer lors de conditions météorologiques et océaniques défavorables (basses pressions atmosphériques et fort vent d’afflux agissant, pour les mers à marée, lors d’une pleine mer) ; elles peuvent durer de quelques heures à quelques jours » (Guide méthodologique PPRL, MEDDE, mai 2014). Elles sont le plus souvent associées à des surélévations temporaires du niveau de la mer lors de

tempêtes ou de cyclones, voire de tsunamis. En dehors des tsunamis, les surcotes marines sont contrôlées par deux processus principaux (Figure 2) :

- **la surcote atmosphérique** : le passage d’un important système dépressionnaire (cyclone, tempête) est caractérisé par des variations du niveau marin selon deux mécanismes :
 - o la chute de pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau du plan d’eau. C’est le phénomène de *baromètre inverse* : une diminution d’1 hPa équivaut à une élévation d’1 cm du plan d’eau (valeurs pour une situation théorique d’un plan d’eau infini et d’une pression atmosphérique uniforme) ;
 - o à cela s’ajoute l’effet du vent, qui en fonction de son intensité et de sa direction est susceptible de provoquer des accumulations d’eau sur la bande littorale.

La surélévation du plan d’eau provoquée par la chute de pression et l’action du vent correspond à la surcote atmosphérique (ou météorologique). La combinaison de la marée et de cette surcote atmosphérique génère le niveau de la mer « au repos » (Figure 2). Par commodité, ce niveau est désigné par la suite par *SWL* (« *still water level* »)

- **la surcote liée aux vagues (wave Setup)** : à l’approche de la côte, les vagues générées au large déferlent en transférant leur énergie sur la colonne d’eau, dont une partie provoque une surélévation du niveau moyen du plan d’eau (le « *wave Setup* » ou surcote liée aux vagues) qui peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres.

Le **niveau moyen du plan d’eau** (ou niveau statique) lors d’une tempête ou d’un cyclone résulte de la contribution de la surcote atmosphérique, de la surcote des vagues et de la marée (Figure 2).

Enfin, le niveau instantané du plan d’eau dépendra du jet-de-rive (swash), c’est-à-dire le flux et le reflux des vagues sur l’estran. On appelle runup la cote maximale atteinte par la mer au-dessus d’un niveau de référence (ex. le zéro hydrographique).

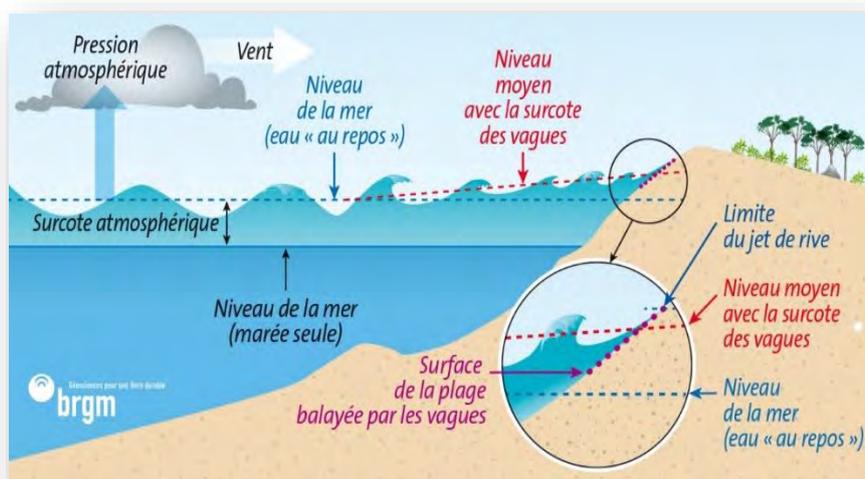


Figure 2 : Schéma des différentes contributions au niveau du plan d’eau lors d’une tempête (surcotes) jusqu’au rivage.

1.2.2. Types de submersion marine

La submersion peut se manifester sous trois formes différentes (Figure 3) :

- le **franchissement** par paquets de mer, qui correspond au passage des vagues par-dessus les défenses côtières (naturelles ou artificielles), l’accumulation d’eau résultante peut s’avérer importante selon l’ampleur des franchissements, sa durée et le linéaire concerné ; le franchissement est conditionné essentiellement par la position du plan d’eau (niveau statique) par rapport à la cote maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection, et par les caractéristiques locales des vagues (hauteurs et périodes) ;
- le **débordement**, qui correspond à une élévation du niveau d’eau statique au-dessus de la cote maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection ; il entraîne un déversement direct d’importantes quantités d’eau à terre ; les volumes d’eau mis en jeu dépendent de l’écart entre le niveau d’eau et celui de la cote maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection, la durée du débordement et de la vitesse de l’écoulement ;
- la **rupture** de structures de protection qui peut être causée par l’action répétée des vagues et/ou la surverse. Les structures de protection peuvent être alors endommagées progressivement ou brutalement, et des brèches ou une défaillance généralisée peuvent se produire, provoquant le passage à un régime de débordement. Le déversement de l’eau en arrière des ouvrages est également de nature à les dégrader davantage.

Un épisode de submersion peut résulter de la succession de ces différents processus (Figure 3), voire de leur occurrence simultanée, en des endroits différents. Lors de tempêtes, on assiste généralement à une montée progressive du niveau statique et à un renforcement de l’intensité des vagues (temps 1). Au-delà d’une certaine intensité, il peut y avoir franchissements par paquets de mer, la submersion associée restant en général limitée (temps 2). Si le niveau statique continue à s’élever et dépasse la cote maximale des défenses côtières, la submersion passe alors en régime de débordement (temps 3A). Lorsque le niveau statique diminue du fait de la marée et/ou de la baisse de la surcote, on peut observer, suivant la configuration, une « vidange » partielle de l’eau accumulée à terre vers la mer ou de nouveaux franchissements jusqu’à ce que les conditions de mer diminuent en intensité (temps 3B). En cas de rupture d’un ouvrage de protection, il peut y avoir submersion par débordement alors que le niveau statique ne dépasse pas la cote maximale de l’ouvrage avant rupture (temps 3C).

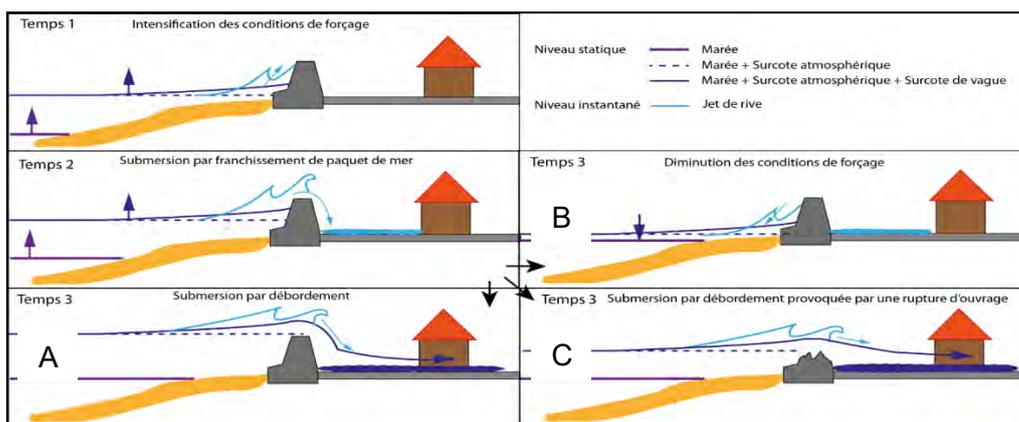


Figure 3 : Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer / dégradation des ouvrages / débordement, ©BRGM).

1.3. OBJECTIF DE L’ACTION

Initialement, lors du montage du projet adapto en 2016-2017, l’action envisagée sur ce site visait à déterminer les caractéristiques physiques de la digue rétro-littorale (position, hauteur, résistance éventuelle aux forçages hydrodynamiques) qui devait être construite au niveau du Bois des Sapins (site n°1 sur la Figure 4), derrière la dune soumise à une forte érosion, afin de protéger efficacement les zones basses en arrière lors d’évènements extrêmes. Il s’agissait en particulier de réaliser des simulations numériques d’un ou des scénarii du PAPI avec « effacement » progressif de la dune et prise en compte d’une digue rétro-littorale.

Courant 2018, à ce premier site du Bois des Sapins, s’est ajouté le site du polder de la Mollière (site n°2 sur la Figure 4) qui présentait une problématique assez similaire : création d’une digue rétro-littorale et reconnexion à la mer d’une partie du polder.

Finalement les décisions prises localement (site du Bois des Sapins : travaux de gestion d’urgence sur la dune du Bois des Sapins avec un rechargement massif en sable en 2019, position et dimensionnement de la digue rétro-littorale actés ; site du polder de la Mollière : refus d’une dépoldérisation de grande envergure, dépoldérisation partielle de la partie Sud du polder limitée à quelques hectares, notamment pour limiter l’érosion observée à cet endroit) n’ont pas permis la considération de différents scénarios de gestion et en particulier de gestion souple. La zone d’étude a finalement été centrée sur la partie sud et amont de la baie (site n°3 sur la figure suivante). Dans cette zone, la dépoldérisation d’une parcelle rive droite a été actée et la dépoldérisation rive gauche, retenue dans le cadre du PAPI, est en cours de discussion (voir Figure 5). Sur cette dernière zone en rive gauche amont, les positions exactes des ouvrages n’étant pas encore fixées, il est encore possible de « faire bouger les lignes » et d’étudier d’autres scénarios d’aménagement.

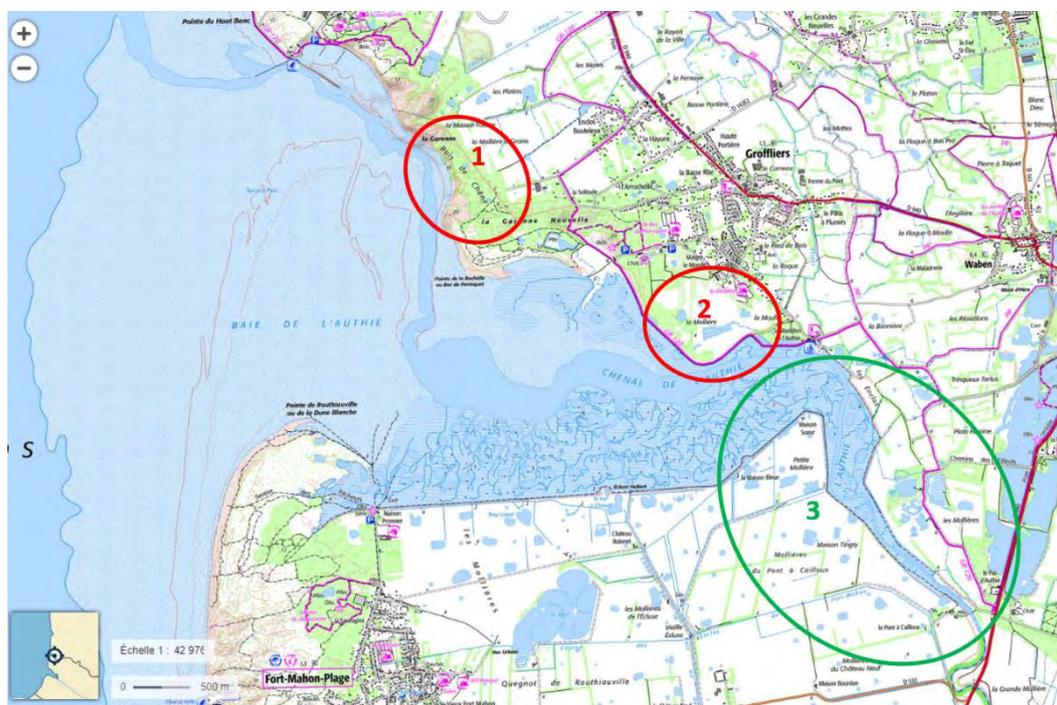


Figure 4 : Carte IGN de la Baie d’Authie (d’après Géoportail).

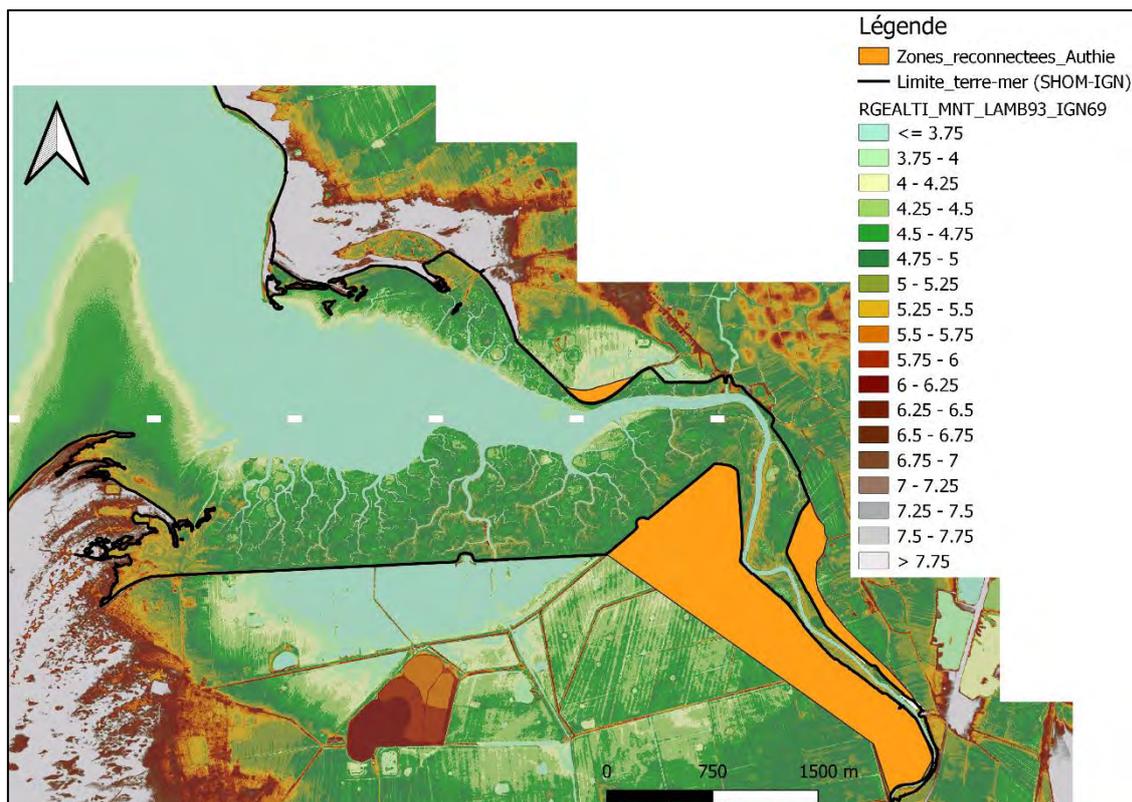


Figure 5 : Zones de reconnexion à la mer considérées dans la présente étude.

Dans ce contexte un peu particulier (ayant entraîné plusieurs modifications du site d’étude et un retard du démarrage de l’action), les objectifs sont les suivants :

- Caractériser les zones reconnectées à la mer en termes d’altimétrie (ou de coefficient de marée) et de temps annuelle de submersion. L’extension de la submersion au sein des zones reconnectées, selon les coefficients de marée, est en effet une information primordiale pour qualifier le type d’écosystèmes créé (slikke, schorre, etc.). En parallèle, les temps de submersion annuel des zones reconnectées sont utilisés par le MNHN pour réaliser des cartographies prospectives d’habitats (Debue et al., 2022) permettant ainsi d’évaluer un indice de qualité écologique avant et après reconnexion.
- Etudier différents scénarios d’aménagement, notamment en termes de position de la digue rétro-littorale, du polder amont en rive droite par simulation numérique. Il s’agira d’évaluer les conséquences sur les niveaux d’eau et vitesses d’écoulement de ces différents scénarios.

Dans la suite du rapport, sont d’abord présentés (chapitre 2) les données utilisées et leurs traitements afin de créer le modèle numérique de terrain (MNT) du site d’étude, nécessaire à la mise en place du modèle numérique. Le chapitre 3 est dédié à la caractérisation des limites théoriques de submersion selon les coefficients de marée et à l’évaluation du temps de submersion annuel des zones reconnectées à la mer. Le chapitre 4 présente la mise en place du modèle numérique, les scénarios étudiés et les résultats obtenus. Les conclusions de ce travail sont données aux chapitre 5.

