

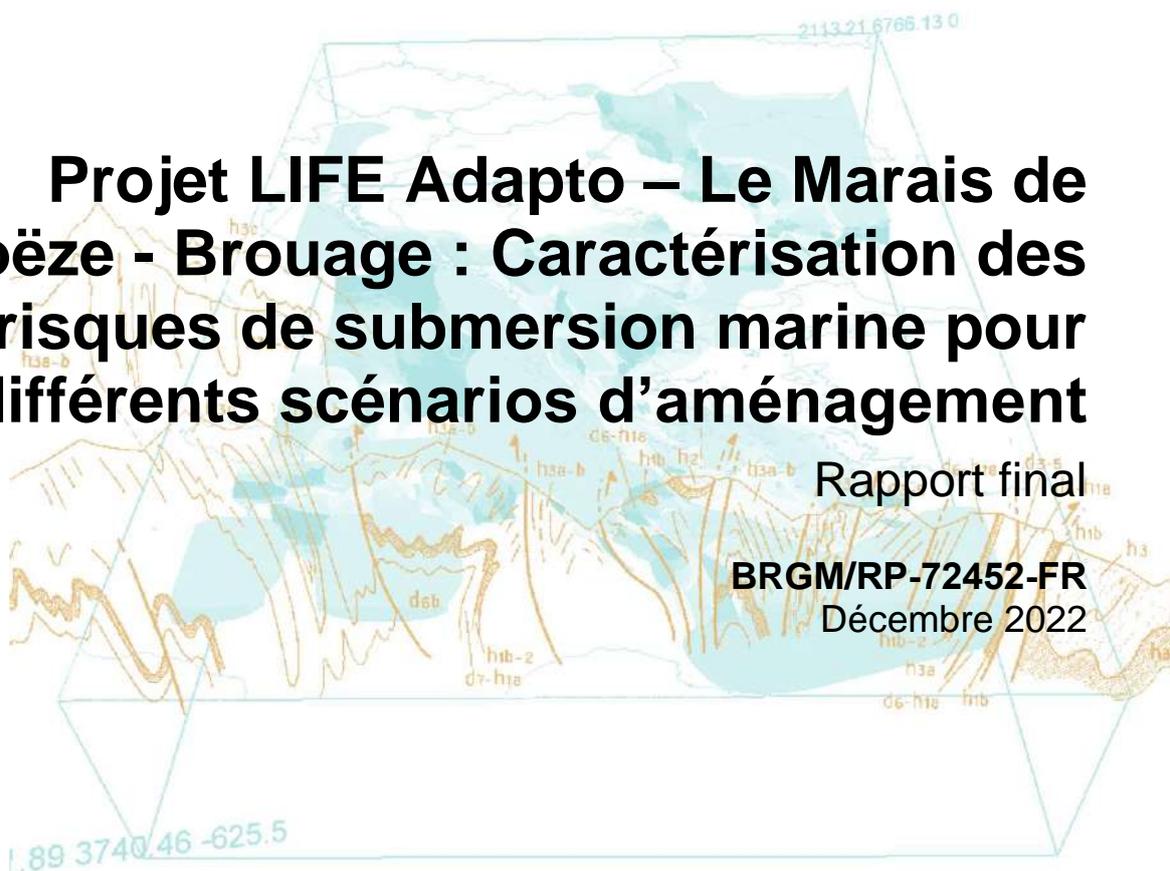


# Projet LIFE Adapto – Le Marais de Moëze - Brouage : Caractérisation des risques de submersion marine pour différents scénarios d'aménagement

Rapport final

BRGM/RP-72452-FR

Décembre 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**

Décembre 2022

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Recherche du BRGM 2016-2022

**J. Louisor et O. Brivois**

Avec la collaboration de

**P. Mouillon**

**Vérificateur :**

Nom : S. Le Roy

Fonction : Ingénieur littoral

Date : 24/03/2023

Signature :



**Approbateur :**

Nom : E. David

Fonction : Responsable d'Unité

Date : 28/03/2023

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)

**Mots-clés** : ADAPTO, changement climatique, marais de Moëze-Brouage, modélisation submersion marine, gestion souple, adaptation.

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

**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, 82 p., 45 fig., 9 tabl.

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

**D**ans 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 du Marais de Brouage, situé au sud de Rochefort en Charente Maritime, est l'un de ces sites en devenir. Au sein de ce marais, le Conservatoire du littoral est propriétaire de la quasi-totalité des parcelles incluses dans la partie terrestre de la Réserve Naturelle Nationale de Moëze-Oléron. Cette réserve est protégée par une digue en terre, relativement fragile, qui connaît, de façon récurrente, la formation de brèches, dont la dernière en date s'est créée en 2018 et n'a pas été réparée. Cet ouvrage pose donc régulièrement des problèmes d'entretien et l'absence de matériaux nécessaires à ces travaux à proximité du site ne permet pas facilement le maintien à niveau de celui-ci.

Dans ce contexte, le Conservatoire souhaitait étudier et comparer trois scénarios de gestion pour le devenir du site (1 - Maintien et renforcement de la digue à son emplacement actuel ; 2 - Effacement de la digue actuelle ; 3 - Recul stratégique de l'emplacement de la digue), en termes :

- De caractérisation de l'aléa de submersion marine et d'exposition des enjeux humains ;
- De hauteur, de longueur (voire de position) des ouvrages nécessaires à la protection des enjeux présents ;
- De coûts de construction de ces ouvrages.

Ainsi, pour chaque scénario de gestion (si cela était pertinent), des simulations numériques hydrodynamiques ont été réalisées, pour des conditions normales et extrêmes (conditions similaires à la tempête Xynthia) actuelles et à l'horizon 2030 et 2050 (en considérant respectivement une élévation du niveau marin d'environ + 18 cm et + 36 cm), afin de caractériser les submersions marines induites, en termes d'emprise spatiale à terre et de hauteur ou niveau d'eau et d'enjeux humains exposés. L'évaluation des coûts de construction ou de réhabilitation des ouvrages nécessaires à chaque scénario est basée, quant à elle, sur une étude des coûts de travaux de reconstruction réalisés en France suite à la tempête Xynthia.

Les résultats obtenus lors de cette première phase de l'étude ont permis de mettre en évidence que les scénarios de gestion envisagés par le Conservatoire sur ses terrains ont une influence en terme d'aléas de submersion marine sur les zones avoisinantes, notamment la partie sud du marais de Brouage, mais également que les aménagements envisagés (dans le scénario 1 de réfection de la digue littorale existante et dans le scénario 2 de recul stratégique de l'emplacement de la digue) nécessitent, pour être efficaces, des interventions sur des zones n'appartenant pas au Conservatoire. Il a également été montré que le recul stratégique de la digue n'avait pas d'influence sur les niveaux marins extrêmes et que les coûts de construction d'un tel ouvrage étaient du même ordre de grandeur que ceux de réhabilitation de la digue existante.

Il est ainsi apparu que le devenir du marais de Moëze, dans un contexte de changement climatique, devait être réfléchi de façon globale, à l'échelle du Marais de Brouage dans son ensemble, et non seulement à l'échelle des propriétés du Conservatoire.

Suite à l'obtention de ces premiers résultats et à l'initiative du Conservatoire du Littoral, un atelier de travail, réunissant l'ensemble des élus du territoire, a été organisé afin de recueillir leurs avis sur les différentes solutions de gestion du trait de côte à envisager à l'échelle du Marais de Brouage dans son ensemble. Trois propositions de gestion ont ainsi été définies par les élus :

- Proposition P1 : Maintien d'une digue à l'emplacement actuel avec mise en place d'ouvrages hydrauliques dans les Havres.
- Proposition P2 : Création d'une digue en retrait (digue rétro-littorale), matérialisant à terme la nouvelle limite terre-mer. Les activités potentiellement impactées, situées entre la digue actuelle et celle en retrait, devront être relocalisées.
- Proposition P3 : Des protections rapprochées sont construites au niveau des centres bourg menacés par les submersions marines. Les digues actuelles, en front de mer sont laissées en libre-évolution. Les activités potentiellement impactées, situées derrière la digue actuelle, devront être relocalisées.

La deuxième partie de l'étude est donc dédiée à l'analyse et à la comparaison des 3 propositions précédentes à l'échelle globale du Marais de Brouage, avec la même méthode que précédemment.

Les résultats obtenus ont permis de montrer que :

- Pour des conditions marines extrêmes, la suppression de la digue littorale actuelle et la création d'une zone d'expansion pour la submersion (propositions P2 et P3) permettent un étalement de la lame d'eau et diminuent ainsi notablement les niveaux d'eau au droit des ouvrages en retrait, par rapport aux niveaux d'eau au droit de la digue littorale actuelle.
- La création d'une digue rétro-littorale (proposition P2) permet la protection des villages de Hiers et de Brouage, mais plusieurs zones péri-urbaines (et habitations isolées) situées devant la nouvelle digue restent vulnérables à la submersion marine. Il s'agit en particulier de quelques habitations, situées dans les zones les plus basses, de Bourcefranc-le-Chapus, de Saint-Froult et de Port-des-barques. Ainsi, pour cette proposition, des protections rapprochées devraient être ajoutées pour protéger ces enjeux humains.
- En termes de coûts de construction et de réhabilitation des ouvrages nécessaires à chaque scénario, une estimation, relativement grossière, permet d'obtenir les ordres de grandeurs suivants
  - Pour la proposition P1, le coût de réhabilitation des digues existantes pourrait s'élever entre 20 et 40 M€ pour un linéaire d'environ 29 km (hors ouvrages hydrauliques dans les Havres, maintenance, ...)
  - Pour la proposition P2, le coût de la construction de la digue rétro-littorale, d'une longueur d'environ 8 km, pourrait s'élever entre 7 et 10 M€, auxquels il est nécessaire d'ajouter les coûts de construction de 6 km de protections rapprochées (pour les enjeux humains situés devant la digue rétro-littorale), soit au total un coût entre 12.6 M€ et 16.8 M€.
  - Pour la proposition P3, les coûts de construction des 8 km cumulés des protections rapprochées pourraient s'élever entre 7.2 M€ et 9.6 M€.

Ces coûts, relatifs à la construction ou réhabilitation des ouvrages, ne tiennent pas compte des relocalisations ou adaptations des activités existantes aujourd'hui, qui seront soumises de

manière récurrente, voire quasi-permanente selon les cycles de marée, à la submersion marine à moyen terme pour les propositions d'aménagement P2 et P3.

Néanmoins, dans le contexte du changement climatique et avec une élévation du niveau de la mer qui va continuer sur plusieurs siècles, la proposition P3, basée sur une dépoldérisation du marais et une protection rapprochée des enjeux humains, paraît la plus pertinente par rapport aux deux autres propositions :

- Elle permet, à moyen terme, de limiter la longueur d'ouvrages de protection à construire, à surveiller et à entretenir, et d'en limiter leur hauteur, par la création d'une zone d'expansion permettant un étalement de la lame d'eau et une diminution des cotes maximales atteintes par les submersions, par rapport aux cotes atteintes sur les digues de premier rang actuelle. Ces éléments ont bien sûr des conséquences directes sur les coûts de construction et d'entretien des ouvrages nécessaires.
- Elle est plus adaptée à un futur rehaussement du niveau de protection, afin d'accompagner l'élévation du niveau marin à plus long terme.
- Elle limite les risques liés à une défaillance ou rupture des ouvrages de protection. En effet, la défaillance d'un des ouvrages de protection rapproché engendrera une submersion très localisée et réduite en terme d'enjeux humains, contrairement à la défaillance de la digue littorale (proposition P1) ou rétro-littorale (proposition P2).
- La reconnexion à la mer d'une part importante du marais de Brouage pourrait entraîner une exondation des sols par sédimentation et le développement de végétations halophiles, telles que les prés-salés. Ces modifications, difficiles à prédire, pourraient avoir un rôle important de réduction des aléas (réduction des houles et courants, meilleure stabilité des sols à l'érosion ...) et créeraient des milieux connus pour leur fort taux de captation et séquestration du dioxyde de carbone, contribuant ainsi à l'atténuation du changement climatique.

Un PAPI (Plan d'Actions et de Prévention des Inondations) d'intention est en cours d'élaboration (2021-2023) sur le marais de Brouage. Dans ce cadre, les trois propositions d'aménagement précédentes, à l'échelle du marais, seront analysées et comparées de manière à évaluer objectivement leur pertinence socio-économique par une analyse coût-bénéfice (ACB) / analyse multicritères (AMC), dans le prolongement des études menées dans le programme Adapto. A ce stade du PAPI et de l'analyse des différentes propositions, les conclusions de ce rapport pourront utilement être prises en compte.

Ainsi, sur ce territoire du Marais de Brouage, la présente étude et plus généralement les diverses études (paysages, perception sociale, économie des territoires, biodiversité...) réalisées dans le cadre du programme Adapto, ont permis une comparaison objective des différentes possibilités de gestion du trait de côte et ont grandement participé à l'acceptation locale d'une gestion plus souple de la bande côtière.



# Sommaire

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Description du site et objectifs de l'étude .....</b>   | <b>13</b> |
| 1.1. CONTEXTE ET DESCRIPTION DU SITE .....  | 13        |
| 1.1.1. Le projet LIFE Adapto .....  | 13        |
| 1.1.2. Le Marais de Moëze-Brouage .....   | 14        |
| 1.2. RAPPELS THEORIQUES SUR LES PHENOMENES DE SUBMERSION MARINE .....   | 16        |
| 1.2.1. Processus physiques .....  | 16        |
| 1.2.2. Types de submersion marine .....   | 18        |
| 1.3. OBJECTIFS DE L'ETUDE .....   | 19        |
| <b>2. Données topographiques et bathymétriques – construction des Modèles Numériques de Terrain (MNT) .....</b> | <b>21</b> |
| 2.1. STRATEGIE ET PROCESSUS GENERAL DE PRODUCTION DES MNT .....   | 21        |
| 2.1.1. Principes généraux .....   | 21        |
| 2.1.2. Caractéristiques et contraintes techniques .....   | 21        |
| 2.2. DONNEES EXPLOITEES .....   | 22        |
| 2.2.1. Bathymétrie .....  | 22        |
| 2.2.2. Topographie .....  | 22        |
| 2.3. CONSTRUCTION DU MNT .....  | 23        |
| 2.3.1. Interpolation et correction des données .....  | 23        |
| 2.3.2. Caractéristiques du MNT .....  | 24        |
| 2.4. PRISE EN COMPTE DES ELEMENTS STRUCTURANTS .....  | 24        |
| 2.4.1. Etape 1 : Identification des éléments structurants (lignes de contraintes) .....                         | 24        |
| 2.4.2. Etape 2 : Retouches automatiques des éléments structurants .....   | 25        |
| 2.5. PRISE EN COMPTE DE L'OCCUPATION ET DES FROTTEMENTS SUR LE FOND ASSOCIES .....                              | 27        |
| 2.5.1. Notion de rugosité/frottement et correspondance avec l'occupation du sol (OCS) .....                     | 27        |
| 2.5.2. Prise en compte de la rugosité dans le modèle .....  | 27        |
| <b>3. Mise en place du modèle par débordement .....</b>   | <b>29</b> |
| 3.1. MODELE MARS-2DH .....  | 29        |
| 3.1.1. Description du code .....  | 29        |
| 3.1.2. Implémentation et calibration/validation du modèle .....   | 30        |
| 3.2. PRISE EN COMPTE DES CONDITIONS DE MAREE .....  | 32        |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.3. PRISE EN COMPTE DE L'ELEVATION DU NIVEAU DE LA MER .....  | 35        |
| <b>4. Comparaison de différents scénarios d'aménagement.....</b>   | <b>38</b> |
| 4.1. AMENAGEMENTS A L'ECHELLE DES TERRAINS DU CONSERVATOIRE ..   | 38        |
| 4.1.1. Scénarios considérés .....  | 38        |
| 4.1.2. Résultats des simulations numériques.....   | 41        |
| 4.1.3. Comparaison des coûts de construction et d'entretien des différents scénarios d'aménagements..... | 48        |
| 4.1.4. Rappel des résultats et premières conclusions.....  | 55        |
| 4.2. AMENAGEMENTS A L'ECHELLE DE L'ENSEMBLE DU MARAIS DE BROUAGE .....                                   | 57        |
| 4.2.1. Déroulement de l'atelier et scénarios envisagés par les élus.....                                 | 57        |
| 4.2.2. Analyse des différents scénarios issus de l'atelier .....   | 59        |
| 4.2.3. Comparaison des 3 propositions d'aménagement à l'échelle du Marais de Brouage.....                | 66        |
| <b>5. Conclusion .....</b>   | <b>70</b> |
| <b>6. Bibliographie.....</b>   | <b>74</b> |

## Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| Figure 1 : Eléments considérés sur les différents sites du projet Adapto. ....   | 13 |
| Figure 2: Sites pilotes Adapto et zoom sur la carte paysagère du marais de Brouage. ....   | 14 |
| Figure 3 : CARTE de situation, montrant les terrains du Conservatoire du Littoral. ....  | 15 |
| Figure 4 : Typologie des défenses côtières des terrains du Conservatoire du Littoral. ....   | 16 |
| Figure 5 : Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête (surcotes) jusqu'au rivage. ....  | 17 |
| Figure 6 : Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer / dégradation des ouvrages / débordement, ©BRGM). ....   | 18 |
| Figure 7 : Capture d'écran de MARC (Modélisation et Analyse pour la Recherche Côtière ; <a href="https://marc.ifremer.fr">https://marc.ifremer.fr</a> ) montrant les hauteurs de houles lors du pic de la tempête Hercule le 6 janvier 2014 à 23h00. ....  | 20 |
| Figure 8 : Produit MNT Bathymétrique des Pertuis Charentais (Shom, 2015). Source : <a href="http://diffusion.shom.fr">diffusion.shom.fr</a> . ....   | 22 |
| Figure 9: A) et B) Extraits du produit RGE ALTI® 1 m IGN (lots fournis en plusieurs étapes) ; C) Extrait du produit RGE ALTI® 5 m IGN. Le périmètre élargi de l'étude est indiqué en rouge. ....   | 23 |
| Figure 10: A) Grille topo-bathymétrique initiale présentant des seuils/discontinuités verticales dans la zone intertidale (entourées en rouge) ; B) Grille corrigée ; C) Vue oblique 3D de la discontinuité/du seuil n°3 ; D) Vue oblique 3D de la grille corrigée. ....   | 24 |
| Figure 11: Eléments linéaires structurants identifiés. ....  | 25 |
| Figure 12: Schéma explicatif du passage du Litto3D à 1 m à un MNT (20 m x 20 m). ....  | 25 |
| Figure 13: Méthode de reconstruction des éléments structurants. A gauche : En noir, est représenté le MNT réalisé à partir du RGE Alti 1m et 5 m et HOMONIM 20m (en mer), en rouge le MNT à 20m dit maximum permettant de considérer les « Zones bloquant l'écoulement » (remblais, routes, aménagements, points hauts ...), en vert le MNT 20m aux valeurs moyennes, en bleu le MNT 20m minimum permettant de prendre en compte les « Zones favorisant l'écoulement » (chenaux, rivières, canaux). A droite : en orange, le MNT final à 20m x 20m tenant compte des zones bloquant et favorisant l'écoulement. .... | 26 |
| Figure 14: MNT moyen avant retouche de la digue Havre-Plaisance (gauche); MNT après retouches par maxima voisins sur la digue Havre-Plaisance, désignée par les flèches noires (droite). ....  | 26 |
| Figure 15: Correspondance entre la typologie simplifiée d'occupation du sol issue des bases de données Corine Land Cover 2012 et BD Topo (IGN) (gauche) et les coefficients de Strickler ( $m/3s^{-1}$ ) à droite dans le marais de Moëze. ....  | 28 |
| Figure 16: Comparaison de l'occupation du sol entre l'étude Corine Land Cover (2012) et la dernière version (CLC 2018). D'après GUAN Lili, et LOIL Amandine, étudiantes de l'ENSG (Ecole Nationale des Sciences Géographiques). ....   | 28 |
| Figure 17: Schéma de principe de la méthodologie employée pour la propagation de la submersion marine : le niveau marin de référence (bleu continu) n'est pas simplement projeté sur la topographie (bleu pointillé) mais bien propagé suivant une dynamique de submersion (vert). ....  | 29 |
| Figure 18: Zone d'extension de la submersion observée suite à la tempête Xynthia (2010) en pointillés (Artélia); et hauteurs maximales simulées pour des conditions de   |    |

|  |    |
|--|----|
| tempête Xynthia. Le fond de carte est une étude paysagère du marais réalisée par Bento & Blanc de l'Ecole Nationale Supérieure de Paysage (2017).....  | 31 |
| Figure 19: Cartes des sites de la zone de marée des Pertuis Charentais. Port de référence et observatoires permanents dans la zone. Source : RAM (Shom, 2017). .....   | 32 |
| Figure 20: Survenue moyenne annuelle (en noir) et occurrence moyenne annuelle (en orange) des marées prédites entre 1996 et 2015. Les données sont fournies par le Shom (SHOMAR, édition 2014-2015). .....   | 33 |
| Figure 21: Elévation du niveau de la mer et projections entre 2007 et 2100 pour le scénario RCP 8.5. Sont représentées les projections médiane, à intervalles de confiance 17 et 83% de l'IPCC ainsi que les valeurs hautes et basses vraisemblables. Les traits bleus verticaux indiquent les années 2030 et 2050. Données fournies par Le Cozannet et al (2018). ..... | 36 |
| Figure 22 : Ouvrages de défense côtière considérés dans le scénario 1. ....  | 39 |
| Figure 23 : Ouvrages de défense côtière considérés dans le scénario 2. ....  | 40 |
| Figure 24 : Positions des différentes digues rétro-littorales considérées dans le scénario 3. ....   | 41 |
| Figure 25: Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions hydrométéorologiques extrêmes de type tempête Xynthia dans le scénario 1 « actuel » (digue Havre-Plaisance réhaussée, autres digues dans leur état actuel, sans prise en compte de l'élévation du niveau de la mer). .....  | 42 |
| Figure 26 : : Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions hydrométéorologiques normales (hors tempête) dans le scénario 2 : à gauche PMVE actuelles, à horizon 2030 et 2050 ; à droite PHMA actuelle, à horizon 2030 et 2050. ....   | 43 |
| Figure 27 : Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions hydrométéorologiques extrêmes de type tempête Xynthia dans le scénario 2 (niveau marin actuel, sans prise en compte de l'élévation du niveau de la mer). .....   | 44 |
| Figure 28: Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions extrêmes de type tempête Xynthia avec le niveau marin actuel dans le scénario 3 (digue rétro-littorale la plus aval).....   | 45 |
| Figure 29 : Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions extrêmes de type tempête Xynthia avec le niveau marin actuel dans le scénario 3 (digue rétro-littorale intermédiaire).....   | 45 |
| Figure 30 : Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions extrêmes de type tempête Xynthia avec le niveau marin actuel dans le scénario 3 (digue rétro-littorale la plus amont). .....   | 46 |
| Figure 31 : Extension de la submersion et cotes maximales simulées du plan d'eau (m NGF) pour des conditions extrêmes de type tempête Xynthia avec le niveau marin actuel dans le scénario 3 (digue rétro-littorale la plus amont). .....  | 47 |
| Figure 32 : Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions extrêmes de type tempête Xynthia avec le niveau marin actuel dans le scénario 3 (digue rétro-littorale intermédiaire) et ajout d'une digue sur la rive droite du Havre de Brouage. ....  | 47 |
| Figure 33 : Position et typologie des ouvrages de défense actuels du marais de Brouage (les numéros servent à identifier les différents tronçons et seront repris dans le Tableau 7). .....  | 50 |
| Figure 34 : Cotes de la digue de premier rang extraites des données Lidar de 2011 (en m NGF, du sud vers le nord). .....   | 51 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 35 : Position de la digue rétro-littorale considérée (position intermédiaire) et digue actuelle.....  | 53 |
| Figure 36 : Position de la digue de 2nd rang considérée et cote du terrain naturel correspondant issu des données Lidar (du sud vers le nord).....   | 54 |
| Figure 37 : Elément cartographiques mis à disposition des élus lors de l'atelier de travail du 3 juin 2019. ....   | 58 |
| Figure 38: Synthèse de l'atelier des maires du 20/06/2019. Proposition P1 : renforcement des digues et des ouvrages hydrauliques identifiées par des étoiles rouges ; P2 : Renforcement d'une route-digue (représentée par les lignes noire et bleue n°1 et n°2), sans entretien ni renforcement des digues pré-existantes ; P3 : Proposition de défenses côtières situées autour des enjeux identifiés, sans entretien ni renforcement des digues existantes. Les activités agricoles à relocaliser sont identifiées par un cercle vert et les flèches bleues représentent l'évolution du trait de côte. .... | 59 |
| Figure 39 : Ouvrages de protection actuels, et leur typologie, au Marais de Brouage. ....  | 60 |
| Figure 40 : Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions hydrométéorologiques extrêmes de type tempête Xynthia avec un niveau marin actuel, les digues littorales existantes arasées et la construction d'une route-digue et de défenses en retrait (représentées par le tracé en blanc).....   | 62 |
| Figure 41 : Extension de la submersion et cotes maximales simulées (en m NGF) pour des conditions hydrométéorologiques extrêmes de type tempête Xynthia avec un niveau marin actuel, les digues littorales existantes arasées et la construction d'une route-digue et de défenses en retrait (représentées par le tracé en blanc). ....  | 63 |
| Figure 42 : Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions hydrométéorologiques extrêmes de type tempête Xynthia avec un niveau marin actuel, les digues littorales existantes arasées et la construction de protections rapprochées (représentées par le tracé en blanc).....  | 64 |
| Figure 43 : Extension de la submersion et cotes maximales simulées (en m NGF) pour des conditions hydrométéorologiques extrêmes de type tempête Xynthia avec un niveau marin actuel, les digues littorales existantes arasées et la construction de protections rapprochées (représentées par le tracé en blanc). ....   | 65 |
| Figure 44 : Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions proches de la PHMA à l'horizon 2030. Digue littorale arasée ; protections rapprochées représentées par le tracé en blanc. ....   | 65 |
| Figure 45 : Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions proches de la PHMA à l'horizon 2050, avec les digues littorales arasées et la construction de protections rapprochées (représentées par le tracé en blanc). ....   | 66 |

## Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1 : Exemple de coefficients de Strickler attribués en fonction de la typologie simplifiée d'occupation du sol. ....  | 27 |
| Tableau 2 : Durée cumulée annuelle de submersion potentielle par tranche altimétrique, calculée par rapport aux références altimétriques du port de La Rochelle pour l'année 2015 (SHOMAR édition 2014-2015 et RAM 2019 du SHOM). .... | 34 |
| Tableau 3 : Durée cumulée annuelle de submersion potentielle par tranche altimétrique, actuelle, à l'horizon 2030 (+ 20 cm d'élévation) et à l'horizon 2050 (+ 40 cm d'élévation). ....  | 37 |

|   |    |
|---|----|
| Tableau 4 : Digue sans parement (couts observés), CEREMA 2018. ....   | 48 |
| Tableau 5 : Digue avec parement en enrochement (couts observés), CEREMA 2018. ....  | 49 |
| Tableau 6 : Cordon dunaire (coûts observés), CEREMA 2018. ....  | 49 |
| Tableau 7 : Evaluations des coûts de réhabilitation de la digue actuelle pour différents scénarios suivant l'état des ouvrages. ....  | 52 |
| Tableau 8 : Evaluations des coûts de création et réhabilitation du système de protection avec digue rétro-littorale pour différents scénarios suivant l'état des ouvrages. .... | 55 |
| Tableau 9 : Evaluations des coûts de réhabilitation des digues de la Proposition P1 pour différents scénarios suivant l'état des ouvrages. ....                                 | 61 |

# 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 2), 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..., 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.

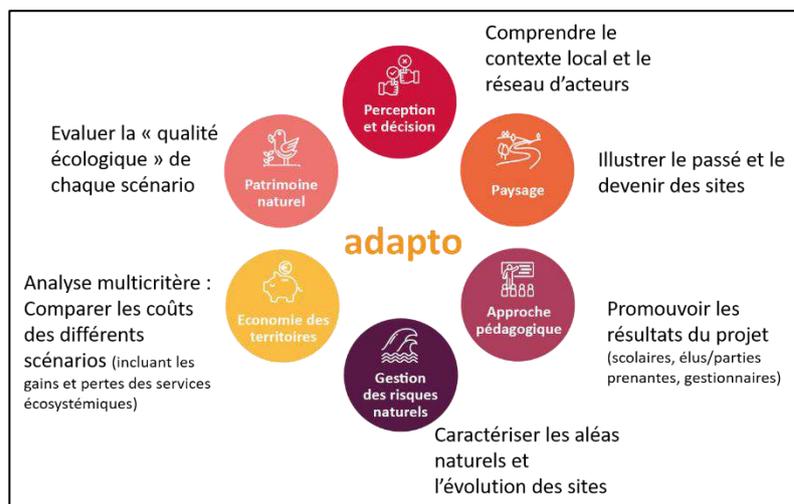


Figure 1 : Eléments considérés sur les différents sites du projet Adapto.

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 du marais de Moëze, au sein du marais de Brouage (Charente-Maritime), sur lequel nous nous concentrons ici (voir figure suivante).

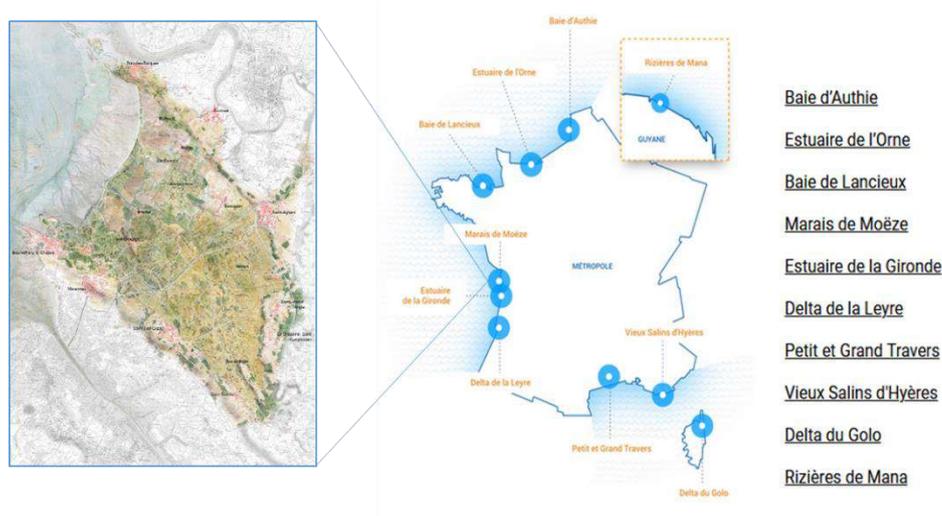


Figure 2: Sites pilotes Adapto et zoom sur la carte paysagère du marais de Brouage.