2. Données disponibles

2.1. DONNEES TOPOGRAPHIQUES ET BATHYMETRIQUES

2.1.1. Données topographiques

La source de données exploitée sur la partie terrestre des MNT, y compris sur la zone intertidale située à l'interface terre-mer, est le produit RGE ALTI® 1 m (IGN, 2011) (Figure 6).

Le RGE ALTI® est composé initialement du MNT issu de la BD ALTI® à 25 m, ré-échantillonné au pas de 1 m, auquel sont intégrées progressivement les données nouvelles, au rythme des réfections. L'objectif est une couverture (V2) de l'ensemble du territoire national concerné par le RGE® avec un modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 1 m ayant partout une précision verticale d'au moins 50 cm.

Il est à noter que sur les zones inondables et littorales, des besoins spécifiques liés à la mise en œuvre de la directive européenne inondation et aux problématiques d'aménagement et de gestion des risques sur le littoral ont été identifiés. Ils requièrent une précision plus grande, de l'ordre de 20-30 cm, qui est obtenue par les levés LIDAR aériens.

Sur le littoral, le RGE ALTI® et la composante terrestre de Litto3D®, lorsque disponible, sont identiques. Le RGE Alti (©IGN) est établi par l'IGN à partir de levés LiDAR aéroportés, et correspond à un modèle numérique de terrain (MNT) topographique à haute résolution (1 m) et grande précision (erreur verticale de l'ordre de 15 à 20 cm).

Les traitements semi-automatiques réalisés par l'IGN ont permis d'effacer les différents éléments de sursol (végétation et bâtiments notamment) de façon à aboutir à un produit véritablement représentatif du sol.

L'acquisition LiDAR est réalisée à marée basse, de façon à couvrir également au mieux l'estran. Dans certains secteurs, en présence d'eau (plans d'eau, rivières, etc.), la donnée ne contient qu'une valeur uniforme ou une interpolation de valeurs qui n'est pas représentatif du fond).



Figure 6 : Représentation des données topographiques utilisées (source RGEALTI®, IGN 2011).

2.1.2. Données bathymétriques

Le MNT bathymétrique de la façade Atlantique à une résolution de 0.001° (~ 111 m) a été réalisé dans le cadre du projet HOMONIM et est sorti en 2015. Il est mis à jour au fil de l’eau, en fonction des besoins exprimés et uniquement en cas d’intégration de nouveaux levés susceptibles d’améliorer significativement la qualité du MNT. Il englobe une partie de la Mer du Nord, la Manche ainsi que le Golfe de Gascogne. Au large, ce MNT s’étend au-delà du talus jusqu’à environ 4800 m de profondeur. Le MNT est destiné à être implémenté dans les modèles hydrodynamiques afin de produire des prévisions aussi précises que possibles des hauteurs d’eau et d’états de mer à la côte et donc d’améliorer la pertinence de la Vigilance Vagues-Submersion. Ce produit est disponible avec comme référence verticale le niveau des plus basses mers astronomiques (PBMA) ou le niveau moyen des mers (NM). Les données bathymétriques utilisées pour l’étude sont représentées sur la Figure 7.

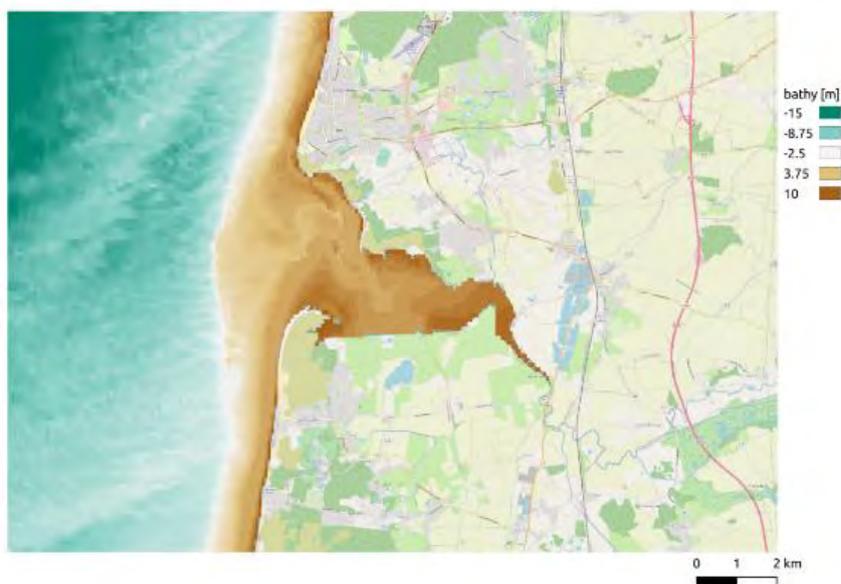


Figure 7 : Représentation des données bathymétriques utilisées (HOMONIN, SHOM).

2.1.3. Création du MNT topo-bathymétrique

Les deux sources de données utilisées à terre et en mer (RGEALTI et HOMONIM) ayant des résolutions spatiales très différentes (1 m pour le RGEALTI et environ 111 m pour HOMONIM) des discontinuités altimétriques peuvent apparaître lors de leur assemblage. Un algorithme de lissage a donc été utilisé pour limiter ces écarts et obtenir une représentation continue de la topo-bathymétrie (voir Figure 8).

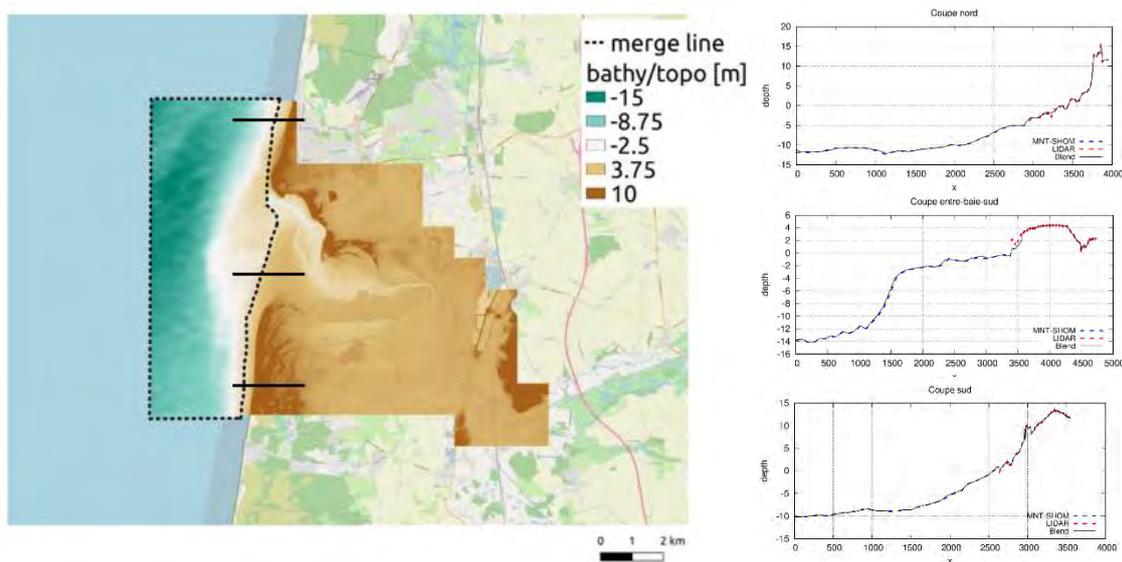


Figure 8. Principe de l’assemblage des données topographiques et bathymétriques : la ligne pointillée représente la zone de jonction entre les deux sources de données. Les lignes continues localisent les 3 profils topo-bathymétriques présentés à droite. Sur ces profils sont représentés les données bathymétriques (pointillés bleus), les données topographiques (pointillés rouges) et le résultat de leur assemblage, après lissage (trait continu noir).

2.2. OCCUPATION DU SOL

L’occupation du sol est une donnée importante par la suite, car elle conditionne les frottements auxquels sont soumis les écoulements dans les simulations numériques de submersion.

Deux jeux de données ont été ici utilisés : les données Corine Land Cover (2012), auxquelles ont été ajoutées les données hydrographie de la BD Topo d’IGN, permettant d’identifier plus précisément les surfaces en eau et plan d’eau ainsi que les canaux, cours d’eau et chenaux. La Figure 9 présente la couche résultat obtenue.

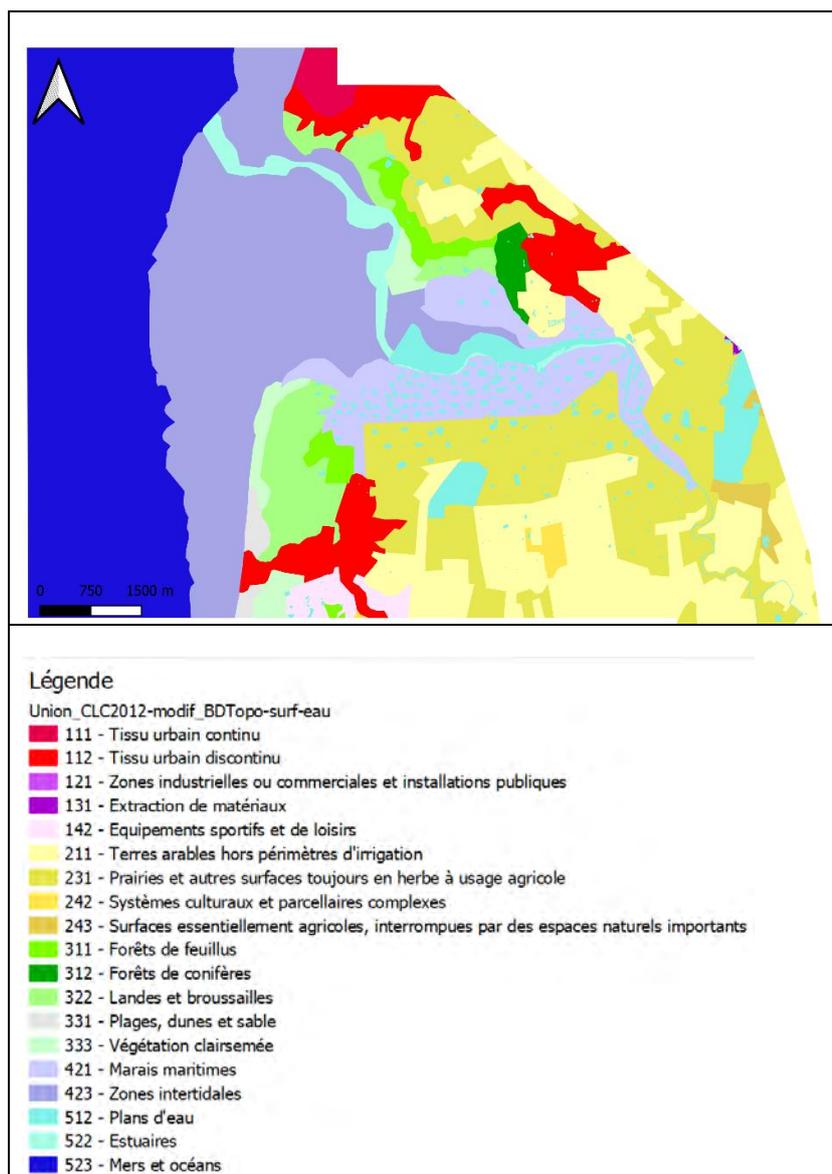


Figure 9 : Occupation du sol dans la Baie d’Authie, issue des données CLC (2012) et BD TOPO (IGN).

2.3. CARACTERISTIQUES MARINES ET FONCTIONNEMENT HYDROSEDIMENTAIRE ACTUEL

2.3.1. Marées et Références altimétriques

La zone de marée des abords de Boulogne-sur-Mer est limitée au Nord par une ligne orientée au 320° passant par le phare du Cap Gris-Nez et au Sud par une ligne orientée au 310° passant par le phare d'Ault (voir figure suivante). Le port de référence de la zone est Boulogne-sur-Mer (observatoire permanent de marée) et le type de marée est semi-diurne.

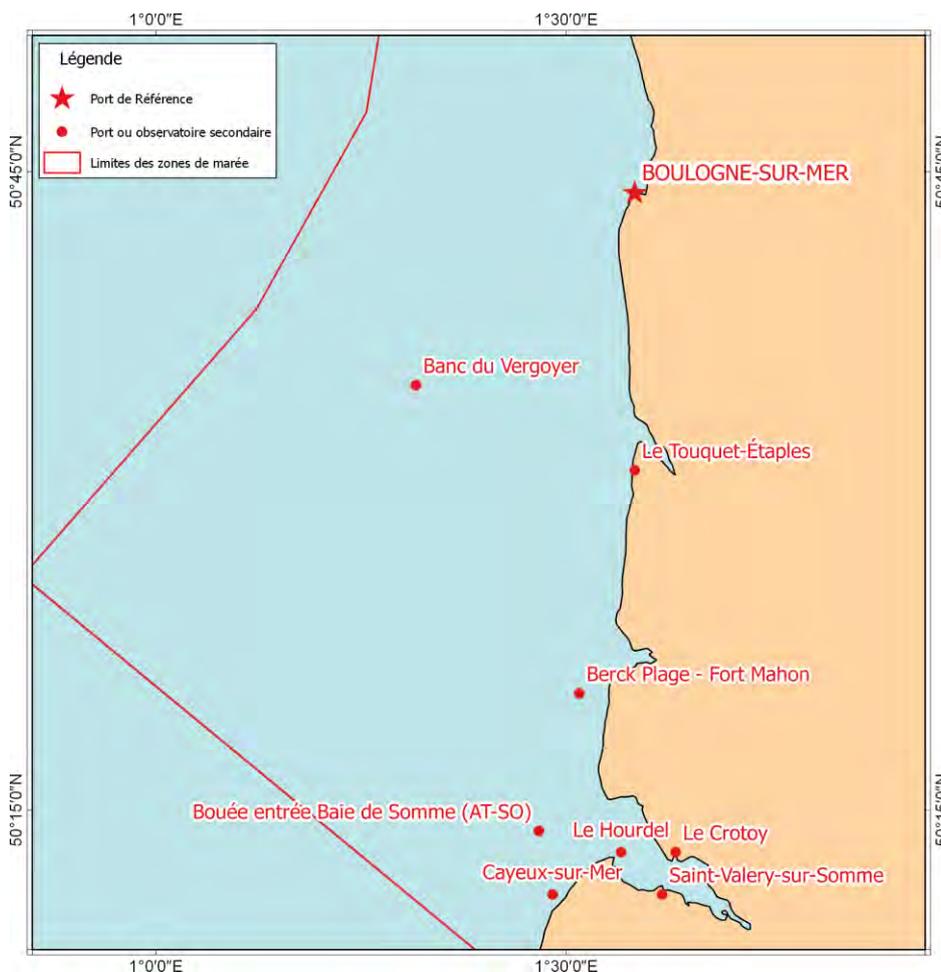


Figure 10 : Port de référence et ports ou observatoires secondaires de la zone d'étude « Abords de Boulogne-sur-Mer » (Source : SHOM, 2019).

Pour la Baie d'Authie, le port ou observatoire secondaire le plus proche est « Berck Plage –Fort Mahon » pour lequel les références altimétriques maritimes sont les suivantes (Tableau 1) :

| | | | |
|----------|--------------------------|-----------|--------------------------|
| RAM 2019 | Berck Plage - Fort Mahon | Réf. Alti | Berck Plage - Fort Mahon |
| PHMA | 10.54 | Repère | N.C.L3-4A |
| PMVE | 9.75 | Organisme | IGN |
| PMME | 7.85 | Date | 1952 |
| NM | 5.37 | RF/ZH | |
| BMME | 2.95 | RF/ref | 5.709 |
| BMVE | 1.15 | ZH/Ref | |
| PBMA | 00.29 | Ref | IGN69 |

Tableau 1 : Références altimétriques maritimes au port ou observatoire secondaire de Berck Plage – Fort Mahon (SHOM, 2019).

Dans le Tableau 1, la cote du zéro hydrographique par rapport à la cote du zéro IGN 69 (ZH/Ref) n’est pas donnée, ne permettant pas de déterminer directement les niveaux de marée en IGN69.

Pour ce faire, nous avons utilisé les données Bathyelli v2.0 (SHOM) pour déterminer la cote du zéro hydrographique par rapport à l’ellipsoïde à Berck Plage - Fort Mahon (Figure 11).



Figure 11 : Illustration des données Bathyelli v2.0 autour de Berck Plage – Fort Mahon (source : data SHOM).

En réalisant la moyenne des valeurs de la cote du zéro hydrographique par rapport à l’ellipsoïde des 4 points situés autour de la position de Berck Plage – Fort Mahon, on obtient une hauteur ellipsoïdale de 39.163 m. En utilisant la grille RAF18 de l’IGN et en procédant de la même façon que précédent (moyenne des 4 points les plus proches autour de la position de Berck Plage – Fort Mahon), il est possible de déterminer la cote du zéro IGN69 par rapport à l’ellipsoïde. L’écart entre la cote du zéro IGN69 et l’ellipsoïde est alors de 43.79 m ; ce qui permet d’en déduire que l’écart entre le zéro hydrographique et le zéro IGN69 est de **ZH/Ref = - 4.63 m**.

Il est alors possible d’exprimer les différents niveaux de marée en m NGF (voir tableau suivant) par rapport à la cote marine (CM).

| Marée | Niveau (m NGF) | Niveau (m CM) |
|-------|----------------|---------------|
| PBMA | - 4.34 | 0.29 |
| BMVE | - 3.48 | 1.15 |
| BMME | - 1.68 | 2.95 |
| NM | 0.74 | 5.37 |
| PMME | 3.22 | 7.85 |
| PMVE | 5.12 | 9.75 |
| PHMA | 5.91 | 10.54 |

Tableau 2 : Correspondance des niveaux de marée en m NGF et cote marine à Berck Plage – Fort Mahon.

2.3.2. Surcotes et niveaux marins extrêmes

Les travaux menés par P.A. Pirazzoli, dans le cadre du projet DISCOBOLE, indiquent les surcotes suivantes à Boulogne-sur-Mer :

| Période de retour | Surcote à Boulogne-sur-Mer |
|-------------------|----------------------------|
| 10 ans | 1.80 m |
| 50 ans | 2.10 m |
| 100 ans | 2.20 m |

Tableau 3 : Surcote extrêmes estimées à Boulogne-sur-Mer (P.A Pirazzoli, 2008).

Les niveaux extrêmes de pleine-mer dans le secteur de la baie d’Authie, issue des cartes produites par SHOM/CETMEF (2008) sont donnés dans le tableau suivant.

| Période de retour | Niveau extrême de pleine-mer |
|-------------------|------------------------------|
| 10 ans | 6.10 m NGF |
| 20 ans | 6.20 m NGF |
| 50 ans | 6.30 m NGF |
| 100 ans | 6.50 m NGF |

Tableau 4 : Niveaux extrêmes de pleine-mer sur le secteur de la Baie d’Authie (SHOM/CETMEF, 2008).

A noter que les niveaux extrêmes présentés ci-dessus n’intègrent pas la contribution liée au déferlement de la houle (wave setup) qui peut localement augmenter le niveau d’eau.

2.3.3. Houles

Du fait de la configuration de la côte, 2 principaux régimes se distinguent : les tempêtes de la Mer du Nord, qui tendent à plutôt impacter la partie nord du littoral (de la frontière belge à Wissant), et les tempêtes venant de la Manche, qui tendent plutôt à impacter le littoral sud-ouest (de Wissant au Tréport).

Les climats de vagues présents sur le secteur reflètent également ces deux directions de provenance privilégiées (Ouest et Nord) comme l’illustrent la rose de houles de la base de données BOBWA-X (cf. Figure 12) extraite au large de la Baie de Somme. Ces vagues, selon leur orientation par rapport à l’orientation et à la configuration du littoral, peuvent générer une surcote de déferlement de plusieurs dizaines de centimètres. Sur les côtes « ouvertes », comme l’essentiel de la façade nord de la région, cette surcote n’apparaît que lors du déferlement des vagues à la côte et reste donc très localisée le long de la côte. Dans des baies plus « fermées » et peu profondes, comme la baie de l’Authie, le déferlement peut se produire à l’entrée de la baie du fait des faibles profondeurs, ce qui conduit à une surcote de déferlement plus généralisée à l’intérieur de la baie.

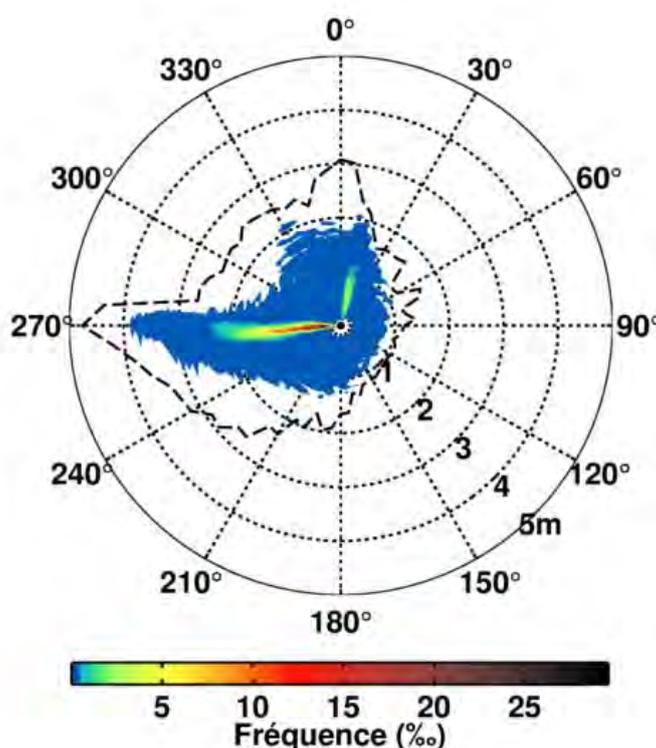


Figure 12 : Roses des houles au large de la Baie de Somme, réalisées à partir des données BoBWA de 1958 à 2010 (BOBWA-X, Bulteau et al, 2013)

En effet, la morphologie particulière de la Baie d’Authie, et la présence de la flèche sableuse (le poulier) en entrée de baie en particulier, entraîne le déferlement des fortes houles et la génération d’une surcote liée à la houle (wave setup) qui se propage dans l’ensemble de la baie. Cela est illustré sur la Figure 13, montrant le résultat de la simulation de la propagation d’une houle centennale associée à un niveau d’eau centennal. Alors qu’au large la houle est imposée à une hauteur de 7.3 m, en fond de baie et suite à son déferlement, la houle résiduelle est inférieure à 0.5 m.

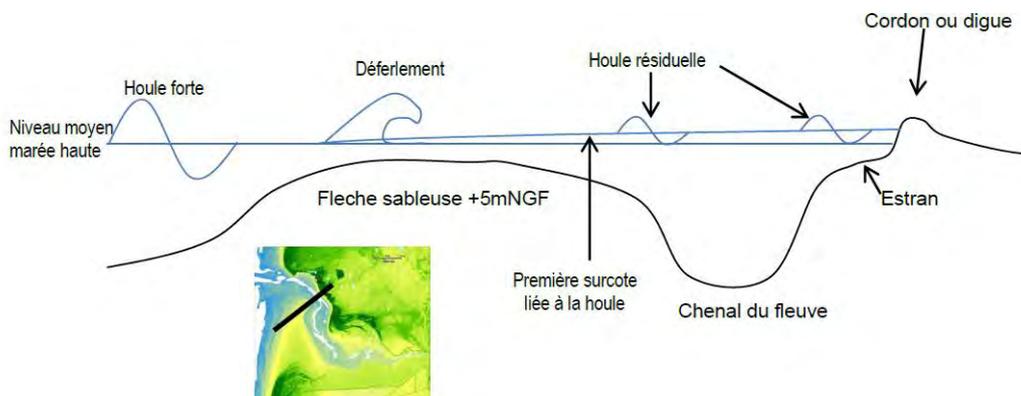
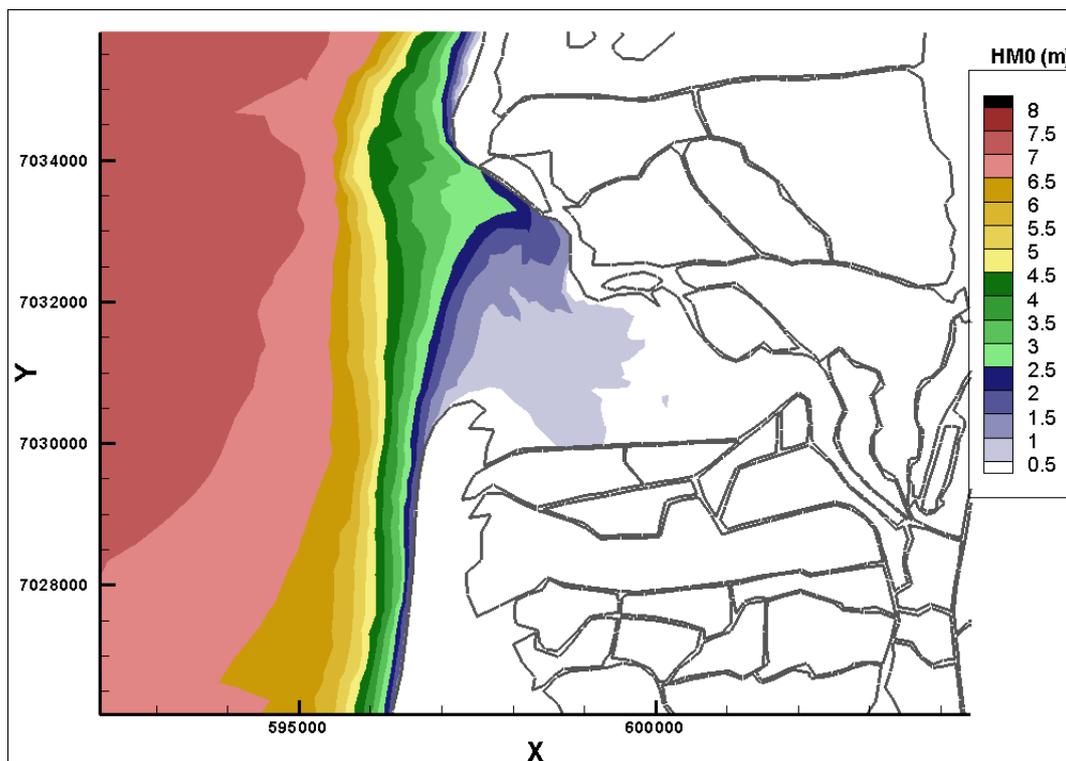


Figure 13 : Authie : Champs de houle centennale ($Hm0 = 7.3m$, $Tp = 11s$, $Dir = 270^\circ N$, niveau centennal) et comportement de la houle sur une coupe transversale Sud-Ouest/Nord-Est (axe porté sur la figure en bas) avec identification des surcotes liées à la houle (d’après Artélia, PAPI BSA 2015).

2.3.4. Fonctionnement hydrosédimentaire actuel

La baie d’Authie est un estuaire historiquement très mobile et en constante évolution. Au Sud de la Baie, la dérive vers le Nord alimente la pointe de Routhiauville. De même, au Nord de la Baie d’Authie, le transit sédimentaire est nord-sud, depuis Berck vers la Canche. Tout comme les autres estuaires « picards », la baie d’Authie connaît un processus de migration vers le nord. Ce phénomène est dû à un engraissement du poulier au sud (Pointe de Routhiauville), accompagné d’un exhaussement des fonds et d’une progression des mollières sur toute la rive sud. Le corolaire de ce phénomène est le déplacement et le resserrement vers le nord du chenal de

l’Authie et des chenaux de marées qui soumettent la rive nord à une forte érosion. Depuis la moitié du XIX^{ème} siècle, la rive nord a été équipée de nombreux aménagements pour tenter d’enrayer ce phénomène tandis que le sud de la baie était marqué par des renclôtures successives gagnant du terrain sur la baie. La baie d’Authie reste aujourd’hui un secteur sensible vis-à-vis du risque d’inondation et d’érosion.

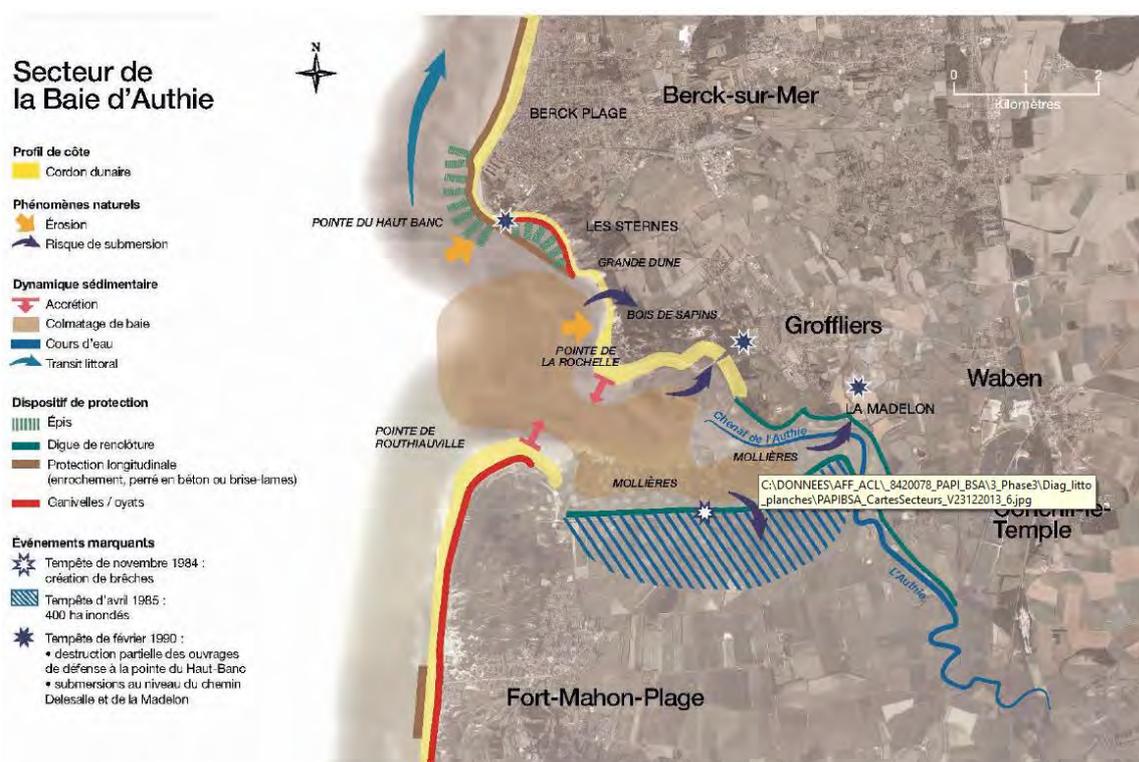


Figure 14 : Fonctionnement hydrosédimentaire de la baie d’Authie (d’après Artélia, PAPI BSA 2015).

3. Caractérisation des limites d’extension de submersion en fonction des coefficients de marée et des temps de submersion annuels

3.1. CARACTERISATION DES LIMITES D’EXTENSION DE SUBMERSION EN FONCTION DES COEFFICIENTS DE MAREE

3.1.1. Méthode

Afin de réaliser la cartographie (théorique) de l’extension des submersions pour différents coefficients de marée (et donc les limites entre écosystèmes de slikke et de schorre), la première tâche consiste à définir les valeurs de hauteur d’eau de pleine-mer pour chaque coefficient¹.