### 1.1.2. Le Marais de Moëze-Brouage

Le territoire des marais de Brouage se trouve sur la côte atlantique, en Charente-Maritime, entre Rochefort et Marennes. Ces marais, d’une surface d’environ 140 km<sup>2</sup>, sont bordés de coteaux dont l’altitude avoisine une vingtaine de mètres.

Situé dans l’ancien golfe de Saintonge, le marais de Brouage a été gagné peu à peu sur la mer ces derniers siècles par un envasement progressif lié aux alluvions de la Charente, complété par la main de l’Homme qui l’a façonné et endigué pour l’exploitation de diverses activités évoluant au fil du temps (saliculture, ostréiculture, agriculture). Ce site dispose d’un large panel de zones humides favorables à l’installation et au développement d’une remarquable biodiversité. Situé en plein cœur d’une voie migratoire et disposant de milieux propices, il est d’une importance majeure pour l’hivernage, le refuge et la migration d’un grand nombre d’oiseaux d’eau. Il est occupé en partie depuis 1985 par la réserve naturelle nationale de Moëze-Oléron.

Le Conservatoire du littoral est propriétaire de la quasi-totalité des parcelles incluses dans la partie terrestre de la réserve (voir Figure 3). La Ligue pour la Protection des Oiseaux (LPO) en est le gestionnaire, y compris pour les propriétés en bordure de réserve. Elle s’étend sur 6720 ha de domaine public maritime depuis 1993. Ce territoire est également reconnu site Natura 2000.

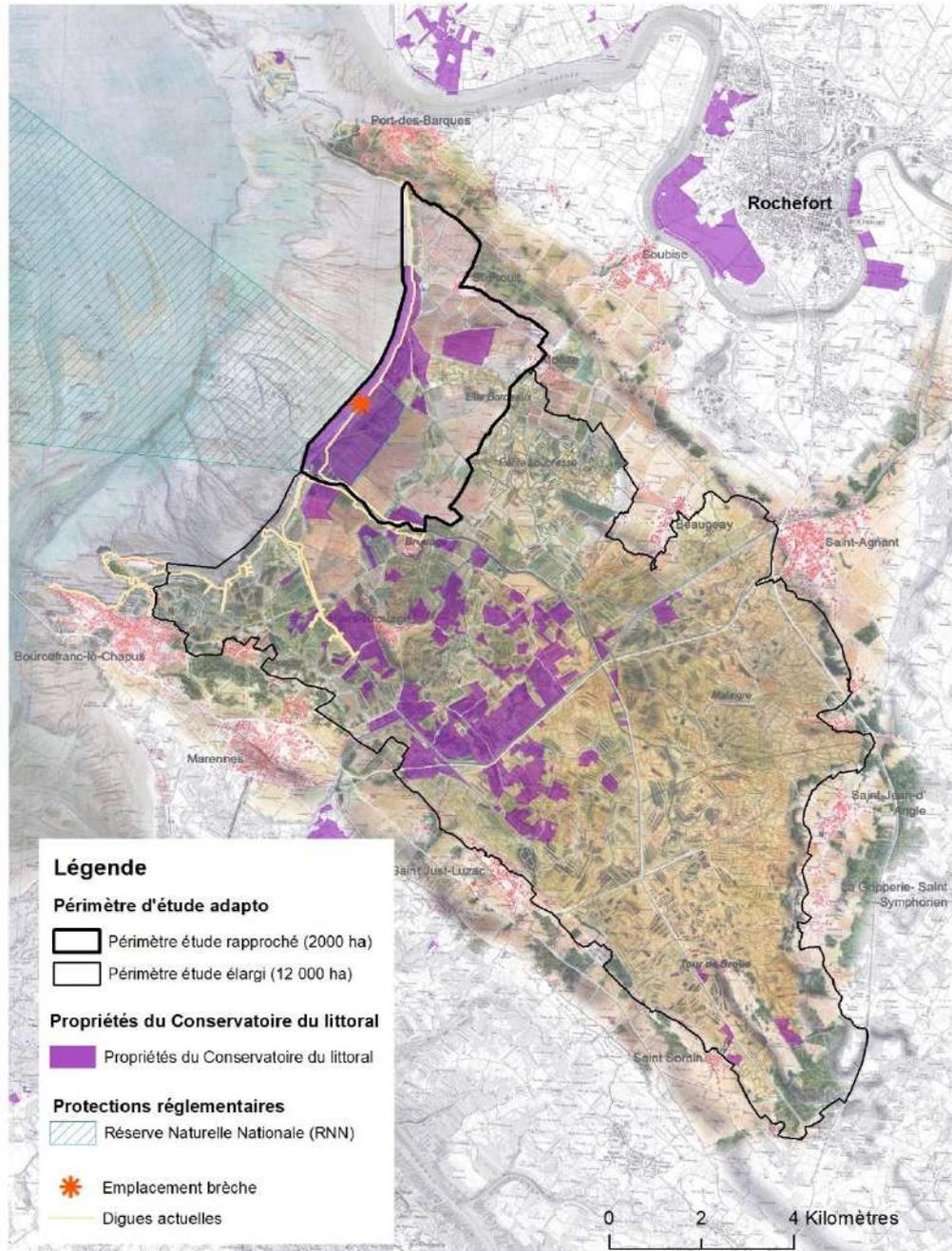


Figure 3 : CARTE de situation, montrant les terrains du Conservatoire du Littoral.

Les terrains du Conservatoire du Littoral, au niveau de la réserve naturelle, sont protégés de la mer par différents types de défense côtières (Figure 4) : une digue en terre dans la partie sud et au niveau des installations conchylicoles plus au nord, une digue en enrochement ou maçonnerie sur plusieurs secteurs du linéaire côtier et un cordon dunaire naturel, de faible hauteur, dans la partie centrale. Ces digues ne sont pas classées d'un point de vue réglementaire.

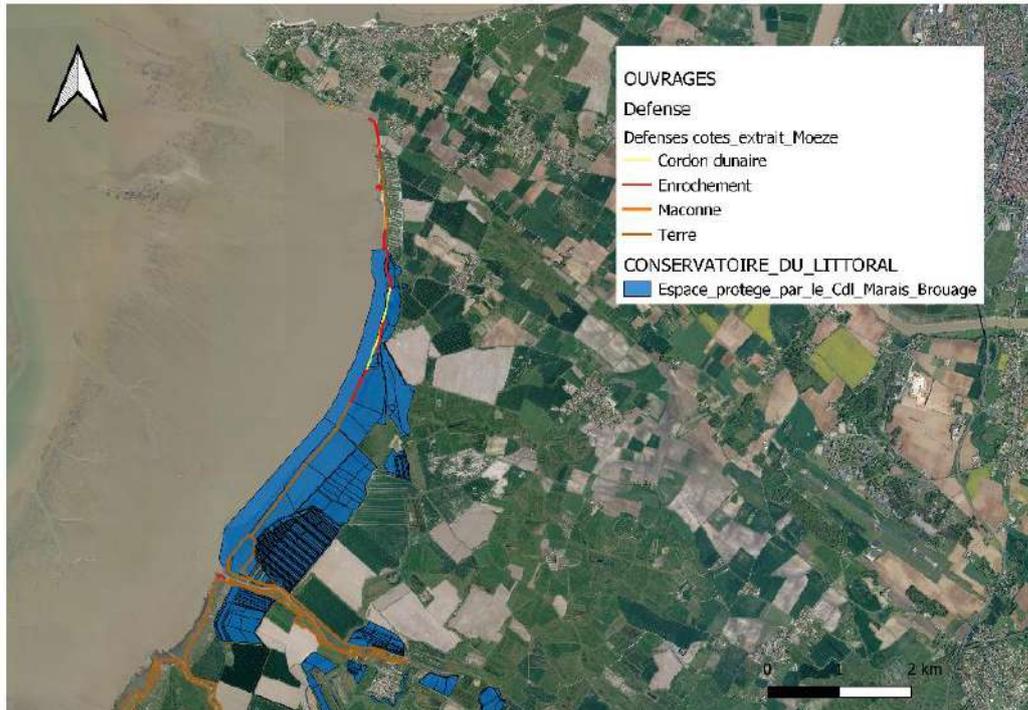


Figure 4 : Typologie des défenses côtières des terrains du Conservatoire du Littoral.

Dans la partie sud des terrains du Conservatoire, la digue en terre est relativement fragile et a connu, de façon récurrente lors d'évènements tempétueux, la formation de brèches (réparées en urgence avec des matériaux pris sur place). Cet ouvrage pose donc régulièrement des problèmes d'entretien et l'absence de matériaux nécessaires à ces travaux à proximité du site ne permet pas facilement le maintien à niveau de celui-ci, dans un contexte de Réserve Naturelle Nationale (RNN).

De même, au nord de la réserve, le cordon dunaire, jouant le rôle d'ouvrage de protection, présente une hauteur et largeur relativement faibles et ne pourra plus à terme assurer son rôle de protection.

Dans ce contexte, le Conservatoire souhaite étudier plusieurs scénarios de gestion pour le devenir du site, en tenant compte des différents enjeux présents localement (réserve naturelle, parcelles agricoles, installations conchylicoles, quelques habitations situées sur des points hauts).

Le marais de Moëze, et plus globalement le marais de Brouage, sont des zones basses, et sont de ce fait soumis à la submersion marine (tempête Xynthia en février 2010 par exemple). La partie suivante rappelle les éléments de base sur les submersions marines (processus physiques et différents types de submersion).

## 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 5) :

- **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 5). 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 5).

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).

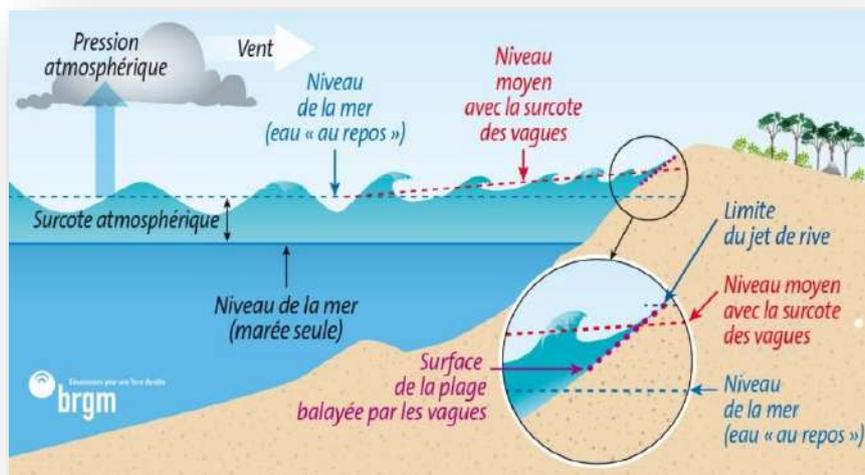


Figure 5 : Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête (surcotes) jusqu'au rivage.

### 1.2.2. Types de submersion marine

La submersion peut se manifester sous trois formes différentes (Figure 6) :

- 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 6), 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).

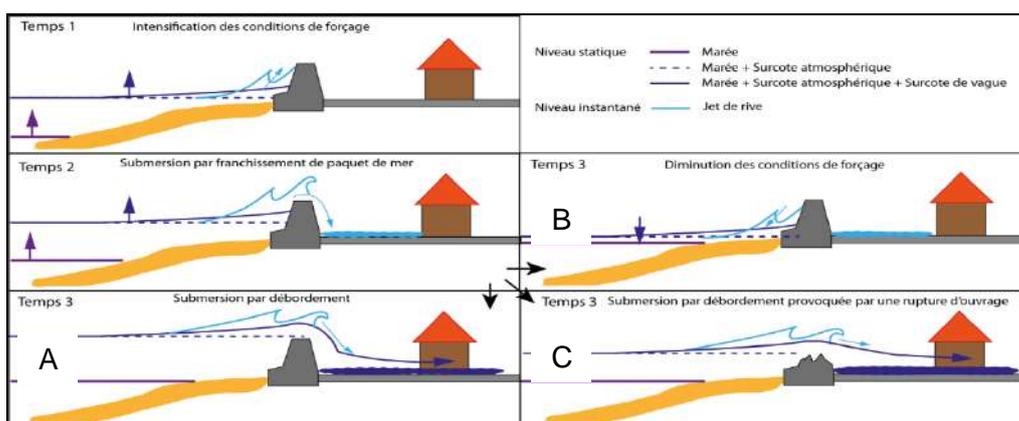


Figure 6 : Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer / dégradation des ouvrages / débordement, ©BRGM).

### 1.3. OBJECTIFS DE L'ETUDE

La digue protégeant les terrains du Conservatoire est fragile et pose régulièrement des questions d'entretien et de maintien du niveau de protection. A partir de ce constat, le Conservatoire souhaite étudier plusieurs scénarios de gestion du trait de côte pour le devenir du site dans un contexte de changement climatique.

Les trois scénarios de gestion envisagés par le Conservatoire sur ces terrains sont les suivants :

- (1) Maintien et renforcement de la digue à son emplacement actuel (digue dénommée digue Havre Plaisance dans la suite du rapport) ;
- (2) Effacement de la digue actuelle ;
- (3) Recul stratégique de l'emplacement de la digue pour bénéficier de la zone tampon offerte par les milieux naturels.

L'objectif de l'action du BRGM sur ce site vise à évaluer, en termes de submersion marine (emprises submergées, hauteurs d'eau, fréquences éventuelles des submersions) et d'exposition des enjeux, les conséquences de ces 3 scénarios de gestion du littoral à l'échelle du marais de Moëze.

Ce travail, réalisé par modélisation numérique, considérera les conditions météo-marines actuelles (conditions normales hors tempête et conditions de tempête), et y ajoute l'élévation du niveau de la mer due au changement climatique pour les échéances futures (horizons 2030 et 2050).

Cette action doit également permettre d'apporter des éléments sur :

- La hauteur des ouvrages nécessaire à la protection des enjeux pour les scénarios (1) et (3) ;
- Les coûts de construction et d'entretien des ouvrages pour les scénarios (1) et (3) et leur comparaison ;
- Les durées annuelles de submersion potentielle (en conditions normales de marée, c.à.d hors évènement de tempête) des zones reconnectées à la mer pour les scénarios (2) et (3) afin de réaliser des cartographies prospectives d'habitats (travail réalisé dans le cadre de deux études, l'une réalisée par la LPO gestionnaire de la RNN, et l'autre par le Museum National d'Histoire Naturel pour évaluer la « qualité écologique » des différents scénarios de gestion).

Sur le site du marais de Brouage, les submersions marines se produisent principalement par débordement, voire par rupture d'ouvrages, et non par franchissement par parquets de mer. En effet, la situation géographique particulière du marais, partiellement protégé des houles provenant directement du large par l'île d'Oléron et les faibles profondeurs bathymétriques devant les marais, ne permettent pas aux houles du large de se propager jusqu'à la côte, elles déferlent en effet bien avant celle-ci.

Cela est illustré sur la figure suivante qui montre les hauteurs de houle modélisées lors du pic de houle de la tempête Hercule le 6 janvier 2014 à 23h (capture d'écran issue de MARC, <https://marc.ifremer.fr>). Ainsi, alors qu'au large les houles ont une hauteur dépassant les 5 m, elles sont pratiquement inexistantes devant le marais de Moëze (hauteur inférieure à 10 cm), suite à leur dissipation par déferlement au niveau du Pertuis d'Antioche.

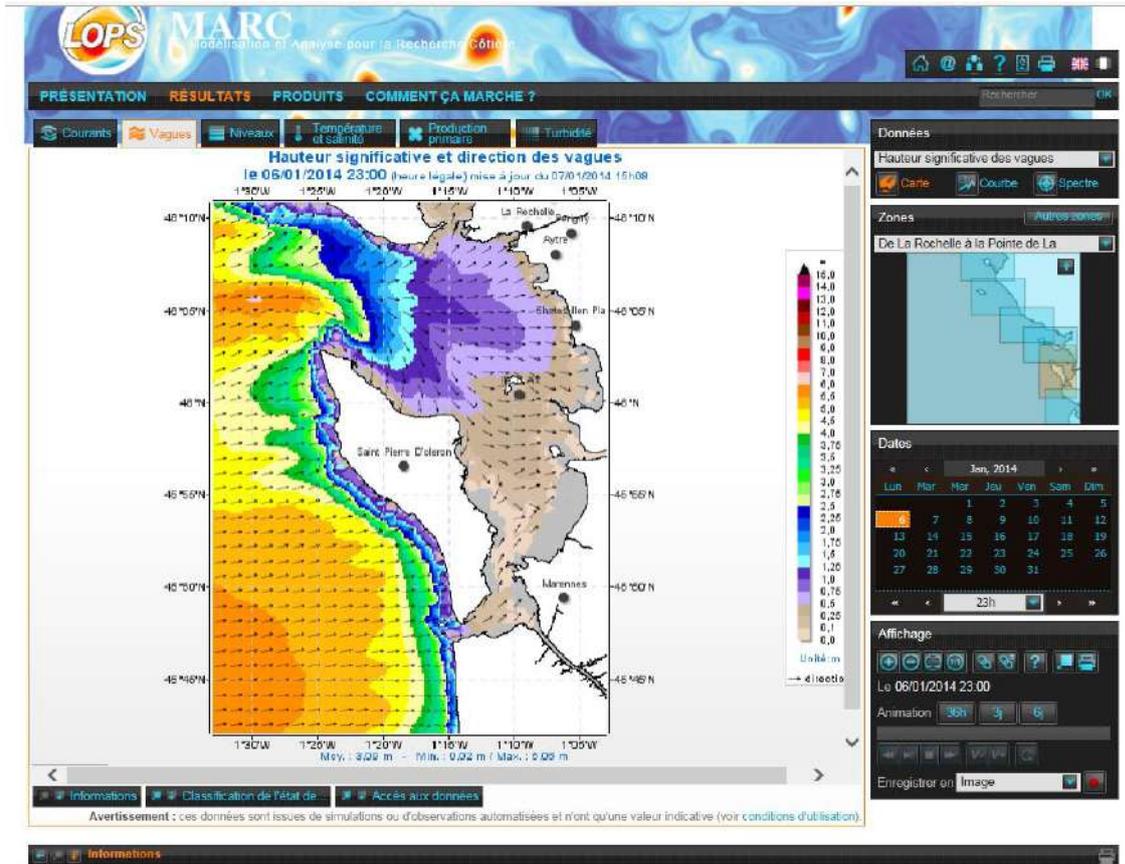


Figure 7 : Capture d'écran de MARC (Modélisation et Analyse pour la Recherche Côtière ; <https://marc.ifremer.fr>) montrant les hauteurs de houles lors du pic de la tempête Hercule le 6 janvier 2014 à 23h00.

Dans les modélisations numériques, les houles ne sont donc pas prises compte, seule la variation du niveau marin (signal de marée et éventuellement surcote) est prise en compte afin de modéliser les submersions marines par débordement.

Dans la suite de ce 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 l'implémentation du modèle numérique et aux conditions marines de forçages considérées. Suite à la mise en place du modèle, les différents scénarios de gestion sont étudiés et comparés dans le chapitre 4. Les conclusions de ce travail sont données au chapitre 5.

## **2. Données topographiques et bathymétriques – construction des Modèles Numériques de Terrain (MNT)**

### **2.1. STRATEGIE ET PROCESSUS GENERAL DE PRODUCTION DES MNT**

#### **2.1.1. Principes généraux**

Un modèle numérique de terrain (MNT) est une représentation digitale du terrain issue de l'interpolation appliquée à une sélection de données topographiques et/ou bathymétriques acquises et traitées au préalable. Chaque produit est défini comme une grille continue et régulière pour laquelle chaque nœud est renseigné par une estimation de la profondeur ou de l'altitude locale. L'interpolation assure donc le remplissage de chaque nœud de manière homogène. Dans la mesure du possible, le produit vise à rendre compte de la situation la plus actuelle des fonds marins (sur sa partie maritime) et de la topographie (sur sa partie terrestre), et à prendre en compte les données offrant la meilleure précision métrologique. La continuité en tout point des domaines terrestre et marin est nécessaire, particulièrement pour les usages en modélisation hydrodynamique.

Pour un usage destiné à la modélisation hydrodynamique, l'objectif est de reproduire le plus fidèlement possible des phénomènes océaniques, en se basant sur des systèmes numériques de modélisation, pour lesquels, entre autres, la bathymétrie joue un rôle primordial. La profondeur d'eau et donc la précision verticale du MNT sera un paramètre déterminant en vue de modéliser fidèlement la plupart de ces phénomènes, notamment leur amplification et leur vitesse de propagation.

La méthodologie mise en œuvre ici répond à une chaîne de production développée pour la réalisation de modèles numériques de terrain topo-bathymétriques emboîtés, à des résolutions données, et en cohérence avec l'échelle des phénomènes physiques modélisés.

#### **2.1.2. Caractéristiques et contraintes techniques**

Dans cette étude, les spécifications des MNT nécessaires aux tâches de modélisation ont été définies à partir d'une fiche de besoin précisant les caractéristiques souhaitées du MNT en sortie : emprise finale attendue, convention en Z des données, références horizontale et verticale, résolution, format de produit ...

Les MNT produits correspondent à des grilles continues terre-mer, soit des MNT topo-bathymétriques. Leurs emprises englobent la bande littorale et s'étendent de part et d'autre du trait de côte, sur terre comme en mer. L'emprise spatiale de chaque MNT est définie de façon à répondre au mieux aux besoins de la modélisation.

Les principales contraintes techniques concernent :

- la construction de grilles à partir des données topographiques et bathymétriques identifiées sur la zone de travail dans des bases de données accessibles ou à partir de données déjà acquises par le BRGM ;
- un besoin de description fine de la bathymétrie au niveau des petits fonds et sur l'avant-côte et de la topographie dans les zones terrestres à enjeu.

## 2.2. DONNEES EXPLOITEES

### 2.2.1. Bathymétrie

Le MNT bathymétrique des Pertuis Charentais d'une résolution de  $0.0002^\circ$  (~ 22 m) a été réalisé dans le cadre du projet HOMONIM (Shom, 2015), et développé afin d'être implémenté dans les modèles hydrodynamiques afin de produire des prévisions aussi précises que possible des hauteurs d'eau et d'états de mer à la côte et donc d'améliorer la pertinence de la Vigilance Vagues-Submersion de Météo France. Il couvre un secteur englobant les départements de la Charente-Maritime et de la Vendée. Ce MNT s'étend sur l'ensemble des pertuis (pertuis Breton, pertuis d'Antioche et pertuis de Maumusson) du domaine terrestre jusqu'à environ 60 m de profondeur. (Figure 8). Ce produit est disponible gratuitement au téléchargement sur les portails de données (<https://data.shom.fr/> et <https://diffusion.shom.fr/>) du Shom, son utilisation est libre, sous licence ouverte / Open Data.

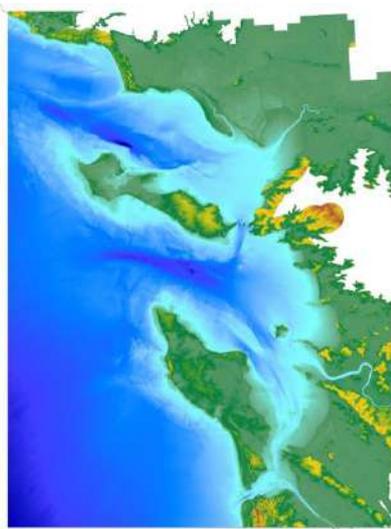


Figure 8 : Produit MNT Bathymétrique des Pertuis Charentais (Shom, 2015). Source : [diffusion.shom.fr](https://diffusion.shom.fr/).

Les sources des données exploitées dans ce MNT sont indiquées dans le fichier de métadonnées associé. Ce produit est rendu disponible selon deux références verticales : niveau moyen (NM) et niveau des plus basses mers astronomiques (PBMA). Quatre formats sont proposés : asc, glz, bag, grd. Les positions des nœuds de la grille bathymétrique sont fournies en positions géographiques, rapportées au système WGS84.

### 2.2.2. Topographie

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) qui correspond à un modèle numérique de terrain (MNT) topographique à haute résolution et grande précision (erreur verticale de l'ordre de 15 à 20 cm) (Figure 9). En complément, les dalles de la version RGE ALTI® 5 m ont aussi été exploitées.

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...), la donnée ne contient qu'une valeur uniforme ou une interpolation de valeurs qui n'est pas représentatif du fond.

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.

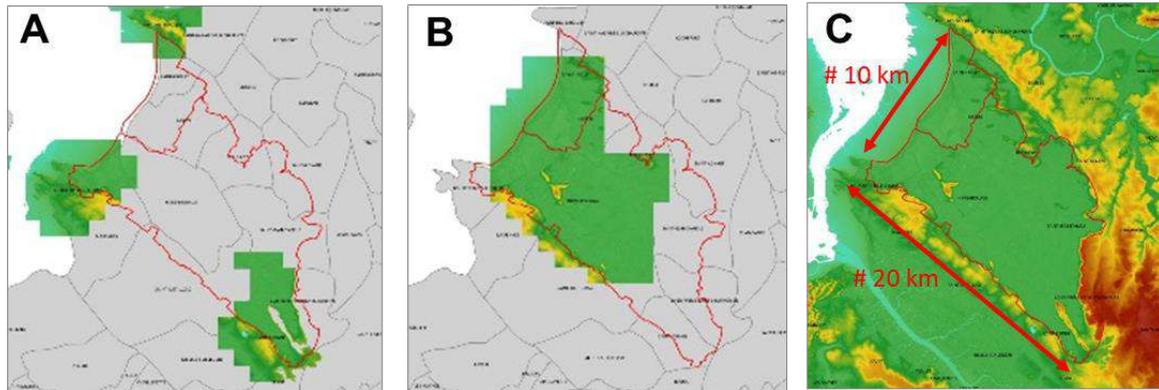


Figure 9: A) et B) Extraits du produit RGE ALTI® 1 m IGN (lots fournis en plusieurs étapes) ; C) Extrait du produit RGE ALTI® 5 m IGN. Le périmètre élargi de l'étude est indiqué en rouge.

## 2.3. CONSTRUCTION DU MNT

### 2.3.1. Interpolation et correction des données

Afin d'obtenir un produit topo-bathymétrique continu, il importe d'effectuer une interpolation des différents jeux de données disponibles. Cette phase d'interpolation est suivie d'une inspection qualitative du MNT généré pour s'assurer de la cohérence et d'une bonne transition graduelle aux limites des jeux de données utilisés. La qualité du produit est évaluée en particulier sur la base d'une inspection visuelle (pentes, coupe transversale et vues 3D). Ce contrôle a permis de souligner la présence locale d'artefacts, remarquables par l'existence de seuils/discontinuités verticales bathymétriques artificiels de quelques dizaines de centimètres dans la zone intertidale (Figure 10 A et C). Pour corriger cette discontinuité dans les données, inhérente au produit RGE ALTI® 1 m (IGN), une découpe et un lissage (nouvelle interpolation, locale, à une résolution moins fine) des données ont été réalisés sur la zone intertidale (Figure 10 B et D), avant une nouvelle interpolation.

Cette correction était nécessaire afin d'éviter d'éventuelles accélérations dans l'écoulement (ou décélérations) induites par ces discontinuités, et des résultats aberrants lors des simulations numériques.

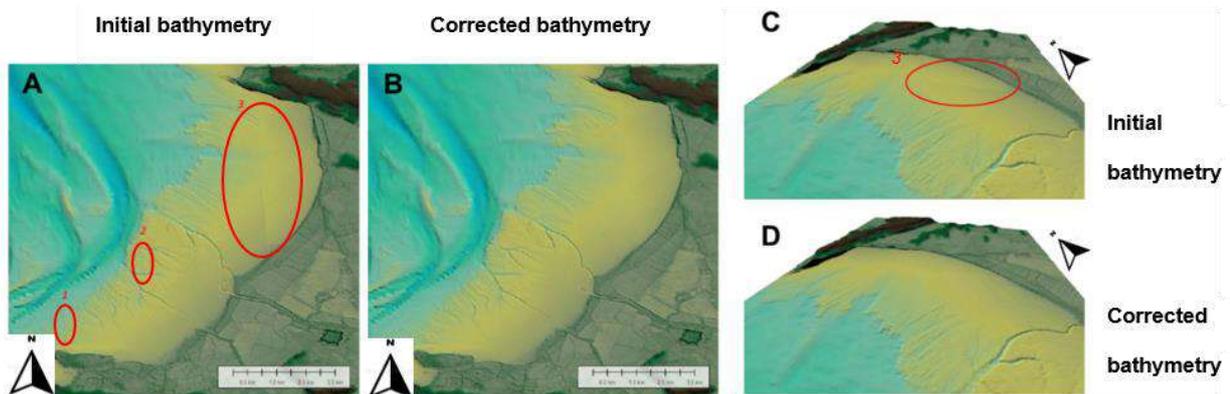


Figure 10: A) Grille topo-bathymétrique initiale présentant des seuils/discontinuités verticales dans la zone intertidale (entourées en rouge) ; B) Grille corrigée ; C) Vue oblique 3D de la discontinuité/du seuil n°3 ; D) Vue oblique 3D de la grille corrigée.

### 2.3.2. Caractéristiques du MNT

La grille finale correspond à un MNT topo-bathymétrique, continu terre-mer, dont l'emprise couvre le périmètre élargi de l'étude (notifié en rouge sur la Figure 9) et s'étend en mer jusqu'à une dizaine de mètres de profondeurs. La résolution spatiale de la grille obtenue est de 20 m x 20 m. Nous expliquons toutefois dans la section suivante que les données topographiques plus résolues seront mobilisées pour tenir compte d'éléments structurants tels que les digues.

Le MNT est calé verticalement par rapport au référentiel altimétrique légal IGN69, dans le système géodésique légal de France métropolitaine (RGF93), avec pour système de coordonnées projetées le Lambert-93.

## 2.4. PRISE EN COMPTE DES ELEMENTS STRUCTURANTS

Afin de prendre en compte les éléments structurants du MNT (linéaires surélevés bloquant les écoulements et linéaires plus bas les favorisant), une méthode de reconstruction automatique est utilisée. Elle permet de reconstruire les altitudes de crêtes des digues, routes et autres chenaux dans notre MNT de résolution 20 m x 20 m. Les différentes étapes sont décrites ci-après.