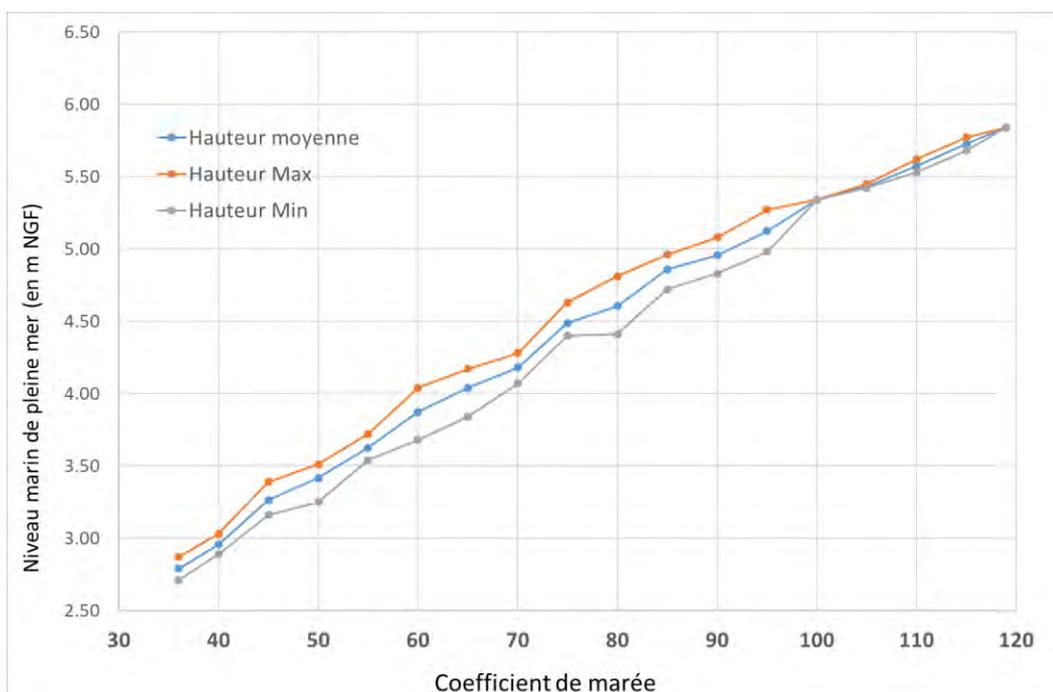


Figure 15 : Enveloppe des hauteurs de pleine mer (m NGF) par coefficient de marée en 2015 à Berck Plage – Fort Mahon (données issue du logiciel SHOMAR du SHOM).

Pour cela, nous avons réalisé une analyse de la corrélation coefficient de marée / niveau de pleine-mer sur toutes les pleines mers de 2015 à Berck Plage – Fort Mahon (en cote NGF), ces données étant fournies par le logiciel SHOMAR (SHOM, 2014). Le graphe de la Figure 15 montre les hauteurs d’eau de pleine-mer minimum, moyenne et maximum pour chaque coefficient. Dans le cadre de ce projet, pour les applications cartographiques, nous avons utilisé la valeur moyenne de la hauteur d’eau pour chaque coefficient (Figure 15 et **Erreur ! Source du renvoi introuvable. Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

¹ Les coefficients reflètent une valeur du marnage (écart entre la basse mer et la pleine mer) mais pas de la hauteur de la pleine mer ce qui explique la variabilité des hauteurs d’eau obtenue pour une valeur de coefficient donnée.

| | Coefficient de marée | Moyenne des pleines mers (PM) | Maximale des PM | Minimale des PM |
|-----------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|
| | 36 | 2.79 | 2.87 | 2.71 |
| | 40 | 2.96 | 3.03 | 2.89 |
| Morte-eau moyenne | 45 | 3.26 | 3.39 | 3.16 |
| | 50 | 3.41 | 3.51 | 3.25 |
| | 55 | 3.63 | 3.72 | 3.54 |
| | 60 | 3.87 | 4.04 | 3.68 |
| | 65 | 4.04 | 4.17 | 3.84 |
| Marée moyenne | 70 | 4.18 | 4.28 | 4.07 |
| | 75 | 4.49 | 4.63 | 4.4 |
| | 80 | 4.61 | 4.81 | 4.41 |
| | 85 | 4.86 | 4.96 | 4.72 |
| | 90 | 4.96 | 5.08 | 4.83 |
| Vive-eau moyenne | 95 | 5.12 | 5.27 | 4.98 |
| | 100 | 5.34 | 5.34 | 5.34 |
| | 105 | 5.43 | 5.45 | 5.42 |
| | 110 | 5.58 | 5.62 | 5.53 |
| | 115 | 5.73 | 5.77 | 5.68 |
| « Vive-eau exceptionnelle » | 119 | 5.84 | 5.84 | 5.84 |

Tableau 5 : Hauteurs actuelles minimales, maximales et moyennes (en m NGF) des pleines mers (PM) en fonction du coefficient de marée pour l’année 2015 à Berck Plage – Fort Mahon.

3.1.2. Résultats

A partir des hauteurs moyennes des pleines mers évaluées par coefficient de marée (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et des données topographiques de la zone d’étude (RGEALTI, voir partie 2.1.1), des cartes d’extension théorique de la submersion fonction du coefficient de marée ont été produites sur la zone d’étude (voir un exemple sur la Figure 16). Ces cartes permettent ainsi d’identifier le secteur théoriquement submergé pour une valeur de coefficient marée donnée.

Ces résultats permettent de mettre en évidence les différences d’altitudes entre les zones à reconnecter à la mer et la zone d’estran en aval immédiat de celles-ci. Ces différences peuvent souvent s’expliquer par l’utilisation des terrains poldérisés pour l’agriculture qui a tendance à tasser les sols alors que côté mer la sédimentation naturelle a pu contribuer à l’exhaussement de l’estran.

Cela est particulièrement vrai pour la partie sud du polder de la Mollière (au Nord sur la Figure 16) : la zone reconnectée pourrait théoriquement être submergée à partir de coefficients de marée de l’ordre de 70, néanmoins l’estran devant cette zone nécessite des coefficients d’au moins 90 à 95 pour l’être. Ainsi lors de la reconnexion de cette zone, si la digue est arasée à l’altitude du terrain naturel côté mer, la zone reconnectée formera une cuvette qui se remplira pour des coefficients supérieurs à 90-95 et restera en eau sans possibilité de vidange. Cela

pourrait favoriser la sédimentation au sein de la zone reconnectée, mais le temps nécessaire à l’exhaussement de cette zone jusqu’à son comblement complet est très difficilement quantifiable et pourrait être très long. Aussi, suivant le type de milieu que l’on souhaite recréer à court terme dans cette zone reconnectée, on pourrait envisager :

- De creuser un chenal, entre la zone reconnectée et le lit de l’Authie, afin de permettre son remplissage et sa vidange pour des coefficients de marée de l’ordre de 70 pour recréer un milieu de slikke (vasière) ;
- De combler la zone reconnectée à une altitude similaire à celle de l’estran alentour (ou légèrement supérieure) pour recréer un milieu de type schorre (prés-salés).

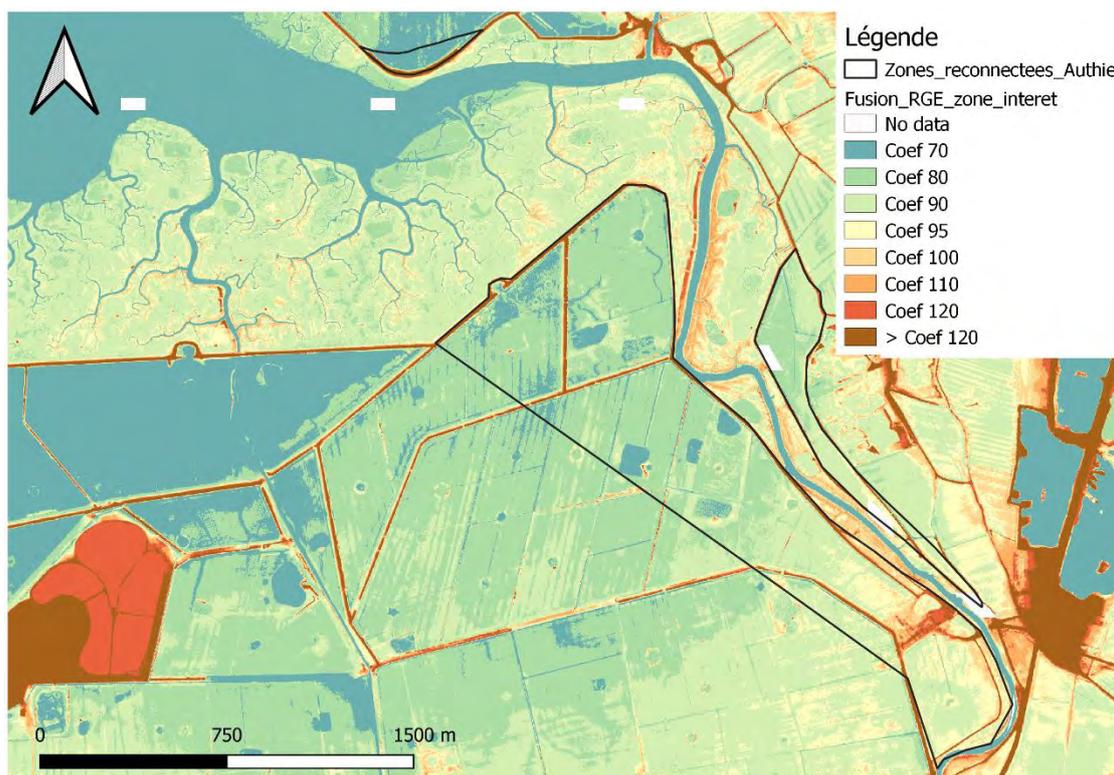


Figure 16 : Limite d’extension de la submersion en fonction du coefficient de marée.

Ces différences d’altitude, entre l’amont et l’aval des ouvrages de protection, sont également assez marquées dans la zone en rive droite de l’Authie. Là encore, lors de la reconnexion de cette zone (ou d’une partie de celle-ci) à la mer, une réflexion sur le type de milieu « désiré » et les travaux à réaliser pour permettre son remplissage et sa vidange (à partir d’un certain niveau marin ou coefficient de marée) devra être menée.

Concernant le polder en rive droite amont (près de Pont-à-Cailloux), les différences d’altitude sont un peu moins importantes. Ce polder présente une pente douce d’amont en aval et on peut noter la présence d’un cours d’eau (ou d’un drain) passant sous la digue dans la partie nord du polder. La reconnexion maritime de ce polder pourrait donc être plus simple et plus naturelle, par exemple en ouvrant une brèche au niveau du cours d’eau, afin que la zone reconnectée se remplisse et se vidange avec la marée (à partir d’un coefficient 70 via le cours d’eau).

Ces cartographies, de limite d’extension de la submersion en fonction des coefficients de marée, sont des éléments essentiels pour le Conservatoire du Littoral. Elles ont constitué des éléments de base dans les réflexions en liens avec les reconnections marines envisagées.

3.2. CARACTERISATION DES TEMPS DE SUBMERSION ANNUELS

3.2.1. Méthode

La méthode suivie pour caractériser les temps de submersion annuel, actuel et aux horizon 2030 et 2050, par tranche altimétrique nécessite plusieurs étapes (voir Garcin et Brivois, 2022) :

- Création de trois marégrammes annuels : actuel, 2030 et 2050 au pas de temps de 5 minutes.
- Transformation des niveaux d’eau en cotes NGF.
- Calcul de la durée cumulée d’immersion par tranches altimétriques (jour/an).
- Calcul du pourcentage de temps d’immersion annuel par tranche altimétrique.

Les données qu’elle nécessite en entrée sont :

- Les données marégraphiques sur le secteur d’étude,
- Des hypothèses sur la valeur de la remontée du niveau marin aux deux échéances futures envisagées (2030 et 2050).

3.2.2. Préparation des données

La base du travail a été la création d’un marégramme sur une année complète à partir des hauteurs d’eau calculées par le logiciel Shomar (© SHOM). L’année 2015 a été prise comme référence.

- Le pas d’échantillonnage temporel des hauteurs d’eau est de 5 minutes. L’hydrogramme annuel créé contient ainsi 105120 valeurs de hauteur d’eau (Figure 17).

- Les hauteurs d’eau fournies par Shomar sont dans le référentiel hydrographique. Elles ont ensuite été transformées dans le référentiel topographique IGN 69 (voir partie 2.3).

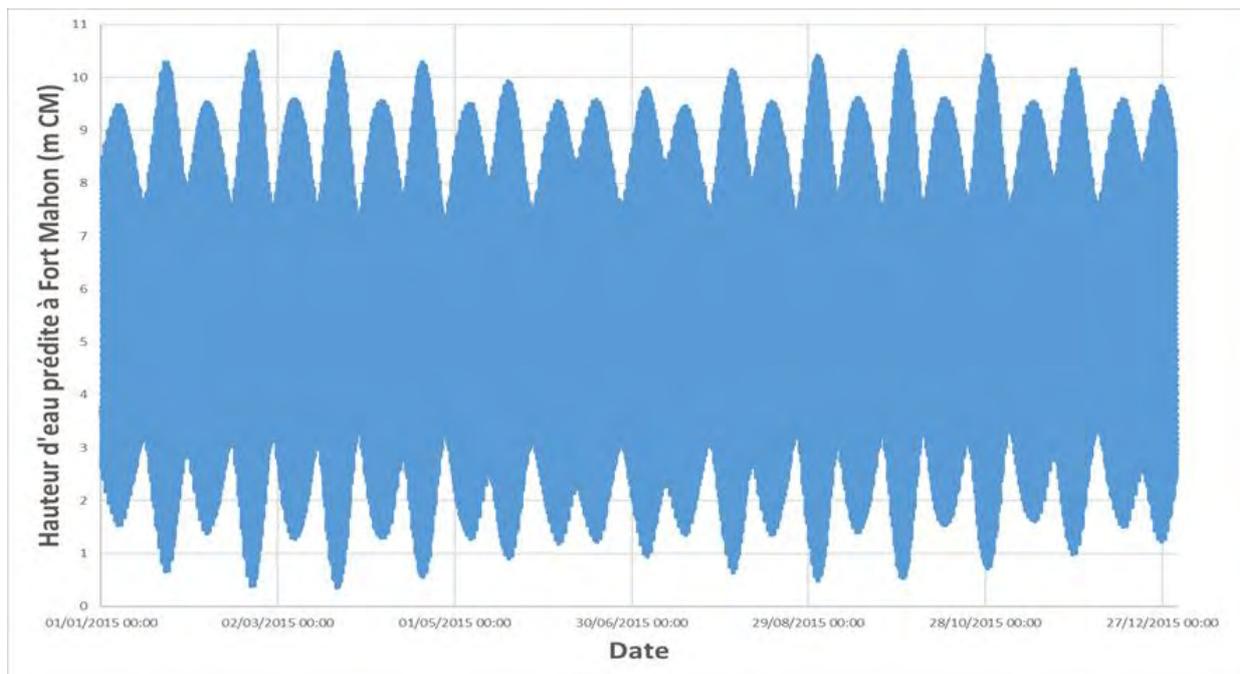


Figure 17 : Marégramme à Berck Plage –Fort Mahon en 2015 (SHOMAR, © SHOM).

3.2.3. Traitement des marégrammes créés

a. Les marégrammes futurs ont été créés en prenant en compte une remontée du niveau marin de + 20 cm (autour de 2030) et + 40 cm (autour de 2050). Ces valeurs d’élévation du niveau marin ont été prises en cohérence avec les données disponibles lors du lancement de cette action (Le Cozannet et al., 2019) et avec les autres sites adapto de la façade Manche Atlantique Mer du Nord (voir par exemple : Garcin et Brivois, 2022 et Louisor et Brivois, 2022).

b. Pour tous les marégrammes (actuel, 2030, 2050), une analyse de la durée cumulée durant laquelle les hauteurs d’eau sont atteintes ou dépassées sur l’année (Tableau 6) a été réalisée. Ce calcul a été effectué par tranche altimétrique de 0,2 m. Les résultats sont présentés sous deux formes :

- i. Nombre de jours cumulés de submersion par an pour chaque tranche altimétrique pour chaque période (actuel, 2030, 2050).
- ii. Pourcentage de temps de la submersion cumulée sur une année pour chaque tranche altimétrique (actuel, 2030, 2050).

Ces données ont été fournies au MNHN pour réaliser des cartographies prospectives d’habitats des zones reconnectées à la mer (voir Debue et al., 2022).

Projet LIFE adapto – Baie d’Authie : Caractérisation des submersions marines pour différents scénarios d’aménagement

| Altitude m NGF | | T0 | | Circa 2030 (+20 cm) | | Circa 2050 (+40 cm) | |
|-----------------------|-----------------------|---|--|---|--|---|--|
| Altitude inf en m NGF | Altitude sup en m NGF | Nombre de jours de submersion / an (t0) | Pourcentage de temps de submersion par an (t0) | Nombre de jours de submersion / an (t0 + 20 cm) | Pourcentage de temps de submersion / an (t0 + 20 cm) | Nombre de jours de submersion / an (t0 + 40 cm) | Pourcentage de temps de submersion / an (t0 + 40 cm) |
| -4.4 | -4.2 | 365.0 | 100.00 | 365.0 | 100.00 | 365.0 | 100.00 |
| -4.2 | -4 | 364.9 | 99.97 | 365.0 | 100.00 | 365.0 | 100.00 |
| -4 | -3.8 | 364.3 | 99.80 | 364.9 | 99.97 | 365.0 | 100.00 |
| -3.8 | -3.6 | 362.9 | 99.43 | 364.3 | 99.80 | 364.9 | 99.97 |
| -3.6 | -3.4 | 360.9 | 98.88 | 362.9 | 99.43 | 364.3 | 99.80 |
| -3.4 | -3.2 | 358.3 | 98.16 | 360.9 | 98.88 | 362.9 | 99.43 |
| -3.2 | -3 | 353.9 | 96.95 | 358.3 | 98.16 | 360.9 | 98.88 |
| -3 | -2.8 | 347.0 | 95.08 | 353.9 | 96.95 | 358.3 | 98.16 |
| -2.8 | -2.6 | 338.7 | 92.80 | 347.0 | 95.08 | 353.9 | 96.95 |
| -2.6 | -2.4 | 329.6 | 90.30 | 338.7 | 92.80 | 347.0 | 95.08 |
| -2.4 | -2.2 | 320.3 | 87.76 | 329.6 | 90.30 | 338.7 | 92.80 |
| -2.2 | -2 | 310.2 | 84.99 | 320.3 | 87.76 | 329.6 | 90.30 |
| -2 | -1.8 | 299.9 | 82.16 | 310.2 | 84.99 | 320.3 | 87.76 |
| -1.8 | -1.6 | 289.5 | 79.31 | 299.9 | 82.16 | 310.2 | 84.99 |
| -1.6 | -1.4 | 278.4 | 76.26 | 289.5 | 79.31 | 299.9 | 82.16 |
| -1.4 | -1.2 | 266.9 | 73.14 | 278.4 | 76.26 | 289.5 | 79.31 |
| -1.2 | -1 | 256.4 | 70.24 | 266.9 | 73.14 | 278.4 | 76.26 |
| -1 | -0.8 | 247.2 | 67.72 | 256.4 | 70.24 | 266.9 | 73.14 |
| -0.8 | -0.6 | 238.8 | 65.42 | 247.2 | 67.72 | 256.4 | 70.24 |
| -0.6 | -0.4 | 230.7 | 63.21 | 238.8 | 65.42 | 247.2 | 67.72 |
| -0.4 | -0.2 | 223.3 | 61.17 | 230.7 | 63.21 | 238.8 | 65.42 |
| -0.2 | 0 | 215.4 | 59.02 | 223.3 | 61.17 | 230.7 | 63.21 |
| 0 | 0.2 | 208.0 | 56.99 | 215.4 | 59.02 | 223.3 | 61.17 |
| 0.2 | 0.4 | 201.0 | 55.07 | 208.0 | 56.99 | 215.4 | 59.02 |
| 0.4 | 0.6 | 193.7 | 53.06 | 201.0 | 55.07 | 208.0 | 56.99 |
| 0.6 | 0.8 | 186.4 | 51.07 | 193.7 | 53.06 | 201.0 | 55.07 |
| 0.8 | 1 | 179.2 | 49.09 | 186.4 | 51.07 | 193.7 | 53.06 |
| 1 | 1.2 | 171.9 | 47.09 | 179.2 | 49.09 | 186.4 | 51.07 |
| 1.2 | 1.4 | 164.6 | 45.08 | 171.9 | 47.09 | 179.2 | 49.09 |
| 1.4 | 1.6 | 157.1 | 43.03 | 164.6 | 45.08 | 171.9 | 47.09 |
| 1.6 | 1.8 | 149.7 | 41.00 | 157.1 | 43.03 | 164.6 | 45.08 |
| 1.8 | 2 | 142.1 | 38.94 | 149.7 | 41.00 | 157.1 | 43.03 |
| 2 | 2.2 | 134.4 | 36.83 | 142.1 | 38.94 | 149.7 | 41.00 |
| 2.2 | 2.4 | 126.6 | 34.69 | 134.4 | 36.83 | 142.1 | 38.94 |
| 2.4 | 2.6 | 118.5 | 32.46 | 126.6 | 34.69 | 134.4 | 36.83 |
| 2.6 | 2.8 | 109.8 | 30.09 | 118.5 | 32.46 | 126.6 | 34.69 |
| 2.8 | 3 | 100.3 | 27.47 | 109.8 | 30.09 | 118.5 | 32.46 |
| 3 | 3.2 | 89.3 | 24.47 | 100.3 | 27.47 | 109.8 | 30.09 |
| 3.2 | 3.4 | 79.1 | 21.66 | 89.3 | 24.47 | 100.3 | 27.47 |
| 3.4 | 3.6 | 69.5 | 19.03 | 79.1 | 21.66 | 89.3 | 24.47 |
| 3.6 | 3.8 | 60.1 | 16.46 | 69.5 | 19.03 | 79.1 | 21.66 |
| 3.8 | 4 | 51.1 | 13.99 | 60.1 | 16.46 | 69.5 | 19.03 |
| 4 | 4.2 | 42.4 | 11.61 | 51.1 | 13.99 | 60.1 | 16.46 |
| 4.2 | 4.4 | 34.6 | 9.47 | 42.4 | 11.61 | 51.1 | 13.99 |
| 4.4 | 4.6 | 26.9 | 7.36 | 34.6 | 9.47 | 42.4 | 11.61 |
| 4.6 | 4.8 | 19.5 | 5.35 | 26.9 | 7.36 | 34.6 | 9.47 |
| 4.8 | 5 | 12.5 | 3.41 | 19.5 | 5.35 | 26.9 | 7.36 |
| 5 | 5.2 | 7.4 | 2.03 | 12.5 | 3.41 | 19.5 | 7.36 |
| 5.2 | 5.4 | 4.8 | 1.31 | 7.4 | 2.03 | 12.5 | 3.41 |
| 5.4 | 5.6 | 2.8 | 0.76 | 4.8 | 1.31 | 7.4 | 2.03 |
| 5.6 | 5.8 | 1.2 | 0.33 | 2.8 | 0.76 | 4.8 | 1.31 |
| 5.8 | 6 | 0.2 | 0.05 | 1.2 | 0.33 | 2.8 | 0.76 |
| 6 | 6.2 | 0 | 0 | 0.2 | 0.05 | 1.2 | 0.33 |
| 6.2 | 6.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.2 | 0.05 |

Tableau 6 : Durée cumulée annuelle de submersion par tranche altimétrique, calculée par rapport aux références altimétriques de Berck Plage – Fort Mahon pour l’année 2015 (SHOMAR édition 2014-2015).

4. Simulation numérique de la submersion marine

Les simulations numériques produites par Artélia dans le cadre du PAPI Bresle Somme Authie ont considéré plusieurs scénarios hydro-climatiques ayant diverses périodes de retour (houles au large, vents, niveaux marins, débits des 3 rivières -Authie, Maye, Somme et Bresle-). Dans ces travaux, la modélisation des conditions hydrodynamiques dans la Baie a été réalisée grâce au modèle Telemac en version 2DH (vitesses et directions des courants moyennées sur la hauteur de l'écoulement). La propagation des houles du large vers la baie, leur déferlement en entrée de baie et leur impact sur le niveau marin au sein de la baie (wave setup) ont été calculés par ailleurs puis ajoutés au niveau marin calculé par Telemac, et ce, directement au niveau des ouvrages de premier rang.

Nous proposons ici d'avoir une approche relativement similaire : la modélisation des niveaux d'eau et courants dans la baie sera réalisée via l'utilisation d'un modèle 2DH (UHAINA), la surcote liée au déferlement des vagues (wave setup) étant ajoutée au niveau marin global au large. On considérera donc une submersion marine par débordement, l'effet, mineur, d'une éventuelle houle résiduelle en fond de baie ne sera donc pas prise en compte.

4.1. MISE EN PLACE DU MODELE

4.1.1. UHAINA

La modélisation de la circulation hydrodynamique dans la baie et de la submersion marine par débordement est réalisée avec UHAINA, un modèle numérique de propagation de vagues pour l'environnement côtier (Filippini et al., 2018). UHAINA est co-développé par l'INRIA, l'IMAG, le CNRS et le BRGM.

Pour cet étude, UHAINA est utilisé dans sa version 2DH : le code est un modèle hydrodynamique à surface libre, résolvant les équations classiques de la mécanique des fluides (Navier-Stokes) intégrées sur la verticale sous les hypothèses de Saint-Venant aussi appelées NLSW pour *Non Linear Shallow Water*) et d'hydrostaticité. Ce modèle utilise un maillage non structuré, composé de triangles, ce qui permet d'affiner la description de certaines zones en densifiant le maillage.

UHAINA calcule donc la vitesse et la direction de courants moyennés sur la verticale, ainsi que les hauteurs d'eau. Ces grandeurs sont calculées en fonction :

- Des conditions aux limites imposées au bord du domaine de calcul (frontières). Ces conditions aux limites peuvent contenir les effets de la marée et de la surcote atmosphérique, mais également de débits spécifiques, liés par exemple à la présence d'une rivière (la possibilité de prendre en compte la présence d'une rivière ou d'un fleuve dans UHAINA a été implémentée spécifiquement pour ce site dans le cadre du projet adapto) ;
- Des conditions de forçages météorologiques (vent) appliquées en chaque nœud du domaine du modèle.

Pour la modélisation de la submersion par débordement plus particulièrement, UHAINA peut prendre en compte :

- La gestion des bancs découvrant (recouvrement/découvrement du sol par l'eau) ;

- le frottement spatialisé sur le fond (sur l’ensemble de la zone dont le sol des terrains inondés).

4.1.2. Emprise et résolution spatiale du domaine de calcul

L’emprise du domaine de calcul est représentée sur la Figure 18 (à gauche). La limite du domaine de calcul est à l’ouest (en mer) l’isobathe -12 m ; à l’est (à terre, elle se situe peu après l’intersection entre l’Authie et le pont SNCF.

La résolution spatiale du maillage est variable dans l’espace (voir Figure 18, à droite) : de l’ordre de 500 m au large (résolution maximale), et autour de 100 m dans la baie, elle passe à 20 m pour les chenaux dans la baie, à 8m pour les ouvrage, et jusqu’à 4 m (résolution minimale) pour le lit de l’Authie. Ces choix permettent une description fine de la topographie et la prise en compte des éléments structurants (voir paragraphe suivant).

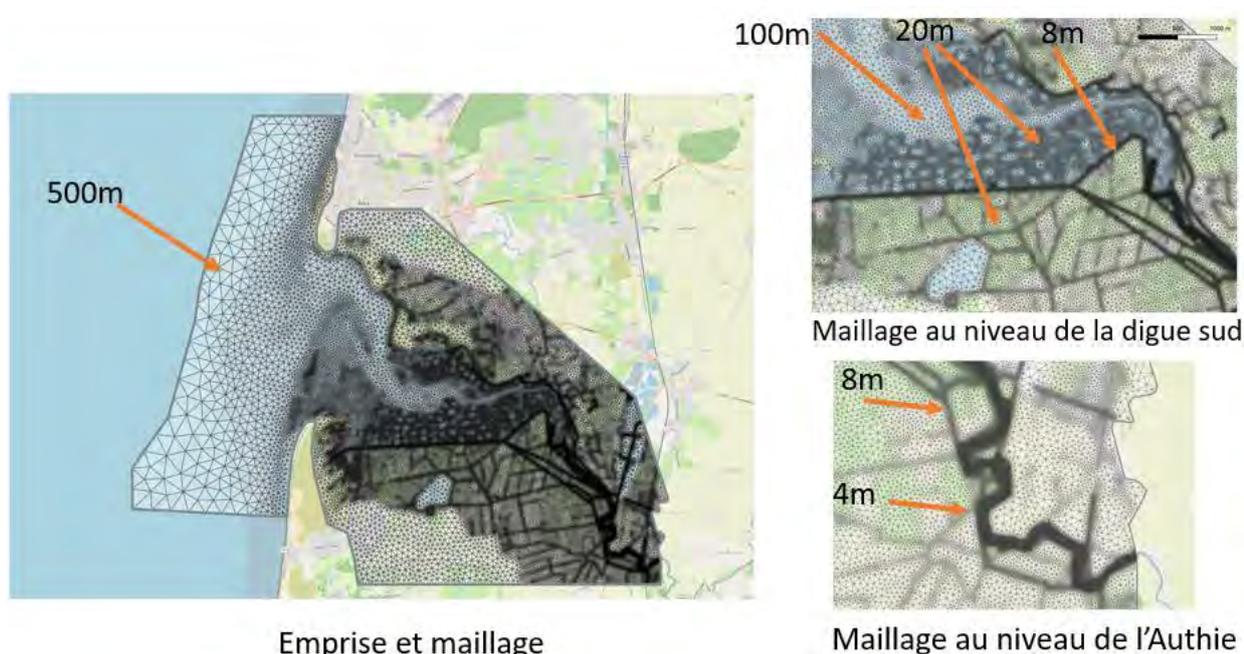


Figure 18 : Emprise et maillage du domaine de calcul (gauche : emprise globale ; droite : détails sur 2 zones du domaine au sein de la Baie).

4.1.3. Prise en compte des éléments structurants

Pour que les simulations de submersion soient les plus précises possible, il convient d’apporter un soin tout particulier à la représentation des éléments structurants qui pourraient influencer les écoulements dans la zone inondée, et notamment les digues et levées de terre qui peuvent arrêter ou détourner les écoulements.

Pour ce faire, la première étape a consisté à créer un fichier SIG représentant tous les digues et levées dans la zone d’étude. Deux sources de données ont été utilisées : la couche « ligne orographique » de la BD TOPO (IGN) et la base de données ouvrages côtiers du CEREMA disponible sur Géolittoral. Ce fichier représentant les ouvrages a ensuite été utilisé pour contraindre la création du maillage : les arêtes des éléments triangulaires du maillage sont imposées sur la position des crêtes d’ouvrages (voir Figure 19) ; un algorithme développé par le

BRGM recherche sur le MNT les valeurs maximales locales dans un rayon donné afin d’associer ces valeurs en chaque points du maillage représentant un ouvrage.

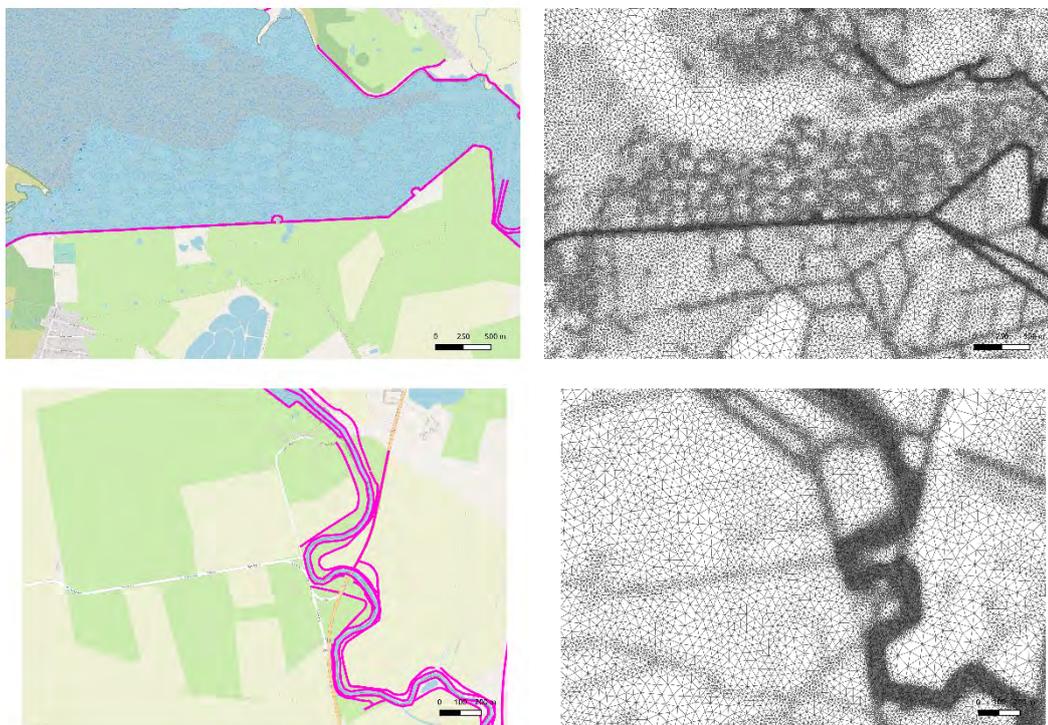


Figure 19 : Ligne d’ouvrage et maillage avec les arrêtes alignées le long des ligne d’ouvrage pour deux secteur différents de l’emprise du domaine de calcul.