### 2.4.1. Etape 1 : Identification des éléments structurants (lignes de contraintes)

Une sélection basée sur le critère d'altitude de crête a permis de repérer les éléments qui auront réellement une influence sur le comportement hydraulique de la submersion : les digues de protection du marais et d'autres linéaires dits « hauts » dont l'altitude de crête contraint la propagation de la submersion, mais également les cours d'eau et canaux principaux (cf. Figure 11).

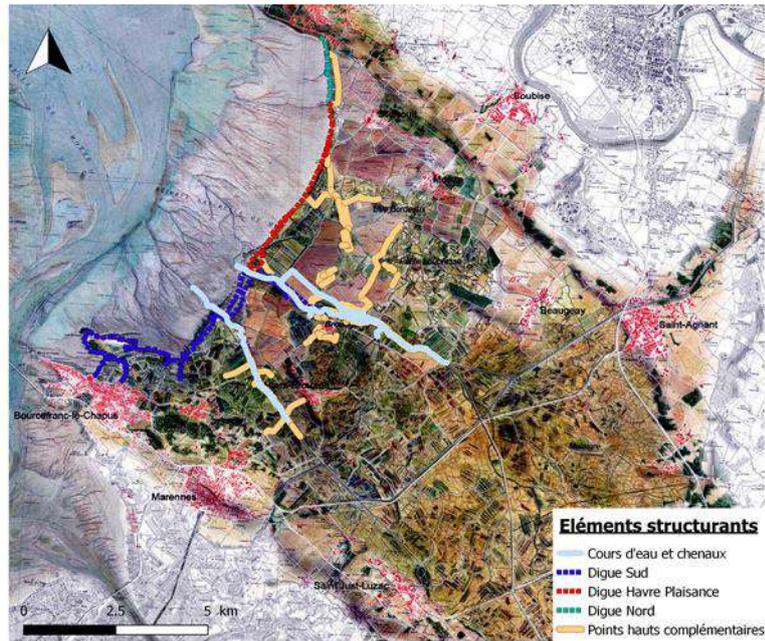


Figure 11: Eléments linéaires structurants identifiés.

#### 2.4.2. Etape 2 : Retouches automatiques des éléments structurants

L'algorithme de retouche automatique des éléments structurants se base sur l'utilisation conjointe d'un jeu de 3 MNT (moyenne, maximum et minimum) et des éléments structurants que l'on souhaite retoucher. Un schéma de principe de l'algorithme est présenté sur la Figure 12 ci-dessous :

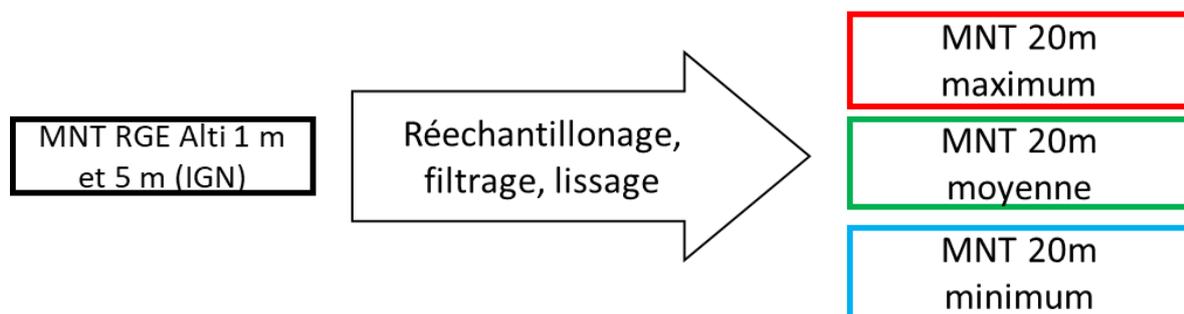


Figure 12: Schéma explicatif du passage du Litto3D à 1 m à un MNT (20 m x 20 m).

La méthode consiste à utiliser des données topographiques très résolues, dans notre cas il s'agit du RGE ALTI® à 1 m et à 5 m, pour en créer 3 moins résolus (ici 20 m x 20 m). Ces MNT couplés aux couches vectorielles d'éléments structurants à retoucher (digues, cours d'eau) permettent de créer un MNT de résolution 20 m facile à traiter par l'algorithme de retouche.

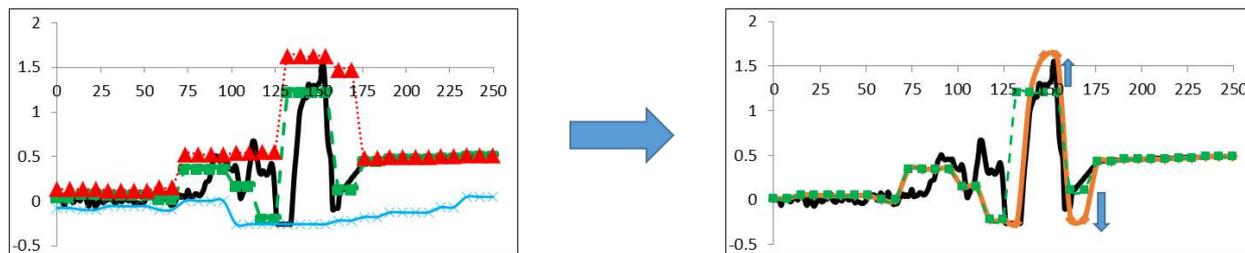


Figure 13: Méthode de reconstruction des éléments structurants. A gauche : En noir, est représenté le MNT réalisé à partir du RGE Alt 1m et 5 m et HOMONIM 20m (en mer), en rouge le MNT à 20m dit maximum permettant de considérer les « Zones bloquant l'écoulement » (remblais, routes, aménagements, points hauts ...), en vert le MNT 20m aux valeurs moyennes, en bleu le MNT 20m minimum permettant de prendre en compte les « Zones favorisant l'écoulement » (chenaux, rivières, canaux). A droite : en orange, le MNT final à 20m x 20m tenant compte des zones bloquant et favorisant l'écoulement.

La Figure 13 illustre la méthode de reconstruction des éléments structurants à partir des MNT représentant les côtes minimales, maximales et moyennes dans chaque cellule de 20 m \* 20 m : dans une maille où un élément structurant est identifié par la couche vectorielle, la valeur du MNT minimum pour les zones favorisant l'écoulement et la valeur du MNT maximum pour les zones bloquant l'écoulement est sélectionnée, le MNT moyen étant pris partout ailleurs. Cette méthode permet ainsi de tenir compte de tous les éléments structurants identifiés sur les données Lidar, malgré un ré-échantillonnage des données initiales au pas de 20 m \* 20 m (voir exemple sur la figure suivante).

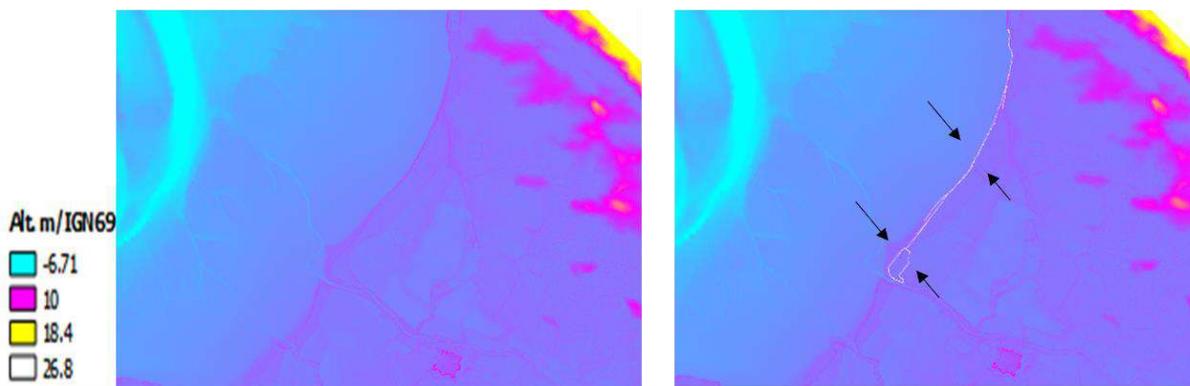


Figure 14: MNT moyen avant retouche de la digue Havre-Plaisance (gauche); MNT après retouches par maxima voisins sur la digue Havre-Plaisance, désignée par les flèches noires (droite).

Un MNT est représentatif d'une situation donnée, en termes d'éléments structurants (présence d'ouvrages de défense par exemple), il est donc nécessaire de réaliser autant de MNT que de scénarios d'aménagement. Pour les scénarios d'aménagement requérant la création ou l'arasement de digues, une démarche similaire à celle présentée précédemment, utilisant l'algorithme de construction automatique, a été suivie.

## 2.5. PRISE EN COMPTE DE L'OCCUPATION ET DES FROTTEMENTS SUR LE FOND ASSOCIES

### 2.5.1. Notion de rugosité/frottement et correspondance avec l'occupation du sol (OCS)

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 Strickler. 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, Goutx et Ladreyt 2001).

Dans un premier temps, un regroupement des typologies brutes OCS en une typologie adaptée à la modélisation de la submersion est effectué. Cette typologie a été créée à partir des données d'occupation du sol de Corine Land Cover (2012), auxquelles ont été ajoutées les données hydrographiques 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.

### 2.5.2. Prise en compte de la rugosité dans le modèle

Ensuite, la correspondance entre la typologie simplifiée d'occupation du sol et les coefficients de rugosité est établie (ici coefficients de Strickler) :

- Les valeurs prises pour les coefficients de Strickler dans les différentes simulations varient de  $4 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$  dans les zones de fort frottement (zones urbanisées denses) jusqu' à  $40\text{-}50 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$  pour les zones à faible frottement (fond marin, rivières...), comme présenté au Tableau 1 et à la Figure 15 ci-dessous.
- En milieu urbain, la valeur du coefficient de Strickler est abaissée afin de prendre en compte l'augmentation de la rugosité qui a pour objectif de tenir compte globalement et en moyenne de la densité d'obstacles aux écoulements (bâtiments, haies, aménagements et mobilier urbain...).

| Typologie simplifiée             | Coefficient de Strikler ( $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ) |
|----------------------------------|---|
| Tissus urbain très dense         | 4   |
| Tissus urbain dense              | 5   |
| Landes, broussailles             | 10  |
| Urbain, habitat                  | 10  |
| Forêts, Végétation hygrophyle... | 12  |
| Schorre                          | 15  |
| Herbiers marins                  | 20  |
| Terres cultivées                 | 20  |
| Polders                          | 22  |
| Sable et vasière                 | 25  |
| Urbain, industries etc.          | 25  |
| Espaces verts non agricoles      | 30  |
| Prairies, surfaces en herbe      | 30  |
| Réseaux routiers                 | 40  |
| Rivières et Plans d'eau          | 40  |
| Océan - Mer                      | 52  |

Tableau 1 : Exemple de coefficients de Strickler attribués en fonction de la typologie simplifiée d'occupation du sol.

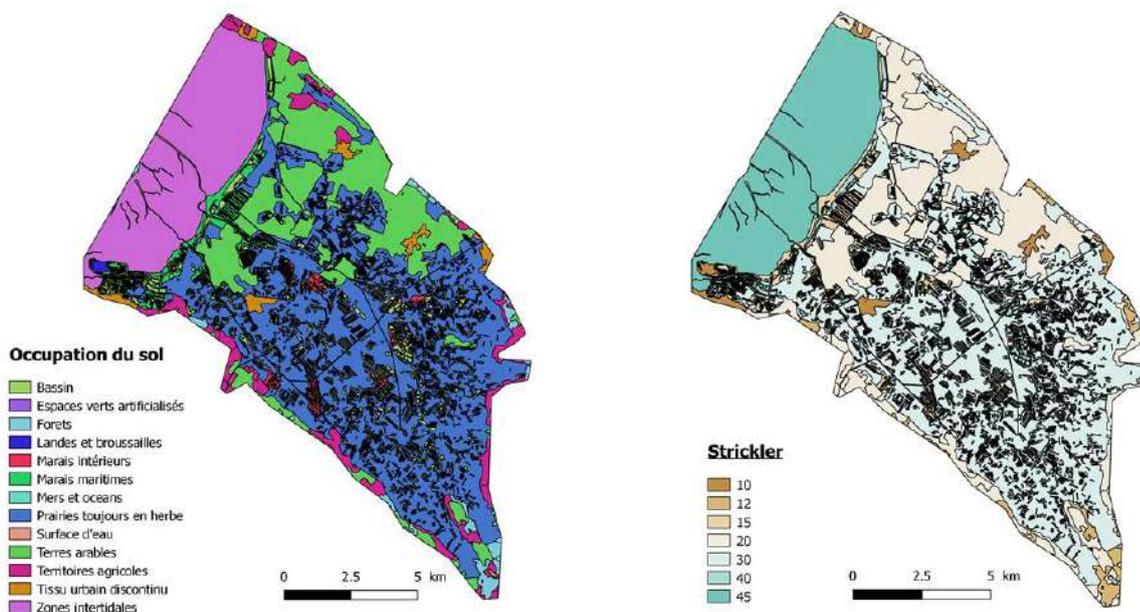


Figure 15: Correspondance entre la typologie simplifiée d'occupation du sol issue des bases de données Corine Land Cover 2012 et BD Topo (IGN) (gauche) et les coefficients de Strickler ( $m^{1/3}s^{-1}$ ) à droite dans le marais de Moëze.

Il est à noter qu'au début de l'étude, les données d'occupation du sol disponibles sont celles de la base Corine Land Cover de 2012. Depuis, une version plus récente de cette base a été diffusée (CLC 2018). La comparaison des deux versions des données Corinne Land Cover dans la zone ne montre que peu de changements de la typologie d'occupation des sols (cf. Figure 16), et n'entraîne pas de modification sur les coefficients de Strickler utilisés.

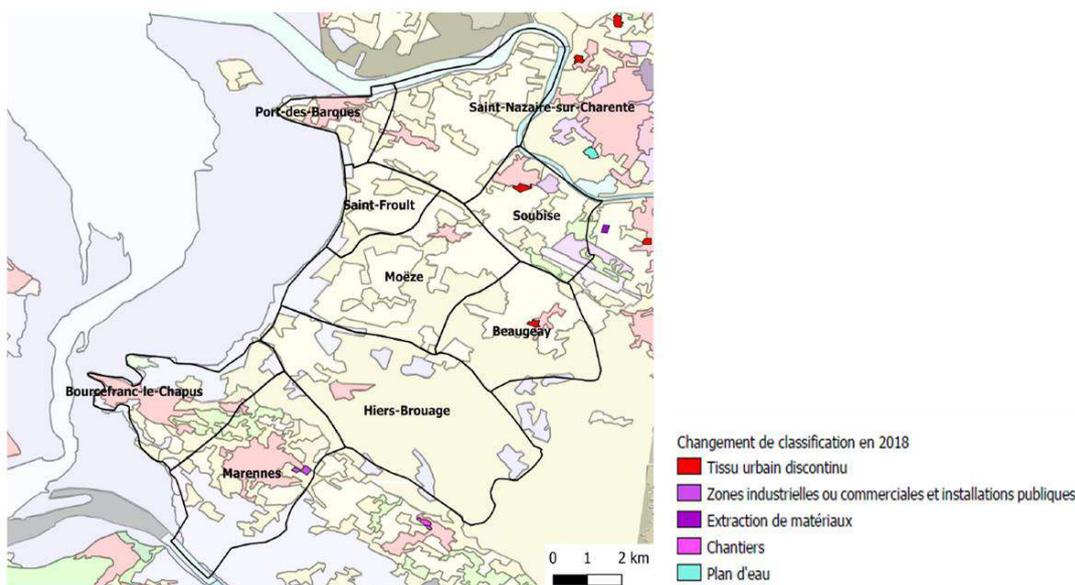


Figure 16: Comparaison de l'occupation du sol entre l'étude Corine Land Cover (2012) et la dernière version (CLC 2018). D'après GUAN Lili, et LOIL Amandine, étudiantes de l'ENSG (Ecole Nationale des Sciences Géographiques).

### 3. Mise en place du modèle par débordement

Les éléments disponibles (cf. paragraphe 1.3) montrent que la submersion sur le marais de Brouage se déroule essentiellement suivant des processus de débordement (niveau marin montant au-dessus de la crête des ouvrages de protection) et de brèches dans les digues, les vagues, ayant déferlé plus large, n'intervenant que par l'intermédiaire du wave setup. Il a donc été choisi de mettre en place un modèle de submersion par débordement (Modèle hydrodynamique MARS-2DH), de manière à obtenir des estimations réalistes de la submersion et des écoulements dans le marais, prenant notamment en compte la chronologie du débordement en lien avec les cycles de marée (voir Figure 17 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

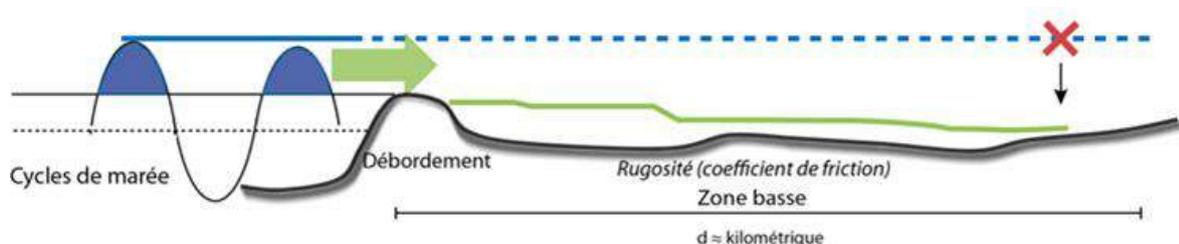


Figure 17: Schéma de principe de la méthodologie employée pour la propagation de la submersion marine : le niveau marin de référence (bleu continu) n'est pas simplement projeté sur la topographie (bleu pointillé) mais bien propagé suivant une dynamique de submersion (vert).

#### 3.1. MODELE MARS-2DH

##### 3.1.1. Description du code

Le code de calcul MARS (Model for Applications at Regional Scale) est un modèle numérique développé à l'IFREMER (Lazure et Dumas, 2007). Ce modèle est particulièrement adapté à la simulation des écoulements dans les régions côtières de l'océan, depuis l'échelle régionale jusqu'à l'échelle locale. Il peut ainsi prendre en compte le forçage des courants par la marée, les conditions météorologiques (vents, pression atmosphérique) et les gradients de densité. Les processus représentés par le modèle sont uniquement liés aux ondes longues (marée et surcote atmosphérique), les ondes courtes (houle et clapot) ne sont pas représentées.

Le modèle 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. La conservation de la quantité de mouvement et de la masse du système sont décrites dans le modèle par le système d'équations dit de Saint-Venant, qui sont ici résolues par une méthode en différences finies.

MARS-2DH 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 :

- de 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 des débits spécifiques, liés par exemple à la présence d'une rivière ;

- de conditions de forçages météorologiques (vent et pression) appliquées en chaque nœud du domaine du modèle.

Pour la modélisation de la submersion par débordement plus particulièrement, MARS-2DH 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).

Par ailleurs, le BRGM a développé dans MARS-2DH des routines, spécifiquement adaptées à la propagation des submersions pour l'élaboration des PPRL, capables de :

- calculer le *wave-setup* et les courants engendrés par les vagues par chainage avec un modèle spectral type WW3 (via les caractéristiques des vagues, dont les tensions de radiation) ;
- simuler les écoulements torrentiels faisant suite à des ruptures de digue avec formation de brèches ;
- prendre en compte le fonctionnement des dispositifs hydrauliques (singularités de type buses, seuils hydrauliques, écluses) par le biais de lois hydrauliques intégrées dans le modèle ;
- considérer les débits entrants suite à des franchissements de paquets de mer (calculés par ailleurs).

### 3.1.2. Implémentation et calibration/validation du modèle

La réalisation des simulations numériques nécessite de fournir au modèle plusieurs types de données :

- La grille (20 m \*20 m) du MNT topo-bathymétrique prenant en compte les éléments structurants (cf paragraphe 2.3 et 2.4) et représentant le domaine de calcul du modèle ;
- Les valeurs du coefficient de rugosité, dans chaque maille du domaine de calcul (cf paragraphe 2.5) ;
- Des conditions aux limites (conditions de forçages) imposées aux bords du domaine de calcul côté mer : il s'agit de l'évolution dans le temps du niveau marin (marée + surcote éventuellement).

Afin de valider le modèle, c.à.d vérifier que le MNT (et les valeurs des coefficients de rugosité) permet une représentation relativement fidèle de la réalité, il est nécessaire de confronter les résultats issus de la simulation à un évènement et des données réels. Le choix s'est porté sur un évènement extrême récent, et de référence (avec une période de retour évaluée à environ 200 ans, Bulteau et al., 2015) : la tempête Xynthia survenue du 27 au 28 février 2010, ayant conduit à une importante submersion marine au sein du marais de Brouage. Cet évènement extrême est relativement bien documenté (mesures de marégraphes et études numériques) et un survol aérien, réalisé quelques jours après la tempête par Artélia, a permis de cartographier l'emprise des zones submergées au sein du marais.

Pour simuler cet évènement, la série temporelle de l'évolution du niveau marin qui sert à forcer le modèle hydrodynamique est issue des mesures du marégraphe La Rochelle – La Palice de cet évènement et représente 5 cycle de marée. Mais le niveau d'eau maximal atteint par Xynthia étant différent le long des côtes françaises (dû à des effets locaux, induits par la bathymétrie, la configuration de la côte...), ces données mesurées ont été normées puis « recalées » au niveau de leur maximum afin d'obtenir un niveau d'eau maximal égal à 4.43 m NGF devant les digues du marais de Brouage, tel que modélisé par Bertin et al. (2012). Ce niveau maximal de 4.43 m NGF intègre la marée, la surcote atmosphérique et la surcote liée aux vagues (*wave setup*) du fait de leur déferlement à l'entrée des pertuis (pour information la surcote atmosphérique au pic

de la tempête Xynthia, mesurée au marégraphe de La Rochelle-La Palice, était d'environ + 1.5 m).

Une des principales difficultés rencontrées pour modéliser de façon réaliste cet évènement concerne la prise en compte des ouvrages de défense du marais de Brouage. Nous savons en effet que pendant la tempête Xynthia, certains tronçons de digues ont été endommagés et ont connu la formation de brèches, accroissant fortement les quantités d'eau pénétrant dans le marais. Or aucune information n'a pu être recueillie sur la localisation, la taille et la dynamique de développement de ces brèches pendant la tempête. De plus la cote initiale des ouvrages, avant Xynthia, n'est pas connue, puisque les données topographiques disponibles (levés Lidar de 2011) sont postérieures à Xynthia, après réfection et surélévation d'une partie des digues du marais.

Plusieurs simulations, avec différentes hypothèses quant aux ouvrages de défense (présence / absence de brèches dans les ouvrages ; différentes cotes considérées), ont ainsi dû être réalisées afin d'obtenir une emprise de submersion comparable à celle observée suite à Xynthia. L'hypothèse retenue a consisté à prendre le MNT moyen pour représenter les cotes des digues de défense du marais (voir paragraphe 2.4).

Finalement, nous modélisons une surface inondée de 30,09 km<sup>2</sup> (Figure 18) contre 28,75 km<sup>2</sup> observés (soit une erreur relative de 4.7%). A titre de comparaison, Breilh (2014) retrouvait une surface inondée de 41,16 km<sup>2</sup> avec une approche statique basée sur les données SIG. Bertin et al., (2014) montrait également une surestimation de la surface inondée dans la zone du marais de Brouage après mise en place d'une chaîne de calcul par modélisation hydrodynamique.

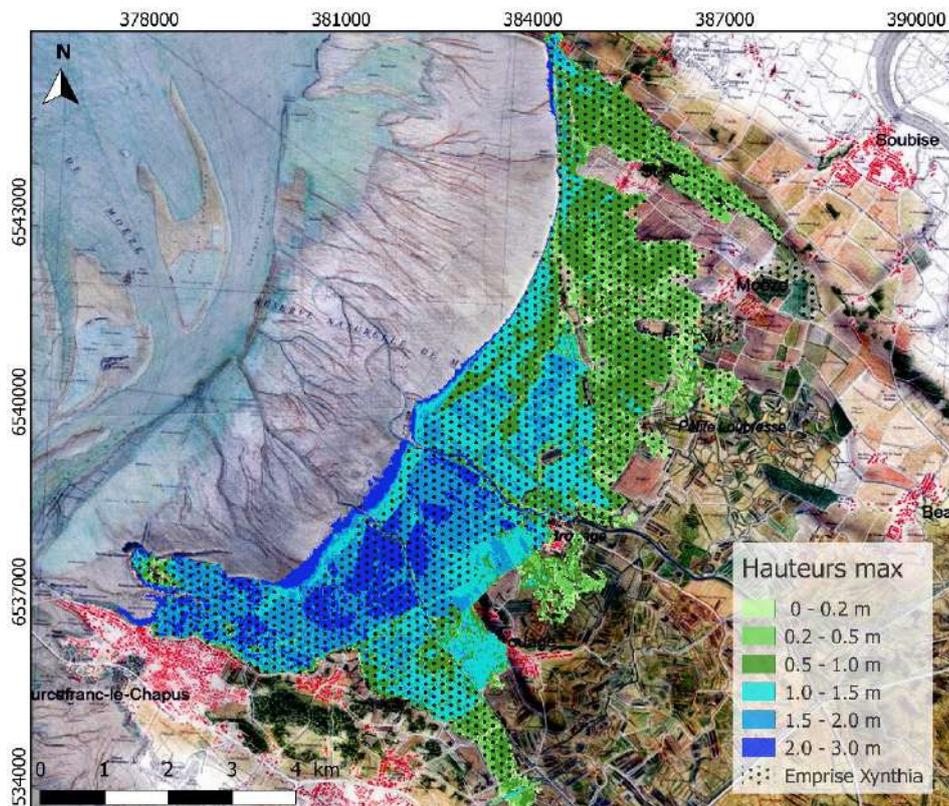


Figure 18: Zone d'extension de la submersion observée suite à la tempête Xynthia (2010) en pointillés (Artélia); et hauteurs maximales simulées pour des conditions de tempête Xynthia. Le fond de carte est une étude paysagère du marais réalisée par Bento & Blanc de l'École Nationale Supérieure de Paysage (2017).

Cette comparaison, relativement correcte, des résultats simulés avec les observations en termes d'emprise de submersion marine, permet donc de vérifier que les éléments structurants à l'intérieur du marais sont bien pris en compte dans le MNT.

### 3.2. PRISE EN COMPTE DES CONDITIONS DE MAREE

Dans cette étude diverses conditions de marée sont prises en compte, non seulement pour des conditions atmosphériques normales, mais également tempétueuses (voir section précédente). Ces conditions de marée sont prises au port de **référence** le plus proche, dans notre cas La Rochelle – La Palice (cf. Figure 19) :

- Pour la tempête Xynthia (27 et 28/02/2010), la série temporelle qui sert à forcer le modèle hydrodynamique est calculée à partir des mesures issues du marégraphe La Rochelle – La Palice (« recalée » à sa valeur maximale, telle que modélisée par Bertin et al.(2012) et incluant la composante de marée, la surcote atmosphérique et le wave setup, voir paragraphe 3.1.2.) ;
- Sous conditions atmosphériques normales (i.e qui n'induisent pas de surcote atmosphérique), les séries temporelles sont issues des prédictions de marée fournies par le Shom.

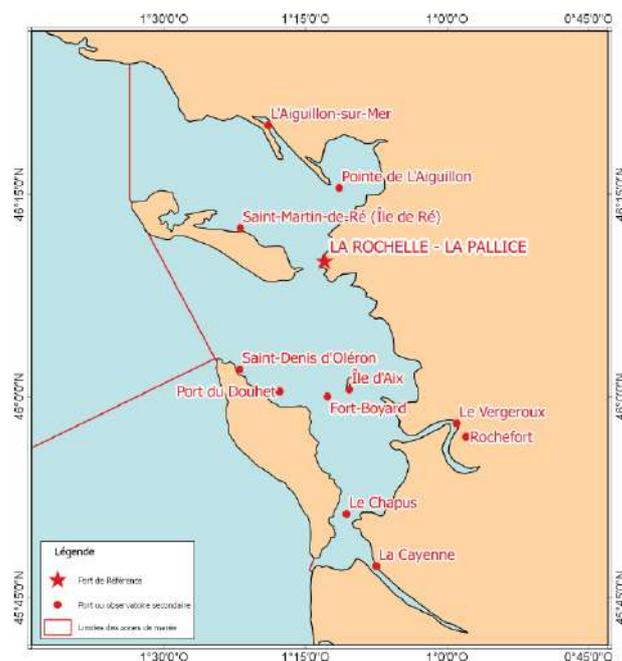


Figure 19: Cartes des sites de la zone de marée des Pertuis Charentais. Port de référence et observatoires permanents dans la zone. Source : RAM (Shom, 2017).

Pour rappel, à un coefficient de marée donné, peuvent correspondre, pour un même port, plusieurs hauteurs d'eau prédites. Pour les simulations sans forçage atmosphérique, nous avons donc appliqué en entrée du modèle, des séries temporelles constituées d'au moins deux pleines mer (PM). Ces deux PM couvrent la gamme des hauteurs d'eau prédites pour un coefficient de marée donné. Par exemple, au coefficient de marée 95 correspondent des hauteurs d'eau prédites comprises en 2.25 m NGF (valeur minimale) et 2.9 m NGF (valeur maximale) au marégraphe de La Rochelle – La Palice entre 1996 et 2015. Afin de simuler des conditions équivalentes à un coefficient de marée 95, une série temporelle synthétique intégrant ces valeurs de PM a été créée pour forcer le modèle.

Pour les conditions plus rarement atteintes, la Plus Haute Mer Astronomique (PHMA) notamment, nous avons appliqué une prédiction Shomar proche de cet état, à savoir des prédictions de marée à coefficient 118 et 119.

En outre, l'analyse des prédictions de marée fournies par le Shom sur la période 1996-2015 (cf. Figure 20) nous apprend que les forts coefficients de marée (au-dessus de 115) ne surviennent en moyenne que 2 fois par an soit 1 jour/an (car ~2 PM/jour). La survenue des pleines mers de vives-eaux (coefficient de marée supérieur ou égal à 95) est beaucoup plus fréquente avec une moyenne de 86 PMVE / an soit 43 jours/an ou 11,8% du temps.