4.1.4. Prise en compte de la rugosité

L’effet de l’occupation du sol sur les écoulements est habituellement représenté dans les modèles via un paramètre de frottement caractéristique de la rugosité de chaque type de sol (béton, pelouse, sable, etc.). La rugosité est généralement paramétrée en termes de coefficients de Manning ou de Strickler. Une représentation spatialisée de la rugosité peut être obtenue à partir d’une classification synthétique de l’occupation des sols qui a été interprétée en termes de valeurs du coefficient de Manning. Les valeurs utilisées sont celles préconisées par différentes sources et sont applicables pour les études en domaines marins et côtiers (Bunya *et al.* 2010 ; Brown *et al.*, 2007).

Dans un premier temps, un regroupement des typologies brutes de l’occupation du sol en une typologie adaptée à la modélisation de la submersion est effectué (voir partie 2.2). A partir de ces données, la spatialisation des coefficients de Manning, fonction de l’occupation du sol, a été réalisée (Figure 20).

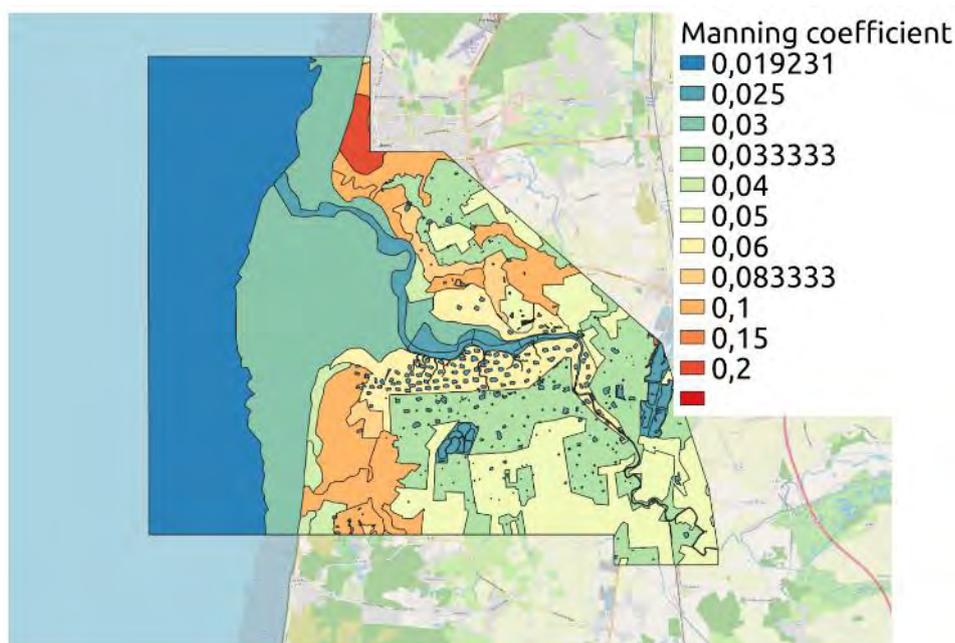


Figure 20 : Carte des coefficients de Manning utilisés pour prendre en compte l’occupation du sol et la rugosité associée.

4.2. SCENARIOS ETUDIES

4.2.1. Conditions marines

a) Scénario du PAPI

Les conditions marines retenues pour cette étude sont issues du PAPI BSA (Artélia 2015). Parmi tous les scénarios étudiés dans le PAPI, le choix a été fait de considérer ici les conditions les plus extrêmes/défavorables en terme de phénomènes physiques pouvant accroître le niveau marin.

Ces conditions extrêmes sont les suivantes (Artélia, PAPI BSA, 2015) :

- Coefficient de marée de 106 : 5.30 m NGF à marée haute ;
- Surcote marine de + 1.20 m ;
- Houle au large : Hs = 7.3 m, Tp = 11 s, Dir = 270° ;
- Vent : Dir = 270°N, 24.3 m/s ;
- Surcote liée au vent de 300°N : + 12 cm.
- Débit de l’Authie : 7.6 m³/s (module).

Le niveau marin de pleine mer considéré dans ce scénario (marée plus surcote atmosphérique) est donc de + 6.5 m NGF et correspond au niveau marin centennal actuel.

De même les caractéristiques de la houle au large correspondent à une houle centennale. La modélisation de propagation de cette houle du large vers la baie a été réalisée par Artélia dans le cadre du PAPI, montrant un déferlement de celle-ci en entrée de baie, induisant une surcote liée au vague (wave setup) dans toute la baie de + 44 cm.

Les conditions de vents de ce scénario sont un peu particulières. En effet, Artélia a montré que les directions de vents les plus défavorables, en terme de surcote liée au vent induite, n’étaient pas les mêmes pour la Baie d’Authie et la Baie de Somme, en raison de leur forme et leur orientation par rapport à la côte. Ces directions de vent sont de 270°N pour la Baie de Somme et de 300°N pour la Baie d’Authie. Afin de considérer ces 2 directions de vent dans une simulation réalisée sur une emprise élargie, s’étendant de 15 km au nord de l’Authie jusqu’à 15 km au sud la Bresle, il a été nécessaire pour Artelia de proposer une solution alternative, une seule direction de vent pouvant être définie pour une simulation numérique. Dans la simulation de ce scénario, un vent de direction 270°N (le plus défavorable pour la Baie de Somme) a été considéré, et une surcote locale de 12 cm a été ajoutée en Baie d’Authie pour équivaloir à la surcote qu’aurait induite un vent de direction 300°N. La vitesse de vent retenue (24.3 m/s) est la vitesse de vent centennale.

b) Scénario considéré

Afin de bien représenter l’asymétrie du signal de marée en Baie d’Authie, un cycle de la marée prédite au marégraphe de Fort-Mahon correspondant à un fort marnage ($A_{PHMA}=4.57\text{m}$ le 19/03/2015) a été utilisé. Ce signal de marée a d’abord été mis à l’échelle afin d’atteindre la valeur voulue de 5.30 m NGF (Coef. 106), une valeur constante de + 1.20 m lui a été ajouté, sur toute la durée de la simulation, pour tenir compte de la surcote marine et à mi-marée le wave setup de +44 cm lui a également été ajouté progressivement pour atteindre à pleine mer le niveau de 6.94 m NGF (marée + surcote marine + wave setup). Remarquons que cette valeur de 6.94 m NGF représente le niveau atteint par la PHMA plus 1.03 m. Afin de ne pas imposer directement ces conditions en début de simulation mais plus progressivement dans le temps, un transitoire a été généré à partir d’un cycle de marée créé (voir une illustration de cette méthode sur la Figure 21).

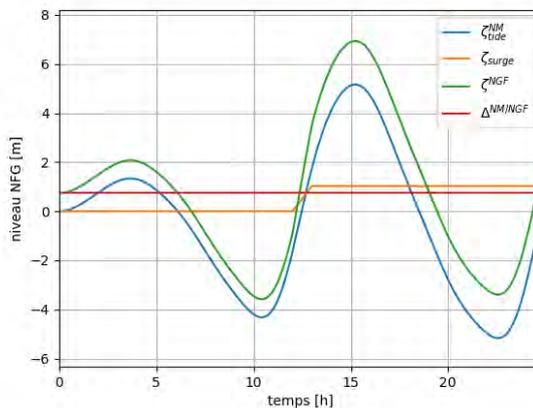


Figure 21 : Illustration de la méthode utilisée pour générer le signal imposé au large du domaine de calcul.

A ces conditions de niveau marin imposées au bord du domaine de calcul en mer, se sont ajoutés un vent de 24.3 m/s et de direction 300°N considéré sur l’ensemble du domaine de calcul (et imposé progressivement après 12h simulée) et un débit de 7.6 m³/s imposé à la frontière amont du lit de l’Authie.

Les conditions météo-marines considérées pour nos simulations sont donc similaires à celles du PAPI.

4.2.2. Scénarios d’aménagement

a) *Scénarios envisagés en rive gauche amont de l’Authie : Petite Mollière et Mollière du Pont à Cailloux*

Le but des simulations à réaliser est d’étudier les trois scénarios illustrés ci-dessous :

- Scénario 1 : reconstruction de la digue actuelle (tracé bleu marine) ;
- Scénario 2 : construction d’une digue de 2nd rang (position intermédiaire, tracé rose), issue de la concertation ;
- Scénario 3 : construction d’une digue de 2nd rang telle que préconisée dans le PAPI (tracé violet).

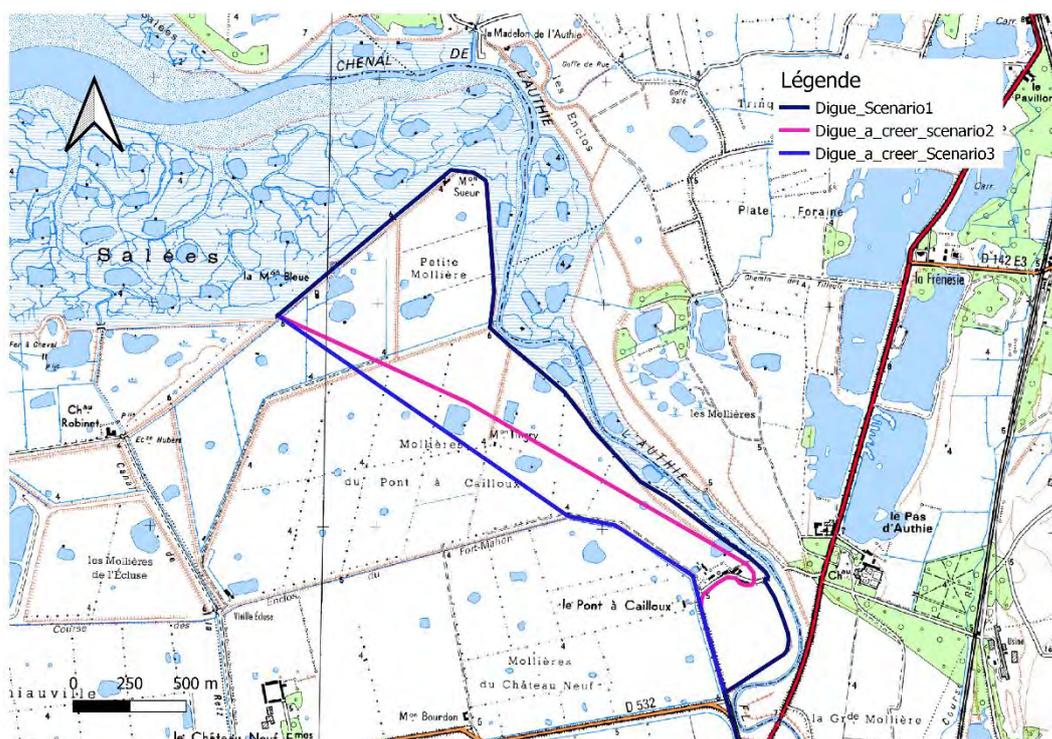


Figure 22 : Positions des digues pour les trois scénarios d’aménagement considérés (fond de carte : SCAN 25, IGN)

Ces simulations doivent tenir compte des aménagements déjà prévus sur 2 secteurs principalement : la Mollière et l’Enclos. Les travaux/modifications au niveau de la digue Barrois ne seront pas pris en compte dans ces simulations car ils vont induire d’importantes modifications bathymétriques (les travaux en eux-mêmes, puis l’évolution naturelle qui en découle) que nous ne pouvons pas appréhender correctement avec les données disponibles.

b) *Modifications du système d’endiguement pris en compte*

La figure suivante (issues du PAPI BSA) montre les cotes des digues prévues en rive droite amont de l’Authie. A partir de ces informations les cotes des digues vont être modifiées dans notre MNT pour tenir compte de ces travaux. Bien que les cotes des digues retenues varient suivant les tronçons considérés, pour simplifier nous considérerons toutes ces digues à une cote de 8.0 m NGF. La digue orientée est-ouest entre Maison Prognier et la Maison Bleue sera également

rehausser à une cote de 8.m NGF pour empêcher toute submersion dans cette zone. De plus afin de limiter d’éventuelles submersions dans la partie amont de l’Authie (à l’amont de Pont à Cailloux), un système de digue est ajouté (voir figure suivante).

Les travaux évoqués précédemment prévoient également l’arasement de la partie sud de la digue de la Mollière actuelle et devant la digue reconstruite, afin de dépolderiser quelques hectares au niveau de zone en érosion. De même la reconstruction de la digue de l’Enclos vise à reconnecter à la mer le polder de l’Enclos situé au nord de Pont à Cailloux (voir les 2 figures suivantes). Afin de permettre cette reconnexion (en cours de planification), un segment de la digue aval et plusieurs segments au sein du polder, identifiés comme dégradés (voir Figure 25) sont arasés (voir Figure 24).



Photo : Google Earth

Figure 23 : Cotes des diges prévues en rive droite amont de l’Authie (PAPI BSA).

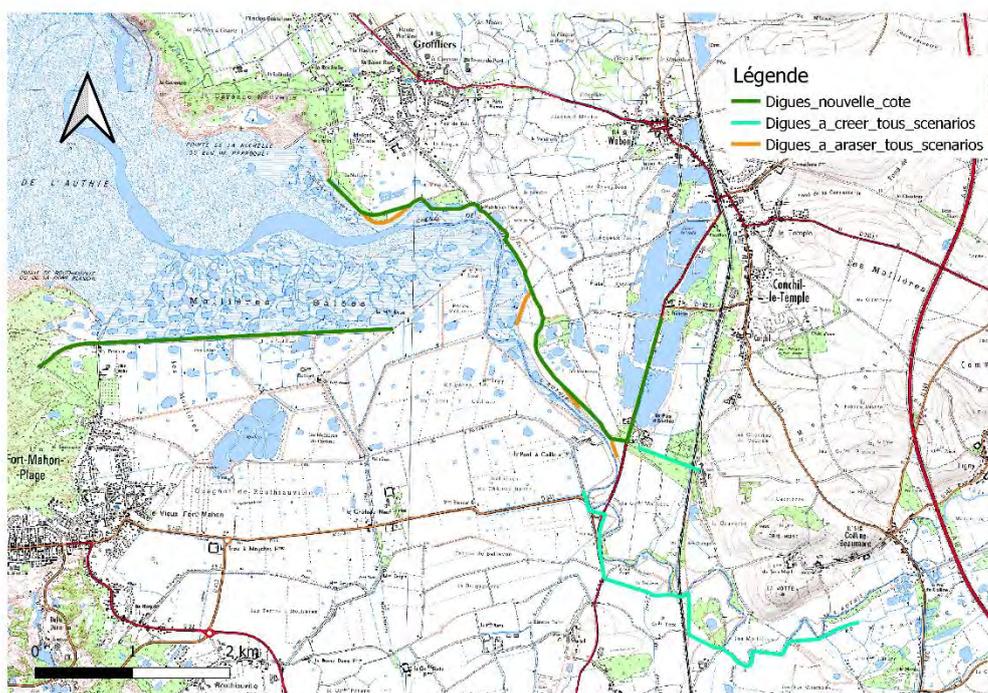


Figure 24 : Digues rehaussées et digues arasées sur le MNT pour les 3 scénarios considérés (fond de carte : SCAN 25, IGN).

Pour le scénario 1, la digue actuelle est également rehaussée à 8.0 m NGF.

Pour les scénarios 2 et 3, les 2 deux digues rétro-littorales sont « créées » à la cote de 8.0 m NGF. Et comme précédemment pour le polder de l’Enclos, des segments de digues du système de défense actuelle sont arasées pour permettre la reconnexion à la mer des zones ainsi dépoldérisées. La sélection de ces segments à araser, est basée sur l’état mécanique des ouvrages expertisé par Artélia dans le cadre du PAPI (voir Figure 25).

Ainsi, pour reconnecter le polder rive gauche amont, les digues le long de l’Authie ont été arasées sur 2 tronçons : le plus aval est connu pour être en érosion (Indice d’état mécanique (IEM) = 1), le deuxième plus amont a été ajouté car très proche du lit mineur de l’Authie. Les digues actuelles protégeant la Petite Mollière ont été arasées sur 2 tronçons de faibles longueurs, (notamment le « fer à cheval » proche de la Maison Bleue) afin de faciliter le remplissage du polder. La digue interne de la Petite Mollière a été totalement arasée, en rapport avec son IEM et pour faciliter les écoulements au sein de la zone reconnectée.

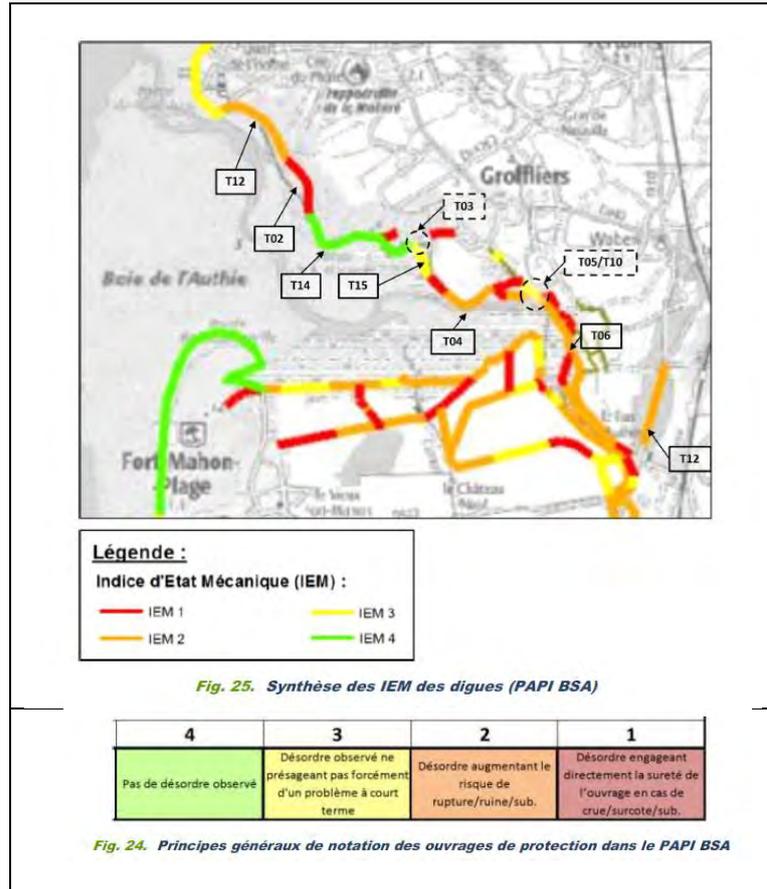


Figure 25 : Indice d'Etat Mécanique (IEM) du système d'endiguement (PAPI BSA).

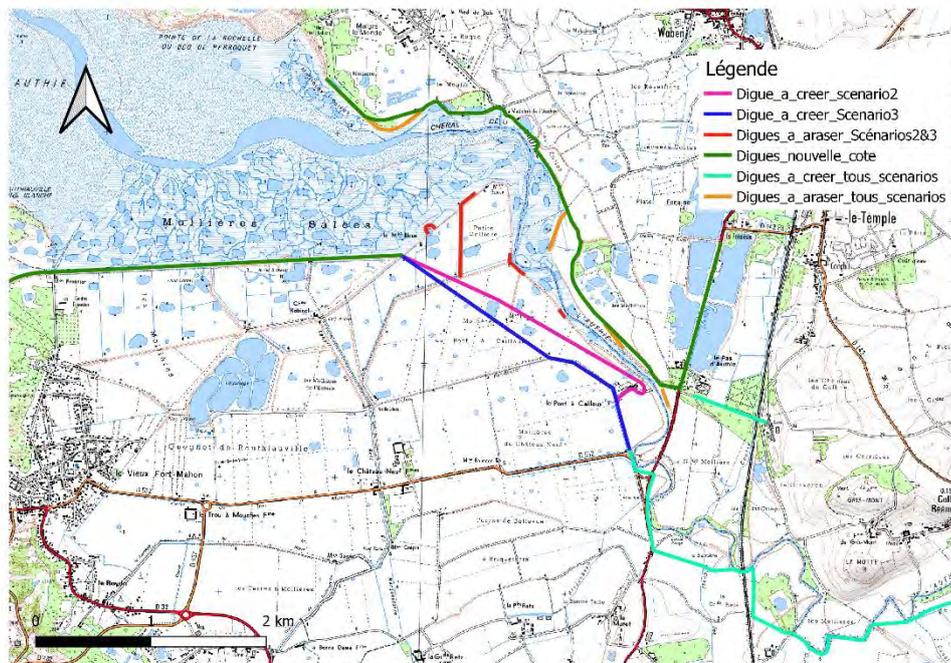


Figure 26 : Modifications du système d'endiguement considérées pour les scénarios 2 et 3 (fond de carte : SCAN 25, IGN).

Dans la partie suivante du rapport, sont présentés les résultats des simulations numériques pour les conditions marines extrêmes du PAPI et les 3 scénarios d’aménagement considérés.

4.3. RESULTATS DES SIMULATIONS NUMERIQUES

4.3.1. Validation du modèle

Le scénario 1, maintien et rehaussement de la digue actuelle et reconstruction de la digue de l’Enclos, a été modélisé dans le PAPI BSA par Artélia (voir Figure 27).

Ces résultats montrent une augmentation du niveau d’eau, vers l’amont, au niveau de la digue de la Mollière (de 7.19 m NGF à 7.29 m NGF), une autre, vers l’amont, au niveau de la digue de l’Enclos (de 7.29 m NGF à 7.34 m NGF), puis une diminution de celui-ci au niveau de la section plus restreinte au nord immédiat de Pont à Cailloux.

Dans cette simulation, la digue aval du polder de l’Enclos (polder visant à être reconnecté à la mer) est, *a priori*, considérée à sa cote actuelle (de 6.0 m NGF à 7.5 m NGF environ sur les données RGE Alti, IGN), globalement (très) inférieure au niveau d’eau maximal.



Figure 27 : Niveau d’eau maximal atteint durant la tempête au niveau de la digue de l’Enclos (valeurs bleues issues du modèle 2DH, tenant compte de la marée, du vent et de + 1.20 de surcote ; valeurs rouges : niveaux d’eau tenant compte de la surcote liée aux vagues (valeurs précédentes + wave setup)).

Ces résultats ont été utilisés pour valider notre modèle.

Les niveaux d’eau obtenus, avec notre modèle, pour les mêmes conditions que celles du PAPI sont présentés sur la Figure 28. L’évolution du niveau d’eau de l’amont vers l’aval, à partir du sud de Groffliers, est similaire et les valeurs identiques à quelques centimètres près, à la modélisation du PAPI.

Cette comparaison permet donc d’affirmer la cohérence de notre approche avec celle d’Artélia et valide les résultats de notre modèle ; Artélia ayant validé son modèle avec des données issues de mesures de terrain et d’observations.

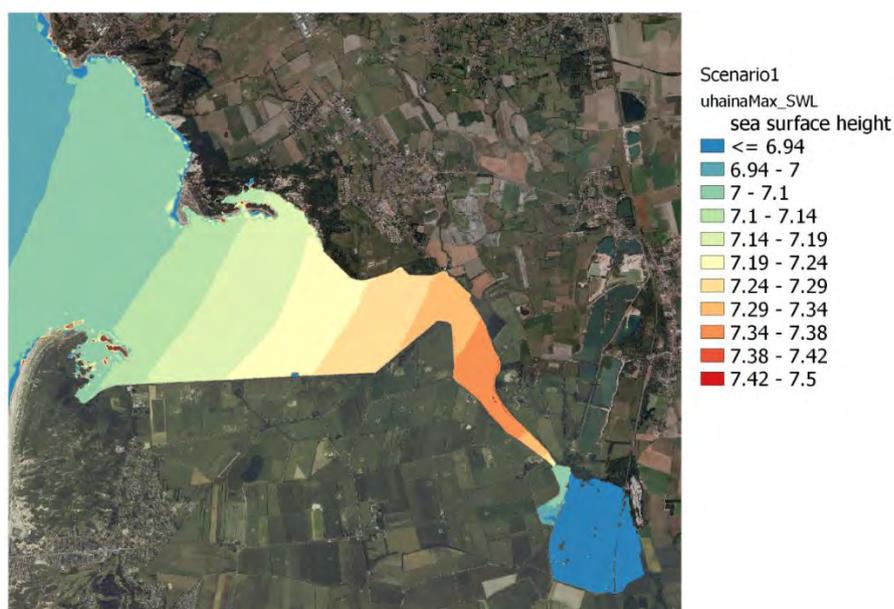


Figure 28 : Niveau d’eau maximal modélisé pour le scénario 1.

Pour ce scénario, l’influence du vent sur le niveau d’eau maximal a été étudiée, voir Figure 29. Ces résultats montrent que la forme convergente (ou en entonnoir) de la baie entraîne une augmentation de niveau d’eau, vers l’amont, de l’ordre de 15 cm (Figure 29, gauche). Le vent, de direction 300°N, « pousse » littéralement la mer en fond de baie, et accroît le niveau marin, assez progressivement, jusqu’à environ 45 cm (Figure 29, droite). Cette augmentation du niveau marin, sous l’effet du vent, accroît naturellement le débit vers l’amont, induisant des surfaces submergées plus importantes en amont de Pont à Cailloux. Les conditions de vent centennales, considérées ici, ont donc un réel impact sur l’évolution du niveau marin et de la submersion en fond de baie.

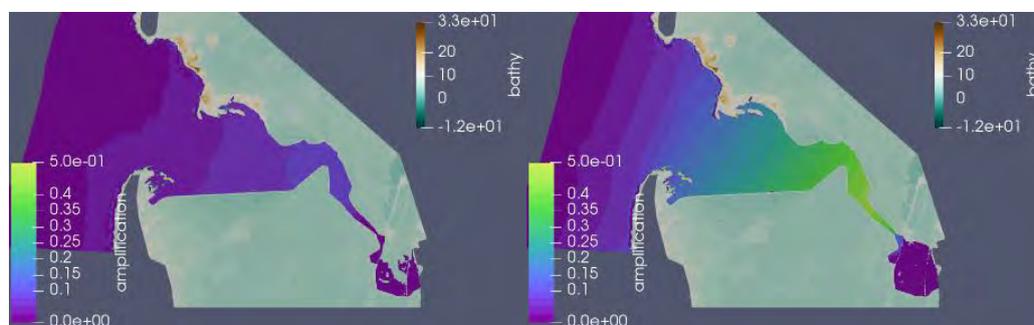


Figure 29 : Amplification du niveau d’eau maximal (en mètre) par rapport au niveau imposé au large. Chaque incrément de couleur correspond à +2,5cm. Gauche : simulation sans l’effet du vent ; Droite : simulation avec l’effet du vent.

4.3.2. Comparaison des différents scénarios

Les cartes de niveau d’eau maximal obtenus pour les 3 scénarios (plus un scénario supplémentaire, similaire au scénario 3, sauf au niveau de Pont à Cailloux où les reliefs topographiques existants ont été arasés) sont présentées sur la Figure 30.

L’amplification du niveau marin vers l’amont, due principalement au vent puis à la forme complète de la baie, est légèrement supérieure pour le scénario 2. Ce niveau maximal atteint au sud du Port de la Madellon est en partie due à la forte contraction du lit majeur de l’Authie, 1.4 km en amont. Le scénario 1, quant à lui, présente un niveau d’eau légèrement plus faible que les autres, en particulier dans la zone aval de Pont à Cailloux.

Ces résultats montrent que le fait d’ouvrir la partie amont de l’estuaire à la mer permet à ces conditions de vent (centennales) d’amener plus d’eau en fond de baie. Une direction de vent moins défavorable pourrait avoir des effets différents. Pour ces conditions hydro-climatiques extrêmes, les reconnections à la mer considérées dans les scénarios 2 et 3 n’ont donc pas d’effet significatif, en terme de zone d’expansion pour la submersion, sur les niveaux marins.

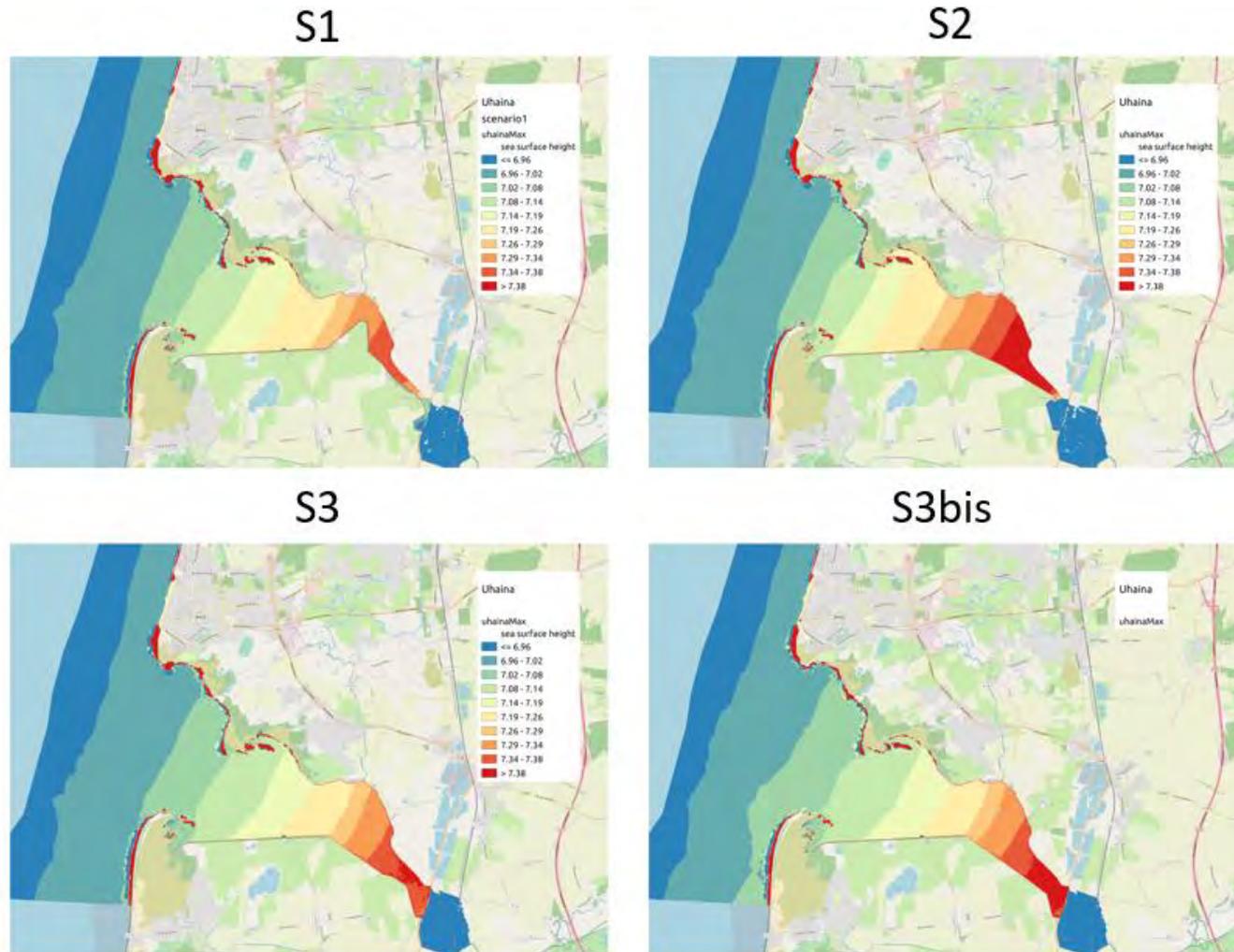


Figure 30 : Cartes de niveau d'eau maximal obtenues pour les 3 scénarios de position de digue.

Lors des modélisations des scénarios 1, 2 et 3, plusieurs jauges numériques, permettant d’extraire les valeurs du niveau marin et de la vitesse du courant pendant la durée de la simulation, ont été placées dans le domaine de calcul. Les évolutions du niveau marin et de la norme de la vitesse d’écoulement sont présentées sur la Figure 32 pour un nombre réduit de jauges (jauges numérotées de 23 à 27, placées dans le lit mineur de l’Authie de l’aval vers l’amont, voir Figure 31).