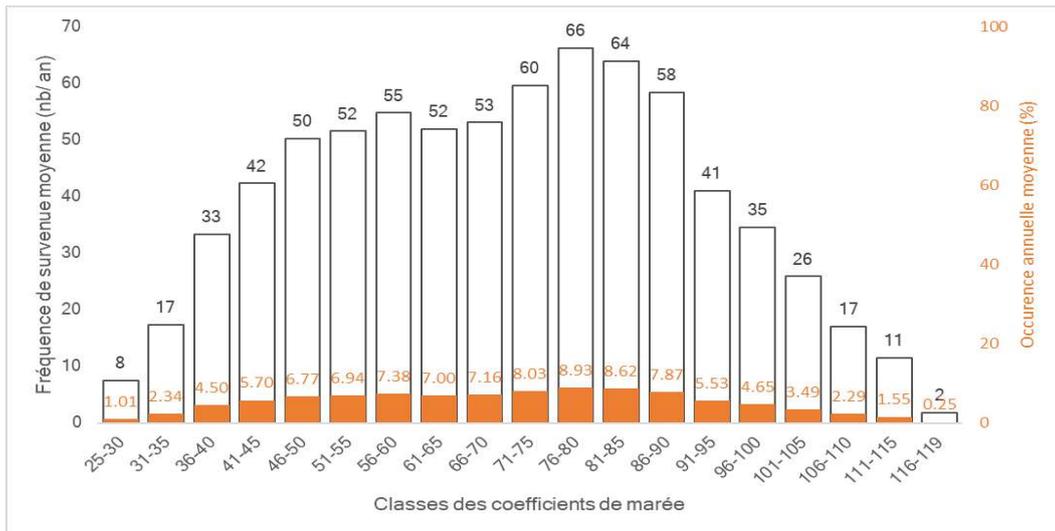


Figure 20: Survenue moyenne annuelle (en noir) et occurrence moyenne annuelle (en orange) des marées prédites entre 1996 et 2015. Les données sont fournies par le Shom (SHOMAR, édition 2014-2015).

A partir des données de marée prédites à la Rochelle pour l'année 2015, à un pas de temps de 5 minutes (SHOMAR, édition 2014-2015), nous avons calculé le temps annuel (et le pourcentage de temps par an) durant lequel une tranche altimétrique donnée est sous le niveau de la mer (sous l'effet de la seule marée). Le Tableau 2 suivant présente ainsi pour chaque tranche altimétrique le nombre de jours cumulé de submersion par an et le pourcentage de temps de submersion cumulé sur une année.

| Conditions de marée actuelle à la Rochelle (SHOM 2019)       | Tranche altimétrique considérée (m NGF) |      | Nombre de jours cumulé de submersion par an | Pourcentage de temps cumulé de submersion par an |
|--|---|------|---|--|
|  |   |      |   |  |
| <b>Niveau des plus basses mers astronomiques</b>             | -3.4                                    | -3.2 | 365.00                                      | 100.00   |
|  | -3.2                                    | -3   | 364.83                                      | 99.95  |
|  | -3                                      | -2.8 | 363.94                                      | 99.71  |
|  | -2.8                                    | -2.6 | 362.42                                      | 99.29  |
| <b>Niveau des basses mers de vives-eaux</b>                  | -2.6                                    | -2.4 | 360.23                                      | 98.69  |
|  | -2.4                                    | -2.2 | 357.49                                      | 97.94  |
|  | -2.2                                    | -2   | 353.21                                      | 96.77  |
|  | -2                                      | -1.8 | 345.57                                      | 94.68  |
|  | -1.8                                    | -1.6 | 336.41                                      | 92.17  |
|  | -1.6                                    | -1.4 | 326.53                                      | 89.46  |
|  | -1.4                                    | -1.2 | 315.26                                      | 86.37  |
| <b>Niveau des basses mers de mortes-eaux</b>                 | -1.2                                    | -1   | 303.39                                      | 83.12  |
|  | -1                                      | -0.8 | 290.26                                      | 79.52  |
|  | -0.8                                    | -0.6 | 275.59                                      | 75.51  |
|  | -0.6                                    | -0.4 | 262.20                                      | 71.84  |
|  | -0.4                                    | -0.2 | 249.95                                      | 68.48  |
|  | -0.2                                    | 0    | 238.04                                      | 65.22  |
|  | 0                                       | 0.2  | 225.94                                      | 61.90  |
| <b>Niveau moyen</b>  | 0.2                                     | 0.4  | 213.56                                      | 58.51  |
|  | 0.4                                     | 0.6  | 200.51                                      | 54.93  |
|  | 0.6                                     | 0.8  | 186.53                                      | 51.10  |
|  | 0.8                                     | 1    | 171.02                                      | 46.86  |
|  | 1                                       | 1.2  | 153.44                                      | 42.04  |
|  | 1.2                                     | 1.4  | 132.32                                      | 36.25  |
| <b>Niveau des pleines mers de mortes-eaux (Coef 45)</b>      | 1.4                                     | 1.6  | 107.04                                      | 29.33  |
|  | 1.6                                     | 1.8  | 84.41                                       | 23.13  |
|  | 1.8                                     | 2    | 63.97                                       | 17.53  |
|  | 2                                       | 2.2  | 45.92                                       | 12.58  |
|  | 2.2                                     | 2.4  | 29.55                                       | 8.10   |
| <b>Niveau des pleines mers de vives-eaux (Coef. 95)</b>      | 2.4                                     | 2.6  | 15.77                                       | 4.32   |
|  | 2.6                                     | 2.8  | 8.34  | 2.28   |
|  | 2.8                                     | 3    | 4.16  | 1.14   |
|  | 3                                       | 3.2  | 1.43  | 0.39   |
| <b>Niveau des plus hautes mers astronomiques (Coef. 120)</b> | 3.2                                     | 3.4  | 0.26  | 0.07   |

Tableau 2 : Durée cumulée annuelle de submersion potentielle par tranche altimétrique, calculée par rapport aux références altimétriques du port de La Rochelle pour l'année 2015 (SHOMAR édition 2014-2015 et RAM 2019 du SHOM).

### 3.3. PRISE EN COMPTE DE L'ÉLEVATION DU NIVEAU DE LA MER

Les résultats de simulation présentés dans la suite de l'étude prennent en compte l'élévation du niveau de la mer (**ENM** dans la suite) en lien avec le changement climatique. En effet, après concertation avec le Conservatoire du Littoral, 3 cas sont considérés :

- un état zéro ou actuel, sans prise en compte de l'élévation du niveau de la mer ;
- une élévation correspondant à une projection régionale à l'horizon 2030 ;
- une élévation correspondant à une projection régionale à l'horizon 2050.

Des élévations de **+18 cm** à l'horizon 2030 et **+36 cm** en 2050 ont été considérées. Ces valeurs sont estimées par Le Cozannet et al. (2018) à l'échelle régionale pour la côte de Nouvelle Aquitaine, pour un scénario de changement climatique « pessimiste » RCP<sup>1</sup> 8.5 (Church et al., 2013). Ces projections régionales ont été calculées en utilisant le marégraphe pérenne de La Rochelle-La Pallice.

Pour ce faire, Le Cozannet et al. (2018) ont utilisé les projections fournies par Kopp et al. (2014) auxquelles ils ont appliqué une correction de subsidence (mouvements verticaux du sol). Ils ont supposé que les projections probabilistes d'ENM au port de référence de La Rochelle étaient applicables à l'ensemble côte de Nouvelle Aquitaine, une fois corrigées des mouvements verticaux du sol locaux<sup>2</sup>. Après concertation avec le Conservatoire du Littoral, le choix a été fait de retenir les valeurs vraisemblables hautes (cf. Figure 21) préférentiellement à celles issues du 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC<sup>3</sup> (IPCC en anglais) et reprises par l'ONERC<sup>4</sup> (2015), car elles sont plus pénalisantes et régionalisées, et en supposant en début d'étude que les valeurs vraisemblables hautes seraient plus proches de celles qui étaient alors à paraître dans le rapport spécial du GIEC (SROCC, 2019). Sur la base de la littérature récente, cette hypothèse est en accord avec les projections régionales issues du SROCC<sup>5</sup> (Thiéblemont et al., 2019). En effet, en considérant les projections du SROCC sur la borne supérieure de la gamme probable du scénario RCP8.5, les valeurs sont évaluées entre [0,15-0,17m] d'ici 2030 dans le Golfe de Gascogne, alors qu'elles sont comprises entre [0,12-0,13m] lorsqu'elles sont dérivées du rapport AR5-IPCC. De la même manière, les valeurs de la limite supérieure sont évaluées entre [0,31-0,34m] d'ici 2050 dans le Golfe de Gascogne, alors qu'elles sont comprises entre [0,24-0,26m] lorsqu'elles sont dérivées du 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC.

---

<sup>1</sup> RCP signifie Representative Concentration Pathway et désigne le forçage radiatif induit par le changement climatique à l'horizon 2100.

<sup>2</sup> Les mouvements verticaux du sol peuvent être corrigés grâce à des antennes GNSS (GPS) colocalisées ou très proches des marégraphe. Plusieurs GPS sont présents sur la côte de Nouvelle Aquitaine : <https://www.sonel.org/GPS-24-.html?lang=fr>

<sup>3</sup>GIEC ou Groupement d'Expert Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (en anglais : Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)

<sup>4</sup> ONERC : Observatoire National sur les Effets du Changement Climatique

<sup>5</sup> Nous invitons le lecteur à tester le démonstrateur de projections régionales du niveau de la mer mis en place par le BRGM dans le cadre des projets de recherche ECLISEA et INSeaPTION: [BRGM: Regional sea level changes](#)

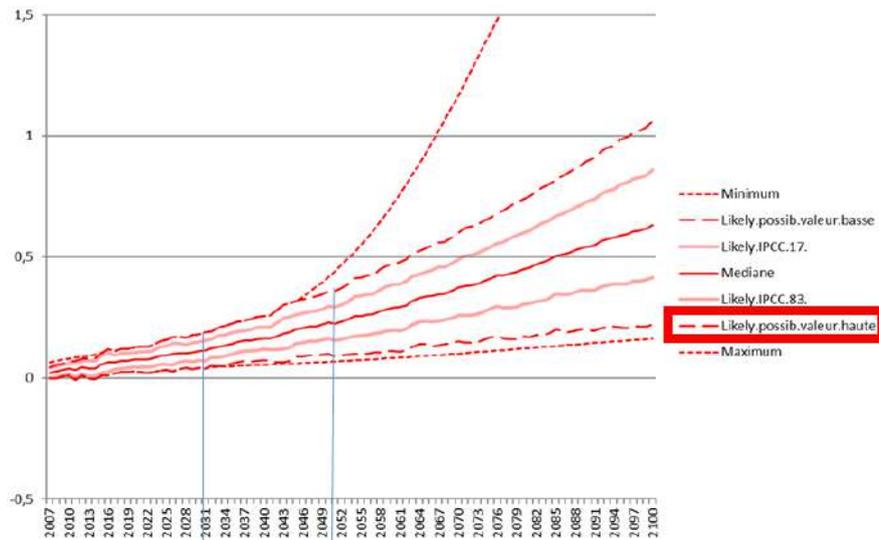


Figure 21: Elévation du niveau de la mer et projections entre 2007 et 2100 pour le scénario RCP 8.5. Sont représentées les projections médiane, à intervalles de confiance 17 et 83% de l'IPCC ainsi que les valeurs hautes et basses vraisemblables. Les traits bleus verticaux indiquent les années 2030 et 2050. Données fournies par Le Cozannet et al (2018).

En considérant au final, et aux arrondis près, une élévation du niveau marin de l'ordre de + 20 cm à l'horizon 2030 et + 40 cm à l'horizon 2050, on peut réévaluer les durées de submersion cumulées par an par tranche altimétrique à ces horizons temporels (Tableau 3).

Cette estimation montre, par exemple, que le niveau d'eau des pleines mers de vives-eaux (2.597 m NGF à La Rochelle), atteint et dépassé actuellement pendant 15.77 jours par an (soit 4.32 % de l'année) le sera respectivement pendant 29.55 jours par an (soit 8.10 % de l'année) à l'horizon 2030 et pendant 45.92 jours par an (soit 12.58 % de l'année) à l'horizon 2050. De la même manière, le niveau des plus hautes mers astronomiques (3.36 m NGF à La Rochelle) atteint actuellement pendant 0.07 jours par an (soit environ 1.7 heures), le sera pendant 0.39 jours par an (soit environ 9.4 heures) à l'horizon 2030 et pendant 1.14 jours par an (soit environ 27.4 heures) à l'horizon 2050.

| Tranche altimétrique considérée (m NGF) |      | Nombre actuel de jours cumulé de submersion par an | Pourcentage actuel de temps cumulé de submersion par an | Pourcentage de temps cumulé de submersion par an en 2030 (+ 20 cm) | Pourcentage de temps cumulé de submersion par an en 2050 (+ 40 cm) |
|---|------|--|---|--|--|
| -3.4                                    | -3.2 | 365.00   | 100.00  | 100.00   | 100.00   |
| -3.2                                    | -3   | 364.83   | 99.95   | 100.00   | 100.00   |
| -3                                      | -2.8 | 363.94   | 99.71   | 99.95  | 100.00   |
| -2.8                                    | -2.6 | 362.42   | 99.29   | 99.71  | 99.95  |
| -2.6                                    | -2.4 | 360.23   | 98.69   | 99.29  | 99.71  |
| -2.4                                    | -2.2 | 357.49   | 97.94   | 98.69  | 99.29  |
| -2.2                                    | -2   | 353.21   | 96.77   | 97.94  | 98.69  |
| -2                                      | -1.8 | 345.57   | 94.68   | 96.77  | 97.94  |
| -1.8                                    | -1.6 | 336.41   | 92.17   | 94.68  | 96.77  |
| -1.6                                    | -1.4 | 326.53   | 89.46   | 92.17  | 94.68  |
| -1.4                                    | -1.2 | 315.26   | 86.37   | 89.46  | 92.17  |
| -1.2                                    | -1   | 303.39   | 83.12   | 86.37  | 89.46  |
| -1                                      | -0.8 | 290.26   | 79.52   | 83.12  | 86.37  |
| -0.8                                    | -0.6 | 275.59   | 75.51   | 79.52  | 83.12  |
| -0.6                                    | -0.4 | 262.20   | 71.84   | 75.51  | 79.52  |
| -0.4                                    | -0.2 | 249.95   | 68.48   | 71.84  | 75.51  |
| -0.2                                    | 0    | 238.04   | 65.22   | 68.48  | 71.84  |
| 0                                       | 0.2  | 225.94   | 61.90   | 65.22  | 68.48  |
| 0.2                                     | 0.4  | 213.56   | 58.51   | 61.90  | 65.22  |
| 0.4                                     | 0.6  | 200.51   | 54.93   | 58.51  | 61.90  |
| 0.6                                     | 0.8  | 186.53   | 51.10   | 54.93  | 58.51  |
| 0.8                                     | 1    | 171.02   | 46.86   | 51.10  | 54.93  |
| 1                                       | 1.2  | 153.44   | 42.04   | 46.86  | 51.10  |
| 1.2                                     | 1.4  | 132.32   | 36.25   | 42.04  | 46.86  |
| 1.4                                     | 1.6  | 107.04   | 29.33   | 36.25  | 42.04  |
| 1.6                                     | 1.8  | 84.41  | 23.13   | 29.33  | 36.25  |
| 1.8                                     | 2    | 63.97  | 17.53   | 23.13  | 29.33  |
| 2                                       | 2.2  | 45.92  | 12.58   | 17.53  | 23.13  |
| 2.2                                     | 2.4  | 29.55  | 8.10  | 12.58  | 17.53  |
| 2.4                                     | 2.6  | 15.77  | 4.32  | 8.10   | 12.58  |
| 2.6                                     | 2.8  | 8.34   | 2.28  | 4.32   | 8.10   |
| 2.8                                     | 3    | 4.16   | 1.14  | 2.28   | 4.32   |
| 3                                       | 3.2  | 1.43   | 0.39  | 1.14   | 2.28   |
| 3.2                                     | 3.4  | 0.26   | 0.07  | 0.39   | 1.14   |
| 3.4                                     | 3.6  | 0.00   | 0.00  | 0.07   | 0.39   |
| 3.6                                     | 3.8  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.07   |

Tableau 3 : Durée cumulée annuelle de submersion potentielle par tranche altimétrique, actuelle, à l'horizon 2030 (+ 20 cm d'élévation) et à l'horizon 2050 (+ 40 cm d'élévation).

## 4. Comparaison de différents scénarios d'aménagement

Cette comparaison de différents scénarios d'aménagement de la bande littorale a été réalisée en deux phases distinctes.

En effet, alors que l'objectif initial de cette action (voir paragraphe 1.3.) était d'étudier les conséquences, en terme de submersion marine, de trois scénarios de gestion du trait de côte sur la zone s'afférant aux terrains appartenant au Conservatoire du Littoral du secteur de Moëze (voir Figure 3, périmètre rapproché), les premiers résultats obtenus, par simulations numériques ont rapidement montré que la réflexion sur ces scénarios d'aménagement devait être portée à l'échelle globale du marais de Brouage pour être cohérent (voir Figure 3, périmètre élargi).

Ainsi dans ce chapitre seront d'abord présentés les résultats obtenus pour les différents scénarios d'aménagement du marais de Moëze (au niveau de la RNN de Moëze-Oléron). A partir de ces résultats, la zone d'étude sera étendue à l'ensemble du marais de Brouage, pour laquelle trois nouveaux scénarios d'aménagement seront étudiés.

### 4.1. AMENAGEMENTS A L'ECHELLE DES TERRAINS DU CONSERVATOIRE

#### 4.1.1. Scénarios considérés

##### ***Scénario 1 - Résister : Maintien de la digue de premier rang***

Dans ce scénario, la digue Havre-Plaisance (située devant les terrains du Conservatoire, voir Figure 22) est surélevée afin d'empêcher tout débordement pour un évènement de type Xynthia. Pour ce faire, la cote de la digue est considérée comme « infinie » dans les simulations (dans la réalité une cote de l'ordre de 4.60 m NGF serait suffisante pour le niveau marin moyen actuel ; même si réglementairement une cote d'au moins 4.80 m NGF serait préconisé ; pour rappel le niveau maximal atteint devant les marais de Brouage lors de Xynthia était de 4.43 m NGF, Bertin et al. 2012).

Les autres digues au nord et au sud des terrains du Conservatoire sont maintenues en l'état. Les cotes des digues sud sont celles mesurées par le bureau d'études Artélia en 2015 (lorsque cette donnée est disponible, voir Figure 22), pour tous les autres tronçons de digues (digues au nord des terrains du Conservatoire notamment) les cotes retenues correspondent au maxima locaux observés sur les données Lidar de 2011 (voir paragraphe 2.4.).

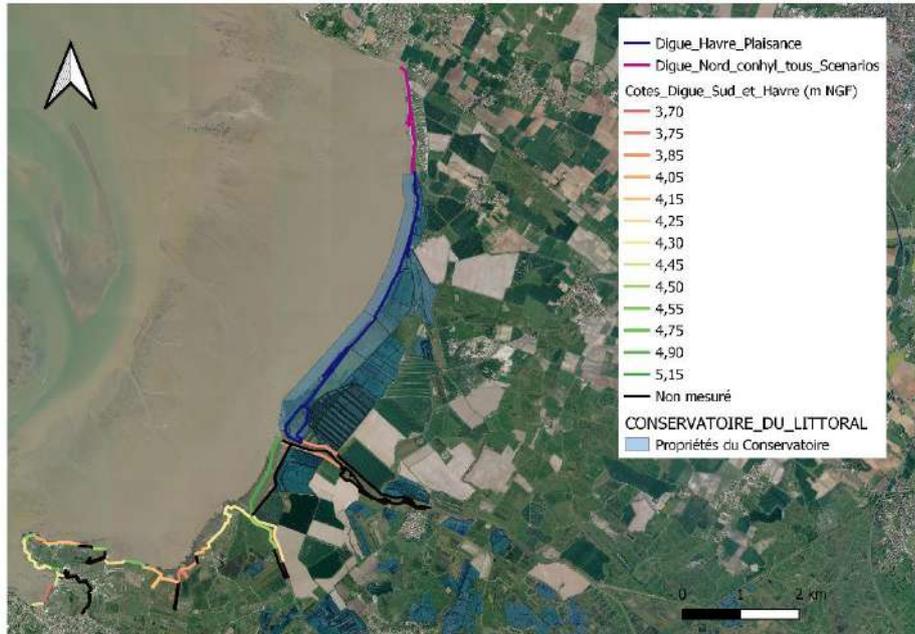


Figure 22 : Ouvrages de défense côtière considérés dans le scénario 1.

### **Scénario 2 – Laisser-faire : suppression de la digue du Havre-Plaisance**

Il est supposé ici que la brèche déjà existante (apparue en 2018) ne sera pas réparée et qu'au cours des différents cycles de marée et tempêtes, la brèche va s'élargir et se creuser jusqu'à faire disparaître la totalité de la digue devant les terrains du Conservatoire. Cette hypothèse peu réaliste à très court terme (mais probable à moyen terme) permet en fait d'envisager la situation la plus défavorable.

Ainsi pour les simulations numériques, la digue actuelle est « effacée » sur le MNT, pour obtenir une pente douce et régulière entre les domaines marin et terrestre.

Les digues au nord et au sud, comme précédemment, sont maintenues à l'identique (Figure 23).

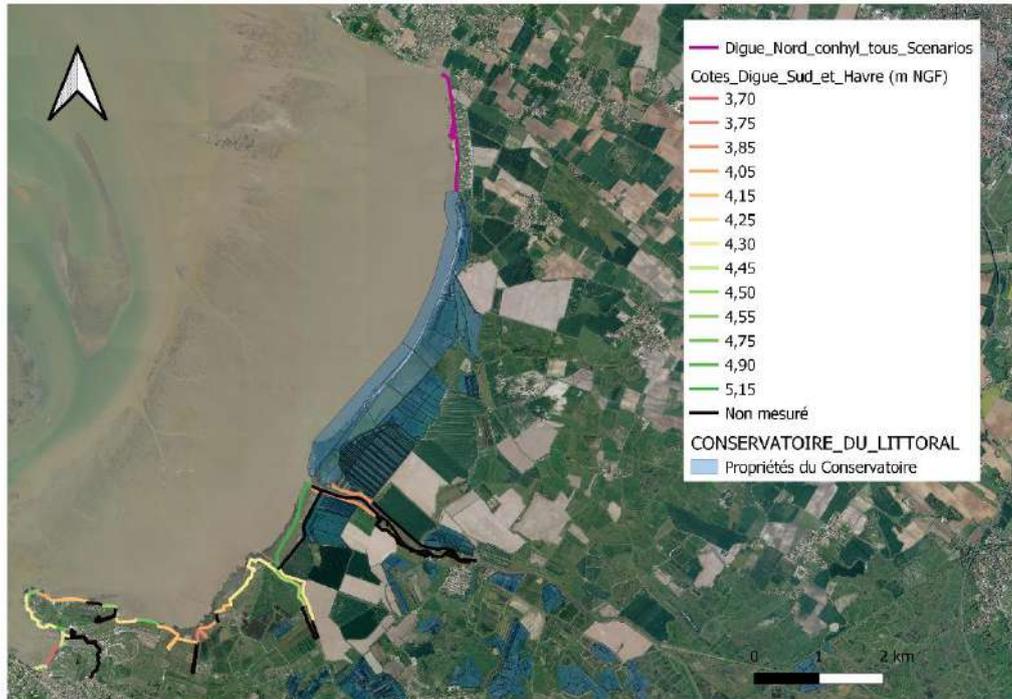


Figure 23 : Ouvrages de défense côtière considérés dans le scénario 2.

### **Scénario 3 – S’adapter : Création d’une digue en arrière du trait de côte**

Pour ce scénario, trois positions de digue en retrait ont été envisagées dans l’idée de bénéficier d’une zone tampon permise par les milieux naturels devant ces dernières (voir Figure 24) ; les autres ouvrages considérés étant similaires au scénario 2 (digue Havre-Plaisance effacée et autres digues maintenues). A noter que pour éviter les entrées d’eau au nord de la digue de 2<sup>nd</sup> rang (voir les résultats du scénario 1 dans la partie suivante), plusieurs possibilités ont été étudiées : soit un rehaussement de la dune, soit l’ajout d’une nouvelle digue derrière la dune pour faire le lien entre la digue de 2<sup>nd</sup> rang et la digue en enrochement protégeant les installations conchylicoles. Ces deux possibilités sont illustrées sur la figure suivante « Digue\_complément\_Scénario3 ».

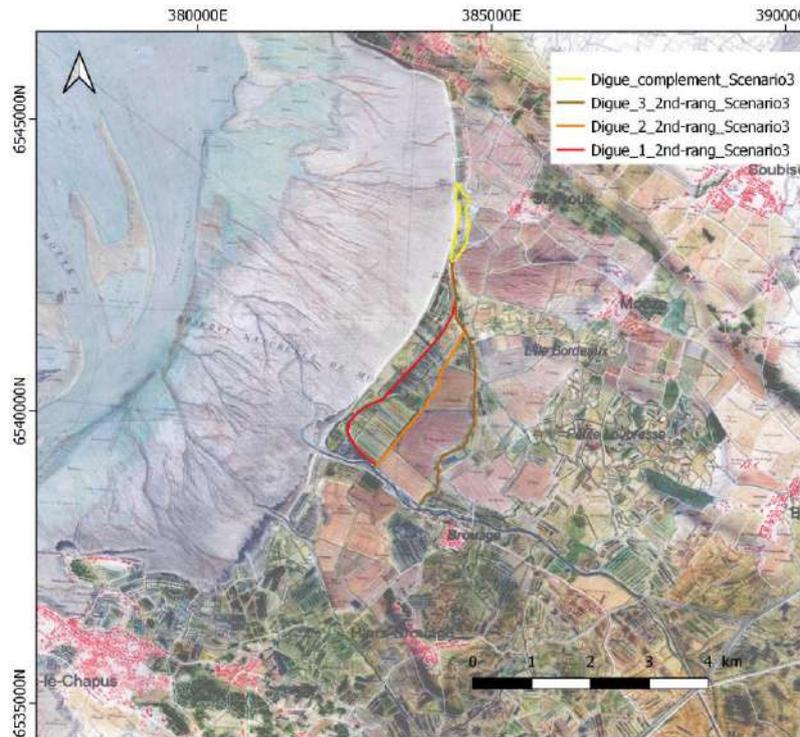


Figure 24 : Positions des différentes digues rétro-littorales considérées dans le scénario 3.

#### 4.1.2. Résultats des simulations numériques

##### **Scénario 1 : Maintien et surélévation de la digue de premier rang devant les terrains du Conservatoire**

La Figure 25 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente la hauteur d'eau maximale simulée à terre pour des conditions similaires à l'événement extrême Xynthia (voir paragraphe 3.1.2.).

Bien que la hauteur de la digue Havre Plaisance empêche tout débordement direct, des submersions relativement locales des terrains du Conservatoire sont tout de même observées au nord et au sud de la digue. Au nord, la submersion est due à la présence d'une zone plus basse et d'un ouvrage hydraulique entre la digue des terrains du Conservatoire et la digue en enrochement protégeant les installations conchylicoles. Dans la partie sud des terrains du Conservatoire, la submersion se propage via le Havre de Brouage et inonde une partie de la Tanne Ronde.

Ce premier résultat montre que la réfection de la digue des terrains du Conservatoire (à une hauteur supérieure au niveau marin atteint par Xynthia) ne suffit pas à protéger totalement ces terrains de la submersion marine. Si toute submersion devait être évitée, pour un événement extrême similaire à Xynthia, des aménagements complémentaires seraient à prévoir sur le Havre de Brouage (ouvrage hydraulique empêchant les entrées marines et/ou digues le long des berges) et à la jonction entre la digue du Conservatoire et la digue en enrochement devant les installations conchylicoles.

La simulation montre que l'emprise de la submersion dans la partie sud du marais de Brouage (au sud du Havre de Brouage) est bien moindre que celle observée (ou modélisée, voir paragraphe 3.1.2.) suite à Xynthia. Cette différence s'explique par le fait qu'aucune brèche n'est

considérée dans les digues dans les simulations (alors que plusieurs brèches étaient apparues pendant Xynthia), et également que les digues actuelles ont été rehaussées dans la partie sud sur certains tronçons suite à Xynthia.

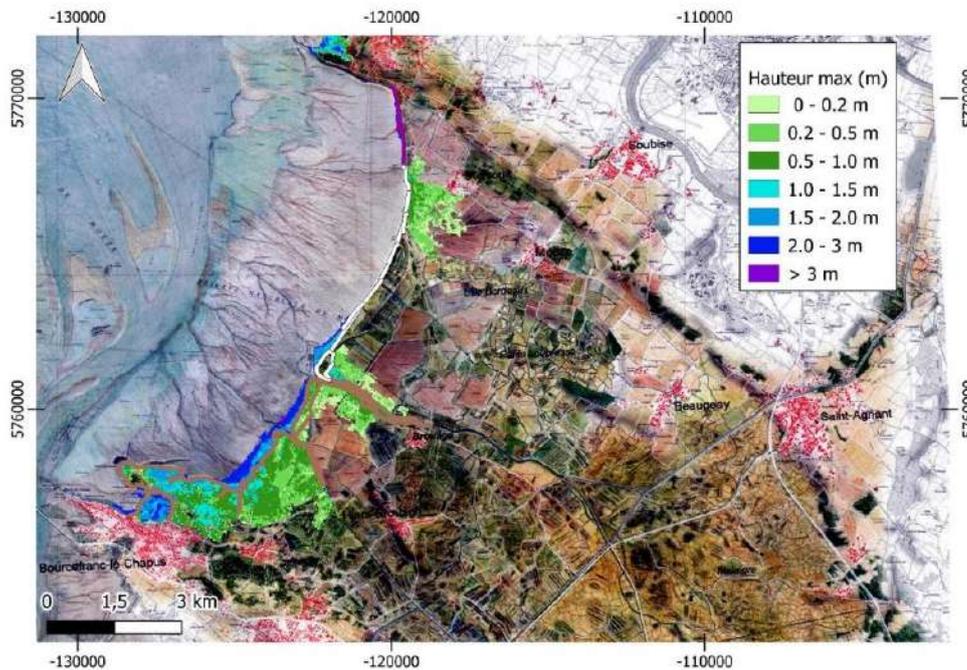


Figure 25: Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions hydrométéorologiques extrêmes de type tempête Xynthia dans le scénario 1 « actuel » (digue Havre-Plaisance réhaussée, autres digues dans leur état actuel, sans prise en compte de l'élévation du niveau de la mer).

### **Scénario 2 : Suppression de la digue du Havre-Plaisance**

Les simulations ont montré que la submersion des polders débute, en l'absence de digue, pour un niveau marin équivalent à ceux observés lors des Pleine Mer de Vive Eau (PMVE, correspondant à un coefficient de marée de 95). Ce résultat est en accord avec les observations de terrain menées début 2019 : la brèche existante, peu développée latéralement et en profondeur, laisse pénétrer la mer pour des niveaux marins du même ordre.

A l'opposé, la zone maximale submergée, hors conditions de tempête, a été évaluée en simulant un niveau marin proche de la Plus Haute Mer Astronomique (PHMA ou coefficient 120). Ces résultats, pour des conditions actuelles et à l'horizon 2030 et 2050, sont présentés sur la Figure 26. Il est d'ailleurs intéressant de noter que dans la partie centrale du marais, la PHMA à l'horizon 2050 induit une submersion d'emprise similaire à celle observée suite à Xynthia.

Les niveaux marins proches de la PMVE sont atteints ou dépassés entre 80 et 130 pleines mers par an (voir partie 3.2.). Ceux s'approchant de la PHMA sont atteints 1 à 2 pleines mers par an au maximum et définissent la position du trait de côte. Ces éléments et les simulations numériques correspondantes permettent donc d'apprécier l'emprise et l'évolution de la zone « re-maritimisée » ou reconnectée à la mer. Pour ces conditions de marée prédite, les niveaux d'eau restent globalement inférieurs aux cotes des digues de la partie sud du marais, sauf près de le Chapus, entraînant une submersion très locale.

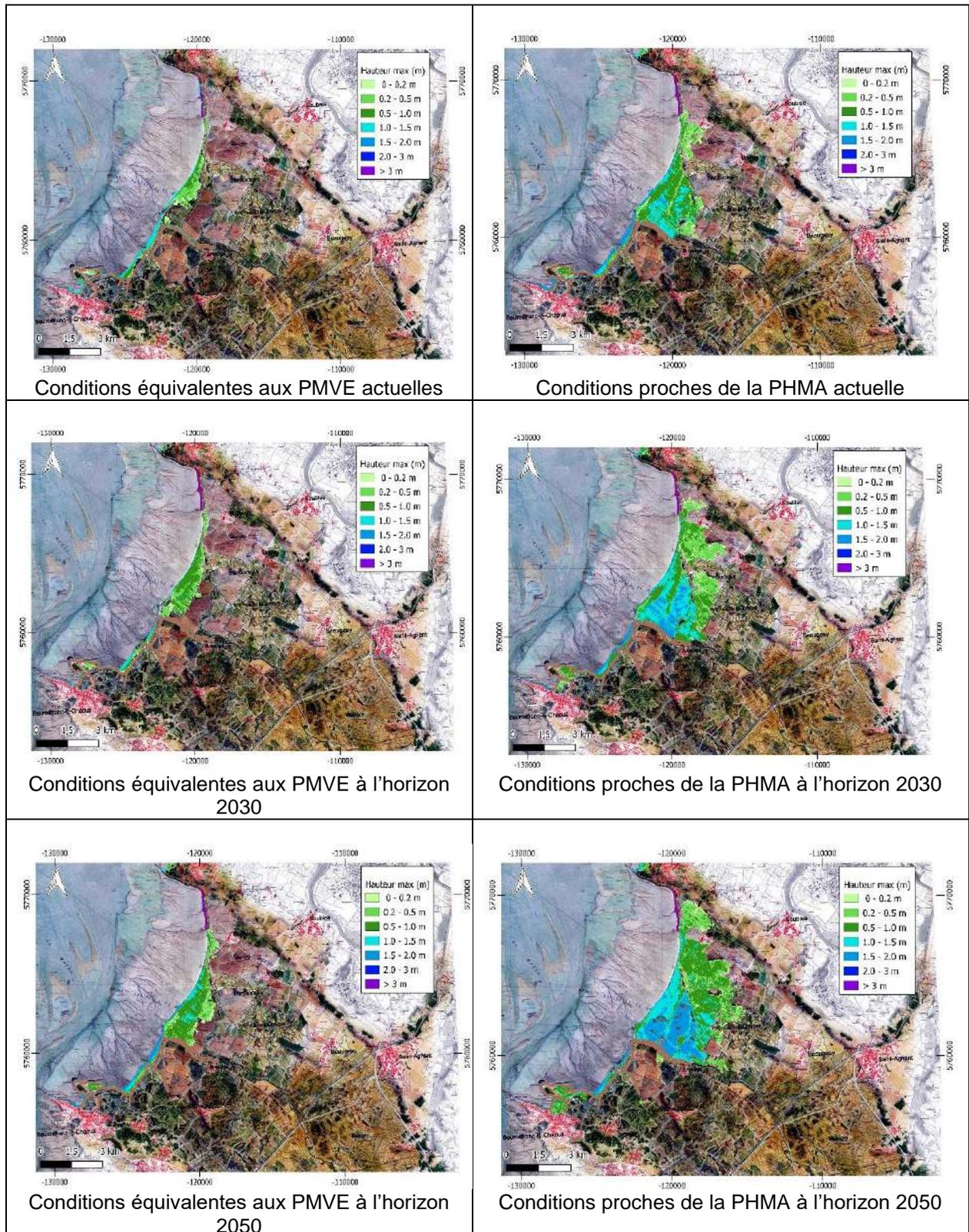


Figure 26 : Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions hydrométéorologiques normales (hors tempête) dans le scénario 2 : à gauche PMVE actuelles, à horizon 2030 et 2050 ; à droite PHMA actuelle, à horizon 2030 et 2050.

Les résultats de ces simulations numériques en conditions normales (PMVE et PHMA) actuelles et aux horizons 2030 et 2050, en termes d'emprise de submersion, et leur fréquence d'occurrence annuelle ont permis la réalisation d'une cartographie prospective d'habitats de la zone reconnectée dans le cadre d'une étude menée par la LPO gestionnaire de la RNN (Fouin et al., 2020).

Pour ce scénario d'aménagement, des conditions hydrométéorologiques extrêmes ont également été considérées. Une simulation de la tempête Xynthia a ainsi été réalisée pour le niveau marin actuel (Figure 27). Sans ouvrage de protection devant les terrains du Conservatoire, la submersion induite par la tempête Xynthia est beaucoup plus importante que celle subie en 2010. L'emprise submergée dans la partie centrale dépasse la route reliant Moëze à Brouage, alors que Xynthia s'y était arrêté en 2010. On peut également remarquer que la submersion dans la partie du sud du Havre de Brouage est légèrement supérieure en terme d'emprise à celle simulée dans le scénario 1 (voir Figure 25 entre le Havre de Brouage et le Canal de Merignac), montrant une influence du débordement en rive droite du Havre sur la submersion en rive gauche.

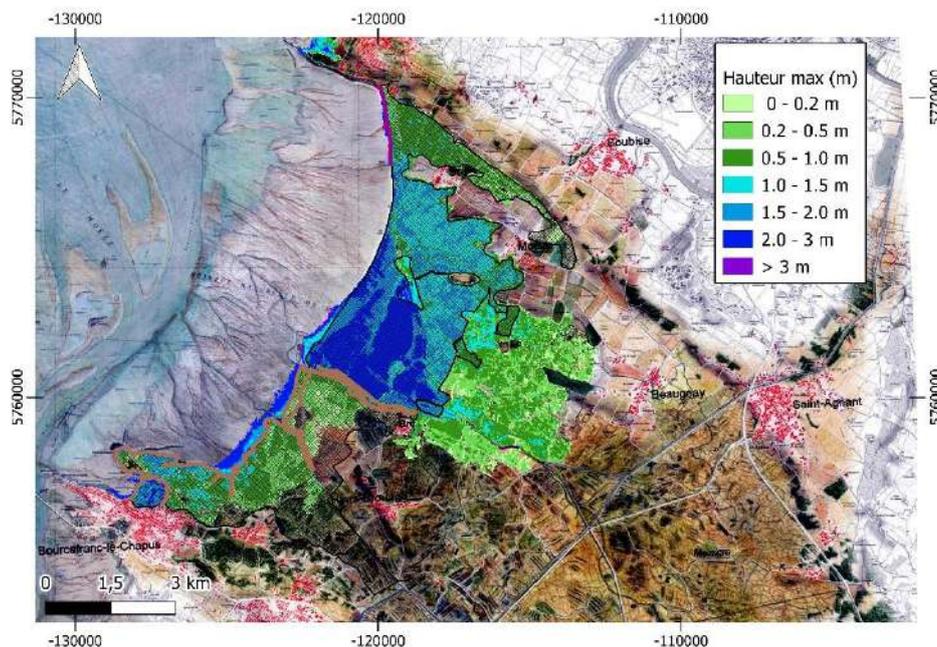


Figure 27 : Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions hydrométéorologiques extrêmes de type tempête Xynthia dans le scénario 2 (niveau marin actuel, sans prise en compte de l'élévation du niveau de la mer).

### Scénario 3 : Création d'une digue rétro-littorale

Les trois positions de la digue rétro-littorale ont été simulées pour des conditions extrêmes correspondant à la tempête Xynthia (voir les 3 figures suivantes). Il n'est en effet pas nécessaire d'étudier les submersions pour des conditions de marée normale, les résultats seraient très similaires à ceux du scénario 2, l'emprise submergée étant restreinte à la zone entre la digue actuelle (ou le trait de côte) et la digue rétro-littorale.

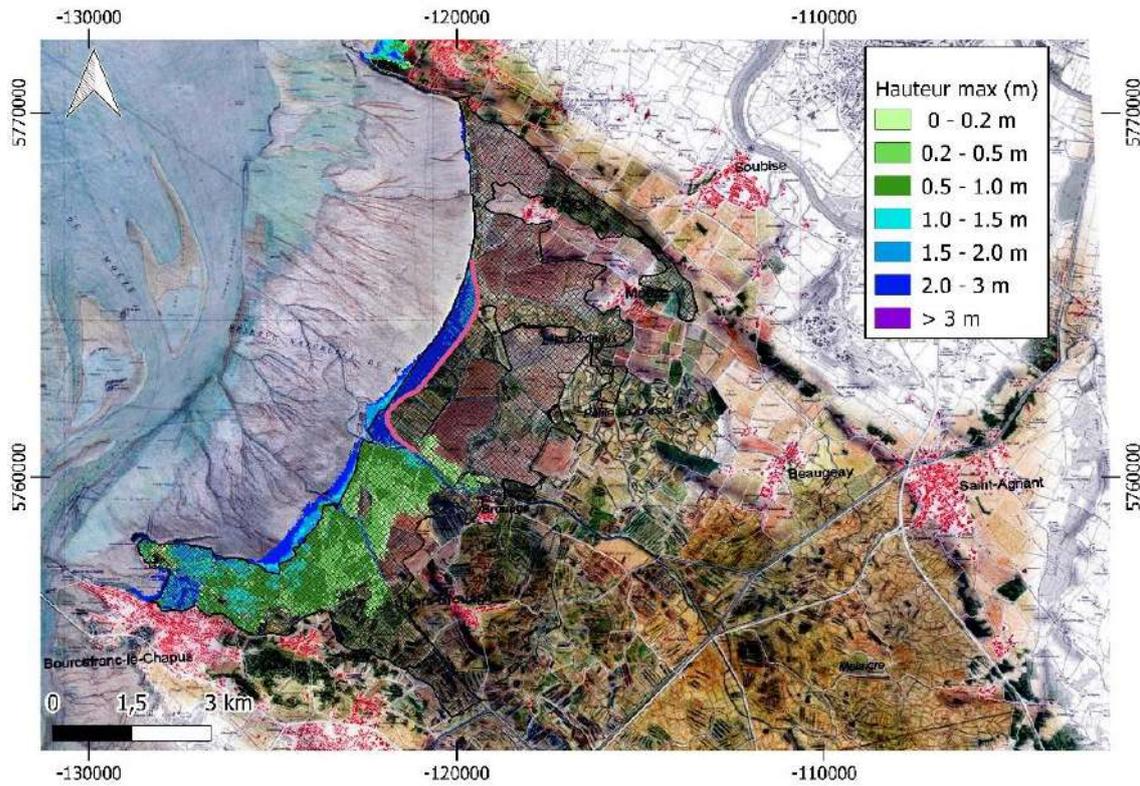


Figure 28: Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions extrêmes de type tempête Xynthia avec le niveau marin actuel dans le scénario 3 (digue rétro-littorale la plus aval).

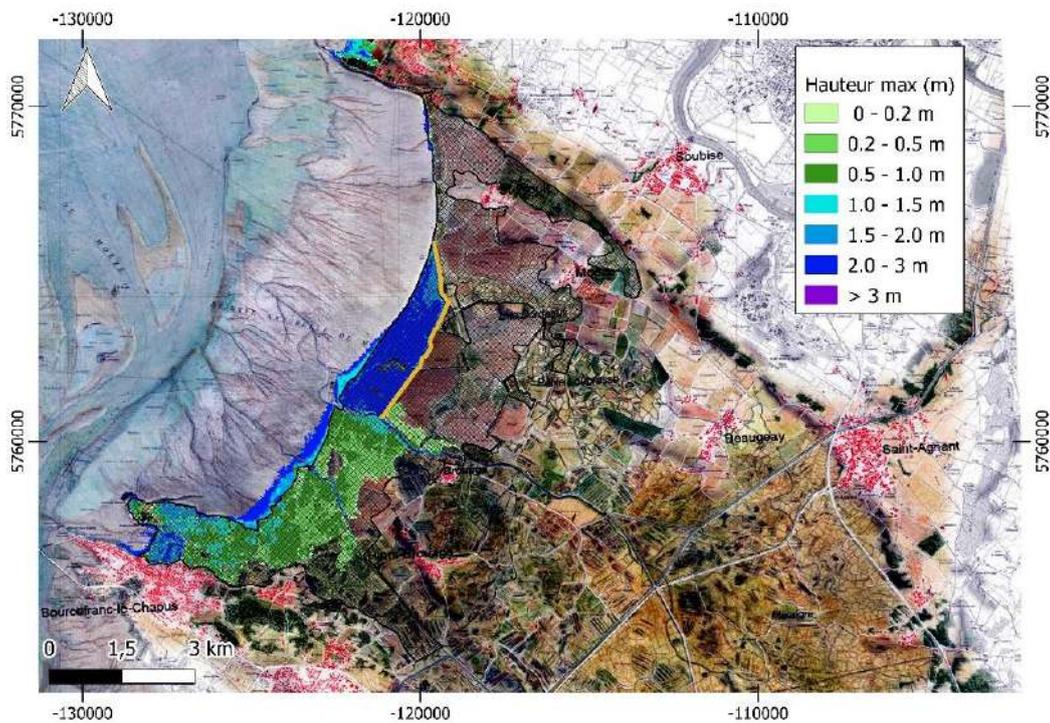


Figure 29: Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions extrêmes de type tempête Xynthia avec le niveau marin actuel dans le scénario 3 (digue rétro-littorale intermédiaire).

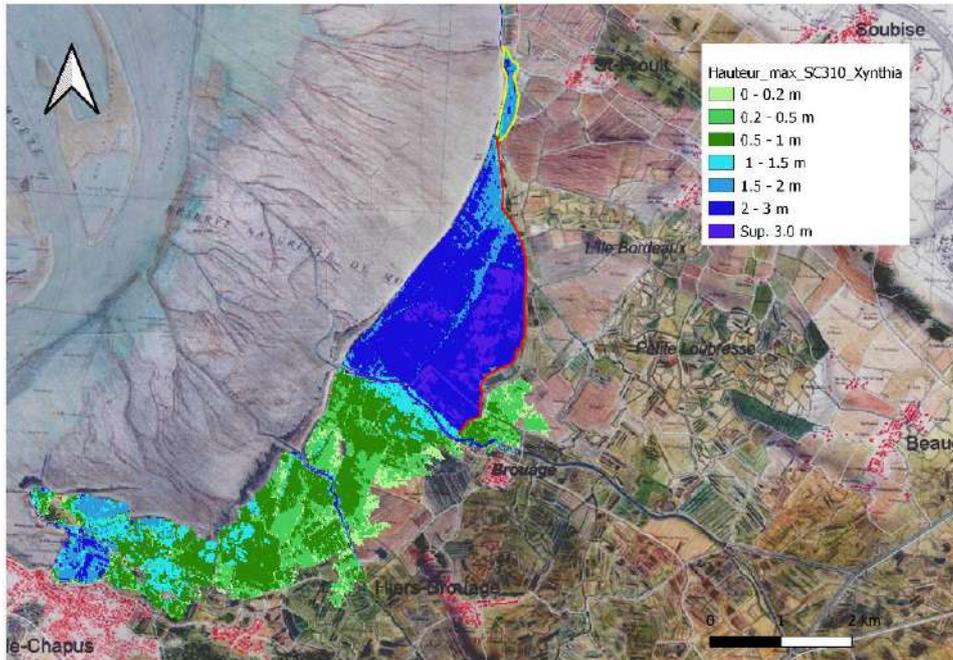


Figure 30 : Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions extrêmes de type tempête Xynthia avec le niveau marin actuel dans le scénario 3 (digue rétro-littorale la plus amont).

Ces résultats permettent de mettre en avant plusieurs phénomènes :

- Quelle que soit la position de la digue rétro-littorale, une submersion peut se produire en arrière de l'ouvrage sur les terrains du Conservatoire, via le Havre de Brouage. La digue en elle-même ne protège donc pas totalement de la submersion et des ouvrages seraient à prévoir le long du Havre pour éviter ce phénomène.
- Les tracés de la digue rétro-littorale simulés accroissent légèrement la submersion de la zone située entre le Havre de Brouage et le canal de Mérignac (par rapport à la situation avec digue de premier rang et sans digue de premier rang : scénarios 1 et 2). Plus la digue rétro-littorale est en retrait par rapport à la côte et plus ce phénomène est important. En effet, outre le fait que les digues rétro-littorales limitent l'étalement de l'eau, la forme des tracés testés canalise l'onde de marée vers le sud, entraînant des apports supplémentaires d'eau dans cette zone.
- Ces simulations permettent également de montrer que le niveau marin maximal atteint devant les digues reste sensiblement le même quelle que soit la position de la digue arrière (voir Figure 31), la création d'une zone d'expansion pour la submersion n'ayant que peu d'impact sur les hauteurs d'eau, en particulier devant les ouvrages de protection, du fait du niveau marin atteint durant Xynthia, trop important pour la superficie des zones d'expansion.



Figure 31 : Extension de la submersion et cotes maximales simulées du plan d'eau (m NGF) pour des conditions extrêmes de type tempête Xynthia avec le niveau marin actuel dans le scénario 3 (digue rétro-littorale la plus amont).

Afin de limiter la submersion derrière la digue rétro-littorale, via le Havre de Brouage, différentes longueurs de digues placées sur la rive droite du Havre ont été testées par simulations numériques. Cette digue doit remonter assez en amont pour être efficace, et avancer également un peu en aval de la digue rétro-littorale pour limiter l'apport d'eau de la zone dépoldérisée dans le Havre de Brouage (Figure 32).

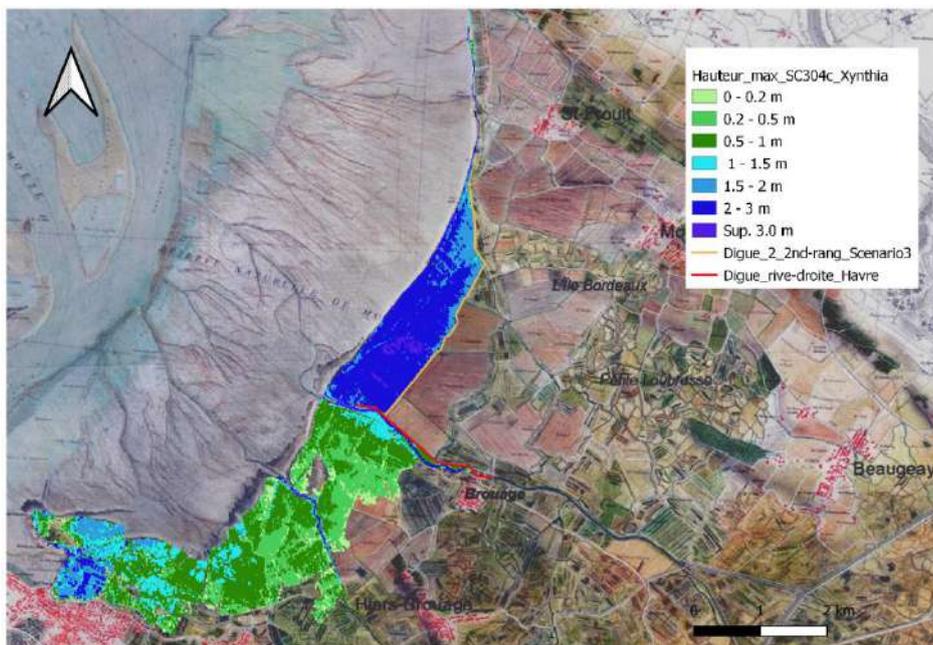


Figure 32 : Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions extrêmes de type tempête Xynthia avec le niveau marin actuel dans le scénario 3 (digue rétro-littorale intermédiaire) et ajout d'une digue sur la rive droite du Havre de Brouage.

### 4.1.3. Comparaison des coûts de construction et d'entretien des différents scénarios d'aménagements

Dans cette partie, les coûts de construction et d'entretien des ouvrages de premier rang du scénario 1 et d'une digue rétro-littorale du scénario 3 (position intermédiaire) sont estimés et comparés. L'évaluation de ces coûts est basée sur une étude des coûts de travaux de reconstruction réalisés en France suite à Xynthia (CEREMA, 2018).

Il est important de noter ici que les coûts évalués ne représentent que des ordres de grandeur assez grossiers, une évaluation plus précise nécessiterait en effet de nombreuses données et études supplémentaires (expertise sur l'état des ouvrages présents, étude de sols pour les fondations, disponibilité et coûts de transport des matériaux nécessaires...).

#### **Coûts de construction et d'entretien des ouvrages**

Les coûts observés de construction, de confortement et d'entretien pour les 3 principaux types d'ouvrages rencontrés dans la partie nord du marais (à savoir digue en terre sans parement, digue avec parement en enrochement et cordon dunaire) sont donnés en euros par mètre linéaire dans les trois tableaux suivants.

| <b>Travaux de construction, reconstruction, réfection</b> |  |
|---|--|
| <b>Technique</b>  | <b>Coût linéaire (€/m)</b>                                 |
| Terrassement  | 420<br>(hauteur de 1,3 m y compris fondation)              |
|   | 900<1000<1200<br>(hauteurs de 2 à 3 m y compris fondation) |
| <b>Travaux de confortement</b>                            |  |
| Terrassement – Travaux « en continu »                     | 250<260<300<br>(hauteur de 2 à 3 m)                        |
|   | 500<550<600<br>(hauteur de 3 à 4 m)                        |
| Terrassement – Travaux ponctuels                          | 100<140<200<br>(hauteur variable de 2 m environ)           |
| <b>Travaux d'entretien ou de réparation</b>               |  |
| Terrassement  | 30<60<90<br>(hauteurs de 2 m environ)                      |

Tableau 4 : Digue sans parement (couts observés), CEREMA 2018.

| <b>Travaux de construction, reconstruction, réfection</b> |  |
|---|--|
| <b>Technique</b>  | <b>Coût linéaire (€/m)</b>                   |
| Terrassement et enrochements                              | 2000<2500<3100<br>(hauteurs de 2 à 3 m)      |
| <b>Travaux de confortement</b>                            |  |
| Terrassement et enrochements- reprise générale du profil  | 840<1100<1400<br>(hauteur de 3,5 à 5 m)      |
| Terrassement et enrochements – rehausse (# 1m)            | 250<275<310<br>(hauteur variable de 2 à 7 m) |
| <b>Travaux d'entretien ou de réparation</b>               |  |
| Terrassement et enrochements – Travaux en continu         | 420<460<540<br>(hauteurs de 2 à 3 m)         |
| Terrassement et enrochements – Travaux ponctuels          | 20<100<250<br>(hauteurs de 1 à 4 m)          |

Tableau 5 : Digue avec parement en enrochement (coûts observés), CEREMA 2018.

| <b>Objet de l'opération</b>                           | <b>Techniques employées</b>                   | <b>Coût linéaire global (€/m)</b> |
|---|---|-----------------------------------|
| Création de cordon dunaire                            | Apport massif de sable                        | 300<500<700                       |
|   | Bourrelet d'amorçage                          | 220                               |
| Réhabilitation et confortement de cordon dunaire      | Apport massif en front de mer                 | 250<290<320                       |
|   | Interventions sur cordons dunaires intérieurs | 100                               |
| Fermeture de cordon dunaire et intervention d'urgence | Apport de sable                               | 70                                |

Tableau 6 : Cordon dunaire (coûts observés), CEREMA 2018.

### ***Digue de premier rang versus digue de second rang***

- **Réhabilitation de la digue protégeant les terrains du Conservatoire**

Afin de protéger efficacement les terrains du Conservatoire de toute submersion marine pour des conditions de tempête de type Xynthia (correspondant au scénario 1, précédemment présenté), nous avons vu qu'une cote d'ouvrage égale à 4.60 m NGF pouvait suffire. Néanmoins, dans les études réglementaires de type PAPI, et pour prendre en compte l'élévation du niveau marin, une cote minimale d'au moins 4.80 m NGF serait préconisée (voir 5 m NGF si l'on vise à maintenir le niveau de protection jusqu'à l'horizon 2050 ou après). Les résultats de simulation du scénario 1 ont également montré la nécessité de surélever les digues en rive droite du Havre de Brouage (à minima de la mer jusqu'au pont de la route départementale 3, au niveau du village de Brouage) afin d'empêcher une submersion via ce havre.

La digue de protection devant les terrains du Conservatoire, d'une longueur de 5.67 km, est actuellement constitué de plusieurs types d'ouvrages (voir Figure 33 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, du sud vers le nord) :

- 3340 m de digue en terre ;
- 530 m de digue en enrochement ;
- 1220 m de cordon dunaire ;
- 585 m de digue en enrochement.

A ces ouvrages en front de mer, doit également être ajoutée la digue en terre le long du Havre de Brouage en rive droite, d'une longueur d'environ 2600 m (voir figure suivante).

Afin d'identifier les tronçons à réhabiliter (par rapport à la cote de protection voulue à 4.80 m NGF), les cotes des ouvrages de premier rang, issues des données Lidar, sont présentées sur la Figure 34. Cette figure montre que les cotes des ouvrages ne sont pas uniformes et varient fortement, entre environ 2 m NGF et 6 m NGF, mais également qu'aucun tronçon des différents types d'ouvrages (digue en terre, en enrochement, dune) n'a aujourd'hui, sur toute sa longueur, la cote requise de 4.80 m NGF. Pour compléter ces informations, les cotes de la digue en rive droite du Havre de Brouage sont globalement comprises entre 3 et 4 m NGF. Ainsi, il apparaît que tous les ouvrages précités ci-dessus nécessiteraient une réhabilitation pour répondre au niveau de protection voulu.

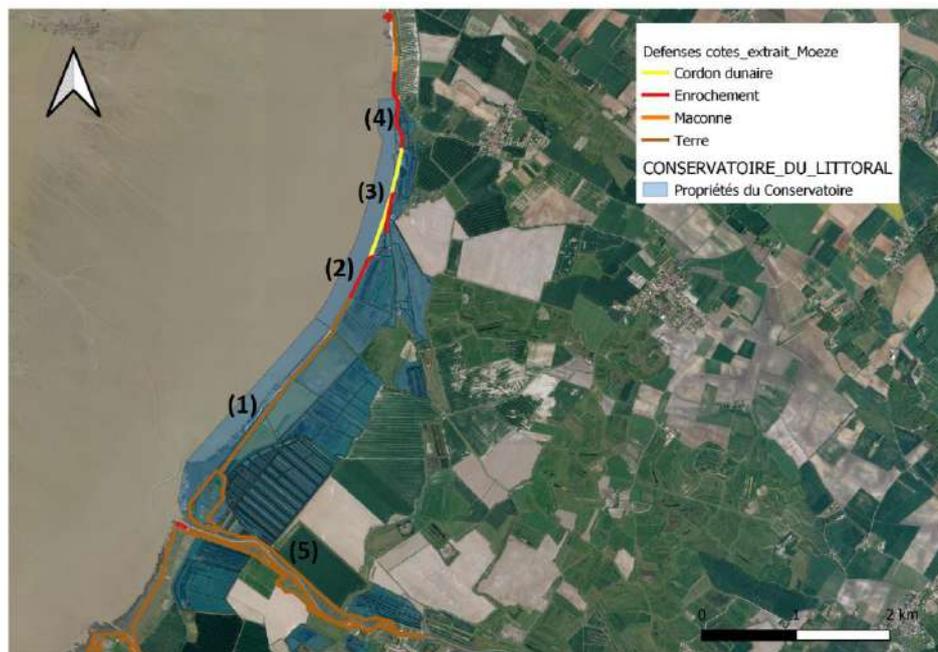


Figure 33 : Position et typologie des ouvrages de défense actuels du marais de Brouage (les numéros servent à identifier les différents tronçons et seront repris dans le Tableau 7).

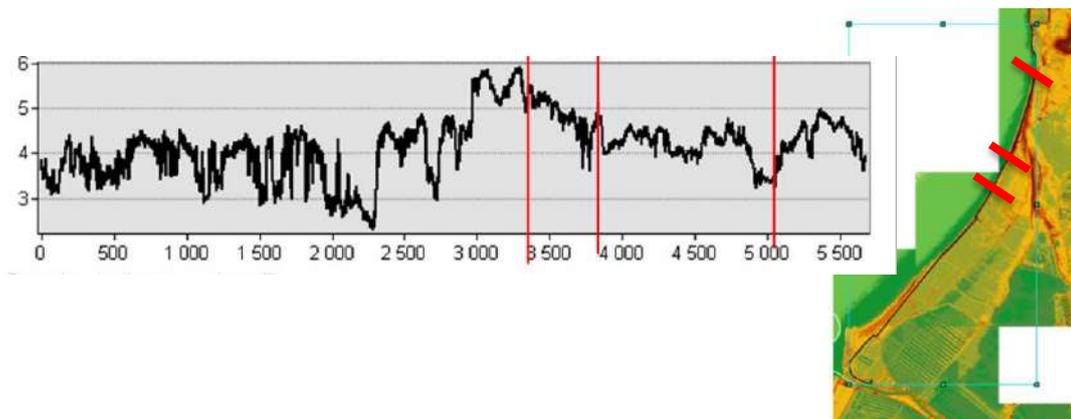
Ne connaissant pas l'état réel de chacun des ouvrages, différents niveaux de réhabilitation (du simple confortement de l'ouvrage existant à sa reconstruction totale, à l'identique ou en ajoutant un parement aval) sont considérés dans la suite (voir Tableau 7).

Dans ce tableau, quatre scénarios de réhabilitation des ouvrages ont été chiffrés, mais d'autres scénarios pourraient être envisagés (la reconstruction totale des tronçons existants en enrochement, digues (2) et (4), n'a pas été, notamment, considérée). Dans ces scénarios, le coût dédié à la réhabilitation de la digue en terre devant les terrains du Conservatoire (1) représente

entre 50 et 75 % du coût total, ce qui s'explique évidemment par l'important linéaire concerné (plus de 3300 m). Pour les mêmes raisons, la réhabilitation de la digue en terre (5) en rive droite du Havre de Brouage représente une part importante des coûts.

Parmi ces scénarios de réhabilitation, le premier (simple confortement des ouvrages existants) semble assez peu réaliste vu l'état actuel (et les problèmes récurrents d'entretien) de la digue en terre devant les terrains du Conservatoire. Cette digue étant en contact direct avec la mer, nous avons chiffré dans le dernier scénario sa reconstruction totale en digue avec parement en enrochement, afin de limiter l'érosion en pied d'ouvrage, comme c'est le cas actuellement. Cette reconstruction augmenterait fortement les coûts des travaux.

Figure 34 : Cotes de la digue de premier rang extraites des données Lidar de 2011 (en m NGF, du sud



vers le nord).

| Niveau de réhabilitation des ouvrages  | Type d'ouvrages et tronçon considéré | Type de travaux / technique  | Coûts (Millions d'€) par tronçons                |
|--|--------------------------------------|--|--|
| <b>Simple confortement des ouvrages existants</b><br><br><b>TOTAL (M €) :</b><br><b>3.57 &lt; 3.85 &lt; 4.33</b>                                       | Digues en terre (1) et (5)           | Confortement / Terrassement en continu   | (1) 1.7 < 1.8 < 2<br>(5) 1.3 < 1.4 < 1.6         |
|  | Digues en enrochement (2) et (4)     | Confortement / Terrassement et enrochements rehausse (# 1m)                      | (2) 0.13 < 0.14 < 0.16<br>(4) 0.14 < 0.16 < 0.18 |
|  | Cordon dunaire (3)                   | Réhabilitation et confortement de cordon dunaire / Apport massif en front de mer | 0.3 < 0.35 < 0.39                                |
| <b>Reconstruction de la digue en terre (1), simple confortement des autres ouvrages</b><br><br><b>TOTAL (M €) :</b><br><b>4.87 &lt; 5.35 &lt; 6.33</b> | Digue en terre (1)                   | Construction, reconstruction, réfection / Terrassement                           | (1) 3 < 3.3 < 4                                  |
|  | Digue en terre (5)                   | Confortement / Terrassement en continu   | (5) 1.3 < 1.4 < 1.6                              |
|  | Digues en enrochement (2) et (4)     | Confortement / Terrassement et enrochements rehausse (# 1m)                      | (2) 0.13 < 0.14 < 0.16<br>(4) 0.14 < 0.16 < 0.18 |
|  | Cordon dunaire (3)                   | Réhabilitation et confortement de cordon dunaire / Apport massif en front de mer | 0.3 < 0.35 < 0.39                                |

|  |                                  |  |  |
|--|----------------------------------|--|--|
| <b>Reconstruction des deux digues en terre (1) et (5), simple confortement des autres ouvrages</b><br><br><b>TOTAL (M €) : 5.97 &lt; 6.55 &lt; 7.93</b>  | Digues en terre (1) et (5)       | Construction, reconstruction, réfection / Terrassement                           | (1) 3 < 3.3 < 4<br>(5) 2.4 < 2.6 < 3.2           |
|  | Digues en enrochement (2) et (4) | Confortement / Terrassement et enrochements rehausse (# 1m)                      | (2) 0.13 < 0.14 < 0.16<br>(4) 0.14 < 0.16 < 0.18 |
|  | Cordon dunaire (3)               | Réhabilitation et confortement de cordon dunaire / Apport massif en front de mer | 0.3 < 0.35 < 0.39                                |
| <b>Reconstruction de la digue (1) avec parement en enrochement, reconstruction de la digue en terre (5), reprise général du profil pour les digues (2) et (4)</b><br><br><b>TOTAL (M €) : 10.32 &lt; 12.52 &lt; 15.5</b> | Digue en terre (1)               | Terrassement et enrochement  | (1) 6.68 < 8.35 < 10.35                          |
|  | Digue en terre (5)               | Construction, reconstruction, réfection / Terrassement                           | (5) 2.4 < 2.6 < 3.2                              |
|  | Digues en enrochement (2) et (4) | Confortement / Terrassement et enrochements – reprise générale du profil         | (2) 0.45 < 0.58 < 0.74<br>(4) 0.49 < 0.64 < 0.82 |
|  | Cordon dunaire (3)               | Réhabilitation et confortement de cordon dunaire / Apport massif en front de mer | 0.3 < 0.35 < 0.39                                |

Tableau 7 : Evaluations des coûts de réhabilitation de la digue actuelle pour différents scénarios suivant l'état des ouvrages.

Ainsi, suivant l'état de la digue en rive droite du Havre de Brouage, le coût des travaux de réhabilitation de la digue actuelle pourrait s'élever entre 4.9 et 7.9 millions d'euros. Si la digue de premier rang était reconstruite avec parement en enrochement (et si les tronçons de digues avec parement en enrochement nécessitaient une reprise générale de leur profil), ce coût pourrait être multiplié pratiquement par deux.

A noter que les coûts des travaux évalués ici ne tiennent pas compte des prestations intellectuelles (études préparatoires, expertises des ouvrages, études des sols, études de dimensionnement...), qui peuvent s'élever de 2 à 12 % du total des dépenses, ni des éventuels ouvrages hydrauliques à implanter ou à réhabiliter.

A ces coûts de construction, doivent être ajoutés les coûts de gestion et d'entretien des ouvrages dont l'ordre de grandeur est le suivant :

- Digue avec parement : 3000<4300<8800 €/km/an HT (2 à 5% de l'investissement initial sur la durée de service) ;
- Digue sans parement : 6400<8600<12300 €/km/an HT (5 à 15% de l'investissement initial) (digue de premier rang).

- **Construction d'une digue rétro-littorale**

La position de la digue de 2<sup>nd</sup> rang retenue pour cette évaluation des coûts est la position intermédiaire, telle qu'illustré sur la Figure 35.

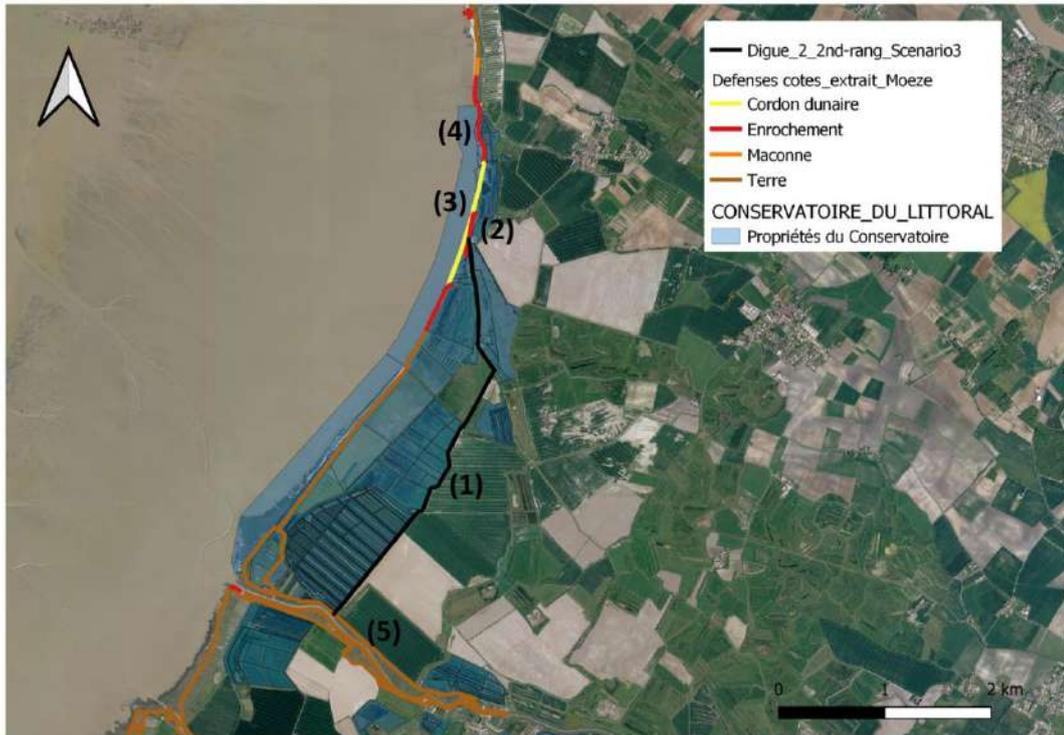


Figure 35 : Position de la digue rétro-littorale considérée (position intermédiaire) et digue actuelle.

Le système de protection à considérer dans ce cas, d'une longueur de 5.43 km, se compose (voir figure ci-dessus du sud au nord) :

- D'une digue rétro-littorale de 4 110 m à construire (1) ;
- D'une digue en enrochement (située en arrière dune) de 250 m (2), permettant la jonction entre la digue rétro-littorale et le cordon dunaire, existante à réhabiliter ;
- D'un cordon dunaire de 680 m (3), existant à réhabiliter ;
- D'une digue en enrochement de 585 m (4), existante à réhabiliter.

A ces ouvrages, doit également être ajoutée, comme précédemment, la digue en rive droite du Havre de Brouage d'une longueur de 2 600 m (5), afin de limiter la submersion dans la partie sud du marais (voir les résultats de simulation obtenus pour le scénario 3 d'aménagement, Figure 32).

Comme l'ont montré les simulations numériques, la création d'une zone tampon devant une digue rétro-littorale sur le site de Moëze n'a pas d'effet notable sur le niveau d'eau maximal atteint pendant Xynthia au droit de cette digue. La cote des ouvrages nécessaire à la protection du marais de Brouage sera donc la même qu'en premier rang, à savoir 4.80 m NGF. Afin d'évaluer la surélévation nécessaire pour atteindre la cote de 4.80 m NGF, le profil topographique du terrain naturel à l'emplacement de la digue rétro-littorale est présenté sur la Figure 36. La cote du terrain naturel est inférieure à 3.50 m NGF sur plus d'un tiers de la longueur de la digue à construire, l'apport de matériaux nécessaire à atteindre la cote de sécurité de 4.80 m NGF sera donc très important.

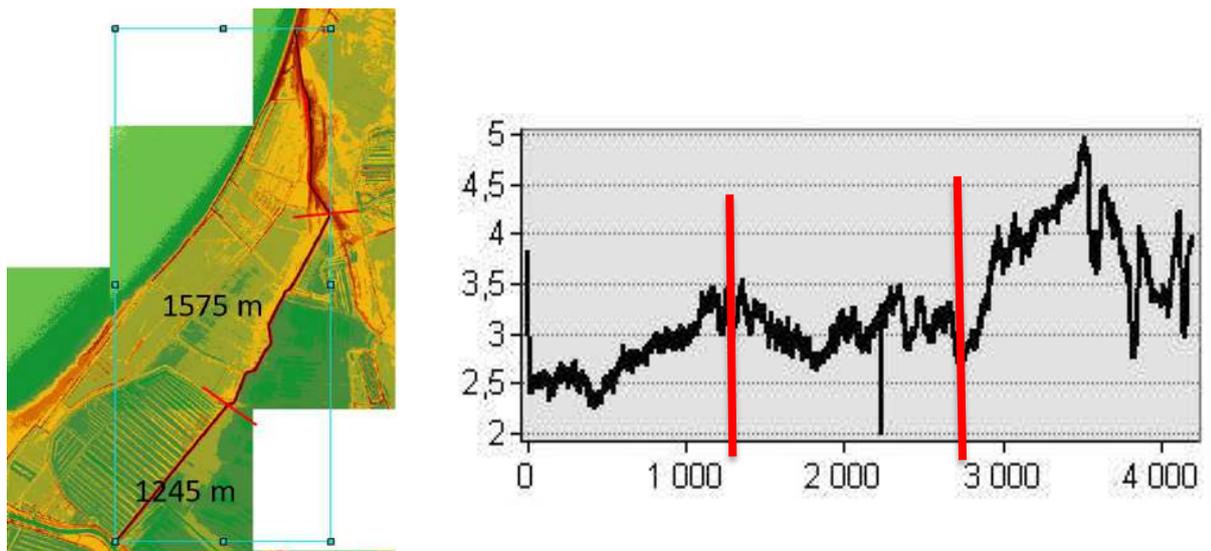


Figure 36 : Position de la digue de 2<sup>nd</sup> rang considérée et cote du terrain naturel correspondant issu des données Lidar (du sud vers le nord).

Comme précédemment, différents niveaux de réhabilitation des ouvrages existants seront considérés (voir tableau suivant). A noter par contre que la digue rétro-littorale n'étant pas actuellement en contact direct avec la mer, un ouvrage en terre (végétalisée), sans parement en enrochement, serait suffisant pour assurer la protection des zones arrières.

Dans le Tableau 8, trois scénarios de réhabilitation des ouvrages ont été chiffrés, en cohérence avec ceux considérés dans le Tableau 7. Dans ces scénarios, le coût dédié à la construction de la digue rétro-littorale représente entre 50 et 70 % du coût total, cela s'explique évidemment par l'important linéaire concerné (plus de 4 100 m). Pour les mêmes raisons, la réhabilitation de la digue en terre en rive droite du Havre de Brouage représente une part importante des coûts.

| Niveau de réhabilitation des ouvrages   | Type d'ouvrages et tronçon considéré | Type de travaux / technique  | Coûts (Millions d'€) par tronçons                |
|---|--------------------------------------|--|--|
| <b>Construction de la digue rétro-littorale (1) et simple confortement des autres ouvrages existants</b><br><br><b>TOTAL (M €) : 5.37 &lt; 5.93 &lt; 6.98</b> | Digue rétro-littorale en terre (1)   | Construction, reconstruction, réfection / Terrassement                           | (1) 3.7 < 4.1 < 4.9                              |
|   | Digue en terre (5)                   | Confortement / Terrassement en continu   | (5) 1.3 < 1.4 < 1.6                              |
|   | Digues en enrochement (2) et (4)     | Confortement / Terrassement et enrochements rehausse (# 1m)                      | (2) 0.06 < 0.07 < 0.08<br>(4) 0.14 < 0.16 < 0.18 |
|   | Cordon dunaire (3)                   | Réhabilitation et confortement de cordon dunaire / Apport massif en front de mer | 0.17 < 0.2 < 0.22                                |

|   |                                  |  |  |
|---|----------------------------------|--|--|
| <b>Construction de la digue rétro-littorale, reconstruction de la digue en terre (5), simple confortement des autres ouvrages</b><br><br><b>TOTAL (M €) :</b><br><b>6.47 &lt; 7.13 &lt; 8.58</b>                  | Digues en terre (1) et (5)       | Construction, reconstruction, réfection / Terrassement                           | (1) 3.7 < 4.1 < 4.9<br>(5) 2.4 < 2.6 < 3.2       |
|   | Digues en enrochement (2) et (4) | Confortement / Terrassement et enrochements – rehausse (# 1m)                    | (2) 0.06 < 0.07 < 0.08<br>(4) 0.14 < 0.16 < 0.18 |
|   | Cordon dunaire (3)               | Réhabilitation et confortement de cordon dunaire / Apport massif en front de mer | 0.17 < 0.2 < 0.22                                |
| <b>Construction de la digue rétro-littorale (1), reconstruction de la digue en terre (5), reprise général du profil pour les digues (2) et (4)</b><br><br><b>TOTAL (M €) :</b><br><b>6.97 &lt; 7.81 &lt; 9.49</b> | Digues en terre (1) et (5)       | Construction, reconstruction, réfection / Terrassement                           | (1) 3.7 < 4.1 < 4.9<br>(5) 2.4 < 2.6 < 3.2       |
|   | Digues en enrochement (2) et (4) | Confortement / Terrassement et enrochements – reprise général du profil          | (2) 0.21 < 0.27 < 0.35<br>(4) 0.49 < 0.64 < 0.82 |
|   | Cordon dunaire (3)               | Réhabilitation et confortement de cordon dunaire / Apport massif en front de mer | 0.17 < 0.2 < 0.22                                |

Tableau 8 : Evaluations des coûts de création et réhabilitation du système de protection avec digue rétro-littorale pour différents scénarios suivant l'état des ouvrages.

Ainsi, suivant l'état de la digue en rive droite du Havre de Brouage, le coût des travaux de réhabilitation du système de protection pourrait s'élever entre 5.4 et 8.6 millions d'euros. Ce coût pourrait s'élever entre 7 et 9.5 millions d'euros si les tronçons de digue avec parement en enrochement nécessitaient une reprise générale de leur profil.

Les coûts évalués pour les digues du scénario 3 sont donc globalement du même ordre de grandeur que ceux relatifs à la réhabilitation des ouvrages actuels (linéaire de digues concerné relativement similaire dans les deux cas). La construction d'une digue rétro-littorale pourrait même s'avérer plus chère relativement aux quantités très importantes de matériaux nécessaires pour atteindre la cote voulue.

De même que précédemment, les coûts présentés ici ne tiennent compte ni des prestations intellectuelles, ni des coûts d'entretien et de gestion des ouvrages.

#### 4.1.4. Rappel des résultats et premières conclusions

Ce paragraphe reprend et discute les principaux résultats obtenus pour la première phase de l'étude, dédiée à la comparaison de trois scénarios d'aménagement sur les terrains appartenant au Conservatoire, à savoir :

- Scénario 1 : Maintien et renforcement de la digue Havre-Plaisance à son emplacement actuel ;
- Scénario 2 : Effacement de la digue actuelle ;
- Scénario 3 : Recul stratégique de l'emplacement de la digue pour bénéficier de la zone tampon offerte par les milieux naturels.

La modélisation numérique du scénario 1, pour des conditions marines similaires à la tempête Xynthia, a montré que la seule réhabilitation de la digue Havre-Plaisance (à une cote supérieure au niveau marin maximal atteint lors de cette tempête) ne suffit pas à protéger efficacement le

marais de Moëze : des travaux complémentaires seraient en effet nécessaires sur l'ouvrage hydraulique au nord des terrains du Conservatoire, ainsi qu'au niveau du Havre de Brouage (réhabilitation de la digue en rive droite du Havre de Brouage ou mise en place d'un ouvrage hydraulique à son embouchure) pour empêcher toute submersion marine sur les terrains du Conservatoire. La modélisation a également montré que dans la partie sud du marais de Brouage (partie du marais située au sud-ouest du Havre de Brouage) les cotes actuelles des digues refaites suite à Xynthia (sans défaillance des ouvrages) permettraient, si la tempête Xynthia se reproduisait, de réduire l'emprise soumise à la submersion marine.

La modélisation du scénario 2 (effacement de la digue Havre-Plaisance) pour différentes conditions marines, hors tempête (voir Figure 26) a permis de montrer que :

- La submersion des terrains du Conservatoire se produit pour un niveau marin proche des pleines mers de vives eaux (coefficient 95), ce niveau marin étant atteint entre 80 et 130 pleines mers par an actuellement, pour une durée cumulée annuelle d'environ une quinzaine de jours.
- La submersion induite par les plus hautes mers astronomiques actuelles (coefficient 120) représente une emprise d'environ 6.8 km<sup>2</sup> (surfaces reconnectées à la mer). La limite de submersion pour ce niveau marin définissant la position du trait de côte, l'effacement totale de la digue Havre-Plaisance induirait actuellement un recul d'environ 2 km de la position du trait de côte dans la zone centrale du marais de Moëze. A l'horizon 2050, ce sont plus de 15 km<sup>2</sup> du marais qui seraient reconnectés à la mer, avec un recul global de 2.5 km de la position du trait de côte par rapport à sa position actuelle.

Pour ce scénario, la modélisation d'un événement similaire à Xynthia montre que la suppression de la digue Havre-Plaisance multiplie pratiquement par deux la zone réellement submergée pendant la tempête dans la partie centrale du marais (la mer pénètre en effet jusqu'à pratiquement 5.5 km des côtes, alors qu'elle s'était arrêtée au niveau de la route départementale reliant Moëze à Brouage, soit environ 2.7 km des côtes en 2010). La suppression de la digue a également un impact sur l'emprise de submersion en rive gauche du Havre de Brouage, qui s'en trouve augmentée, montrant une influence des aménagements réalisés sur les terrains du Conservatoire sur une zone plus large.

Pour le scénario 3, trois positions de digue rétro-littorale ont été testées par simulations numériques pour des conditions similaires à la tempête Xynthia. Les résultats obtenus ont montré que :

- Quelle que soit la position de la digue rétro-littorale, une submersion se produit derrière l'ouvrage sur les terrains du Conservatoire, via le Havre de Brouage. La digue en elle-même ne protège donc pas totalement de la submersion et des ouvrages seraient à prévoir le long du Havre de Brouage pour éviter ce phénomène.
- La présence d'une digue rétro-littorale accroît légèrement la submersion de la zone située entre le Havre de Brouage et le canal de Mérignac (par rapport à la situation avec digue de premier rang et sans digue de premier rang : scénarios 1 et 2), et plus la digue de 2<sup>nd</sup> rang est en retrait par rapport à la côte et plus ce phénomène est important. En effet la digue de 2<sup>nd</sup> rang canalise la marée vers le sud, entraînant des apports supplémentaires d'eau dans cette zone. Là encore, la réhabilitation de la digue en rive droite du Havre de Brouage serait nécessaire pour éviter ces apports du nord vers le sud, au sein du marais, via le Havre de Brouage.
- Ces simulations permettent également de montrer que le niveau marin maximal atteint devant les digues reste sensiblement le même quelle que soit la position de la digue arrière. La cote des ouvrages nécessaires, relativement à un événement extrême de type Xynthia, sera donc la même pour la digue rétro-littorale que pour la digue de premier rang.

Remarque importante : pour les simulations des scénarios 2 et 3, la digue littorale actuelle, devant les terrains du Conservatoire, a été arasée, facilitant et maximisant la submersion marine à terre. Dans la réalité, même si la digue littorale actuelle n'était plus entretenue, elle mettrait un certain temps à se détériorer jusqu'à son effacement total (ce temps sera variable suivant les secteurs et leur exposition aux éléments naturels, mais également suivant le type d'ouvrages et son état actuel). Les résultats des simulations réalisées ici ont donc tendance à majorer l'aléa de submersion marine, en termes d'emprise et de hauteur d'eau.

Une première évaluation des coûts de construction et de réhabilitation des ouvrages du scénario 1 et du scénario 3 montre que ces coûts sont globalement du même ordre de grandeur et assez élevés (entre 5 et 8 millions d'euros), à la vue des enjeux présents (réserve naturelle, parcelles agricoles, installations conchylicoles principalement). La construction d'une digue rétro-littorale pourrait même être plus chère que la réhabilitation de la digue de premier rang. Par contre, la digue rétro-littorale n'étant pas en contact directe avec mer à moyen terme, les frais d'entretien et de gestion de celle-ci devrait être moindres que ceux de la digue de premier rang.

Ainsi cette première phase du travail a permis de mettre en évidence que les scénarios de gestion envisagés par le Conservatoire sur ses terrains ont une influence en terme d'aléas de submersion marine sur les zones avoisinantes, notamment sur la partie sud du marais de Brouage, mais également que les aménagements envisagés (scénarios 1 et 3) nécessitent, pour être efficaces, des interventions sur des zones n'appartenant pas au Conservatoire.

Il apparaît ainsi que le devenir du marais de Moëze, dans un contexte de changement climatique, doit être réfléchi de façon globale, à l'échelle du Marais de Brouage dans son ensemble, et pas seulement à l'échelle des terrains propriétés du Conservatoire.

Sur l'initiative du Conservatoire du Littoral, une partie des résultats de cette première phase a été présentée au Comité des Maires du 12 février 2019 (instance regroupant les maires des différentes communes du marais de Brouage), soulignant en particulier la nécessité d'une réflexion globale de la gestion du trait de côte, à l'échelle du Marais de Brouage.

Suite à cette présentation, le Conservatoire a invité l'ensemble des élus du territoire à un atelier de travail afin de recueillir leurs avis sur les différentes solutions de gestion du trait de côte à envisager à l'échelle du Marais de Brouage.

La partie suivante s'attache ainsi à la deuxième phase de notre étude : la présentation des différents scénarios d'aménagement envisagés par les élus à l'échelle du Marais de Brouage et les éléments de réflexion et résultats des simulations numériques qui en découlent.

## **4.2. AMENAGEMENTS A L'ECHELLE DE L'ENSEMBLE DU MARAIS DE BROUAGE**

### **4.2.1. Déroulement de l'atelier et scénarios envisagés par les élus**

L'atelier de travail avec les élus du territoire du Marais de Brouage s'est tenu le 3 juin 2019 dans les locaux de la Délégation Centre-Atlantique du Conservatoire du Littoral à Rochefort. Durant cet atelier, les participants divisés en 3 sous-groupes (avec un animateur et un rapporteur par sous-groupe) devaient répondre aux questions suivantes :

*Q1/ Selon vous, quels sont les enjeux importants à préserver/protéger dans cette zone, dès à présent et dans le futur ? Identifiez ces enjeux sur la carte et expliquez-les.*

Q2/ Quel(s) type(s) d'aménagement envisageriez-vous pour les protéger/préserver ? Dessinez-les et expliquez-les.

Pour faciliter leurs réflexions (identifier les enjeux à protéger et proposer différents scénarios d'aménagements), plusieurs cartes furent mises à leur disposition (voir Figure 37) :

- 1 carte paysage du Marais de Brouage (format A1) ;
- 1 carte de l'altimétrie du Marais (format A1) ;
- 6 cartes (format A3) présentant les résultats des simulations numériques du scénario 2 (effacement de la digue devant les terrains du Conservatoire) pour des conditions marines normales (Coefficients de marée 95 et 120) actuelles et à l'horizon 2030 et 2050 ;
- 1 carte montrant l'emprise des submersions marines à l'échelle du Marais pour les tempêtes Martin et Xynthia (format A3).

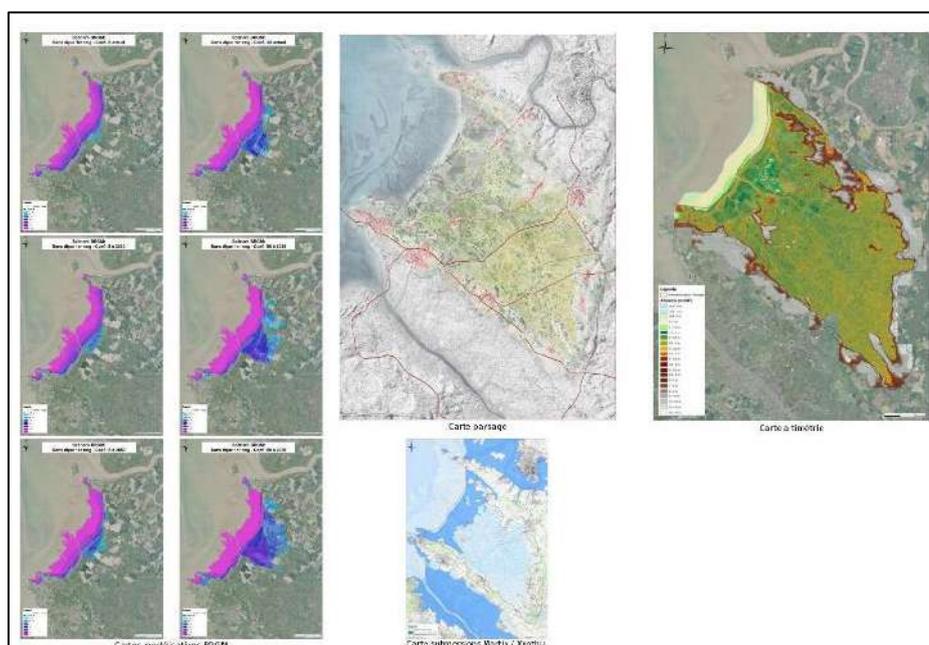


Figure 37 : Elément cartographiques mis à disposition des élus lors de l'atelier de travail du 3 juin 2019.

A la première question, différents types d'enjeux furent identifiés :

- Des enjeux humains, représentés par des zones urbaines (Saint-Froult ; Moëze ; Citadelle de Brouage ; Port-des-barques ; Bourcefranc-le-Chapus ; Beaugeay) et des habitations isolées (Bourcefranc-le-Chapus ; Saint-Froult) ;
- Des enjeux économiques, principalement agricoles (cultures céréalières, élevage et pâturage), ostréicoles et touristiques (réserve naturelle, Citadelle de Brouage) ;
- Des enjeux immatériels tels que l'identité du marais (paysages, biodiversité, Réserve Nationale Naturelle, loisirs permis par le milieu) et son patrimoine historique (Citadelle de Brouage).

A la deuxième question, trois propositions de gestion du trait de côte ont émergé (voir Figure 38) :

- P1 : Maintien d'une digue à l'emplacement actuel (assurant un niveau de protection adéquat), avec mise en place d'ouvrages hydrauliques dans les Havres (matérialisés par des étoiles rouges sur la carte), avec deux options de gestion possibles :
  - o Maintien de la gestion actuelle par les propriétaires privés.
  - o Mise en place d'une gestion concertée et publique (gestion GEMAPIENNE).
- P2 : Création d'une digue en retrait (digue rétro-littorale), matérialisant à terme la nouvelle limite terre-mer. Les activités potentiellement impactées, situées entre la digue actuelle et celle en retrait sont relocalisées.
  - o (1) La digue actuelle en front de mer est laissée en libre évolution entre Montportail et le havre de Brouage. La digue de retrait est mise en place au niveau de la route D3 entre Brouage et Moëze.
  - o (2) La digue actuelle en front de mer est laissée en libre évolution sur toute sa longueur et une digue de retrait est également mise en place entre Brouage et Bourcefranc.
- P3 : Des protections rapprochées sont construites au niveau des centres bourg menacés par les submersions marines. Les digues actuelles, en front de mer sont laissées en libre-évolution. Les activités potentiellement impactées, situées derrière la digue actuelle sont relocalisées.

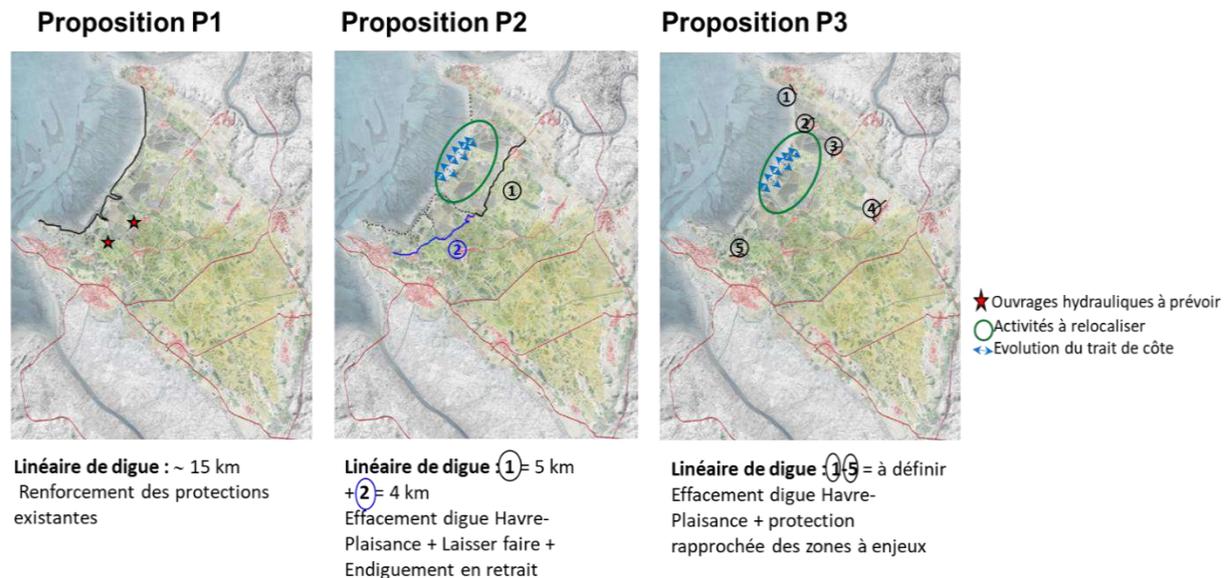


Figure 38: Synthèse de l'atelier des maires du 20/06/2019. Proposition P1 : renforcement des digues et des ouvrages hydrauliques identifiées par des étoiles rouges ; P2 : Renforcement d'une route-digue (représentée par les lignes noire et bleue n°1 et n°2), sans entretien ni renforcement des digues pré-existantes ; P3 : Proposition de défenses côtières situées autour des enjeux identifiés, sans entretien ni renforcement des digues existantes. Les activités agricoles à relocaliser sont identifiées par un cercle vert et les flèches bleues représentent l'évolution du trait de côte.

#### 4.2.2. Analyse des différents scénarios issus de l'atelier

##### **Proposition P1 : Maintien des digues à leur position actuelle**

Pour ce scénario, la réalisation d'une simulation numérique n'est pas nécessaire puisque le système de défense mis en place (digues de protection et ouvrages hydrauliques au niveau des havres et chenaux) doit empêcher toute submersion marine à terre. Il s'agit par contre de chiffrer

l'ordre de grandeur des coûts de réhabilitation ou de reconstruction du système de protection existant. Les différents ouvrages présents et leur nature sont représentés sur la figure suivante.

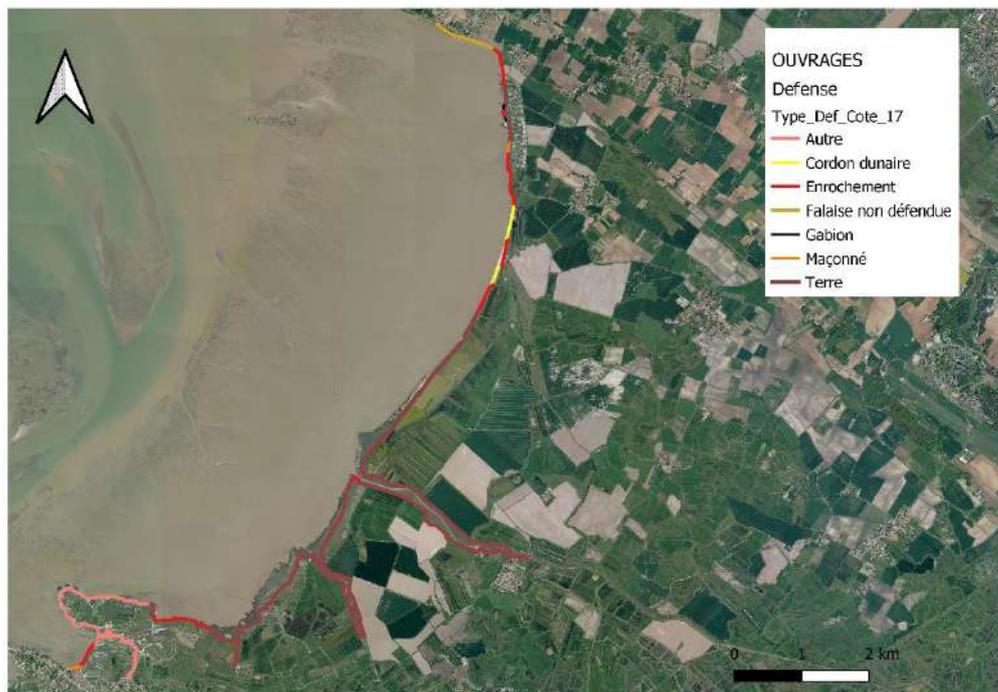


Figure 39 : Ouvrages de protection actuels, et leur typologie, au Marais de Brouage.

La longueur cumulée de ces ouvrages, par nature, est la suivante :

- Digue en terre : 18 010 m ;
- Digue en enrochement : 3 840 m ;
- Digue « autre » : 5 760 m (nature non connue, au niveau de la pointe de Chardon, sud-ouest de la carte ci-dessus) ;
- Cordon dunaire : 1 220 m ;
- Digue maçonnée : 325 m ;
- Gabion : 180 m ;
- (falaise non défendue : 1 800 m, au sud de Port des Barques).

La longueur cumulée de ces ouvrages (hors falaises) représente un peu plus de 29 km. Cette longueur est beaucoup plus importante que celle identifiée suite au Comité des Maires (# 15 km). Cela s'explique par le fait que les digues au niveau de la Pointe du Chardon n'avaient pas été prises en compte, alors qu'elles sont nécessaires pour protéger le Marais de Brouage. De même, les digues existantes (principalement en terre) remontent aujourd'hui assez haut en amont du Havre de Brouage, du Canal de Mérignac et du Chenal de Daire, représentant des longueurs importantes (de l'ordre de 11 km). Ces portions de digues, non considérées totalement dans la proposition P1, pourraient ne pas être réhabilitées ou reconstruites si des ouvrages hydrauliques étaient installés en aval afin d'empêcher la remontée de la mer pour des niveaux marins importants.

Comme dans la partie précédente, ne connaissant pas l'état réel de chacun des ouvrages, différents niveaux de réhabilitation (du simple confortement de l'ouvrage existant à sa reconstruction totale, à l'identique) sont considérés dans la suite. De plus, les tronçons de digues dont la nature n'est pas connue sont assimilés à des digues en terre, de même que les tronçons

de digues maçonnées ou en gabions sont assimilés à des digues avec parement en enrochement.

| Niveau de réhabilitation des ouvrages   | Type d'ouvrages et tronçon considéré          | Type de travaux / technique  | Coûts (Millions d'€) par type d'ouvrage |
|---|---|--|---|
| <b>Simple confortement des ouvrages existants</b><br><br><b>TOTAL (M €) :</b><br><b>13.29 &lt; 14.55 &lt; 16.04</b>   | Digues en terre (23 770 m)                    | Confortement / Terrassement en continu   | 11.9 < 13 < 14.3                        |
|   | Digues avec parement en enrochement (4 350 m) | Confortement / Terrassement et enrochements rehausse (# 1m)                      | 1.09 < 1.2 < 1.35                       |
|   | Cordon dunaire (1 220 m)                      | Réhabilitation et confortement de cordon dunaire / Apport massif en front de mer | 0.3 < 0.35 < 0.39                       |
| <b>Reconstruction des digues en terre, simple confortement des autres ouvrages</b><br><br><b>TOTAL (M €) :</b><br><b>22.8 &lt; 25.35 &lt; 30.24</b>         | Digues en terre (23 770 m)                    | Construction, reconstruction, réfection / Terrassement                           | 21.4 < 23.8 < 28.5                      |
|   | Digues avec parement en enrochement (4 350 m) | Confortement / Terrassement et enrochements rehausse (# 1m)                      | 1.09 < 1.2 < 1.35                       |
|   | Cordon dunaire (1 220 m)                      | Réhabilitation et confortement de cordon dunaire / Apport massif en front de mer | 0.3 < 0.35 < 0.39                       |
| <b>Reconstruction des digues en terre, reprise général du profil pour les autres ouvrages</b><br><br><b>TOTAL (M €) :</b><br><b>25.4 &lt; 28.95 &lt; 35</b> | Digues en terre (23 770 m)                    | Construction, reconstruction, réfection / Terrassement                           | 21.4 < 23.8 < 28.5                      |
|   | Digues avec parement en enrochement (4 350 m) | Confortement / Terrassement et enrochements – reprise générale du profil         | 3.7 < 4.8 < 6.1                         |
|   | Cordon dunaire (1 220 m)                      | Réhabilitation et confortement de cordon dunaire / Apport massif en front de mer | 0.3 < 0.35 < 0.39                       |

Tableau 9 : Evaluations des coûts de réhabilitation des digues de la Proposition P1 pour différents scénarios suivant l'état des ouvrages.

Le Tableau 9 présente une évaluation, assez grossière, des coûts pour 3 niveaux de réhabilitation du système de protection actuel. Un autre scénario de réhabilitation, consistant à reconstruire toutes les digues en front de mer avec un parement en enrochement, aurait également pu être chiffré, augmentant l'estimation des coûts de 10 à 20 millions d'euros. A noter également que les estimations proposées ici ne tiennent pas compte de la construction de plusieurs ouvrages hydrauliques (au niveau du Havre de Brouage, du Canal de Mérignac et du Chenal de Daire), nécessaires pour empêcher la submersion marine. Pour ces ouvrages hydrauliques, il serait possible de les installer à l'aval, limitant ainsi les tronçons de digues le long des rives, ou plus en amont en réhabilitant les digues existantes.

Pour résumer, ce scénario, en termes de travaux de réhabilitation des ouvrages, coûterait plusieurs dizaines de millions d'euros, de 20 à 40 M€ (hors coûts des ouvrages hydrauliques, de prestation intellectuelle et d'entretien et de gestion des ouvrages et d'acquisition du foncier pour les construire ou les réhabiliter).

### Proposition P2 : Création d'une digue rétro-littorale

Dans ce scénario, le système actuel de digue en front de mer n'est plus maintenu sur l'ensemble du marais et une digue rétro-littorale est créée. La longueur de digue nécessaire à protéger l'arrière du Marais s'en trouve réduite, à environ 7.9 km (voir Figure 40), notamment par l'existence de points hauts naturels ne nécessitant pas la présence d'ouvrage de protection. A noter par contre, qu'un tronçon de digue supplémentaire serait nécessaire au niveau de la route entre Boubise et Moëze (d'environ 250 m) afin de maintenir la circulation en cas d'évènement extrême.

La Figure 40 présente l'extension de la submersion et les hauteurs d'eau maximales simulées pour des conditions similaires à la tempête Xynthia (sans élévation du niveau de la mer). Dans cette simulation, les digues de front de mer ont été arasées, tandis que la digue de second rang limite l'extension de la submersion.

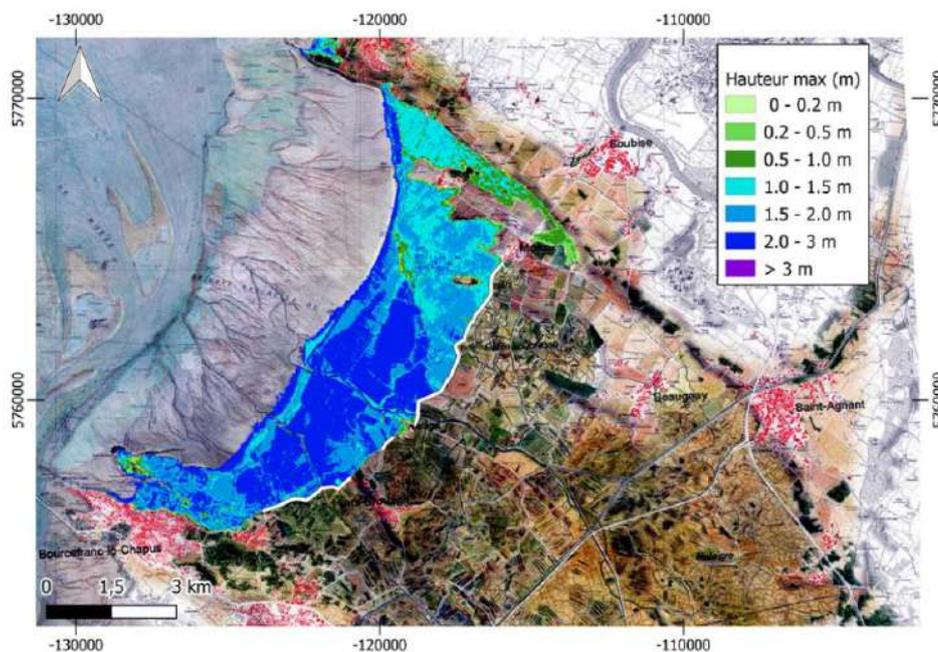


Figure 40 : Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions hydrométéorologiques extrêmes de type tempête Xynthia avec un niveau marin actuel, les digues littorales existantes arasées et la construction d'une route-digue et de défenses en retrait (représentées par le tracé en blanc).

Un résultat intéressant pour ce scénario est l'effet de la zone d'expansion, créée entre la position du trait de côte actuel et la digue rétro-littorale, sur la cote maximale atteinte par la submersion marine. En effet, alors qu'à l'échelle des terrains du Conservatoire, l'effacement de la digue littorale actuelle et la création d'une digue rétro-littorale n'avait aucun effet sur les niveaux d'eau atteints (voir partie 4.1 et Figure 31), dans le cas présent la zone d'expansion permet de diminuer efficacement la cote maximale atteinte par la submersion devant la digue rétro-littorale (Figure 41). Pour rappel, le niveau d'eau atteint par Xynthia devant les ouvrages en front de mer est de 4.43 m NGF (voir parties 3.1. et 4.1.), tandis qu'avec la zone d'expansion il diminue à une valeur inférieure à 4.3 m NGF dans la partie sud du marais et jusqu'à une valeur inférieure à 3.8 m NGF au nord du marais devant Moëze. Cette variation de la cote maximale atteinte du nord vers le sud s'explique par la distance de recul à la côte plus faible dans la partie sud (de l'ordre de 1000 m) que la partie nord du marais (de l'ordre de 2700m) et par la topographie du terrain. Cet effet de

la zone d'expansion pourrait permettre de diminuer les hauteurs de la digue rétro-littorale et d'en diminuer ainsi les coûts de construction (malheureusement les ordres de grandeurs des coûts de construction fournis par le CEREMA ne permettent de prendre en compte précisément la hauteur de digue nécessaire au niveau de protection voulu).

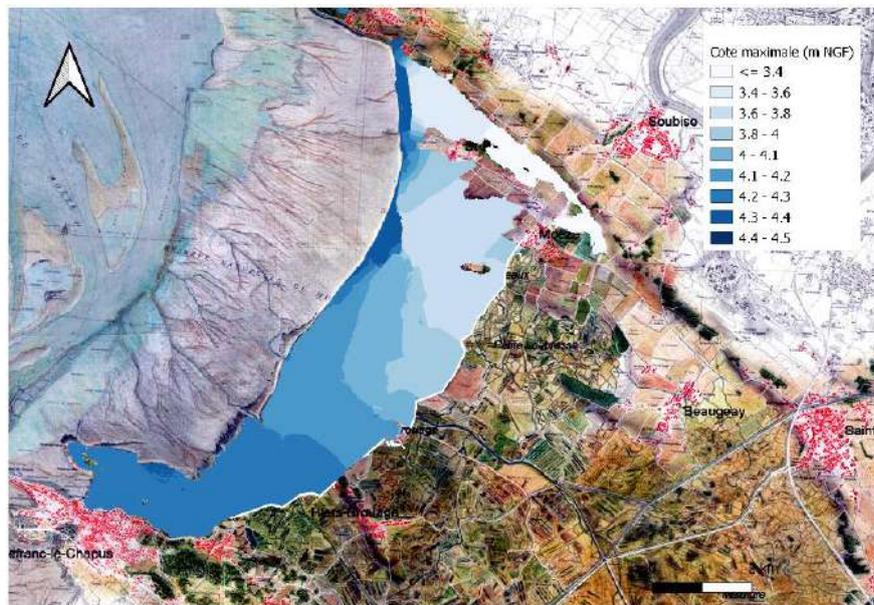


Figure 41 : Extension de la submersion et cotes maximales simulées (en m NGF) pour des conditions hydrométéorologiques extrêmes de type tempête Xynthia avec un niveau marin actuel, les digues littorales existantes arasées et la construction d'une route-digue et de défenses en retrait (représentées par le tracé en blanc).

Pour ce scénario, la digue rétro-littorale n'étant pas en contact direct avec la mer à moyen terme, elle pourrait être construite en terre et végétalisée. La construction d'un tel ouvrage, sur une longueur d'environ 7.9 km, s'élèverait entre 7.1 M€ et 9.5 M€ (hors coûts de prestation intellectuelle et d'entretien et de gestion des ouvrages et d'acquisition du foncier pour les construire ou les réhabiliter). A noter que des ouvrages hydrauliques seraient également nécessaires dans la digue rétro-littorale au niveau du Havre de Brouage et du Canal de Mérignac. Le coût de ces ouvrages n'est pas évalué ici.

Par contre, dans cette configuration, des enjeux humains, situés entre la digue rétro-littorale et le trait de côte actuel, seraient à protéger par des ouvrages supplémentaires (enjeux humains non identifiés lors de l'atelier avec les maires). Ainsi, une partie des habitations situées dans les zones les plus basses, de Bourcefranc-le-Chapus, de St-Froult et de Port-des-barques, nécessiteraient des protections rapprochées (voir proposition P3). Le linéaire d'ouvrages supplémentaires, évalué grossièrement, pourrait ainsi s'élever à environ 6 km (par rapport à la proposition P3, seuls les bourgs de Hiers et Brouage n'auraient pas besoin de protections rapprochées car situés en arrière de la digue rétro-littorale).

Dans ce scénario, la longueur de digue de protection à construire serait donc de l'ordre 14 km (digue rétro-littorale et protections rapprochées) pour un coût compris entre 12.6 M€ et 16.8 M€ pour des digues en terre.

### **Proposition P3 : Endiguement au plus proche des enjeux**

Dans ce scénario, le système actuel de digue en front de mer n'est plus maintenu et les principaux enjeux humains (zones urbaines : Saint-Froult, Moëze, Hiers, Citadelle de Brouage, Brouage, Port-des-barques, Bourcefranc-le-Chapus, Beaugeay et habitats isolés : Bourcefranc-le-Chapus et Saint-Froult) sont protégés par des protections rapprochées (tronçons de digues de longueurs réduites au plus près des enjeux).

La Figure 42 présente l'extension de la submersion et les hauteurs d'eau maximales simulées pour des conditions similaires à la tempête Xynthia (sans élévation du niveau de la mer), en considérant que les digues actuelles de front de mer ont été arasées et que des protections rapprochées ont été ajoutées (lignes blanches sur la figure) au niveau des habitations potentiellement soumises à un risque de submersion.

Dans cette situation, l'emprise de la submersion est très largement supérieure à celle observée suite à Xynthia en 2010, en particulier dans la partie centrale du Marais, sans tout de même atteindre le village de Beaugeay. Les bourgs de St-Froult, Moëze, Brouage, la Citadelle de Brouage et Hiers se retrouvent partiellement entourés d'eau, mais installés sur des reliefs et des points hauts, ils sont relativement peu soumis à la submersion. Des protections rapprochées sont tout de même nécessaires pour protéger quelques habitations installées aux altitudes les plus faibles. De même, à Bourcefranc-le-Chapus, Nodes et Port-des-Barques, installés sur des reliefs, seules quelques habitations seraient à protéger. A noter également que des protections individuelles supplémentaires seraient nécessaires au niveau du hameau de La Maison Blanche, entre Moëze et Brouage, sur la route départementale 3 (hameau non visible sur la carte).

Dans cette configuration, l'absence de digue rétro-littorale à l'échelle du marais accroît encore la zone d'expansion de la submersion et permet une diminution notable des cotes maximales atteintes (voir Figure 43). Les protections nécessaires aux quelques habitations soumises à l'aléa pourront donc être de hauteurs relativement réduites, sauf près de Bourcefranc-le-Chapus où des niveaux d'eau assez hauts sont atteints.

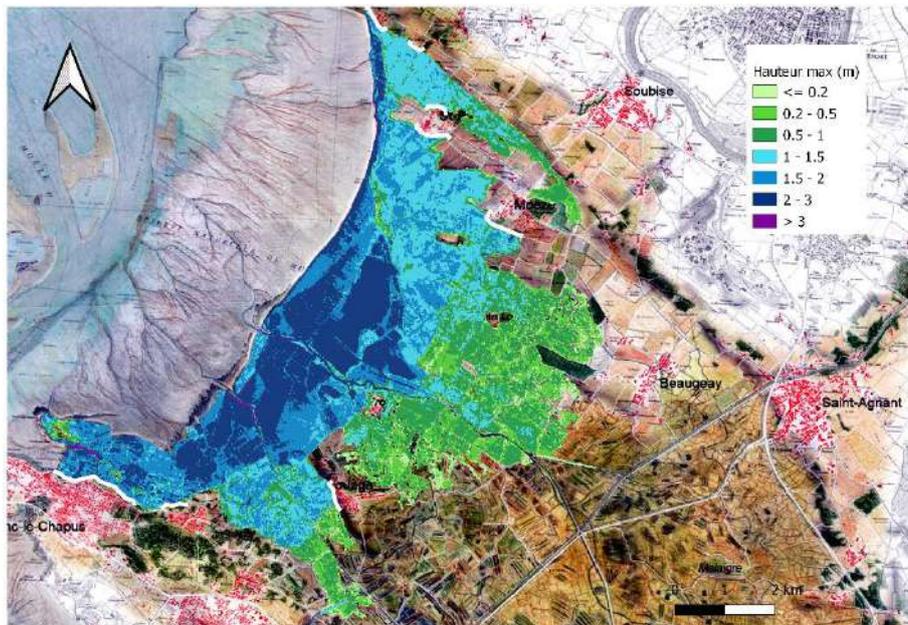


Figure 42 : Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions hydrométéorologiques extrêmes de type tempête Xynthia avec un niveau marin actuel, les digues littorales existantes arasées et la construction de protections rapprochées (représentées par le tracé en blanc).

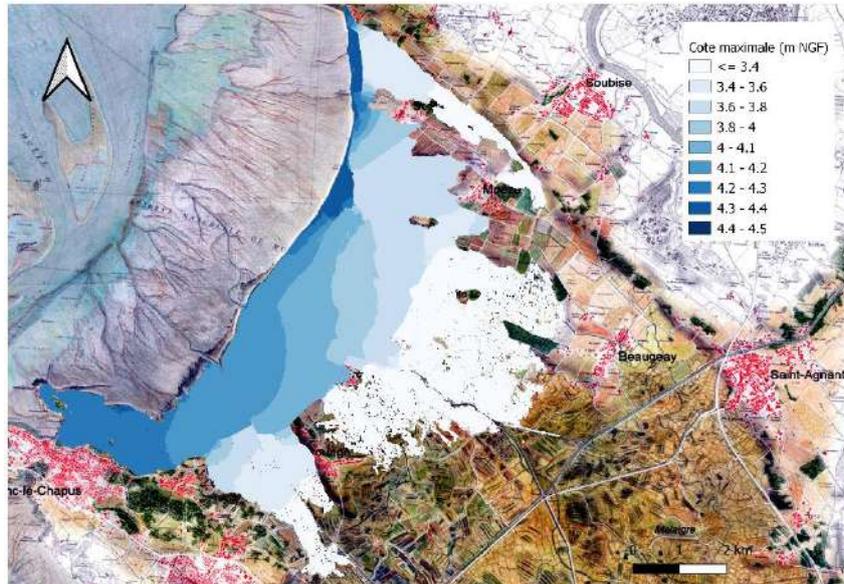


Figure 43 : Extension de la submersion et cotes maximales simulées (en m NGF) pour des conditions hydrométéorologiques extrêmes de type tempête Xynthia avec un niveau marin actuel, les digues littorales existantes arasées et la construction de protections rapprochées (représentées par le tracé en blanc).

Les deux figures suivantes présentent les résultats obtenus pour des conditions normales (hors tempête) proches des plus hautes mers astronomiques (PHMA, correspondant à un coefficient de marée de 120) à horizon 2030 (Figure 44) et 2050 (Figure 45) et montrent que pour une élévation d'une vingtaine de centimètres du niveau marin (et la digue littorale ruinée), les PHMA pourraient atteindre St-Froult, la Citadelle de Brouage, Port-des-Barques et Bourcefranc-le-Chapus, nécessitant des protections rapprochées ; tandis que Nodes, Hiery et Moëze ne seraient pas atteints. A l'horizon 2050, tous les enjeux précédemment identifiés seraient soumis à un risque de submersion, en l'absence d'ouvrages de protection dédiés.

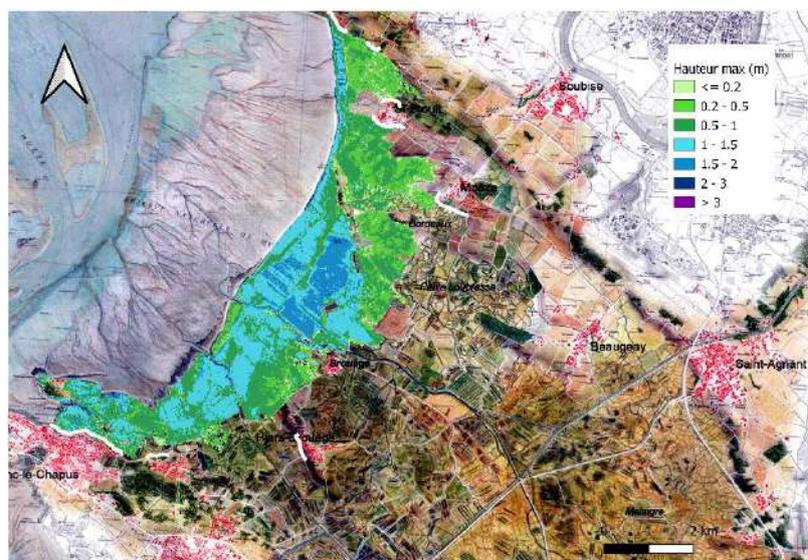


Figure 44 : Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions proches de la PHMA à l'horizon 2030. Dignes littorales arrasées ; protections rapprochées représentées par le tracé en blanc.

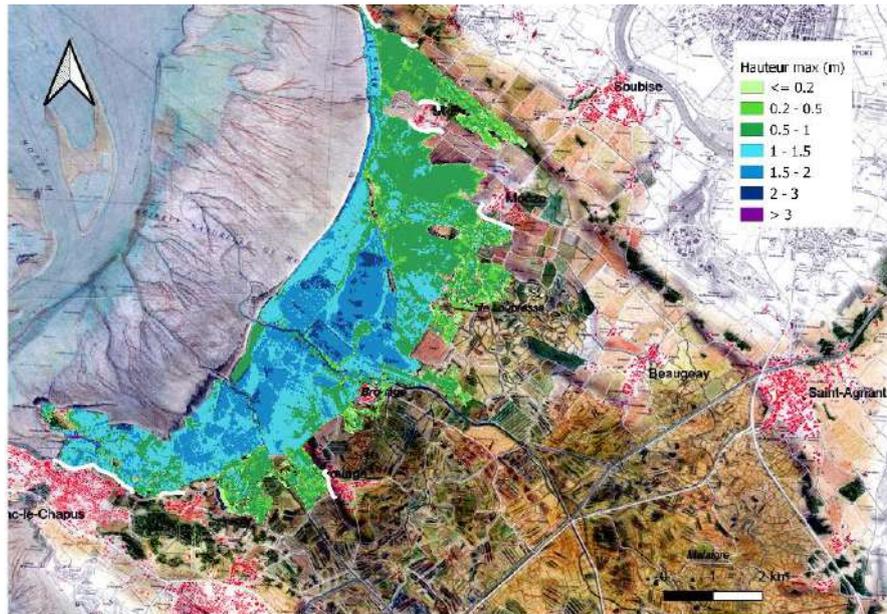


Figure 45 : Extension de la submersion et hauteurs maximales simulées pour des conditions proches de la PHMA à l'horizon 2050, avec les digues littorales arrasées et la construction de protections rapprochées (représentées par le tracé en blanc).

Dans ce scénario de protections rapprochées, la longueur d'ouvrages cumulée, évaluée ici de façon assez grossière, est de l'ordre de 8 km, soit environ la même longueur que la digue rétro-littorale de la proposition 2. Les coûts de construction correspondant, pour des digues en terre, seraient de l'ordre de 7.2 M€ à 9.6 M€.

Néanmoins, une analyse plus fine de la situation des habitations installées aux altitudes les plus basses, des zones urbaines et habitats isolés identifiés précédemment, permettrait certainement de réduire cette longueur d'ouvrages. De plus, dans le cas de protections rapprochées, la zone d'expansion créée diminue fortement les niveaux d'eau atteints près des enjeux humains, nécessitant donc des hauteurs d'ouvrages de protection moindres. Malheureusement, les données sur les coûts de construction d'ouvrages dont nous disposons ne sont pas assez détaillées pour prendre en compte ces différences de hauteur des ouvrages.

Les résultats de ces simulations numériques en conditions normales (PHMA et PMVE) actuelles et aux horizons 2030 et 2050, en termes d'emprise de submersion, et les durées de submersion potentielle annuelles correspondantes (Tableau 2) ont permis la réalisation d'une cartographie prospective d'habitats de la zone reconnectée dans le cadre de l'étude menée par le MNHN (Debue et al., 2022).

#### 4.2.3. Comparaison des 3 propositions d'aménagement à l'échelle du Marais de Brouage

Dans cette partie, les trois propositions d'aménagement du Marais de Brouage, issues de l'atelier de travail de juin 2019 réunissant les élus du territoire de Brouage, ont été analysées en termes :

- de caractérisation de l'aléa submersion marine, induit par des conditions marines similaires à la tempête Xynthia, pour les propositions P2 et P3 (non utile pour la proposition P1 puisque le système de défense envisagé serait conçu pour empêcher la submersion marine pour de telles conditions) ;
- de coûts de réhabilitation ou de construction des ouvrages de défense envisagés pour chaque proposition (hors ingénierie, foncier, ouvrages hydrauliques...).

Les simulations numériques réalisées pour des conditions marines similaires à la tempête Xynthia ont montré que :

- la suppression de la digue littorale actuelle et la création d'une zone d'expansion pour la submersion (propositions P2 et P3) permettent un étalement de la lame d'eau et diminuent ainsi notablement les niveaux d'eau au droit des ouvrages en retrait (par rapport aux niveaux d'eau au droit de la digue littorale actuelle pour les mêmes conditions marines) ;
- la création d'une digue rétro-littorale (proposition P2) permet la protection des villages de Hiers et de Brouage, mais plusieurs zones péri-urbaines (et habitations isolées) situées devant la digue restent vulnérables à la submersion marine. Il s'agit en particulier de quelques habitations, situées dans les zones les plus basses, de Bourcefranc-le-Chapus, de St-Froult et de Port-des-barques. Ainsi, pour cette proposition, des protections rapprochées devraient être ajoutées pour protéger ces enjeux humains.

Les simulations réalisées pour des conditions normales (hors tempête), proches des PHMA, à horizon 2030 et horizon 2050 et la digue littorale actuelle ruinée (digue inexistante) montrent que :

- avec une élévation de l'ordre de 20 cm du niveau de la mer, les PHMA pourraient atteindre la digue rétro-littorale (proposition P2) sur pratiquement  $\frac{3}{4}$  de sa longueur ainsi que les protections rapprochées (proposition P3) situées à St-Froult, à la Citadelle de Brouage, à Port-des-Barques et à Bourcefranc-le-Chapus ;
- avec une élévation de l'ordre de 40 cm, toute la digue rétro-littorale (proposition P2) pourrait être atteinte par la mer ainsi que toutes les zones identifiées à enjeux humains pour la proposition P3.

Remarque importante : pour les simulations des propositions P2 et P3, la digue littorale actuelle a été arasée, facilitant et maximisant la submersion marine à terre. Dans la réalité, même si la digue littorale actuelle n'était plus entretenue, elle mettrait un certain temps à se détériorer jusqu'à son effacement total (ce temps sera variable suivant les secteurs et leur exposition aux éléments naturels, mais également suivant le type d'ouvrages et son état actuel). Les résultats des simulations réalisées ici ont donc tendance à majorer l'aléa de submersion marine, en termes d'emprise et de hauteur d'eau.

Une première estimation des coûts de construction ou de réhabilitation des ouvrages de défense des 3 propositions, (sans prise en compte des ouvrages hydrauliques éventuellement nécessaires, ...) permet d'obtenir les ordres de grandeurs suivants :

- Pour la **proposition P1 (réhabilitation et maintien de la digue actuelle)**, le coût de réhabilitation des protections existantes pourrait s'élever **entre 20 et 40 M€ pour un linéaire d'environ 29 km**. Des ouvrages hydrauliques seraient de plus nécessaires dans le Havre de Brouage, le Canal de Mérignac et le Chenal de Daire pour compléter le système de protection. A noter que le linéaire d'ouvrages à réhabiliter pourrait être diminué de plus d'une dizaine de kilomètres, le long des berges des cours d'eau précédemment cités, si ces ouvrages hydrauliques étaient placés au niveau de leur embouchure.
- Pour la **proposition P2 (abandon de la digue actuelle et construction d'une digue en retrait)**, la construction de la **digue rétro-littorale, d'une longueur d'environ 8 km pourrait s'élever entre 7 et 10 M€**, auxquels il est nécessaire d'ajouter les coûts de construction de 6 km de protections rapprochées (pour les enjeux humains situés devant la digue rétro-littorale), soit au total **un coût entre 12.6 M€ et 16.8 M€**. Des ouvrages hydrauliques, au niveau de la digue rétro-littorale, seraient également nécessaires dans le Havre de Brouage, le Canal de Mérignac et le Chenal de Daire.

- Pour la **proposition P3 (constructions de protections au plus près des enjeux)**, les coûts de construction des 8 km cumulés des protections rapprochées pourraient s'élever **entre 7.2 M€ et 9.6 M€**.

A ces coûts de construction, doivent être ajoutés les coûts de gestion et d'entretien des ouvrages dont l'ordre de grandeur est le suivant (CEREMA, 2018) :

- Digue avec parement : 3000<4300<8800 €/km/an HT (2 à 5% de l'investissement initial sur la durée de service)
- Digue sans parement : 6400<8600<12300 €/km/an HT (5 à 15% de l'investissement initial) (digue de premier rang).

Ainsi, le coût de gestion et d'entretien de la digue littorale de la proposition P1 pourrait s'élever, pour une digue avec parement, entre 100 et 300 k€ par an. Pour la digue rétro-littorale et les protections rapprochées de la proposition P2, considérées ici sans parement, ce coût sera relativement limité au début puisque les ouvrages ne seront pas en contact direct avec la mer (hors événement extrême), mais à terme et avec l'élévation du niveau marin, ces ouvrages seront atteints par la mer à chaque marée, et le coût de gestion et d'entretien pourrait alors s'élever entre 100 et 200 k€ par an. De façon similaire pour les protections rapprochées de la proposition 3, ce coût, faible à court terme, pourrait atteindre entre 50 et 100 k€ par an à moyen terme.

En ne considérant que les coûts relatifs à la réhabilitation et/ou à la construction des ouvrages de défense et à leur entretien, la proposition P3 apparaît évidemment la plus intéressante en termes de coûts pour la société civile. Néanmoins, cette estimation des coûts ne prend pas en compte la relocalisation ou l'adaptation des activités existantes aujourd'hui (agricoles, conchylicoles, touristiques, culturelles, de protection de l'environnement avec la Réserve Naturelle, ...), qui seront soumises de manière récurrente, voire permanente, à la submersion marine à moyen terme. L'ensemble de ces coûts n'a pas été évalué dans le présent rapport.

Ainsi, en terme de protection des enjeux humains face à l'aléa de submersion marine, la proposition P3, basée sur une dépoldérisation du marais et une protection rapprochée de ces enjeux, paraît la plus pertinente :

- Elle permet, à moyen terme, de limiter la longueur d'ouvrages de protection à construire et d'en limiter leur hauteur par la création d'une zone d'expansion permettant un étalement de la lame d'eau et une diminution des cotes maximales atteintes par les submersions (par rapport à une digue littorale, proposition P1, et une digue rétro-littorale, proposition P2). Ces éléments ont bien sûr des conséquences directes sur les coûts de construction et d'entretien des ouvrages nécessaires.
- Pour ces mêmes raisons (longueur et cote des ouvrages inférieures aux autres propositions), elle est plus adaptée à un futur rehaussement du niveau de protection, afin d'accompagner l'élévation du niveau marin à plus long terme. Il est en effet plus simple de rehausser des tronçons de protections individuelles de longueurs réduites plutôt qu'un seul ouvrage d'un seul tenant.
- Elle limite les risques liés à une défaillance ou à une rupture des ouvrages de protection. En effet la rupture de la digue rétro-littorale ou de la digue littorale (création d'une brèche localisée par exemple) pendant un événement extrême pourrait entraîner une onde de submersion importante au sein du marais (en termes de volume et de vitesse) qui pourrait atteindre la plupart des enjeux humains. A l'opposé, la défaillance d'un des ouvrages de protection rapprochée engendrera une submersion très localisée et réduite en terme d'enjeux humains.
- La reconnexion à la mer d'une part importante du marais de Brouage va entraîner des modifications du milieu, notamment morphologiques par le flux et reflux des marées et l'apport de sédiments par la mer, mais également en termes de typologie d'habitats (création de zones de vasière et de prés salés suivant la topographie locale). La

dynamique de ces modifications est difficile à prévoir, elles pourraient néanmoins avoir des effets très positifs en termes de réduction de l'aléa. En effet, si la sédimentation est suffisante au sein de la zone reconnectée, elle engendrera une exondation du sol qui diminuera de facto les hauteurs d'eau ; de même la végétation de prés salés en haut d'estran permet une dissipation de l'énergie des courants et vagues et atténue ainsi les conditions de forçages. Outre ces effets de réduction d'aléas, les habitats de type vasières et prés salés sont reconnus pour leurs forts taux de captation et de séquestration du carbone. La création de ces types d'habitats contribuera donc à l'atténuation des effets du changement climatique. **Si cette reconnexion du Marais est acceptée au niveau du territoire, il sera primordial de suivre les évolutions du site (morphologiques, sédimentaires, écologiques) à moyen terme afin de mieux les comprendre et les prévoir et pouvoir ainsi mieux évaluer les bénéfices de cette gestion souple du trait de côte.**

## 5. Conclusion

Ce rapport présente la contribution du BRGM au projet Adapto pour le site du Marais de Moëze-Brouage. **Il s'agissait initialement d'étudier différents scénarios de gestion des terrains du Conservatoire du Littoral, situés dans la partie terrestre de la Réserve Nationale Naturelle.** L'étude visait à comparer les **3 scénarios de gestion** envisagés (**1 Maintien et renforcement de la digue à son emplacement actuel ; 2 Effacement de la digue actuelle ; 3 Recul stratégique de l'emplacement de la digue**), en termes :

- De caractérisation de l'aléa de submersion marine et d'exposition des enjeux humains ;
- De hauteur, de longueur (voire de position) des ouvrages nécessaires à la protection des enjeux présents ;
- De coûts de construction de ces ouvrages.

Pour chaque scénario de gestion (si cela était pertinent), des simulations numériques hydrodynamiques ont été réalisées, pour des conditions normales (pleines mers de vives-eaux et plus hautes mers astronomiques) et extrêmes (conditions similaires à la tempête Xynthia) avec un niveau marin actuel et à l'horizon 2030 et 2050 (en considérant respectivement une élévation du niveau marin d'environ + 18 cm et + 36 cm), afin de caractériser les submersions marines induites, en termes d'emprise spatiale à terre et de hauteur ou niveau d'eau et d'enjeux humains exposés.

Cette première partie de l'étude, dédiée à l'aménagement des terrains du Conservatoire et basée sur l'utilisation de simulations numériques, a permis de montrer que :

- **Pour le scénario 1** (maintien et renforcement de la digue actuelle) et pour des conditions marines similaires à la tempête Xynthia, la seule réhabilitation de la digue Havre-Plaisance (à une cote supérieure au niveau marin maximal atteint lors de cette tempête) ne suffit pas à protéger efficacement le marais de Moëze : des travaux complémentaires seraient en effet nécessaires sur l'ouvrage hydraulique au nord des terrains du Conservatoire, ainsi qu'au niveau du Havre de Brouage (réhabilitation de la digue en rive droite du Havre de Brouage ou mise en place d'un ouvrage hydraulique à son embouchure) pour empêcher toute submersion marine sur les terrains du Conservatoire. La modélisation a également montré que dans la partie sud du marais de Brouage (partie du marais située au sud-ouest du Havre de Brouage) les cotes actuelles des digues refaites suite à Xynthia (sans défaillance des ouvrages) permettraient, si la tempête Xynthia se reproduisait, de réduire l'emprise soumise à la submersion marine, sans toutefois l'empêcher.
- **Pour le scénario 2** (effacement de la digue actuelle) et pour des conditions marines similaires à Xynthia, la suppression de la digue Havre-Plaisance multiplie pratiquement par deux la zone submergée dans la partie centrale du marais (la mer pénètre en effet jusqu'à pratiquement 5.5 km des côtes, alors qu'elle s'était arrêtée pendant la tempête au niveau de la route départementale reliant Moëze à Brouage, soit à environ 2.7 km des côtes en 2010). La suppression de la digue a également un impact sur l'emprise de submersion en rive gauche du Havre de Brouage, qui s'en trouve augmentée, montrant une influence des aménagements réalisés sur les terrains du Conservatoire sur une zone plus large.
- **Pour le scénario 3** (recul stratégique de l'emplacement de la digue) et pour des conditions marines similaires à Xynthia, quelle que soit la position de la digue rétro-littorale, une submersion se produit derrière l'ouvrage sur les terrains du Conservatoire, via le Havre de Brouage. La digue en elle-même ne protège donc pas totalement de la

submersion et des ouvrages seraient à prévoir le long du Havre de Brouage pour éviter ce phénomène. Par ailleurs, la présence d'une digue rétro-littorale accroît légèrement la submersion de la zone située entre le Havre de Brouage et le canal de Mérignac, et plus la digue de 2nd rang est en retrait par rapport à la côte et plus ce phénomène est important. Ces simulations permettent également de montrer que le niveau marin maximal atteint devant les digues rétro-littorales considérées reste sensiblement le même quelle que soit la position de la digue. La cote des ouvrages nécessaires, relativement à un événement extrême de type Xynthia, sera donc la même pour la digue rétro-littorale que pour la digue de premier rang.

De plus, une première évaluation des coûts de construction et de réhabilitation des ouvrages du scénario 1 et du scénario 3 montre que ces coûts sont globalement du même ordre de grandeur et assez élevés (entre 5 et 8 millions d'euros), à la vue des enjeux présents (réserve naturelle, parcelles agricoles, installations conchylicoles principalement). La construction d'une digue rétro-littorale pourrait même être plus chère que la réhabilitation de la digue de premier rang. Par contre, la digue rétro-littorale n'étant pas en contact direct avec mer, les frais d'entretien et de gestion de celle-ci devrait être moindres que ceux de la digue de premier rang.

Ainsi cette **première phase du travail** a permis de mettre en évidence que les scénarios de gestion envisagés par le Conservatoire sur ses terrains ont une influence en terme d'aléas de submersion marine sur les zones avoisinantes, notamment la partie sud du marais de Brouage, mais également que les aménagements envisagés (scénarios 1 et 3) nécessitent, pour être efficaces, des interventions sur des zones n'appartenant pas au Conservatoire. Il apparaît ainsi que **le devenir du marais de Moëze**, dans un contexte de changement climatique, **doit être réfléchi de façon globale, à l'échelle du Marais de Brouage dans son ensemble, et non seulement à l'échelle des terrains propriétés du Conservatoire.**

Sur l'initiative du Conservatoire du Littoral, une partie des résultats de cette première phase a été présentée au Comité des Maires du 12 février 2019 (instance regroupant les maires des différentes communes du marais de Brouage), soulignant en particulier **la nécessité d'une réflexion globale de la gestion du trait de côte, à l'échelle du Marais de Brouage.**

Suite à cette présentation, le Conservatoire a invité l'ensemble des élus du territoire à un atelier de travail afin de recueillir leurs avis sur les différentes solutions de gestion du trait de côte à envisager à l'échelle du Marais de Brouage. Cet atelier de travail, qui s'est tenu le 3 juin 2019 dans les locaux de la Délégation Centre-Atlantique du Conservatoire du Littoral à Rochefort, a permis de définir 3 propositions de gestion de la bande côtière à l'échelle du Marais de Brouage dans son intégralité. **L'analyse et la comparaison de ces 3 propositions**, en suivant la même méthode que précédemment, **a fait l'objet de la deuxième phase de travail de cette étude.**

Les 3 propositions, issues de l'atelier de travail avec les élus locaux, furent les suivantes :

- **Proposition P1 : Maintien d'une digue à l'emplacement actuel** (assurant un niveau de protection adéquat) avec mise en place d'ouvrages hydrauliques dans les Havres ;
- **Proposition P2 : Création d'une digue en retrait** (digue rétro-littorale), matérialisant à terme la nouvelle limite terre-mer. Les activités potentiellement impactées, situées entre la digue actuelle et celle en retrait sont relocalisées.
- **Proposition P3 : Des protections rapprochées sont construites au niveau des centres bourg menacés par les submersions marines.** Les digues actuelles, en front de mer sont laissées en libre-évolution. Les activités potentiellement impactées, situées derrière la digue actuelle sont relocalisées.

Dans la 2<sup>ème</sup> phase de cette étude, dédiée à l'étude de ces 3 propositions à l'échelle globale du Marais de Brouage, les simulations numériques réalisées pour des conditions marines similaires à la tempête Xynthia ont montré que :

- la suppression de la digue littorale actuelle et la création d'une zone d'expansion pour la submersion (**propositions P2 et P3**) permettent un étalement de la lame d'eau et diminuent ainsi notablement les niveaux d'eau au droit des ouvrages en retrait (par rapport aux niveaux d'eau au droit de la digue littorale actuelle pour les mêmes conditions marines) ;
- la création d'une digue rétro-littorale (**proposition P2**) permet la protection des villages de Hiers et de Brouage, mais plusieurs zones péri-urbaines (et habitations isolées) situées devant la digue restent vulnérables à la submersion marine. Il s'agit en particulier de quelques habitations, situées dans les zones les plus basses, de Bourcefranc-le-Chapus, de St-Froult et de Port-des-barques. Ainsi, pour cette proposition, des protections rapprochées devraient être ajoutées pour protéger ces enjeux humains.

Une première estimation des coûts de construction ou de réhabilitation des ouvrages de défense des 3 propositions, (sans prise en compte des ouvrages hydrauliques éventuellement nécessaires, etc) permet d'obtenir les ordres de grandeurs suivants :

- Pour la **proposition P1**, le coût de réhabilitation du système de protection existant pourrait s'élever **entre 20 et 40 M€ pour un linéaire d'environ 29 km**. Des ouvrages hydrauliques seraient de plus nécessaires dans le Havre de Brouage, le Canal de Mérignac et le Chenal de Daire pour compléter le système de protection. A noter que le linéaire d'ouvrages à réhabiliter pourrait être diminué de plus d'une dizaine de kilomètres, le long des berges des cours d'eau précédemment cités, si ces ouvrages hydrauliques étaient placés au niveau de leur embouchure.
- Pour la **proposition P2**, la construction de la **digue rétro-littorale, d'une longueur d'environ 8 km pourrait s'élever entre 7 et 10 M€**, auxquels il est nécessaire d'ajouter les coûts de construction de 6 km de protections rapprochées (pour les enjeux humains situés devant la digue rétro-littorale), soit au total **un coût entre 12.6 M€ et 16.8 M€**. Des ouvrages hydrauliques, au niveau de la digue rétro-littorale, seraient également nécessaires dans le Havre de Brouage, le Canal de Mérignac et le Chenal de Daire.
- Pour la **proposition P3**, les coûts de construction des 8 km cumulés des protections rapprochées pourraient s'élever **entre 7.2 M€ et 9.6 M€**.

En ne considérant que les coûts relatifs à la réhabilitation et/ou à la construction des ouvrages de défense et à leur entretien, la proposition P3 apparaît évidemment la plus intéressante en termes de coûts pour la société. Néanmoins, cette estimation des coûts ne prend pas en compte la relocalisation ou l'adaptation des activités existantes aujourd'hui (agricoles, conchylicoles, touristiques, culturelles, de protection de l'environnement avec la Réserve Naturelle, ...), qui seront soumises de manière récurrente, voire permanente, à la submersion marine à moyen terme. L'ensemble de ces coûts n'a pas été évalué dans le présent rapport.

Néanmoins, dans le contexte du changement climatique et avec l'élévation du niveau de la mer qui va continuer sur plusieurs siècles, **la proposition P3**, basée sur une dépoldérisation du marais et une protection rapprochée des enjeux humains, **paraît la plus pertinente** :

- Elle permet, à moyen terme, de limiter la longueur d'ouvrages de protection à construire et d'en limiter leur hauteur, par la création d'une zone d'expansion permettant un étalement de la lame d'eau et une diminution des cotes maximales atteintes par les submersions. Ces éléments ont bien sûr des conséquences directes sur les coûts de construction et d'entretien des ouvrages nécessaires.

- Elle est plus adaptée à un futur rehaussement du niveau de protection, afin d'accompagner l'élévation du niveau marin à plus long terme.
- Elle limite les risques liés à une défaillance ou rupture des ouvrages de protection. En effet, la défaillance d'un des ouvrages de protection rapproché engendrerait une submersion très localisée et réduite en terme d'enjeux humains, contrairement à la défaillance de la digue littorale ou rétro-littorale.
- La reconnexion à la mer d'une part importante du marais de Brouage pourrait entraîner une exondation des sols par sédimentation et le développement de végétations halophiles, telles que les prés-salés. Ces modifications, difficiles à prévoir, pourraient avoir un rôle important de réduction des aléas et créeraient des milieux connus pour leur fort taux de captation et séquestration du dioxyde de carbone, contribuant ainsi à l'atténuation du changement climatique.

A noter qu'un PAPI (Plan d'Actions et de Prévention des Inondations) d'intention est en cours d'élaboration (2021-2023) sur le marais de Brouage. Dans ce cadre, les trois propositions d'aménagement précédentes, à l'échelle du marais, seront analysées et comparées de manière à évaluer objectivement leur pertinence socio-économique par une analyse coût-bénéfice (ACB) / analyse multicritères (AMC), dans le prolongement des études menées dans le programme Adapto. A ce stade du PAPI et de l'analyse des différentes propositions, les conclusions de ce rapport pourront utilement être prises en compte.

Ainsi, sur ce territoire du Marais de Brouage, la présente étude et plus généralement les diverses études (paysages, perception sociale, économie des territoires, biodiversité,...) réalisées dans le cadre du programme Adapto, ont permis une comparaison objective des différentes possibilités de gestion du trait de côte et ont grandement participé à l'acceptation locale d'une gestion souple de la bande côtière.

## 6. Bibliographie

- Amante C.J. et Eakins B.W. (2016) - Accuracy of interpolated bathymetry in digital elevation models. In: Brock, J.C.; Gesch, D.B.; Parrish, C.E.; Rogers, J.N., and Wright, C.W. (eds.), Advances in Topobathymetric Mapping, Models, and Applications. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, No. 76, pp. 123–133. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.
- Bento, C., Blanc, M., 2017. Les paysages du marais de Brouage, Technical report. ENSP Versailles. [https://issuu.com/cb935/docs/apr\\_marais\\_de\\_brouage\\_all\\_g](https://issuu.com/cb935/docs/apr_marais_de_brouage_all_g)
- Bernon N., Mugica J., Le Cozannet G. et Maspataud A. (2017) – Cartographie de la vulnérabilité du littoral au recul du trait de côte dans un contexte de changement climatique à l'échelle du bassin Adour-Garonne. Rapport final. BRGM/RP-67395-FR, 96p., 57 ill., 8 tab, 1 ann..
- Bertin, X., Li, K., Roland, A., Breilh, J.F., Zhang, Y.L. and Chaumillon, E., 2014. *A modeling-based analysis of the flooding associated with Xynthia, central Bay of Biscay*. Coastal Engineering 94, 80-89.
- Bertin, X., Bruneau, N., Breilh, J.-F., Fortunato, A.B., Karpytchev, M., 2012. Importance of wave age and resonance in storm surges: The case Xynthia, Bay of Biscay. Ocean Model. 42, 16–30. doi:10.1016/j.ocemod.2011.11.001
- Breilh, J-F., Chaumillon, E., Bertin, X., Gravelle, M. (2013) Assessment of static flood modeling techniques: application to contrasting marshes flooded during Xynthia (western France). Natural Hazards and Earth System Sciences, 13, 1595–1612, 2013 <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1595-2013>
- Breilh, J-F. (2014). *Les surcotes et les submersions marines dans la partie centrale du Golfe de Gascogne : les enseignements de la tempête Xynthia*. Thèse de doctorat en Sciences de la Terre. Université de La Rochelle. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01174997>
- 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.
- 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
- Bulteau, T., Idier, D., Lambert, J., Garcin, M. (2015). How historical information can improve estimation and prediction of extreme coastal water levels: application to the Xynthia event at La Rochelle (France). Natural Hazards and Earth System Sciences, European Geosciences Union, 2015, 15, pp.1135-1147.
- CEREMA (2018). Coût des protections contre les aléas littoraux. Référence SKU1844306213, Numéro ISSN 2417-9701, 248 p.

Charpy C., Schmitt T., Biscara L., Maspataud A., Avisse L., Créach R. (2015) - Précision et performance des méthodes d'interpolation pour la réalisation de modèles numériques de terrain bathymétriques. *Colloque merIGéo*, 24-26 novembre 2015, Brest, 173-175.

Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, 2013: Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fisher E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. (2015) - *System for Automated Geoscientif Analyses (SAGA) v.2.1.4*. *Geosci. Model Dev.*, 8, 1991-2007. doi:10.5194/gmd-8-1991-2015.

Cortina-Segarra, J., García-Sánchez, I., Grace, M., Andrés, P., Baker, S., Bullock, C., Decler, K., Dicks, L.V., Fisher, J.L., Frouz, J., Klimkowska, A., Kyriazopoulos, A.P., Moreno-Mateos, D., Rodríguez-González, P.M., Sarkki, S. and Ventocilla, J.L. (2021), Barriers to ecological restoration in Europe: expert perspectives. *Restor Ecol* e13346. <https://doi.org/10.1111/rec.13346>

DDTM-17, 2011. Éléments de mémoire sur la tempête Xynthia du 27 et 28 Février 2010 en Charente-Maritime. Available on <http://www.charente-maritime.gouv.fr/layout/set/print/Politiques-publiques/Environnement-risques-naturels-et-technologiques/Risques-naturels-et-technologiques/Generalites-sur-la-prevention-des-risques-naturels/Elements-de-memoire-Xynthia/Elements-de-memoire-sur-la-tempete-Xynthia-du-27-et-28-fevrier-2010>

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 du marais de Moëze, PatriNat (OFB-MNHN-CNRS).

DREAL Poitou-Charentes, 2014. Directive inondations. Bassin Adour-Garonne. Rapport de présentation de la cartographie du risque de submersion marine sur le Littoral Charentais-Maritime. Available on : [Rapport TRI Littoral Charentais v2 1 sans cartes cle54839f.pdf](http://developpement-durable.gouv.fr/developpement-durable/rapport-tri-littoral-charentais-v2-1-sans-cartes-cle54839f.pdf) ([developpement-durable.gouv.fr](http://developpement-durable.gouv.fr))

Eakins B. W. et Grothe P. R. (2014) - Challenges in Building Coastal Digital Elevation Models. *Journal of Coastal Research*, 30(05), 942-953. <http://dx.doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00192.1>

European Environment Agency, 2012. CORINE Land Cover Project. Commission of the European Communities. Available at <http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012/view>

Fouin, M., Travichon, S., Mouillon, P. (2020). Quelles évolutions de la biodiversité en fonction de la gestion du trait de côte dans un contexte d'élévation du niveau marin? Analyse sur le site de Moëze-Brouage: prévisions à 2050. [https://www.lifeadapto.eu/media/5772/Brouage\\_2021\\_Rapport%20LPO.pdf](https://www.lifeadapto.eu/media/5772/Brouage_2021_Rapport%20LPO.pdf)

Goutx, D., Ladreyt, S. (2001) *Hydraulique des cours d'eau. La théorie et sa mise en pratique*. Cerema. 51p, ISSN : 2276-0164.

IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.

Kopp, R. E., Horton, R. M., Little, C. M., Mitrovica, J. X., Op-penheimer, M., Rasmussen, D. J., Strauss, B. H., and Tebaldi, C.: Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites, *Earth's Future*, 2, 383–406, 2014.

Lazure, P., Dumas, F. (2007). *An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS)*. *Advances In Water Resources*, 31(2), 233-250.

Le Cozannet, G., Bulteau, T. Castelle, B., Ranasinghe, R., Wöppelmann, G., Roher, J., Bernon, N., Idier, D., Louisor, J., Salas-y-Mélia, D. (2019). - Quantifying uncertainties of sandy shoreline change projections as sea level rises. *Scientific Reports*.

Lazure, P., Dumas, F. (2007). An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances In Water Resources*, 31(2), 233-250. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.06.010>

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

Leitch, A. M., Palutikof, J. P., Rissik, D., Boulter, S. L., & Tonmoy, F. N. (2019). Co-development of a climate change decision support framework through engagement with stakeholders. *Climatic Change*. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02401-0>

Lorie, M., Neumann, J.E., Sarofim, M.C., Jones, R., Horton, R.M., Kopp, R.E, Fant, C., Wobus, C., Martinich, J., O'Grady, M., Gentile, L.E., Modeling coastal flood risk and adaptation response under future climate conditions, 2020, *Climate Risk Management*, Volume 29, <https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100233>

ONERC (2015). Le littoral dans le contexte du changement climatique, rapport au Premier ministre et au Parlement. La documentation Française. 180p. [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC\\_Rapport\\_2015\\_Littoral\\_WEB.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_Rapport_2015_Littoral_WEB.pdf)

Shom (2015). MNT Topo-Bathymétrie Côtier des Pertuis Charentais (Projet Homonim). [http://dx.doi.org/10.17183/MNT\\_COTIER\\_PERTUIS\\_HOMONIM\\_20m\\_WGS84](http://dx.doi.org/10.17183/MNT_COTIER_PERTUIS_HOMONIM_20m_WGS84)

Shom (2017) - *Ouvrage de marée. Références Altimétriques Maritimes Ports de France métropolitaine et d'outre-mer. Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée*. Edition 2017. 120 p.

Smith W.H.F. et Wessel P. (1990) - Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics*, Vol. 55, No. 3 (March 1990), 293-305.

Thiéblemont R, Le Cozannet G, Toimil A, Meyssignac B, Losada IJ. (2019). Likely and High-End Impacts of Regional Sea-Level Rise on the Shoreline Change of European Sandy Coasts Under a High Greenhouse Gas Emissions Scenario. *Water*. 2019; 11(12):2607. <https://doi.org/10.3390/w11122607>

Wessel P., Smith W. H. F., Scharroo R., Luis J., Wobbe F. (2013) - Generic Mapping Tools: Improved Version Released. *EOS Trans. AGU*, 94(45), 409-410. doi:10.1002/2013EO450001.







**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](http://www.brgm.fr)