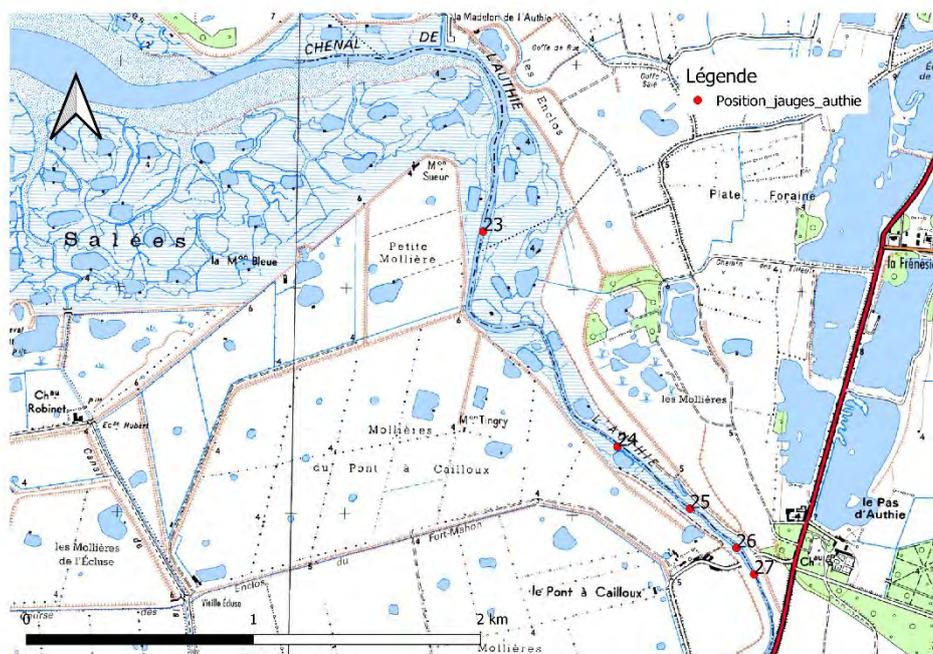


Figure 31 : Position des jauges considérées au sein du domaine de calcul.

La Figure 32 permet de mettre en exergue les phénomènes suivants :

- Toutes les courbes présentent des évolutions relativement similaires :
 - o Avant que l’onde de « marée » n’arrive au niveau des différentes jauges (un peu avant le temps $t = 14h$), les niveaux d’eau correspondent uniquement à celui de l’Authie (écoulement fluvial). Ces niveaux augmentent progressivement, avec l’arrivée de la marée, sur une durée inférieure à 2 heures pour atteindre leur maximum un peu avant $t = 16h$ (pleine mer), puis décroissent sur environ 7h avec la marée descendante.
 - o Les évolutions de la norme des vitesses du courant, en lien avec les évolutions du niveau d’eau, sont les suivantes : avant que l’onde de « marée » n’arrive au niveau des différentes jauges, la vitesse du courant est due à l’écoulement de l’Authie de l’amont vers l’aval. L’arrivée de l’onde de marée, se propageant de l’aval vers l’amont, induit une forte diminution de la norme des vitesses ; les courants de l’Authie et de l’onde de marée ayant des directions opposées, ils s’opposent et s’annulent pratiquement puisque le modèle intègre les vitesses sur la hauteur. L’onde de « marée » montante accélère ensuite fortement les écoulements, de l’aval vers l’amont, pour atteindre un maximum environ 1h avant la marée haute. Les vitesses diminuent ensuite fortement pour s’annuler au niveau maximum de la marée (étale). Les vitesses augmentent ensuite, de l’aval vers l’amont, en lien avec la marée descendante, pour atteindre une valeur proche de leur valeur initiale, due à l’écoulement fluviale de l’Authie seule. Cette convergence vers la

valeur initiale n'est pas tout à fait vérifiée pour la jauge 23 puisqu'elle se situe en zone côtière et peut donc être sous l'influence des forçages marins et de vidanges d'autres bassins.

- Les jauges 23 à 25 montrent des évolutions du niveau marin très proches pour les trois scénarios d'aménagement pendant la phase de montée de la marée. Les jauges 26 et 27 montrent des différences plus marquées entre les 3 scénarios pendant cette phase. Pendant la phase de marée descendante, le scénario 1 présente, à partir du temps $t = 18h$ et pour toutes les jauges, une décroissance du niveau d'eau plus importante que les autres scénarios. Cela peut s'expliquer par le fait que pour le scénario 1, le volume d'eau atteignant Pont-à-Cailoux est moindre que pour les autres scénarios du fait du resserrement plus prononcé de la baie à l'aval.
- La norme des vitesses de courant est également très similaire pour les 3 scénarios d'aménagement jusqu'au temps $t = 18h$. A partir de ce moment, la jauge 23 montre une norme de la vitesse d'écoulement moindre pour le scénario 1 que pour les autres scénarios. Les autres jauges (24 à 27) montrent une tendance opposée, les vitesses d'écoulement du scénario 1 sont supérieures aux autres scénarios. Ces différences peuvent s'expliquer par le fait que la vidange de la partie amont de la baie est plus contrainte spatialement dans le scénario 1 (due au maintien de la digue actuelle), les vitesses sont donc plus importantes.
- Les vitesses maximales des courants en amont et aval immédiat de Pont à Cailloux (jauges 26 et 27) sont très fortes avant l'étale (supérieures à 2 m/s).

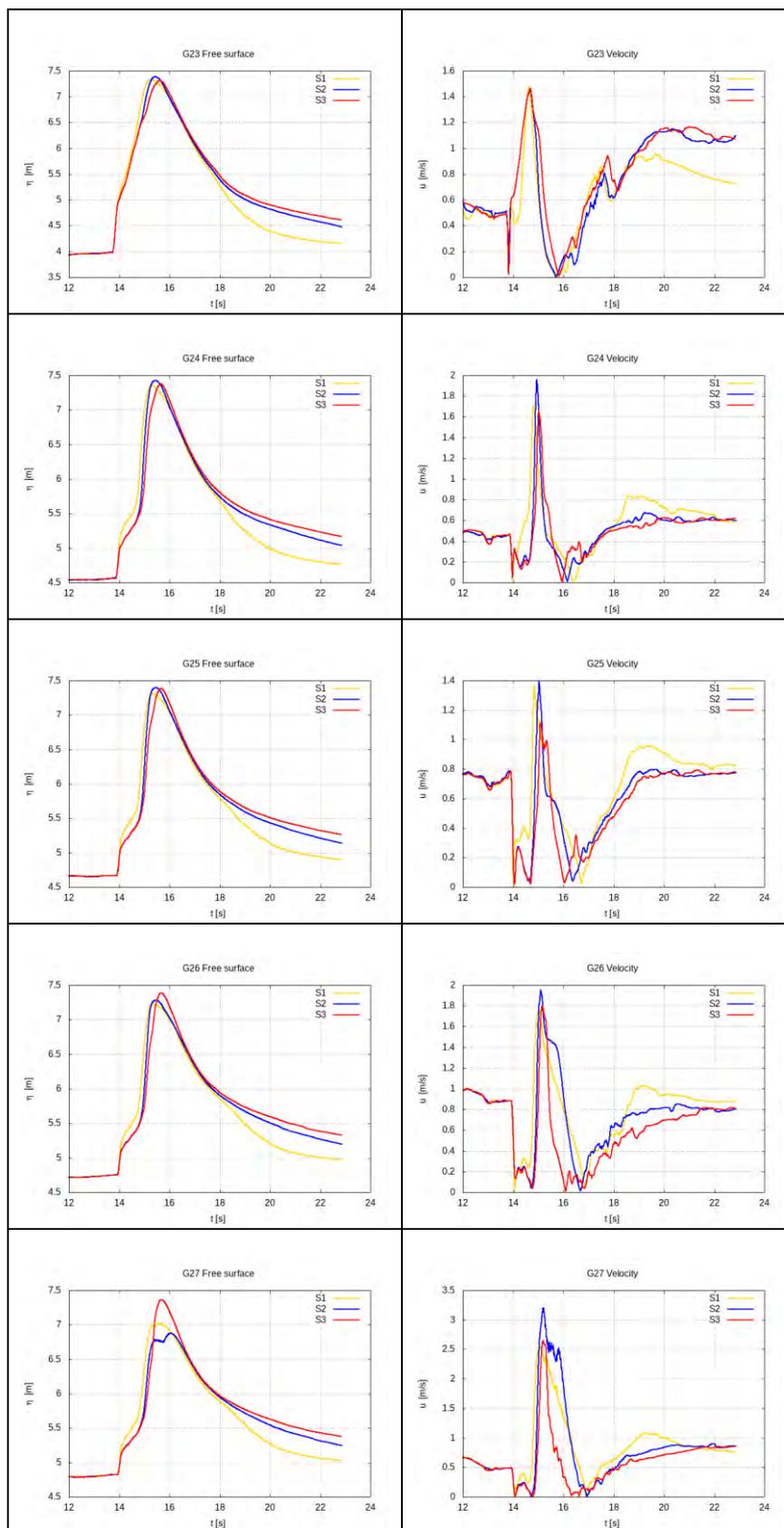


Figure 32 : Niveau d'eau (en m NGF) et norme de la vitesse (en m/s) extraits aux jauges 23, 24, 25, 26 et 27 (de haut en bas, et donc de l'aval vers l'amont) ; S1, S2 et S3 représentent les différents scénarii considérés.

5. Conclusions et perspectives

Ce rapport présente les résultats de l’action menée par le BRGM, dans le cadre du projet LIFE adapto, sur le site de la Baie d’Authie, plus précisément sur la partie amont de l’Authie, en rive gauche (zone de la Petite Mollière et Mollière du Pont à Cailloux).

Cette étude a permis de :

- Calculer la cote du zéro hydrographique par rapport à la cote du zéro IGN 69 (ZH/Ref) à l’observatoire secondaire « Berck Plage –Fort Mahon », cette donnée n’étant pas fournie directement par le RAM (Shom, 2019). Cette donnée est essentielle pour les deux tâches suivantes et permet d’accroître la précision des caractérisations réalisées.
- Caractériser les limites d’extension de la submersion marine en fonction des coefficients de marée. Cette donnée est très utile au Conservatoire du Littoral dans ses réflexions sur les types d’habitats qui vont se développer dans les zones reconnectées à la mer. En effet, cette donnée permet de définir la limite entre les écosystèmes de slikke (vasières) et de schorre (prés-salés), élément crucial pour considérer la création d’écosystèmes ingénieurs de l’environnement pouvant servir de Solutions Fondées sur la Nature dans la lutte contre les submersions marines actuelles et à venir. Ainsi, le Conservatoire a préconisé de remblayer la zone reconnectée devant la digue de la Mollière en rive droite à un niveau similaire à l’estran environnant afin de favoriser le développement d’une végétation de type prés-salés.
- Caractériser les temps annuels de submersion en fonction de la topographie du site. Cette donnée est en effet nécessaire pour réaliser des cartographies prospectives d’habitats des zones reconnectées à la mer. Ces cartographies d’habitats, actuelle et prospective, sont ensuite utilisées pour évaluer un IQE (Indice de Qualité Ecologique) permettant une comparaison des habitats avant/après dépoldérisation en terme de fonctionnalités, diversité écologique et patrimonialité (voir Debue et al., 2022).
- Mettre en place et valider un modèle de submersion par débordement pour étudier et comparer 3 scénarios d’aménagement au sein de la zone d’étude pour des conditions marines extrêmes telles que définies dans le PAPI :
 - o Scénario 1 : reconstruction de la digue actuelle ;
 - o Scénario 2 : construction d’une digue de 2nd rang issue de la concertation ;
 - o Scénario 3 : construction d’une digue de 2nd rang telle que préconisée dans le PAPI.

Les résultats des simulations numériques ont permis de montrer que :

- Les conditions de vents considérées ont un effet très significatif sur le niveau marin au sein de la baie (augmentation du niveau marin de l’ordre de + 45 cm de l’aval vers l’amont). L’effet du resserrement/contraction de la baie, de l’aval vers l’amont, sur le niveau marin est moindre et de l’ordre d’une quinzaine de centimètres.
- Pour les conditions extrêmes de niveau marin considérées au large (+ 6.94 m NGF correspondant au niveau de la plus haute mer pour un coefficient de 106 auquel s’ajoute la surcote marine et la surcote lié aux vagues), les reconnections à la mer considérées dans les scénarios 2 et 3 ont relativement peu d’influence, en terme de zone d’expansion pour la submersion, sur les niveaux marins induits dans la baie.
- Quel que soit le scénario considéré, les vitesses d’écoulement maximales à Pont à Cailloux, atteintes un peu avant l’étale de la marée, sont très fortes et supérieures à 2 m/s.

Les résultats de ces simulations (notamment sous forme de vidéos), présentées par le Conservatoire du littoral à diverses réunions en lien avec le PAPI, ont été appréciées par les acteurs locaux et ont contribué au choix d’une position de digue rétro-littorale intermédiaire entre le scénario 2 et la scénario 3.

Des travaux complémentaires sont en cours de discussion avec le Conservatoire du Littoral. En effet, il serait intéressant d’étudier et de comparer, par simulations numériques, les trois scénarios d’aménagement pour des conditions marines normales (hors tempête), actuelles et futures avec prise en compte de l’élévation du niveau marin due au changement climatique. Pour de telles conditions, les différents scénarios d’aménagement considérés devraient montrer des résultats plus contrastés, en termes de fonctionnement à l’amont de la baie (niveaux marins et vitesses d’écoulement). De telles simulations, en conditions marines normales, seraient également nécessaires pour étudier finement les différentes possibilités et les impacts des reconnections des polder l’Enclos et de la Petite Mollière.

6. Bibliographie

Brown, J. D., Spencer, T., and Moeller, I.: Modelling storm surge flooding of an urban area with particular reference to modelling uncertainties: a case study of Canvey Island, United Kingdom, *Water Resources Research.*, 43, W06402, doi: 10.1029/2005WR004597, 2007.

Bulteau T., Nicolae Lerma A., Lecacheux S. (2013). *Projet Climats de houle – Phase 2 : Analyse des valeurs extrêmes de vagues le long de la côte Atlantique et en Manche. Rapport final.* BRGM/RP-62730-FR, 49 p., 26 fig., 3 ann.

Bunya, S., Deitrich, J.C., Westerink, J.J., Ebersole, B.A., Smith, J.M., Atkinson, J.H., Jensen, R., RESio, D.T., Luettich, R.A., Dawson, C., Cardone, V.J., Cox, A.T., Powell, M.D., Westerink, H.J., and Roberts, H.J. (2010). *A High-Resolution Coupled Riverine Flow, Tide, Wind, Wind Wave, and Storm Surge Model for Southern Louisiana and Mississippi. Part I: Model Development and Validation.* *Monthly Weather Review.* Vol. 18, pp. 345-377

Debue M., Billon L., Poncet R., Reyjol Y. (2022). Développement d'un indicateur de qualité écologique dans le cadre du LIFE adapto. Rapport final – Site de la baie d'Authie, PatriNat (OFB-MNHN-CNRS).

Filippini A. G., de Brye S., Perrier V., Marche F., Ricchiuto M., et al.. UHAINA : A parallel high performance unstructured near-shore wave model. Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, May 2018, La Rochelle, France. pp.47-56, (10.5150/jngcgc.2018.006). (hal-01824108)

Garcin M., Brivois O. (2022) – *Projet LIFE adapto - Le Marais de Cagny (estuaire de l'Orne) – Caractérisation des temps de submersion pour différents scénarios d'aménagement.* BRGM/RP-71847-FR, 42 p., 21 fig., 8 tabl., 1 ann.

Le Cozannet, G., Bulteau, T. Castelle, B., Ranasinghe, R., Wöppelmann, G., Roher, J., Bernon, N., Idier, D., Louisor, J., Salas-y-Méllia, D. (2019). - Quantifying uncertainties of sandy shoreline change projections as sea level rises. *Scientific Reports.* <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37017-4>

Louisor J., Brivois O. avec la collaboration de Mouillon P. (2022) – *Projet LIFE adapto – Le Marais de Moëze - Brouage : Caractérisation des risques de submersion marine pour différents scénarios d'aménagement.* Rapport final. BRGM/ RP-72452-FR, 87 p., 45 fig., 10 tabl., 1 ann.

Pirazzoli P. A. et al., Juillet 2008. Extreme sea level in English Channel: calibration of the joint probability method. *Journal of Coastal Research.*

Shom (2019) - *Références Altimétriques Maritimes - Ports de France métropolitaine et d'outre-mer - Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée.* Edition 2019.

SHOM/CETMEF, édition 2008. *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique).*



**Centre scientifique et technique
Direction Risques et Prévention**
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr