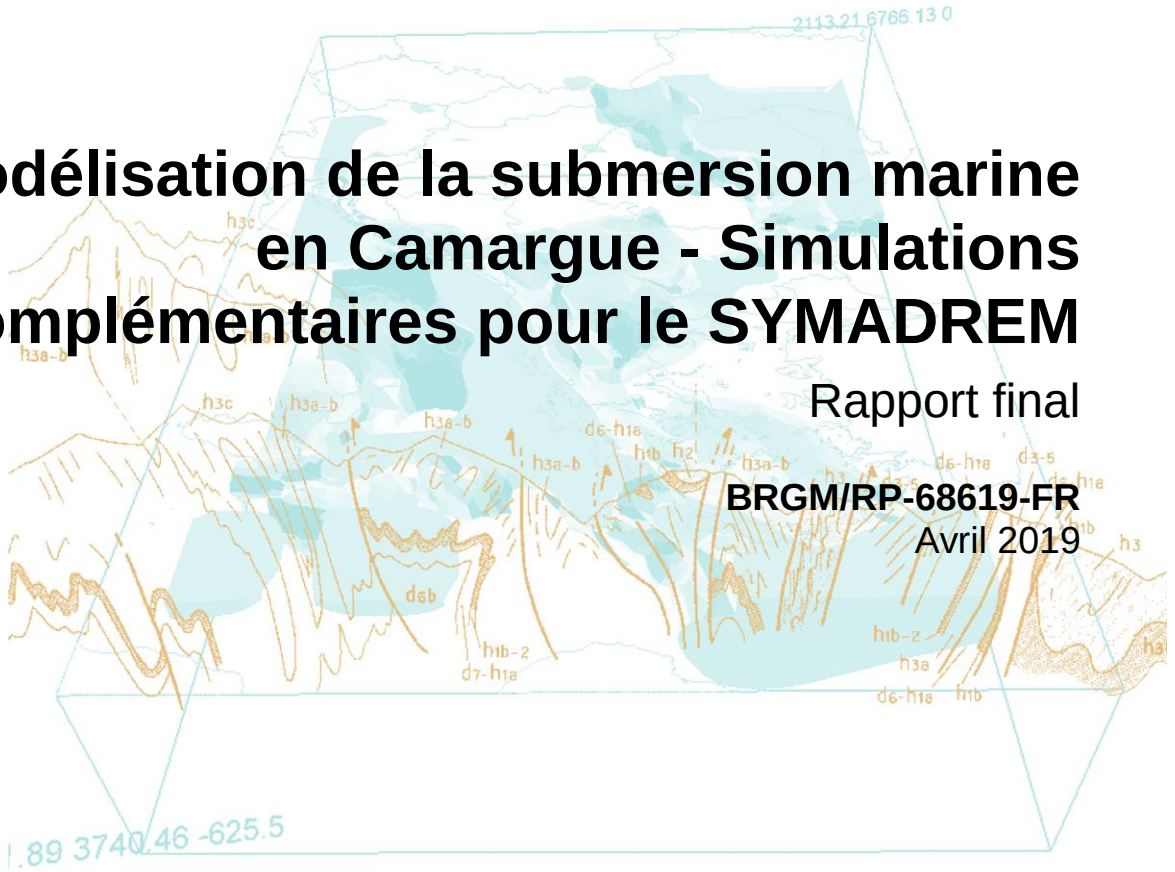


Document public



Modélisation de la submersion marine en Camargue - Simulations complémentaires pour le SYMADREM

Rapport final

BRGM/RP-68619-FR
Avril 2019

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement SYMADREM des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

Géosciences pour une Terre durable brgm

Document public

Modélisation de la submersion marine en Camargue - Simulations complémentaires pour le SYMADREM

Rapport final

BRGM/RP-68619-FR
Avril 2019

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 2018-RIS-24

S. Elineau, R. Pedreros, F. Paris, A. Stépanian et T. Bulteau

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : C. Oliveros	Nom : JL Lambeaux
Fonction : Responsable d'unité	Fonction : Directeur régional
Date : 19/04/2019	Date : 23/05/2019
Signature : 	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

Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement SYMADREM des Digues du Delta du Rhône et de la Mer

Géosciences pour une Terre durable brgm

Mots-clés : Submersion marine, Niveau marin, Surcotes, Vagues, Milieu littoral, Camargue, Provence-Alpes-Côte d'Azur.

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

Elineau S., Pedreros R., Paris F., Stépanian A. et Bulteau T. (2019) - Modélisation de la submersion marine en Camargue - Simulations complémentaires pour le SYMADREM. Rapport final. BRGM/RP-68619-FR, 54 p., 36 fig., 3 tabl., 1 ann.

© BRGM, 2019 ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre d'un projet en partenariat avec la Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Bouches-du-Rhône (DDTM13), le BRGM a développé entre 2015 et 2017, un modèle numérique permettant de réaliser des simulations dynamiques des phénomènes de submersion marine sur la totalité du littoral camarguais (Rapport RP-66804-FR).

Le modèle apporte des éléments d'aide à la décision à la DDTM13 en termes d'évaluation précise de l'extension de la submersion marine sur les surfaces terrestres de la Camargue et du golfe de Fos-sur-Mer. Les scénarios sont modélisés pour des échéances actuelles et futures, en prenant en compte une remontée du niveau marin liée au changement climatique global. Ce modèle permet également de tester différents scénarios d'aménagements (abandon ou construction de digues) pour la gestion du risque de submersion marine en Camargue.

En 2018, le BRGM et le Syndicat Mixte d'Aménagement des Digues du Delta du Rhône et de la Mer (SYMADREM) ont noué un partenariat pour une exploitation complémentaire du modèle, sur des scénarios lui permettant de mener à bien ses opérations de gestion du littoral de Camargue.

Des scénarios complémentaires définis par le SYMADREM, avec ou sans brèches, ont été simulés sur le modèle numérique de terrain produit initialement. De plus, des modifications topographiques ont également été apportées afin de simuler des scénarios avec la prise en compte de différents états d'aménagement.

Les résultats des simulations alimenteront en particulier l'étude de danger (EDD) sur tout le linéaire de la Camargue en fournissant des données d'entrée pour les modèles utilisés par les bureaux d'études pour la détermination du niveau de protection de la digue à la mer, et pour la définition du niveau altimétrique de la crête de la digue de second rang.

Sommaire

1. Introduction 9

1.1. CONTEXTE GÉNÉRAL 9
1.1.1. Étude Salin de Giraud 9
1.1.2. Étude du système de protection du littoral du delta du Rhône géré par le SYMADREM 10

1.2. CONTENU DU RAPPORT 10

2. Présentation du modèle 11

2.1. RAPPELS SUR LES SUBMERSIONS MARINES 11

2.2. PLATEFORME DE MODÉLISATION 13
2.2.1. Modèle hydrodynamique et de submersion par débordement 13
2.2.2. MARS-2DH (version 9.06) : modèle hydrodynamique de niveaux et courants 14
2.2.3. WW3 (version 4.18) : modèle de propagation des vagues 15
2.2.4. Emprise et résolution spatiale 16

3. Simulations réalisées 17

3.1. OBJECTIFS 17

3.2. SIMULATIONS 17
3.2.1. Scénarios 17
3.2.2. États d'aménagement et configurations topographiques associées 18
3.2.3. Synthèse des simulations 21

3.3. PRISE EN COMPTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE 21

3.4. CINÉTIQUE DE LA SIMULATION 21

4. Résultats 25

4.1. ÉTATS INITIAUX DES PLANS D'EAU 25

4.2. RÉSULTATS DES SIMULATIONS 26
4.2.1. Scénario 1 : décennal 27
4.2.2. Scénario 2 : trentennal 29
4.2.3. Scénario 3 : centennal 31
4.2.4. Scénario 4 : exceptionnel 33
4.2.5. Scénario 5 : centennal 2100 35
4.2.6. Scénario 6 : exceptionnelle 2100 36
4.2.7. Scénario 7 : aléa PPRI 38
4.2.8. Scénario 8A : tempête de novembre 2014 39

4.3. CARTOGRAPHIE DES SUR-IMPACTS LIÉS AUX BRECHES DANS LE SYSTÈME D'ENDIGUEMENT 40
4.3.1. Localisation des brèches 40
4.3.2. Caractéristique et cinétique des brèches 41
4.3.3. Modélisation avec brèches 41
4.3.4. Sur-impact lié aux brèches 43

4.4. CARTOGRAPHIE DE L'IMPACT DES AMÉNAGEMENTS 45

5. Conclusion 49

6. Bibliographie 51

Liste des figures

Figure 1 : Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête (surcotes) jusqu'au rivage. 12

Figure 2 : Schéma de principe de la méthodologie employée pour la propagation de la submersion marine par modélisation dynamique. 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). 12

Figure 3 : Schématisation de stratégie de modélisation utilisée. 13

Figure 4 : Illustration schématique du modèle Camargue : les forçages météo (flèches vertes), marins (traits bleus) et fluvial (linéaire « bleu ciel » du Rhône et du petit-Rhône), le linéaire côtier (trait noir) et les phénomènes de submersion représentés (flèches bleues pour les débordements et cercle mauve pour les franchissements). 14

Figure 5 : Construction du maillage non structuré utilisé par WW3. 15

Figure 6 : Modifications de topographie utilisées pour la configuration C 20

Figure 7 : Différences entre l'état d'aménagement A et l'état d'aménagement C sur les secteurs de digues à araser 20

Figure 8 : Séries temporelles Niveaux-Vagues-Vents pour les scénarios 1 à 7 22

Figure 9 : Conditions hydrodynamiques pendant la tempête du 25/11/2014 au 1/12/2014. Les variations de niveau marin en orange sont basés sur des moyennes sur 10 min. La modélisation prend en compte des moyennes horaires pour éviter des artefacts numériques liés à la présence d'oscillations de type Seiche dans les données de mesure. Ici le niveau SWL maximal enregistré est +1,04 m NGF, mais dans la simulation, c'est la moyenne horaire de +0,97 m NGF qui est utilisé. 23

Figure 10 : Plans d'eau initiaux pour les scénarios d'élévation du niveau moyen de la mer et différentiel d'hauteur entre ces deux scénarios 25

Figure 11 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 1A - Décennal et État d'aménagement initial 27

Figure 12 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 1C - Décennal et État aménagé 28

Figure 13 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 2A - Trentennal et État d'aménagement initial 29

Figure 14 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 2C - Trentennal et État aménagé 30

Figure 15 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 3A - Centennal et État d'aménagement initial 31

Figure 16 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 3C - Centennal et État aménagé 32

Figure 17 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 4A - Exceptionnel et État d'aménagement initial 33

Figure 18 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 4C - Exceptionnel et État aménagé 34

Figure 19 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 5C – Centennal 2100 et État aménagé 35

Figure 20 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 6C1 - Exceptionnelle 2100 et État aménagé C1 (topographie MNT Litto 3D) 36

Figure 21 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 6C2 - Exceptionnelle 2100 et État aménagé C2 (MNT modifié par ajout de données topographiques). 37

Figure 22 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 7C - Aléa PPRI et État aménagé 38

Figure 23 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 8A - Aléa PPRI - État aménagé 39

Figure 24 : Localisation des brèches dans le système d'endiguement au niveau des Saintes-Maries-de-la mer. 40

Figure 25 : Synthèse des localisations et description des brèches dans le système d'endiguement au niveau des Saintes-Maries-de-la mer. 40

Figure 26 : Caractéristiques géométriques des brèches et cinétiques de la défaillance 41

Figure 27 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour le scénario 2B - Trentennal avec brèches 42

Figure 28 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour le scénario 3B - Centennal avec brèches 42

Figure 29 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour le scénario 4B - Exceptionnel avec brèches. 43

Figure 30 : Cartographie de sur-impact (hauteurs d'eau maximales) pour les scénarios 2 (Trentennal) avec brèches. 44

Figure 31 : Cartographie de sur-impact (hauteurs d'eau maximales) pour les scénarios 3 (Centennal) avec brèches. 44

Figure 32 : Cartographie de sur-impact (hauteurs d'eau maximales) pour les scénarios 4 (Exceptionnel) avec brèches. 45

Figure 33 : Cartographie de l'impact de l'état aménagé pour le scénario 2 (Décennal). 46

Figure 34 : Cartographie de l'impact de l'état aménagé pour le scénario 3 (Centennal). 46

Figure 35 : Cartographie de l'impact de l'état aménagé pour le scénario 3 (Exceptionnel). 47

Figure 36 : Courbes d'iso-période de retour de dépassement conjoint 1, 10, 30 et 100 ans. Les points bleus sur la courbe 30 ans représentent des combinaisons (Hs,SWL) potentielles pour le choix du scénario trentennal à déterminer. 53

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Synthèse des valeurs de forçages pour les 8 scénarios retenus - CFBR : Nomenclature des scénarios retenu par le SYMADREM (d'après le Comité Français des Barrages et Réservoirs). 18

Tableau 2 : Synthèse des 16 simulations réalisées.....21

Tableau 3 : Combinaisons issues de la discrétisation du contour de probabilité conjointe 30 ans.....54

Liste des annexes

Annexe 1 : Complément étude Submersion Camargue - Forçages trentennaux.....53

1. Introduction

1.1. CONTEXTE GÉNÉRAL

Dans le cadre d'une étude « Modélisation de la submersion marine en Camargue » en partenariat avec la Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Bouches-du-Rhône DDTM13, le BRGM a récemment développé un modèle numérique (Rapport RP-66804-FR ; Paris *et al.*, 2018), permettant de simuler les phénomènes de submersion marine, résultant des tempêtes impactant le littoral camarguais. Il s'agissait d'apporter des éléments d'aide à la décision à la DDTM13 en termes d'évaluation précise de l'extension de la submersion marine sur les surfaces terrestres de la Camargue et du golfe de Fos-sur-Mer pour des échéances actuelles, et futures, en prenant en compte pour ces dernières, une remontée du niveau marin liée au changement climatique global. Ce modèle permet également de tester différents scénarios d'aménagements (abandon ou construction de digues) pour la gestion du risque de submersion marine en Camargue.

En 2018, le BRGM et le Syndicat Mixte d'Aménagement des Digues du Rhône et de la Mer (SYMADREM) ont noué un partenariat pour une exploitation complémentaire du modèle afin que le SYMADREM puisse mener à bien deux opérations de gestion du littoral de Camargue : le renforcement des digues du Grand Rhône à Salin-de-Giraud et Port-Saint-Louis-du-Rhône et l'étude du système de lutte contre la submersion marine et l'érosion du delta.

1.1.1. Étude Salin de Giraud

Le SYMADREM a lancé en 2017 une opération de renforcement des digues du Grand Rhône à Salin-de-Giraud et Port-Saint-Louis-du-Rhône, associée à la création d'une digue de protection rapprochée au sud de Salin-de-Giraud (opération du Plan Rhône). Cette opération prévoit la conception, en stade avant-projet, d'une digue de second rang qui, une fois en place, fera office de « digue à la mer » à la place du tronçon actuellement géré par la compagnie des Salins-du-Midi.

La mission confiée à un maître d'œuvre en septembre 2017, prévoit la définition du niveau altimétrique de la crête de la digue de second rang sur la base des données et paramètres suivants :

- cote de la ligne d'eau contre la digue en cas de crue exceptionnelle du Rhône ;
- cote de la ligne d'eau contre la digue en cas de tempêtes marines pour l'évènement dimensionnant ;
- run-up contre la digue dû au batillage sur le « plan d'eau ».

Vis-à-vis de l'écoulement maritime, il est détaillé dans le CCTP de maîtrise d'œuvre :

« L'étude du BRGM (DDTM13 - Modélisation dynamique de la submersion marine en Camargue - BRGM) définit la tempête de référence comme la tempête centennale avec une hypothèse de montée des eaux de 60 cm. Pour cette tempête, il est probable que des surverses se produisent sur la digue à la mer […], au niveau des points bas et que les écoulements se dirigent contre la face nord de la digue de second rang pour former un « matelas » d'eau.

La tempête dimensionnante sera celle pour laquelle le matelas d'eau face nord a une hauteur de 1 m, sauf si cette dernière a une fréquence supérieure à 1 000 ans. Le cas échéant, c'est la tempête millénale qui sera retenue. On estime en effet que lorsque la digue est en charge des deux côtés (avec une hauteur d'eau minimale de 1 m sur la face nord) le risque de brèche est limité ».

Dans ce cadre, et en concertation avec le maître d'œuvre, le BRGM réalisera des modélisations complémentaires à celles de l'étude de la modélisation dynamique de la submersion marine en Camargue. Les résultats de ces modélisations seront fournis au maître d'œuvre et lui serviront de données d'entrée pour la définition du niveau altimétrique de la digue de second rang.

1.1.2. Étude du système de protection du littoral du delta du Rhône géré par le SYMADREM

Le système de lutte contre la submersion marine et l'érosion littorale du Delta du Rhône (digue à la mer, érigée dès les années 1860 et série d'épis et de brise-lames au droit des Saintes-Maries-de-la-Mer) est aujourd'hui confronté à des problèmes d'érosion menaçant sa pérennité.

C'est pourquoi le SYMADREM a lancé une étude globale ayant pour objectifs :

- d'établir un diagnostic approfondi des ouvrages du système composé de la digue à la mer et des ouvrages de maintien du trait de côte ;
- d'évaluer leur performance et déterminer le niveau de protection du système d'endiguement ;
- d'évaluer l'évolution du niveau de protection du système d'endiguement à l'échelle de 10 à 20 ans sans travaux complémentaires ;
- d'étudier différents scénarios possibles d'aménagement et réalisation d'une approche coût bénéfice ou multi-critères simplifiée permettant de comparer les différents scénarios ;
- de déterminer un programme de travaux et le concevoir au stade avant-projet.

Il est prévu dans le cadre de cette étude, en tranche optionnelle, la construction d'un modèle hydrodynamique numérique sur le linéaire compris entre le Petit Rhône et le pertuis de la Fourcade. La modélisation numérique devra permettre d'appréhender :

- le fonctionnement de l'ensemble des ouvrages actuels suivant les phénomènes marins qui peuvent intervenir et en particulier l'effet des brise-lames ou autres ouvrages sur la houle avant d'atteindre la digue à la mer ;
- la sollicitation des ouvrages pour différentes situations. En particulier, les données de sortie du modèle serviront de base à la vérification de la stabilité des ouvrages et au redimensionnement éventuel des ouvrages en phase Avant-Projet ;
- les volumes d'eau et débits pouvant franchir la digue à la mer sur l'emprise du modèle. Ces données seront par la suite réutilisées par le SYMADREM ;
- le transport sédimentaire autour des ouvrages afin d'appréhender le risque de déstabilisation des ouvrages par affouillement d'une part, et de déterminer l'impact sur le transport des aménagements qui seront modélisés dans le cadre de la phase avant-Projet ;
- le transport sédimentaire au niveau de la plage Est.

1.2. CONTENU DU RAPPORT

Le présent rapport rassemble les données, hypothèses de travail, et conditions de forçages hydrodynamiques sur lesquelles se sont basées les simulations réalisées dans le cadre de cette étude. Les principaux résultats sont présentés sous forme de cartographies des inondations maximales pour chaque scénario. Les données sont également fournies au format SIG.

2. Présentation du modèle

Les éléments suivants présentent les caractéristiques générales du modèle développé par le BRGM. Ils sont issus du rapport BRGM RP-66804-FR (Paris *et al.*, 2017) :

Paris F., Pedreros R., Stépanian A., Bulteau T., et Lecacheux S. (2017) - Modélisation de la submersion marine en Camargue. Rapport final. BRGM/RP**-66804-**FR, 176 p., 128 fig., 23 tabl., 2 ann.

Nous renvoyons le lecteur à ce rapport pour des informations qui ne seraient pas reprises ici.

Il est téléchargeable sur le site www.infoterre.fr[1].

2.1. RAPPELS SUR LES SUBMERSIONS MARINES

« *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, MEDDE, mai 2014).

Les épisodes de tempête entraînent des surélévations du niveau de la mer qui s'ajoutent temporairement aux fluctuations du niveau d'eau d'origine astronomique (marées). Ces composantes principales sont (Figure 1) :

- la surcote atmosphérique ou météorologique qui est une surélévation du niveau d'eau générée par la chute de la pression atmosphérique et l'effet du vent ;
- la surcote de vague « wave setup » qui est une surélévation générée par le déferlement des vagues dans le secteur proche côtier qui peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres ;
- le jet de rive (swash), qui est le flux et le reflux des vagues sur l'estran induisant des variations instantanées du niveau d'eau à la côte.

Lors des tempêtes, on peut ainsi observer différents types de submersion provoquée par :

- des franchissements par paquets de mer, qui correspondent au passage des vagues par-dessus les défenses côtières (naturelles ou artificielles) ;
- des débordements, qui correspondent à une élévation du niveau d'eau statique (ou niveau moyen avec la surcote des vagues) au-dessus de la cote maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection ;
- la rupture de structures de protection causée par l'action répétée des vagues et/ou la surverse.

[1] http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-66804-FR.pdf

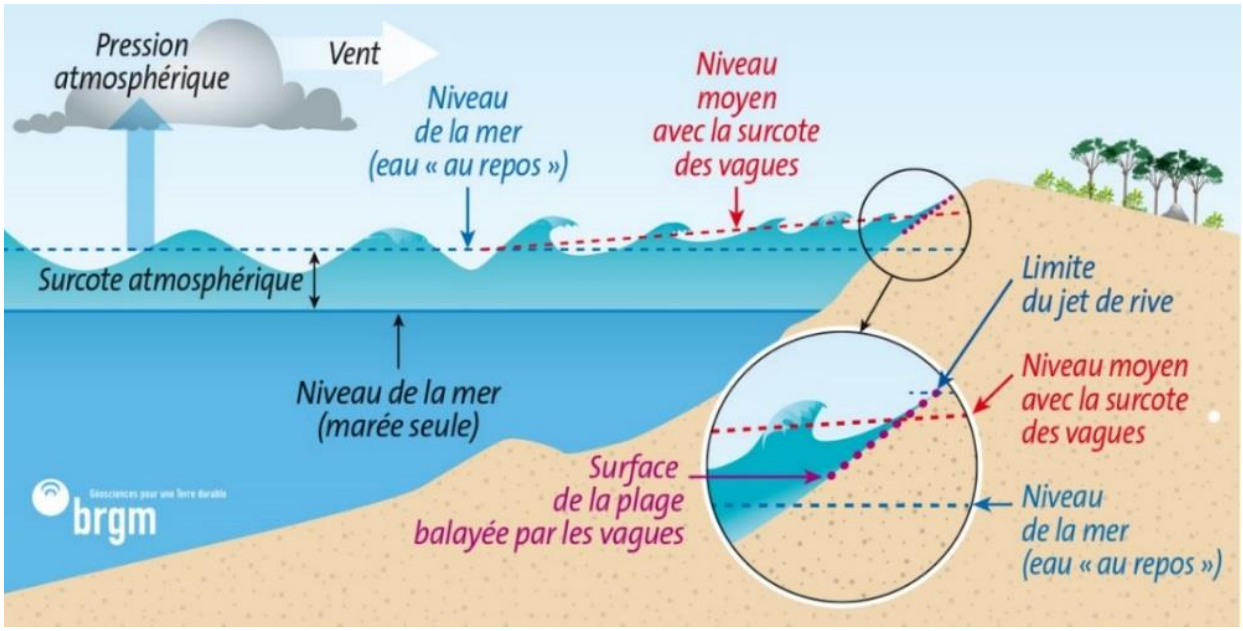


Figure 1 : Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête (surcotes) jusqu'au rivage.

Afin de permettre une représentation réaliste et complète de la submersion, la modélisation s'efforce de reproduire les différents processus à l'origine des submersions : variations du niveau d'eau marin, action des vagues, processus de franchissement (cf. Figure 1).

La modélisation numérique proposée prend en considération l'influence de **l'occupation du sol** (zones urbanisées et aménagées à des degrés différents, zones naturelles, forêts, etc…) à partir d'une carte de rugosité (coefficient de strikler) reproduisant les frottements différentiels sur les écoulements ainsi que les obstacles et les vecteurs à la propagation des écoulements à terre (Figure 2).

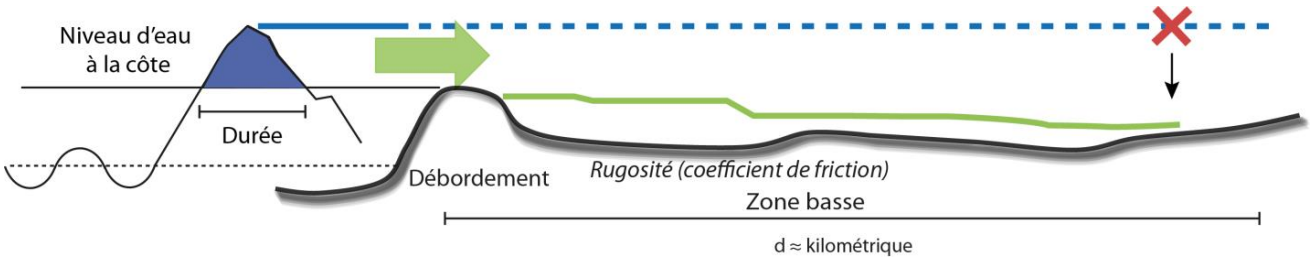


Figure 2 : Schéma de principe de la méthodologie employée pour la propagation de la submersion marine par modélisation dynamique. Le niveau marin de référence (bleu continu) n'est pas simplement projeté sur la topographie (bleu pointillé) mais bien propagé suivant une dynamique de submersion (vert).

2.2. PLATEFORME DE MODÉLISATION

2.2.1. Modèle hydrodynamique et de submersion par débordement

Une modélisation chaînée (Figure 3, Figure 4) du modèle de vagues WW3 et du modèle hydrodynamique MARS-2DH est mise en place avec une résolution d'environ 20 m proche du rivage et à terre pour simuler la submersion marine.

Ce chaînage **MARS-2DH/WW3** permet :

- ⇨ de calculer les niveaux d'eau et les courants sur l'ensemble du domaine et plus spécifiquement à la côte de prendre en compte les interactions vagues-niveaux-courants et de calculer la surcote induite par le déferlement des vagues (*wave setup*) et les courants associés aux vagues ;
- ⇨ de prendre en compte l'influence du vent sur les niveaux côtiers et sur étangs ;
- ⇨ de prendre en compte le débit entrant du Rhône ;
- ⇨ de calculer la submersion par débordement ;
- ⇨ d'intégrer les débits entrants par franchissements (paquets de mer) calculés par le module de franchissement implanté sur le secteur des Saintes-Maries-de-la-Mer.

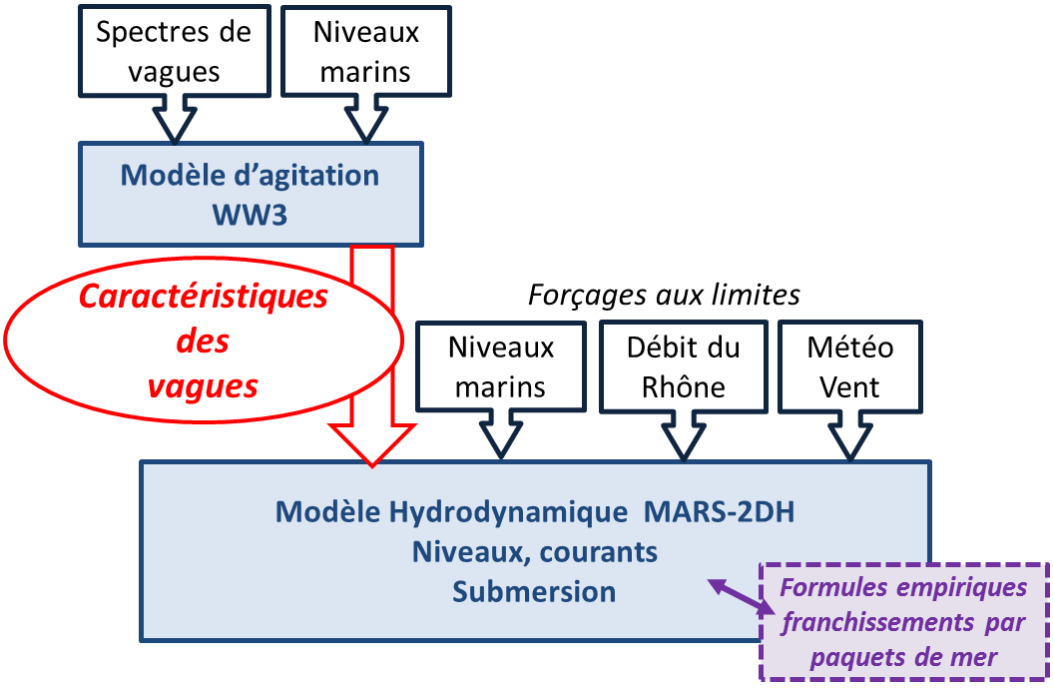


Figure 3 : Schématisation de stratégie de modélisation utilisée.

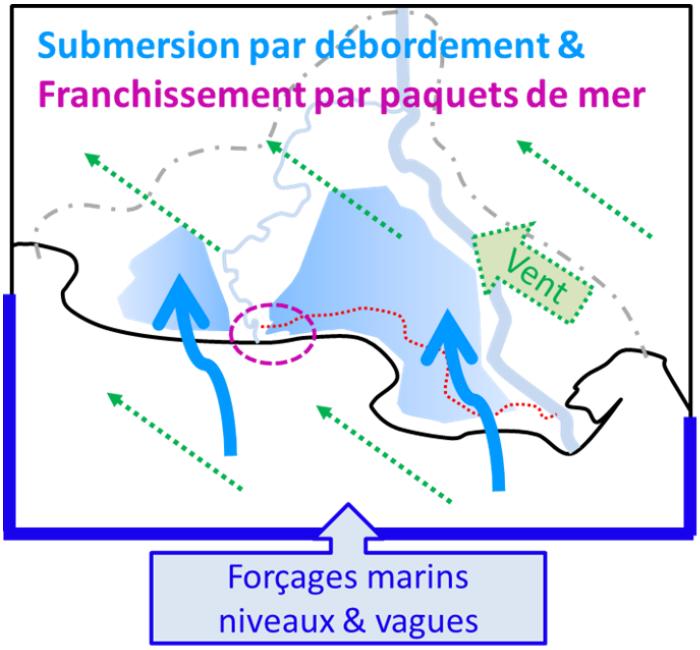


Figure 4 : Illustration schématique du modèle Camargue : les forçages météo (flèches vertes), marins (traits bleus) et fluvial (linéaire « bleu ciel » du Rhône et du petit-Rhône), le linéaire côtier (trait noir) et les phénomènes de submersion représentés (flèches bleues pour les débordements et cercle mauve pour les franchissements).

2.2.2. MARS-2DH (version 9.06) : modèle hydrodynamique de niveaux et courants

Le code de calcul MARS (Lazure et Dumas, 2007) permet de modéliser l'hydrodynamique (niveau, courants) à l'échelle régionale à partir de composantes de marée et de données de météorologie. 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. Il résout les équations de Saint-Venant qui régissent les écoulements à surface libre en deux dimensions sur le plan horizontal, après une intégration verticale des équations de Navier Stokes.

La résolution des équations se fait par (i) discrétisation spatiale selon une méthode aux différences finies : calcul des grandeurs physiques en chaque point d'un maillage régulier, et (ii) discrétisation temporelle : les variables (niveau d'eau et vitesse/direction du courant) sont calculées à chaque pas de temps du modèle.

Le modèle MARS-2DH, chaîné au modèle de vagues WW3, permet de prendre en compte les interactions vagues-niveaux-courants et de calculer la surcote induite par le déferlement des vagues (*wave setup*) en fonction de conditions aux limites imposées au bord du domaine de calcul (effets de la marée et de la météorologie) et de conditions de forçages météorologiques (vent et pression) appliquées en chaque nœud du modèle.

Le BRGM a utilisé et développé dans MARS-2DH de nouvelles fonctionnalités capables de :

- simuler les écoulements torrentiels suite à des ruptures de digue avec formation de brèches ;
- prendre en compte le fonctionnement des structures hydrauliques (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.

2.2.3. WW3 (version 4.18) : modèle de propagation des vagues

Le code WW3 résout l'équation de conservation de la densité d'action des vagues suivant des grilles de calculs structurées (différences finies) ou non structurées (éléments finis). Il est capable de reproduire les différents processus liés aux vagues depuis le large jusqu'au rivage comme la génération par le vent, la propagation dans l'espace (réfraction, interactions avec les courants, …) et la dissipation (frottement au fond, déferlement, etc.).

Dans cette étude, WW3 a été utilisé pour propager les vagues depuis une profondeur d'environ 50 m, jusqu'au rivage (profondeur supérieure à 0,3 m). La contrainte principale pour ce modèle est de reproduire correctement les caractéristiques des vagues dans la zone de déferlement afin d'assurer le bon calcul du *wave setup* (effectué dans un 2ème temps dans MARS-2DH).

Cela implique l'utilisation d'un maillage fin (au maximum 20 m de résolution spatiale) dans cette zone de déferlement. Vue l'étendue du domaine d'étude, il a été décidé d'utiliser WW3 avec un maillage non structuré (Figure 5) avec une longueur maximale des côtés des triangles allant de 2 km au large, à une centaine de mètres aux environs de 7 m de profondeur et un raffinement local pour les secteurs à forte pente (par exemple au large du delta du Rhône) et pour la zone de déferlement (~20 m de côté pour les profondeurs inférieures à 7 m). Au final, cela représente 255 799 nœuds et 511 596 éléments (triangles).

Le modèle a été paramétré suivant la configuration décrite dans Ardhuin *et al.* (2010), le spectre des vagues étant discrétisé en 24 directions (pas de 15°) et en 30 fréquences (correspondant à des périodes de vagues allant de 1,6 à 20 secondes). Le frottement au fond et le déferlement des vagues ont été activés.

Le modèle utilise en entrée (cf. Figure 3) :

- le niveau du plan d'eau uniforme et instationnaire (variable dans le temps) ;
- des spectres directionnels de vagues : ceux-ci sont construits à partir des caractéristiques des vagues (hauteur significative, période et direction pic), avec la boîte à outil WAFO (Brodtkorb *et al.,* 2000*)* ainsi que des routines développées pour l'étude.

En sortie, WW3 fournit à MARS-2DH les données de vagues (Hs, Tp, Dp, tensions de radiation, …) au pas de temps horaire.

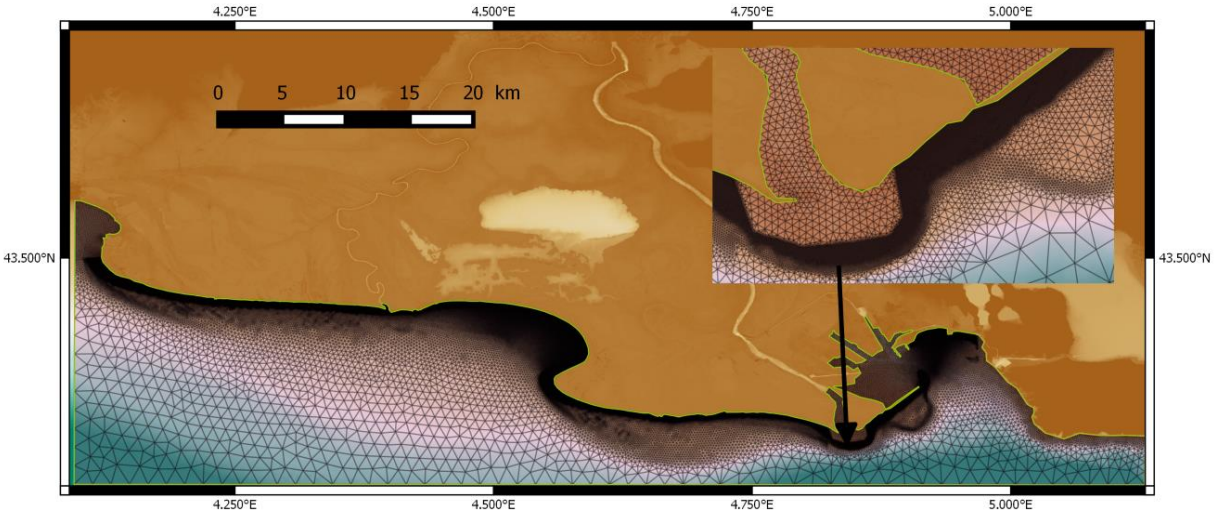


Figure 5 : Construction du maillage non structuré utilisé par WW3.

2.2.4. Emprise et résolution spatiale

L'emprise du modèle est le territoire potentiellement exposé à la submersion marine. Il s'étend depuis la pointe de l'Espiguette jusqu'au Golfe de Fos-sur-Mer. Une partie de la Camargue gardoise est ainsi incluse dans le périmètre. En revanche, le modèle ne prend pas en compte la zone de Port-Camargue ainsi que la zone des étangs entre le Grau-du-Roi et Aigues-Mortes.

Le modèle s'étend au large, dans la partie marine, jusqu' à des profondeurs proches de 50 m. Cette extension correspond à la position du point choisi pour les données de vagues utilisé dans la détermination des événements de référence.

L'extension à l'intérieur des terres du modèle est définie en fonction de la limite d'inondation statique maximale, déterminée par la surimposition directe de niveaux marins de référence à la côte (actuel et futur) sur le modèle topographique terrestre (propagation à l'infini de la submersion).

Les niveaux retenus lors de la mise en œuvre de la Directive Inondation (cartographie des TRI notamment), peuvent être retenus à priori comme enveloppe maximale d'inondation : + 2 m NGF/IGN69 pour l'évènement moyen et + 2,4 m NGF/IGN69 avec élévation du niveau de la mer dû au changement climatique en 2100.

En raison de sa large emprise, un maillage régulier avec une résolution de l'ordre de 20 m a été retenu pour le modèle hydrodynamique. Cette taille de maille est à la fois un compromis entre une bonne représentation du relief et des contraintes de calcul numérique, mais aussi c'est une contrainte géométrique minimale pour s'assurer de la reproduction de la surcote liée au déferlement des vagues sur toute la bande côtière.

L'espace géographique est donc discrétisé suivant une grille structurée en maillage régulier (20 m) constituée de 11 983 695 éléments (2 305 mailles verticales x 5 199 mailles horizontales).

Le modèle s'étend du nord (43.7087°N) au sud (43.2946°N), et d'ouest (4.1003°E) en est (5.0345°E).

Avec une telle résolution, les particularités topographiques telles que les digues, les routes, les remblais, ne sont pas forcément bien représentées, or ces éléments topographiques peuvent contraindre ou même bloquer les écoulements lors de la propagation de la submersion. Ainsi il convient de représenter fidèlement les altitudes des sommets de ces ouvrages. Des retouches sont donc effectuées sur le MNT afin de reconstruire les sommets des ouvrages. Un algorithme spécifique, développé par le BRGM, est employé pour reconnaitre de manière automatique les sommets topographiques des ouvrages et les intégrer au modèle numérique de terrain comme ligne de contrainte.

3. Simulations réalisées

3.1. OBJECTIFS

Les résultats des modélisations réalisées dans le cadre de la présente convention, serviront :

- de données d'entrée pour le modèle qui sera créé dans le cadre de l'étude littorale sur le tronçon de digue à la mer gérée par le SYMADREM (données issues du modèle de propagation de vagues du BRGM) ;
- à déterminer le niveau de protection sur les secteurs de la digue à la mer (à l'ouest de la nouvelle digue), qui ne seront pas prise en compte dans le modèle numérique développé par le SYMADREM sur le secteur de ses ouvrages de protection ;
- à alimenter l'Étude de Danger (EDD) du système de protection contre la mer.

3.2. SIMULATIONS

Le nombre de simulations à réaliser est déterminé en fonction des valeurs de forçages et des périodes de retour associées de chacun des scénarios, et des choix d'aménagement qui sont faits.

3.2.1. Scénarios

Afin de pouvoir répondre aux exigences réglementaires du SYMADREM tout en restant sur des scénarios sécuritaires et anticiper sur la montée des eaux dans le dimensionnement de la nouvelle digue, les scénarios suivants ont été retenus (Tableau 1). Par rapport à l'étude précédente, les hypothèses de prises en compte des valeurs de forçages différent sensiblement, en raison des besoins spécifiques du SYMADREM.

Les valeurs des forçages pour le scénario trentennal et pour la tempête de 2014 ont été déterminées dans le cadre de cette étude. Les valeurs retenues pour le scénario trentennal (Hs= 5,09 m ; Tp = 9,2s ; Niveau = +1,17 m NGF et Vent = 23,6 m/s) ont été déterminées à partir des méthodes de probabilité conjointes développées dans l'étude précédente (cf. Annexe 1).

Les valeurs pour le scénario de tempête de novembre 2014 ont été fournies par le SYMADREM après discussion avec le BRGM (extraction de modèles), en fonction des données disponibles pour cet évènement, de période de retour entre 10 et 30 ans (cf. Annexe 1). Ce scénario de simulation est particulier et ne suit pas la même chronologie de tempête que les autres scenarios basés sur la normalisation de la tempête de référence de 1982.

Qualification		Décennale	Trentennale	Centennale	Exceptionnelle	Centennale 2100	Exceptionnelle 2100	Aléa PPRI	Tempête 2014
	N°	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
	CFBR	**Rare**	**Rare**	**Rare**	**Exceptionnelle**	**Rare 2100**	**Exceptionnelle**	**Rare**	
	T (ans)	**10**	**30**	**100**	**1000**	**100**	**1000**	**100**	**10-30**
Vagues	**Hs (m)**	4,7	5,09	5,33	8,75	5,33	8,75	5,33	4,04
	Tp (s)	9	9,2	9,4	11,5	9,4	11,5	9,4	9,1
	Dp (°N)	**155 (Sud Sud Est)**							
Niveau SWL (m NGF)	**Décomposition**	0,86 + 0,2	0,97 + 0,2	1,1 + 0,2	1,35 + 0,2	1,1 + 0,6	1,35 + 0,6	1,1 + 0,6 + 0,25	0,97
	Total	**1,06**	**1,17**	**1,3**	**1,55**	**1,7**	**1,95**	**1,95**	**0,97**
Vent	**U (m/s)**	22,4	23,6	24,2	**30**	24,2	30	24,2	19,6
	Dir (°N)	121							130 [120-180]

Tableau 1 : Synthèse des valeurs de forçages pour les 8 scénarios retenus - CFBR : Nomenclature des scénarios retenu par le SYMADREM (d'après le Comité Français des Barrages et Réservoirs).

Les hypothèses retenues dans la présente étude sont les suivantes :

- pas de prise en compte de l'incertitude de 25 cm pour la prise en compte de l'amorce de la montée des eaux à l'exception du scenario 7, conformément au directive nationale (MEDDE 2014) ;
- pas de prise en compte de la borne supérieure à 70 % des valeurs caractéristiques de niveaux et hauteurs de vagues pour le scénario extrême (Hs = 8,75 m ; Tp = 11,5 s ; SWL = +1,95 m NGF et U = 30 m/s) ;
- une seule direction de vagues est retenue (N 155, sud-sud-est) correspondant à la direction la plus pénalisante sur les scénarios centennaux déjà réalisés. Ce dernier choix s'opère également par soucis de cohérence et d'homogénéité des modélisations et d'inter-comparaison des cartes finales.

3.2.2. États d'aménagement et configurations topographiques associées

Les simulations sont réalisées avec trois états d'aménagement différents :

- état A : digues en état actuel sans brèche dans le système ;
- état B : digues en état actuel avec brèche(s) dans le système ;
- état C : digues en état aménagé.

L'état d'aménagement A correspond à la configuration topographique du modèle de l'étude BRGM/DDTM13 (avec digues fluviales infinies sur le lit du Rhône, pour débordement interdit).

L'état d'aménagement B correspond à la configuration topographique du modèle de l'étude BRGM/DDTM13 (avec digues fluviales infinies sur le lit du Rhône, pour débordement interdit) mais avec des brèches dans le système d'endiguement qui sont déterminées par le SYMADREM.

L'état d'aménagement C ou « état aménagé » intègre différentes modifications de la topographie du modèle de l'étude DDTM13 (Figures 6 et 7) :

- prise en compte de la digue de second rang avec une crête infinie ou crête calée par BRL (+ corrections topographiques) ;
- prise en compte des cotes projet pour les tronçons résistants à la surverse sur la digue du Grand Rhône Rive droite entre l'Estacade de l'Esquineau et le domaine de la Palissade, et en rive gauche au niveau du centre-ville de Port-Saint-Louis-du-Rhône (cote rive droite = +2,15 à +1,48 m NGF - cote rive gauche = +2,35 à 2,19 m NGF) ;
- prise en compte de l'arasement du merlon à la Palissade et de la digue du Grau de Piémanson ;
- en amont de l'Estacade de l'Esquineau et du centre-ville de Port-Saint-Louis : prise en compte de crête infinie ;
- arasement total des merlons sur les tronçons des digues (Figure 6) . Le niveau d'arasement est fixé de façon à ce que ces merlons soient transparents par rapport à l'écoulement (cote d'arase = niveau des étangs en état initial de la simulation) ;
- arasement de la surface en triangle au niveau du Rhône (Figure 6) ;
- sur la digue à la mer, actuellement en gestion par le SYMADREM (entre le PR0 et le PR 25.5), la cote minimale de la digue est à rehausser à +1,5 m NGF (essentiellement sur la route d'accès à Beauduc).

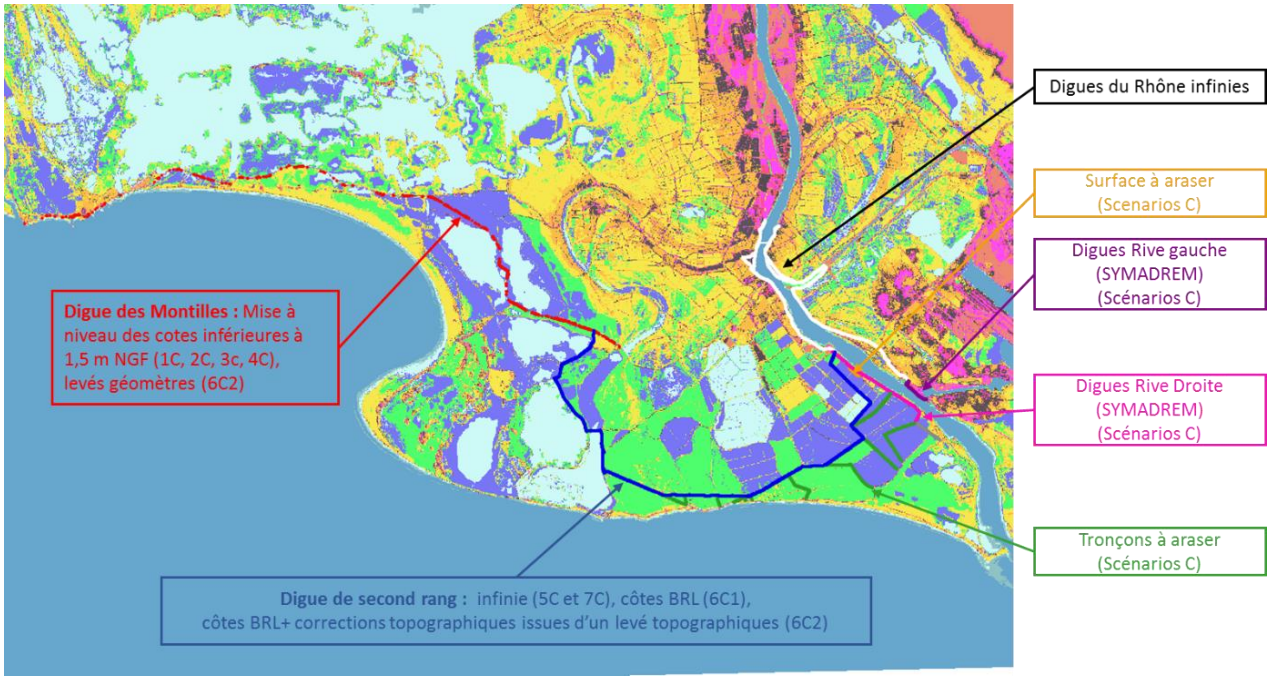


Figure 6 : Modifications de topographie utilisées pour la configuration C.

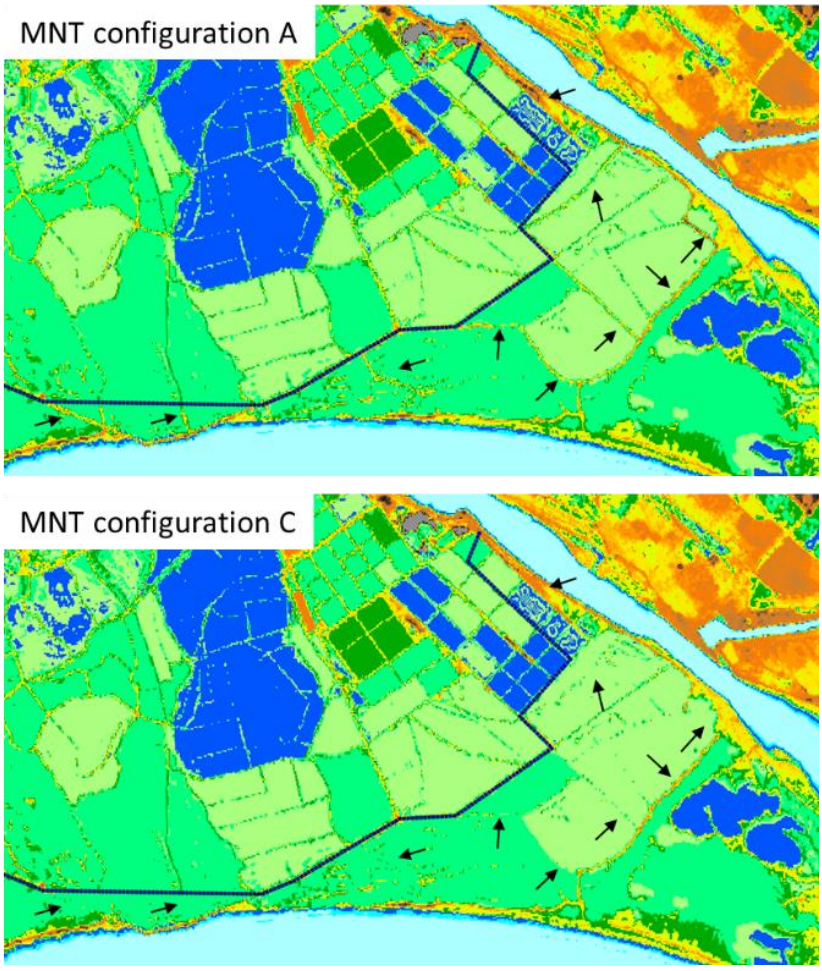


Figure 7 : Différences entre l'état d'aménagement A et l'état d'aménagement C sur les secteurs de digues à araser.

3.2.3. Synthèse des simulations

Au final, 16 simulations sont réalisées intégrant les scénarios hydrodynamiques et les trois états d'aménagement :

- 5 scénarios en configuration A ;
- 3 scénarios en configuration B ;
- 8 scénarios en configuration C.

Qualifi-cation	Etude SYMA DREM	Décennale	Trentennale	Centennale	Exceptionnelle	Centennale 2100	Exceptionnelle 2100	Aléa PPRI	Tempête 2014
	N°	1	2	3	4	5	6	7	8
	CFBR	Rare	Rare	Rare	Exceptionnelle	Rare 2100	Exceptionnelle	Rare	
	T (ans)	10	30	100	1000	100	1000	100	
État d'aménagement A : Digues en l'état actuel		**1A**	**2A**	**3A**	**4A**				**8A**
État d'aménagement B : Digues en l'état actuel avec brèches			**2B**	**3B**	**4B**				
État d'aménagement C: Digues en état aménagé		**1C**	**2C**	**3C**	**4C**	**5C**	**6C1**	**7C**	
							6C2 avec données topographiques issues de cabinet de géomètre		

Tableau 2 : Synthèse des 16 simulations réalisées.

3.3. PRISE EN COMPTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le guide d'élaboration des PPRL (MEDDE, 2014) préconise l'incorporation de forfaits au niveau de l'aléa de référence pour prendre en compte l'élévation du niveau marin liée au réchauffement climatique global.

Ces forfaits définis par l'ONERC (2010) et repris dans le guide PPRL sont de :

- **+20 cm** sur le niveau marin pour une simulation temporelle à l'époque actuelle ;
- **+60 cm** sur le niveau marin pour simulation temporelle à échéance 2100.

Ces valeurs sont prises en compte dans les simulations des différents scénarios et pour chaque évènement défini.

Ainsi, les scénarios 1 à 4 prennent en compte une surélévation du niveau marin de +20 cm d'élévation du niveau de la mer, alors que la surélévation est de +60 cm pour les scénarios 5 à 7.

3.4. CINÉTIQUE DE LA SIMULATION

Le modèle mis en place est un modèle dynamique de la submersion marine qui prend en compte une cinétique de l'évolution des paramètres de forçages au cours de la tempête (vagues, vents, niveau marin). La cinétique retenue est celle de la tempête de novembre 1982. Pour chacun des scénarios, il est réalisé une normalisation de l'évolution des forçages en fonction de cette tempête (Paris *et al.*, 2017).

Ainsi, les scénarios 1 à 7 se basent sur la cinétique de la tempête de référence 1982 avec une normalisation de leurs valeurs maximum de scénario en terme de niveaux d'eau, de hauteur des vagues, et des vitesses du vents (Figure 7). Les directions de vagues (155°) et de vents (121°) sont les mêmes pour les scénarios 1 à 7. Les séries temporelles des niveaux d'eau sont relativement homogènes avec une augmentation progressive des niveaux en fonction de la période de retour et des scénarios d'élévation du niveau moyen de la mer. Les séries temporelles de vagues et de vents sont plus marquées entre les valeurs du scénario exceptionnel et les scénarios de période de retour plus faible (10, 30 et 100 ans).

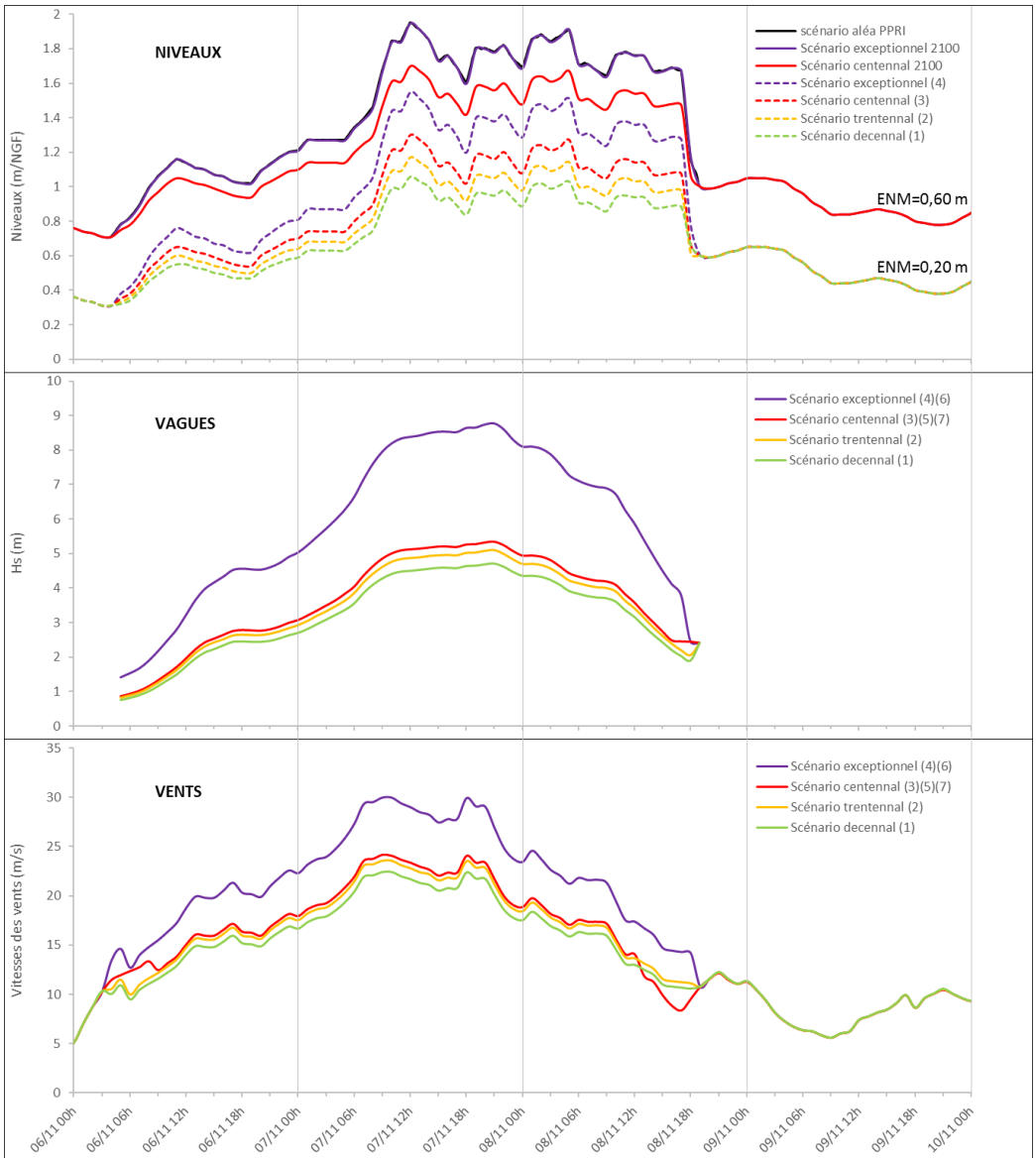


Figure 8 : Séries temporelles Niveaux-Vagues-Vents pour les scénarios 1 à 7.

Il est important de rappeler que la tempête dimensionnante pour la digue de second rang sera celle pour laquelle le matelas d'eau face nord a une hauteur de 1 m, sauf si cette dernière a une fréquence supérieure à 1 000 ans. Le cas échéant, c'est la tempête millénale qui sera retenue.

Pour le scénario 8, la cinétique de tempête simulée correspond à celle de l'évènement réel qui a frappé le littoral de Camargue du 25 novembre au 1er décembre 2014 (Figure 9). Cette tempête est caractérisée par :

- un niveau d'eau maximum de +0,97 m NGF (moyenne horaire), déterminé à partir des mesures réalisées au marégraphe de Fos/mer (moyenne sur 10 minutes ; source : REFMAR) ;
- des vagues relativement modérées avec des Hs maximales de 4,04 m et des périodes Tp de 8 - 9 s (données WW3) ;
- des vents de 19,58 m/s (T< 10 ans) avec des directions oscillant entre 120 et 180 ° avec une direction moyenne de 130° pendant le maximum de tempête ;
- des débits du Rhône et du Petit-Rhône de l'ordre d'un tiers inférieur aux débits de référence de 5 000 m^3/s.

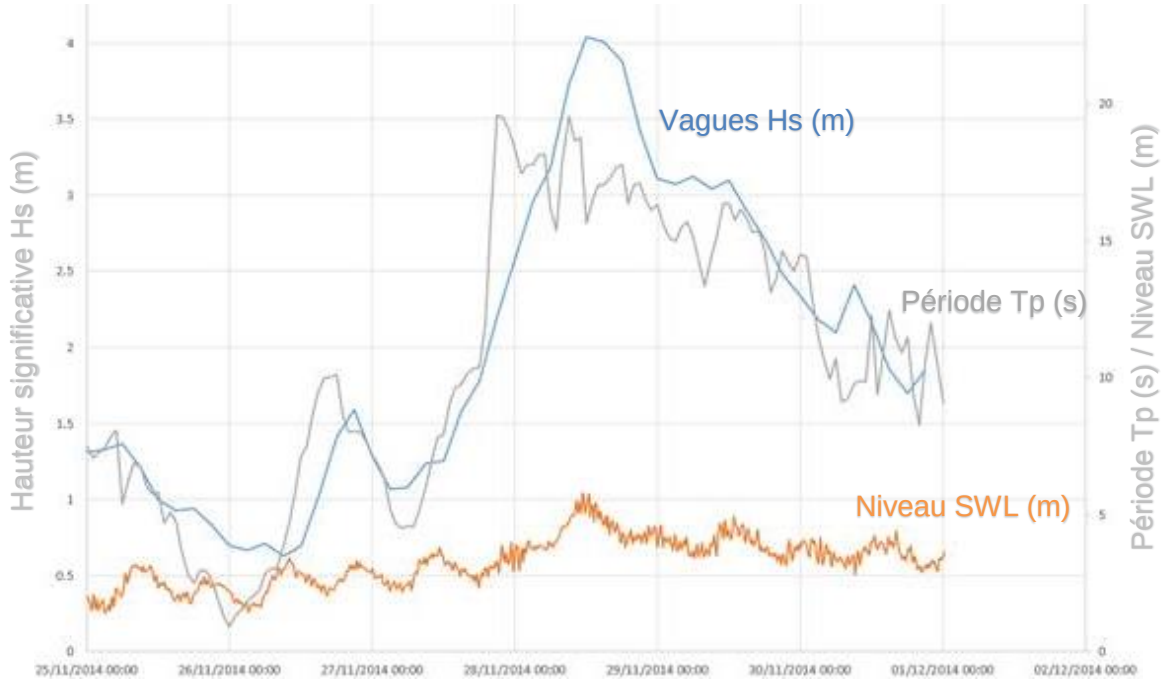


Figure 9 - Conditions hydrodynamiques pendant la tempête du 25/11/2014 au 1/12/2014. Les variations de niveau marin en orange sont basés sur des moyennes sur 10 min. La modélisation prend en compte des moyennes horaires pour éviter des artefacts numériques liés à la présence d'oscillations de type Seiche dans les données de mesure. Ici le niveau SWL maximal enregistré est +1,04 m NGF, mais dans la simulation, c'est la moyenne horaire de +0,97 m NGF qui est utilisé.

Avec des valeurs de Hs = 4,04 m et de SWL = + 0,97 m NGF, la tempête de novembre 2014 est un évènement de période de retour conjointe entre 10 et 30 ans (cf. Annexe 1).

4. Résultats

4.1. ÉTATS INITIAUX DES PLANS D'EAU

À l'exception du scénario 8 (tempête de 2014), les simulations concernent des scénarios avec prise en compte de l'élévation du niveau moyen de la mer lié au changement climatique avec respectivement + 20 cm (Scénarios 1 à 4) et + 60 cm (Scénario 5 à 7). Les plans d'eau sont ainsi réhaussés au début de la simulation. Cependant, les étangs ne sont pas tous en eau pour les scénarios +20 cm d'élévation du niveau de la mer, contrairement au scénario +60 cm d'élévation du niveau de la mer. Certains seuils topographiques étant franchis entre les deux scénarios d'élévation du niveau moyen de la mer lié au changement climatique, le différentiel d'hauteur initiale des plans d'eau n'est pas homogène sur l'ensemble du secteur d'étude (Figure 10).

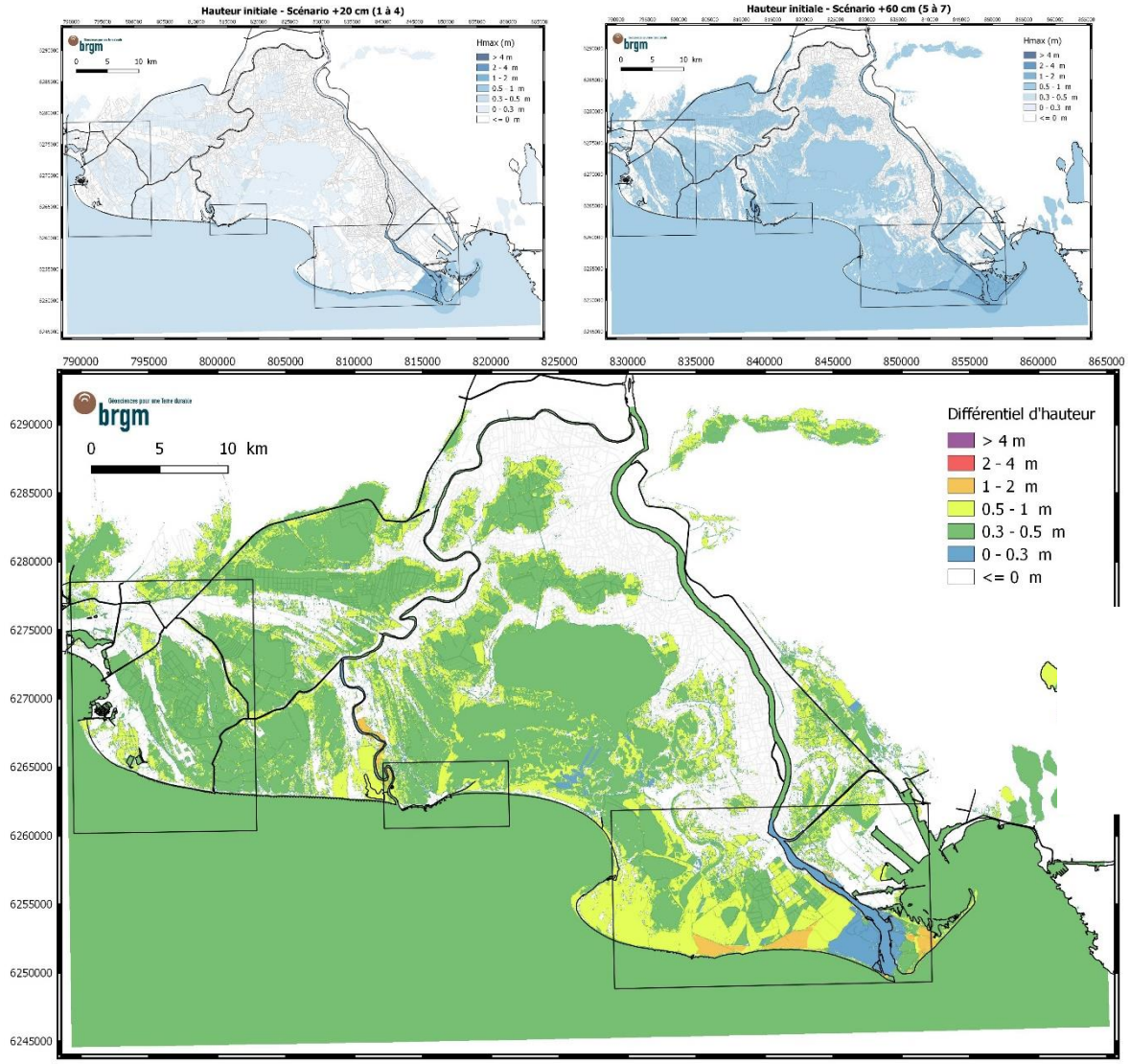


Figure 10 : Plans d'eau initiaux pour les scénarios d'élévation du niveau moyen de la mer et différentiel d'hauteur entre ces deux scénarios.

4.2. RÉSULTATS DES SIMULATIONS

Les résultats des simulations sont reportés dans les paragraphes suivants pour chaque scénario sous forme de cartographies des inondations maximales avec deux types de cartes :

- carte des hauteurs d'eau absolues maximales ;
- carte des hauteurs d'eau relatives maximales : la hauteur relative maximale correspond à la différence maximale, atteinte au cours de la simulation, entre la hauteur du plan d'eau et la hauteur initiale pour chaque maille du modèle.

4.2.1. Scénario 1 : Décennal

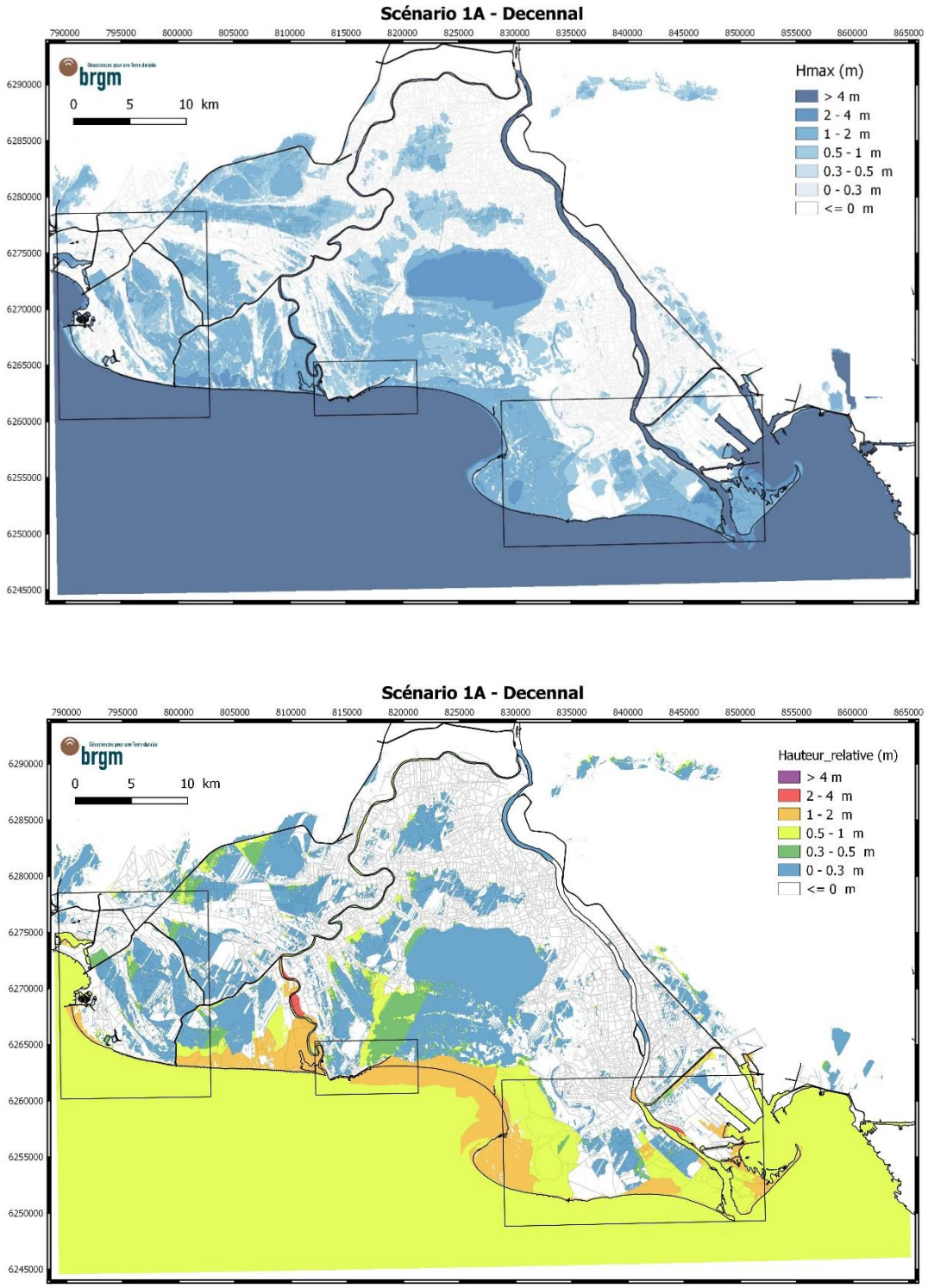


Figure 11 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 1A Décennal et État d'aménagement initial.

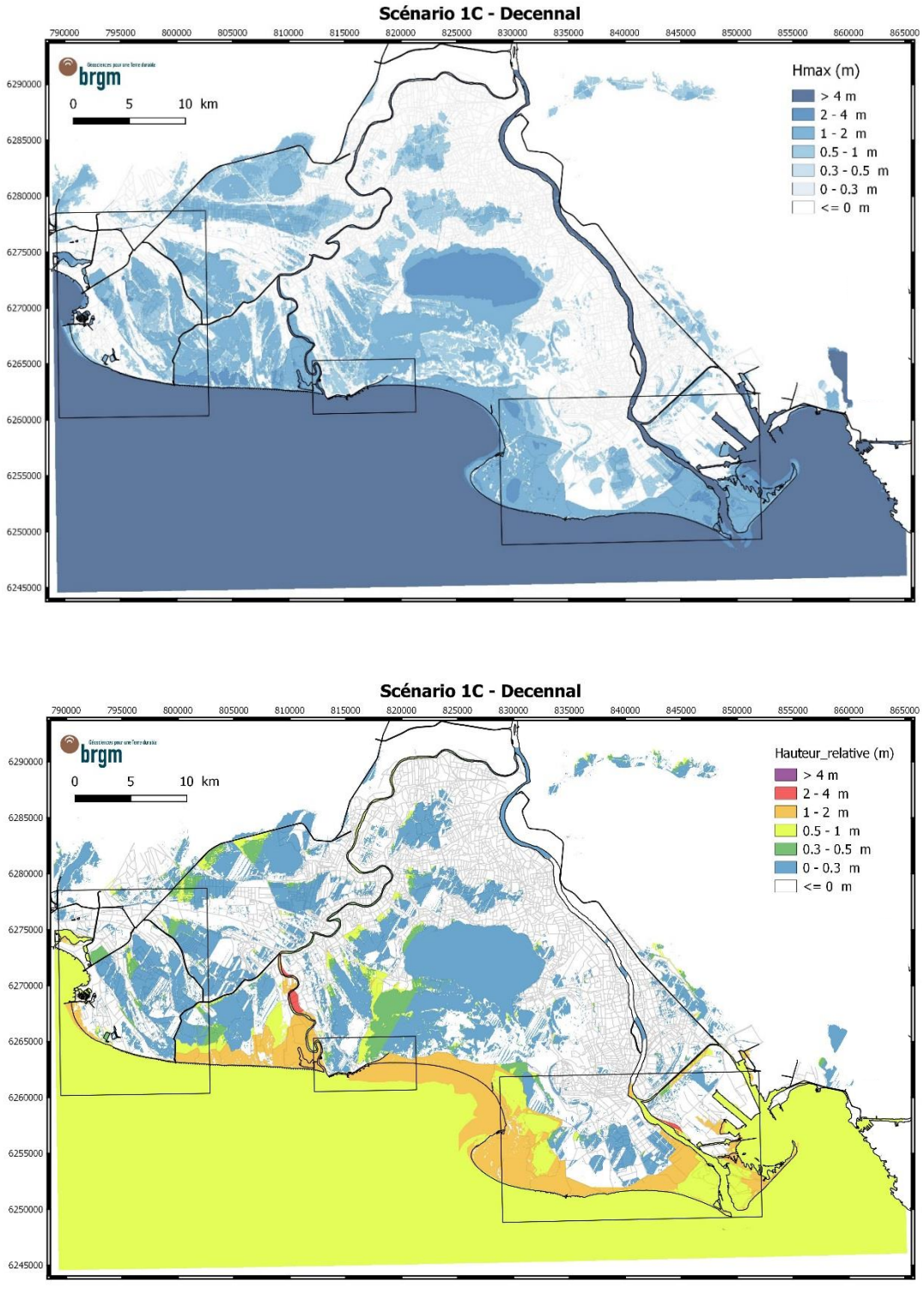


Figure 12 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 1C - Décennal et État aménagé.

4.2.2. Scénario 2 : Trentennal

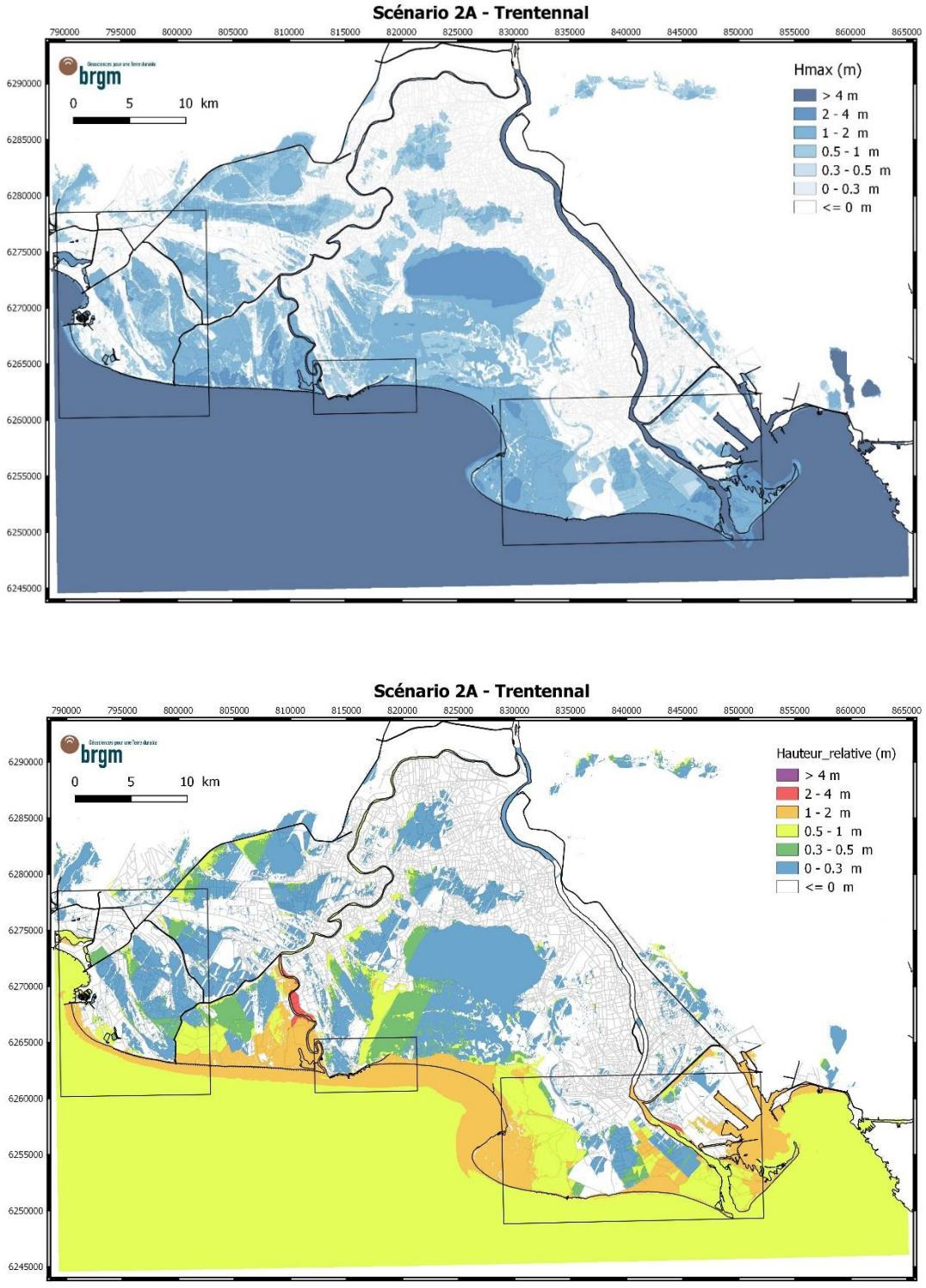


Figure 13 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 2A - Trentennal et État d'aménagement initial.

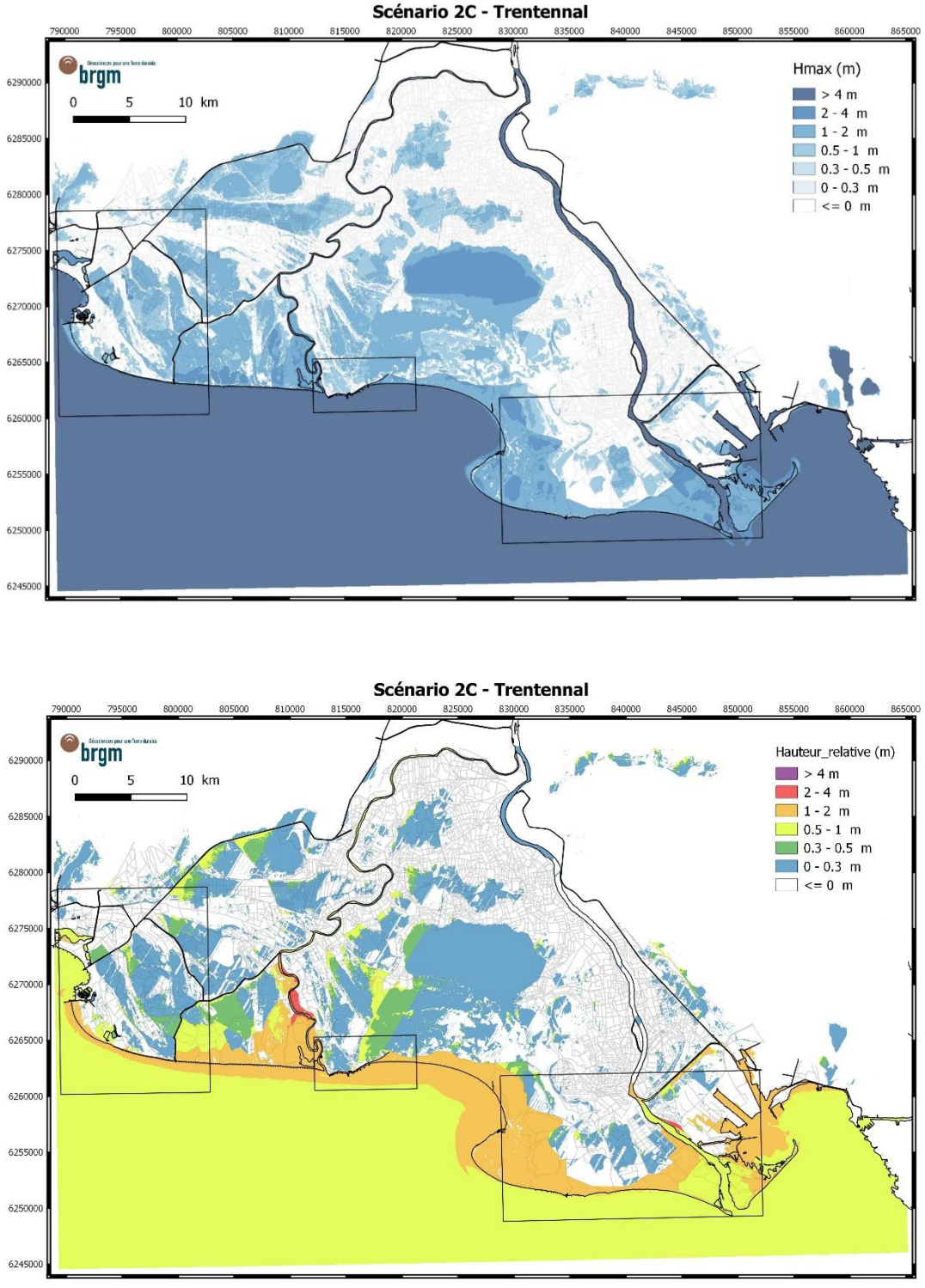


Figure 14 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 2C - Trentennal et État aménagé.

4.2.3. Scénario 3 : Centennal

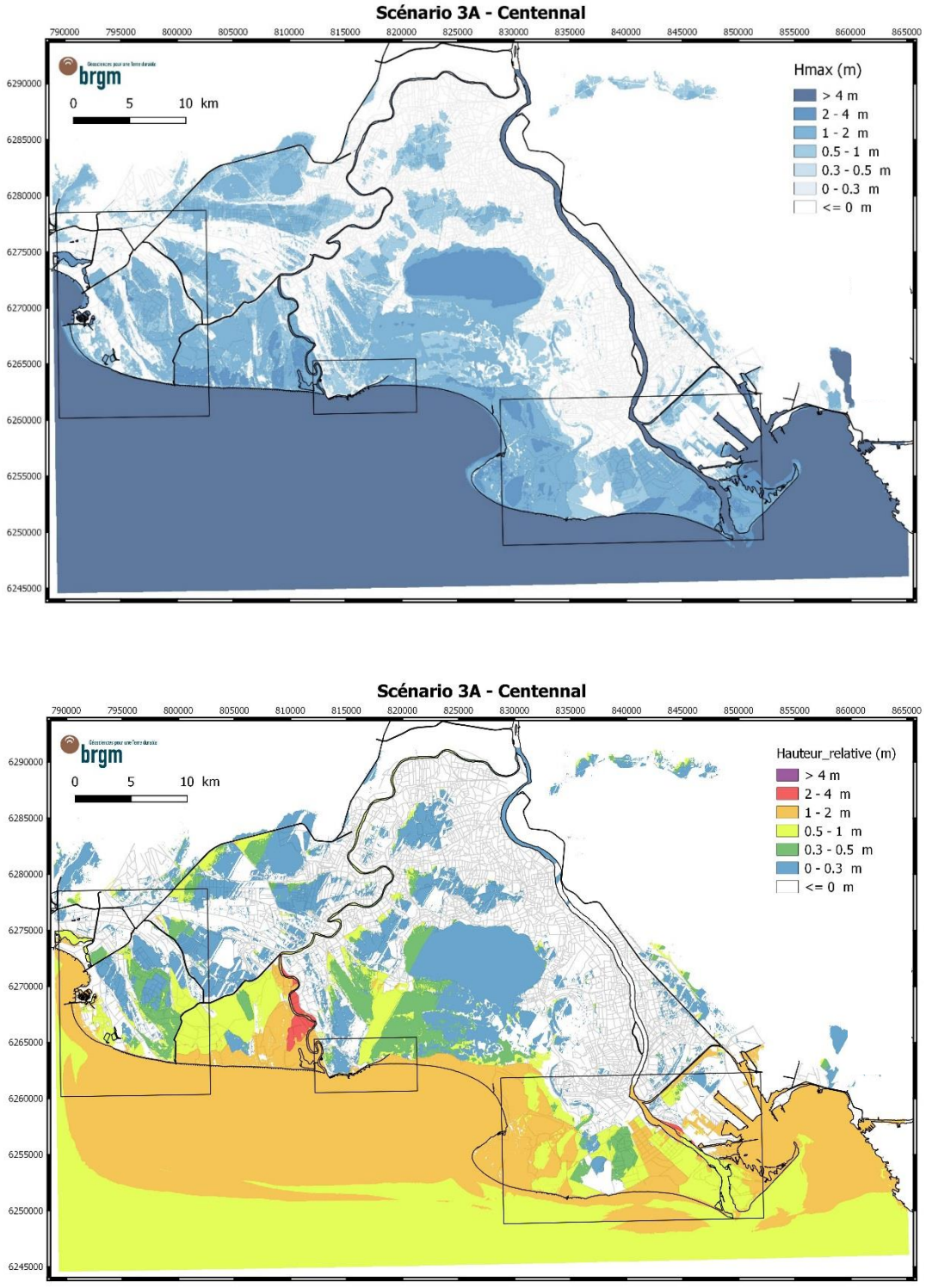


Figure 15 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 3A - Centennal et État d'aménagement initial.

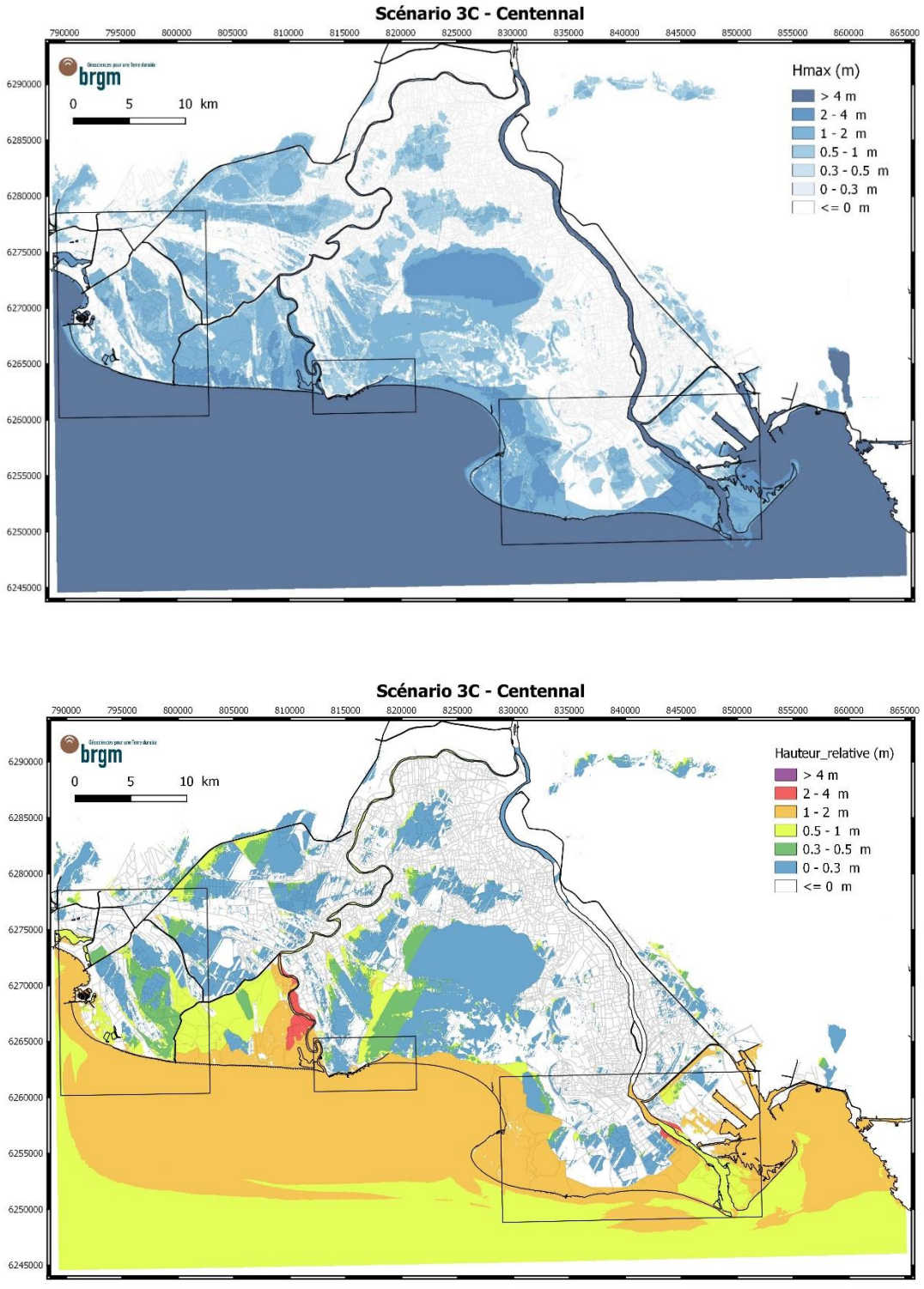


Figure 16 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 3C - Centennal et État aménagé.

4.2.4. Scénario 4 : Exceptionnel

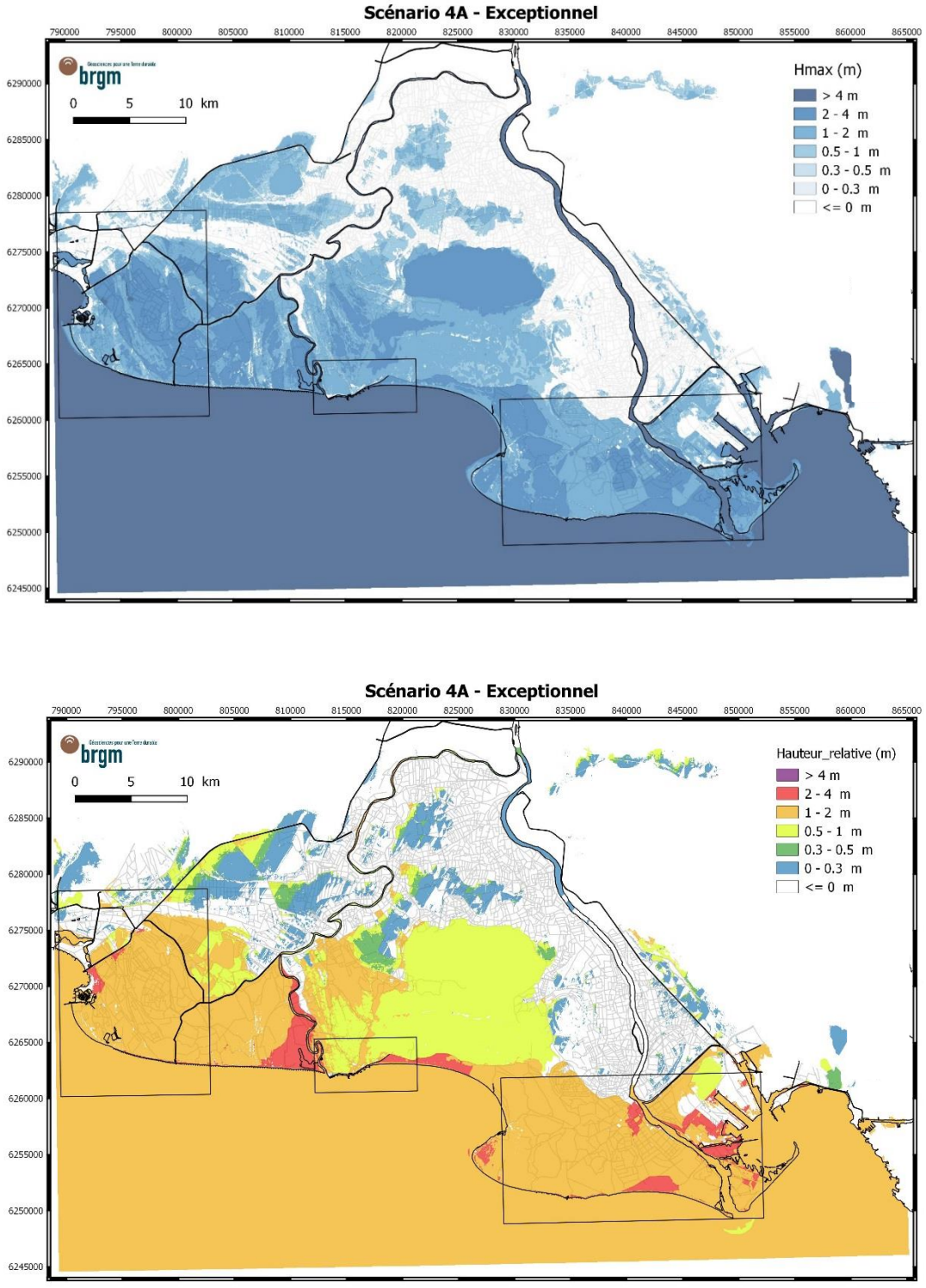


Figure 17 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 4A - Exceptionnel et État d'aménagement initial.

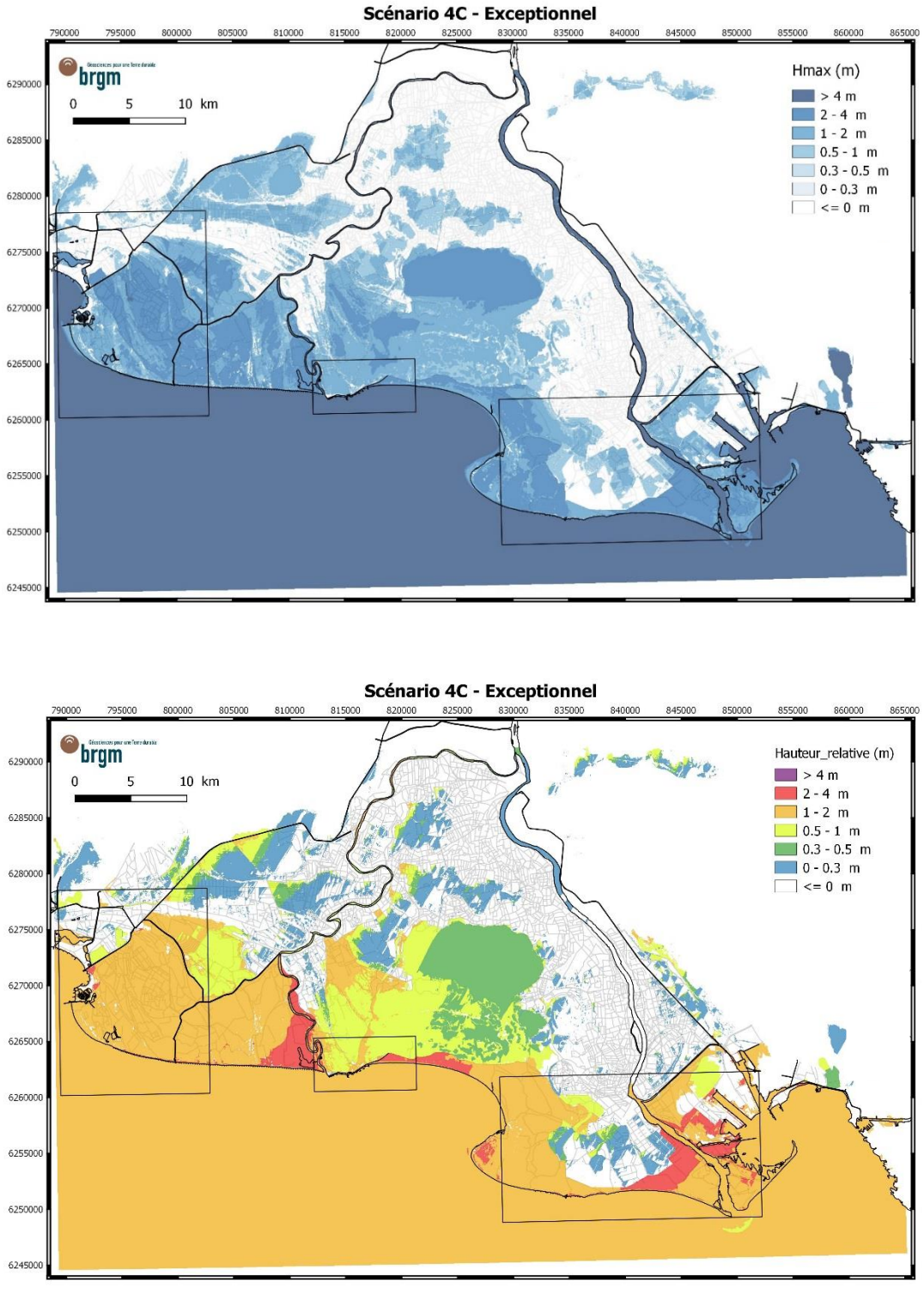


Figure 18 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 4C - Exceptionnel et État aménagé.

4.2.5. Scénario 5 : Centennal 2100

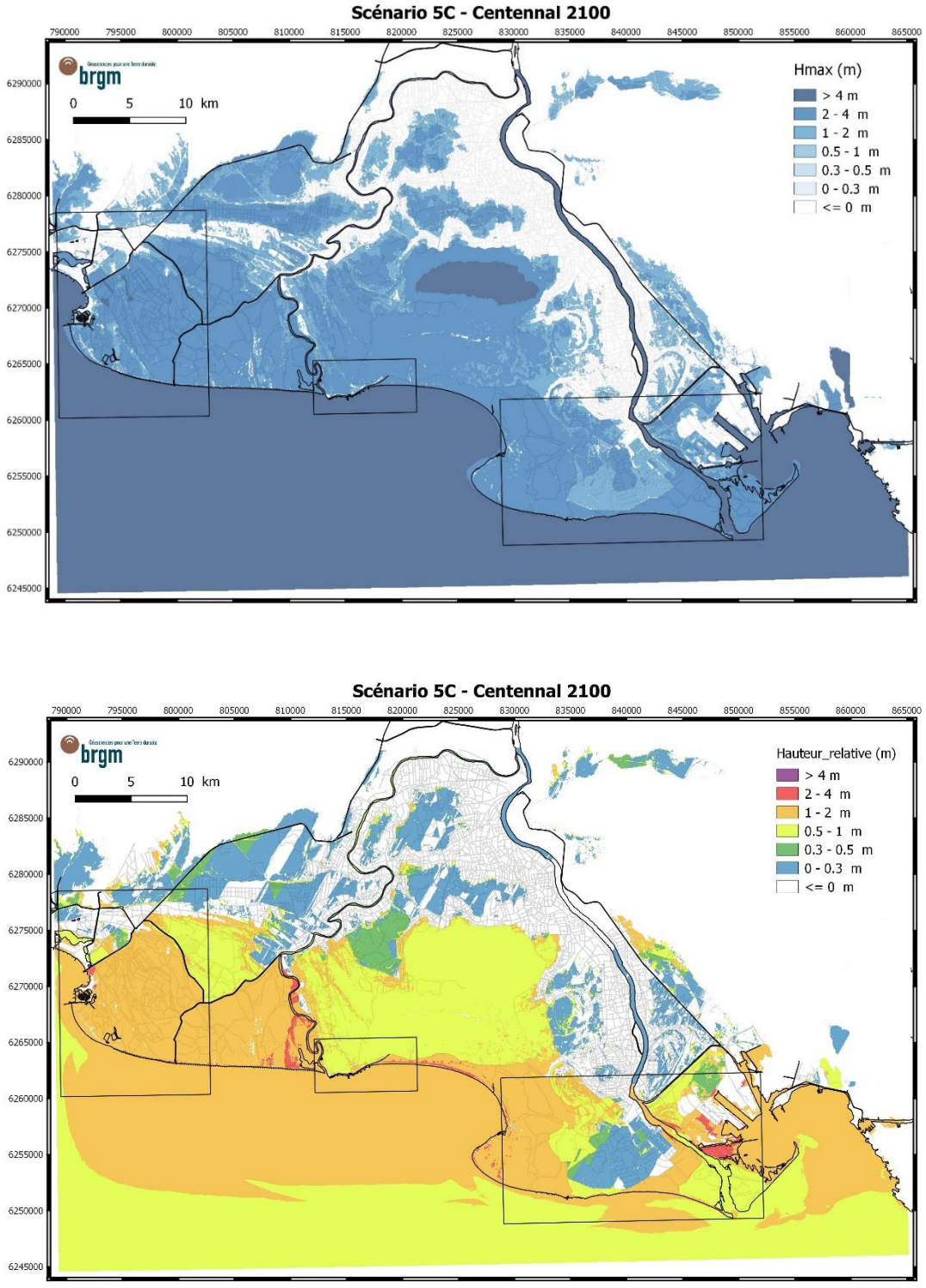


Figure 19 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 5C - Centennal 2100 et État aménagé.

4.2.6. Scénario 6 : Exceptionnelle 2100

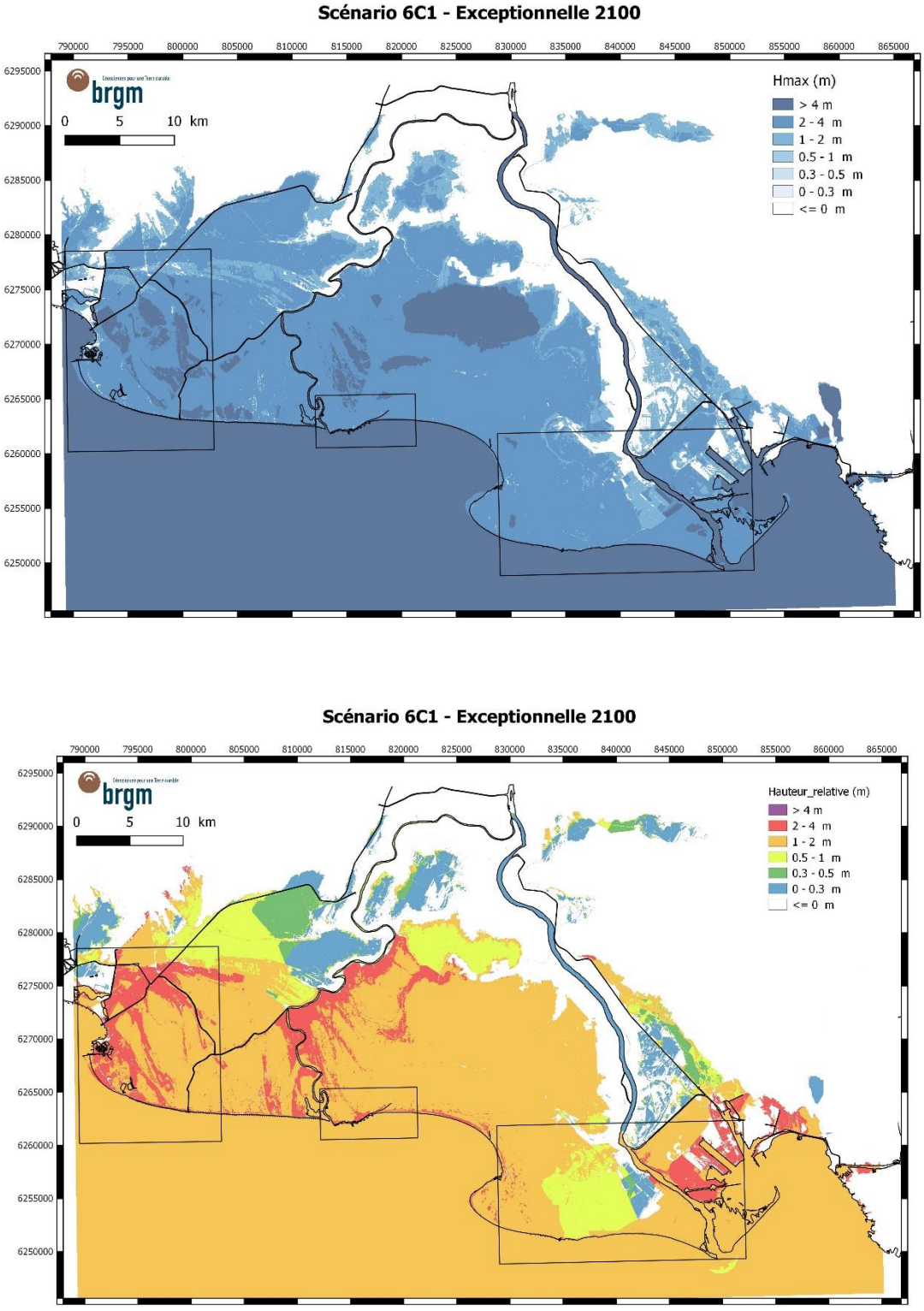


Figure 20 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 6C1 - Exceptionnelle 2100 et État aménagé C1 (topographie MNT Litto 3D).

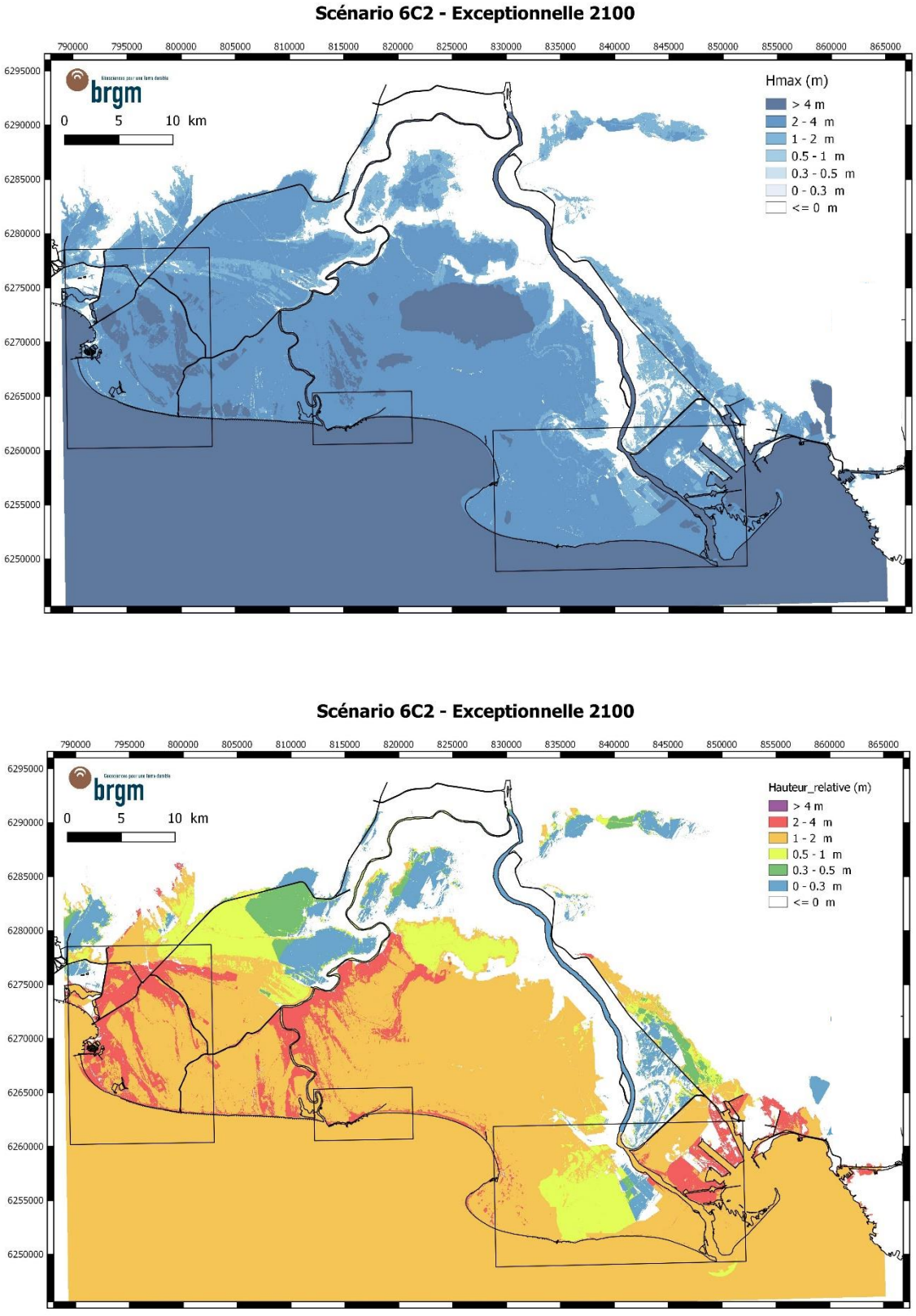


Figure 21 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 6C2 - Exceptionnelle 2100 et État aménagé C2 (MNT modifié par ajout de données topographiques).

4.2.7. Scénario 7 : Alea PPRI

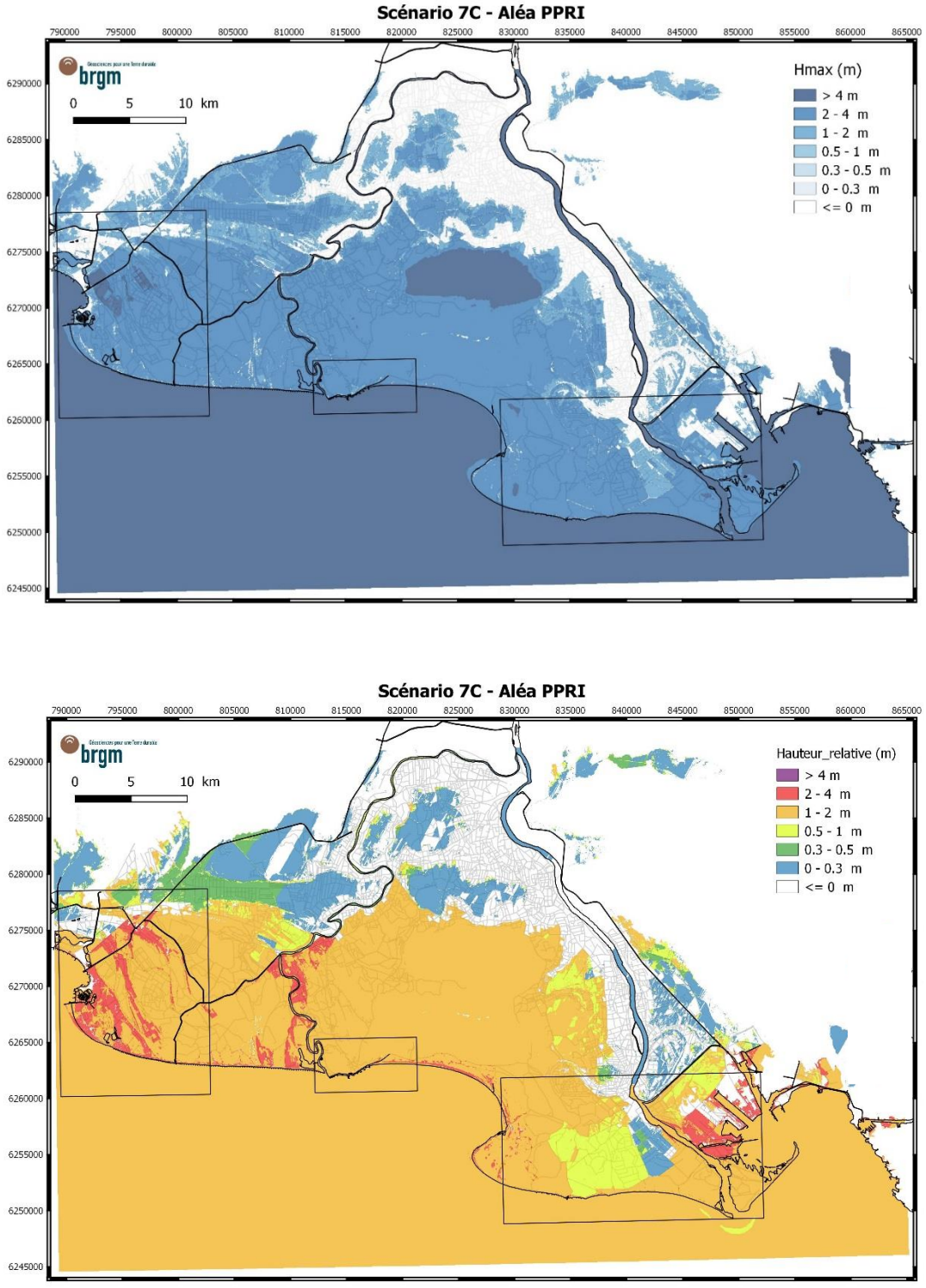


Figure 22 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 7C - Aléa PPRI et État aménagé.

4.2.8. Scénario 8A : Tempête de novembre 2014

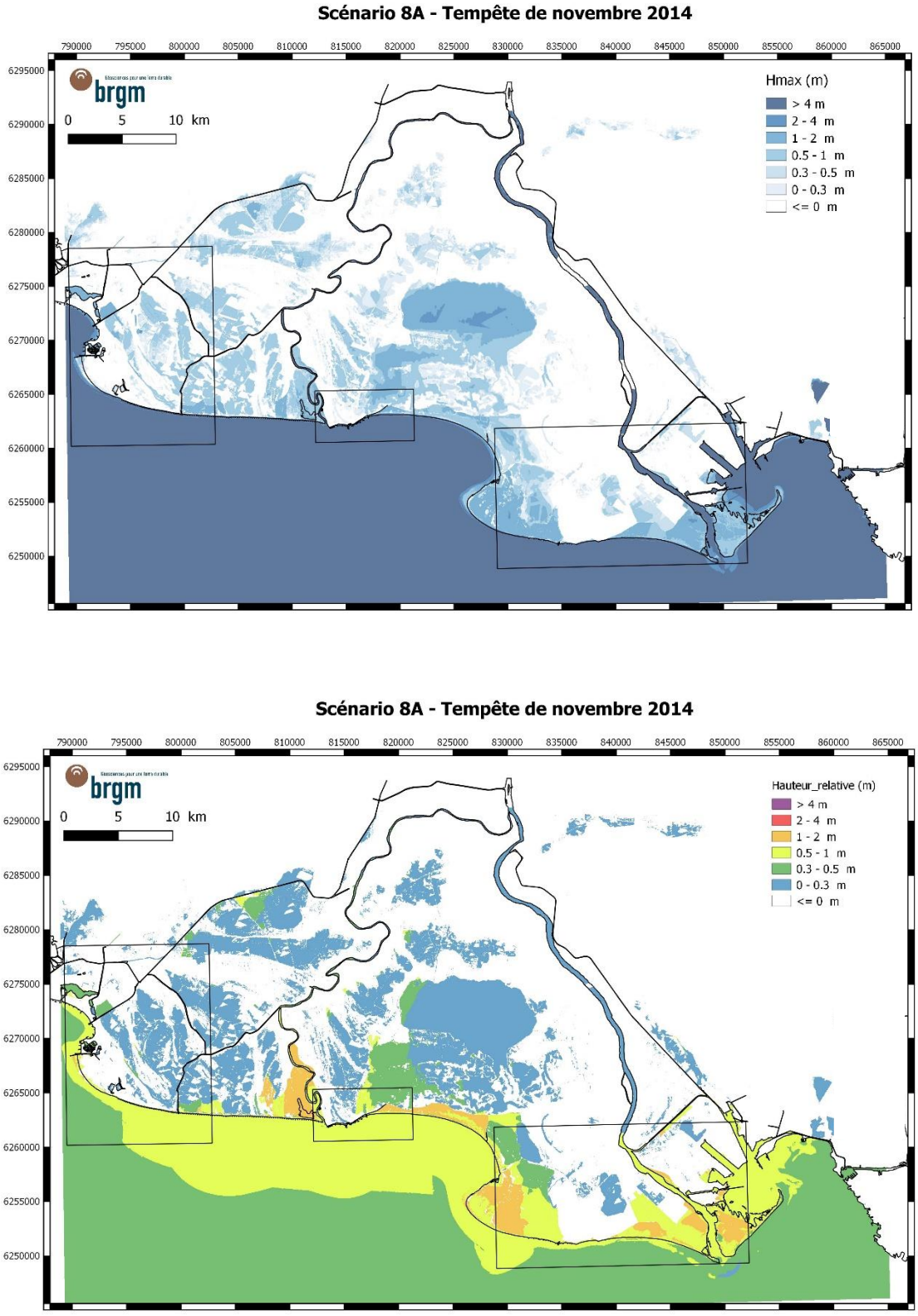


Figure 23 : Cartographie des hauteurs d'eau absolues maximales (figure du haut) et des hauteurs d'eau relatives maximales (figure du bas) pour le scénario 8A - Aléa PPRI - État aménagé.

4.3. CARTOGRAPHIE DES SUR-IMPACTS LIÉS AUX BRÈCHES DANS LE SYSTÈME D'ENDIGUEMENT

Les scénarios de brèches suivants ont été définis par le bureau d'étude EGIS et le SYMADREM.

La localisation de l'apparition potentielle de brèches dans les digues s'est basée sur :

- des observations faites lors de visites techniques ;
- une analyse de la structure de l'ouvrage ;
- une analyse de l'exposition à la houle et à l'érosion côtière ;
- des levés topographiques.

4.3.1. Localisation des brèches

Les localisations sélectionnées sont détaillées sur la Figure 24 et le tableau ci-dessous (Figure 25).



Figure 24 - Localisation des brèches dans le système d'endiguement au niveau des Saintes-Maries-de-la mer.

Nom	Localisation	Description - justification	Longitude / Latitude
B1	Clos du Rhône	Digue longitudinale de fond de plage. Enrochements hétérogènes et glissement de blocs observés. Les aménagements de cette zone sont particulièrement exposés du fait de l'approfondissement des fonds devant cet aménagement et du décalage du trait de côte de chaque côté du petit Rhône.	4°24'16.62"E / 43°26'53.76"N
B2	Quai des Pécheurs (port Gardian)	Mur « chasse mer » localisé entre le quai « sud » de la darse et la plage. Instabilité de ce mur (affaissement, « renard » visible coté quai). Érosion de la plage ; augmentation potentielle de la houle qui arrive sur cette plage si le musoir de la digue du port est détruit. Ce musoir est en très mauvais état et une fosse d'érosion est visible.	4°25'27.88"E / 43°26'58.04"N
B3	Centre du village	Exposition directe aux houles de Sud Est et abaissement potentiel des fonds à moyenne échéance.	4°25'45.85"E / 43°26'58.51"N
B4	Plage Est	Digue longitudinale à l'Est du grau de la Fourcade. Renforcement d'urgence réalisé récemment. Tenue du pied de digue ? franchissements potentiellement plus importants. Le fort recul du trait de côte et abaissement des fonds ces dernières années augmentent les aléas hydrodynamiques et sédimentaires.	4°26'55.04"E / 43°27'26.33"N

Figure 25 - Synthèse des localisations et description des brèches dans le système d'endiguement au niveau des Saintes-Maries-de-la mer.

4.3.2. Caractéristique et cinétique des brèches

Quatre propositions de brèches ont été utilisées pour des périodes de retour trentennale, centennale et exceptionnelle :

- pour la période de retour T= 30 ans, deux zones potentielles de brèches, parmi les quatre retenues, semblent inéluctables ;
- pour les périodes de retour 100 ans et exceptionnelle, les quatre zones sont impactées.

Les caractéristiques des brèches présentées dans le tableau ci-dessous (Figure 26) ont été définies par avis d'expert, par EGIS et le SYMADREM.

Période de retour T (ans)	Description	B1	*B2*	*B3*	*B4*
30	Largeur	10 m	*50 m*	*10 m*	*50 m*
	Début de brèche par rapport au « palier haut de la tempête »	Avec 1 à 2 heures de décalage	*Rapidement de l'Ouest vers l'Est*	*Avec 1 à 2 h de décalage*	*Rapidement, d'Ouest en Est depuis les limites Ouest du renforcement.*
	Cote	TN en arrière de la digue	*Niveau du quai*	*TN en arrière de la digue*	*TN en arrière de la digue*
100	Largeur	50 m	*100 m*	*35 m (1)*	*100 m (4)*
	Début de brèche par rapport au « palier haut de la tempête »	Rapidement	*Rapidement*	*Rapidement*	*Rapidement*
	Cote	TN en arrière de la digue	*TN en arrière de la digue*	*TN en arrière de la digue*	*TN en arrière de la digue*
Exceptionnel	Largeur	100 m (3)	*120 m(2)*	*100 m (4)*	*100 m (4)*
	Début de brèche par rapport au « palier haut de la tempête »	Rapidement	*Rapidement*	*Rapidement*	*Rapidement*
	Cote	TN en arrière de la digue	*TN en arrière de la digue*	*TN en arrière de la digue*	*TN en arrière de la digue*

(1) longueur digue entre les 2 épis
(2) longueur du mur
(3) destruction brise-lames « clos du Rhône »
(4) brèche « PPRl »

Figure 26 - Caractéristiques géométriques des brèches et cinétiques de la défaillance.

4.3.3. Modélisation avec brèches

Les cartographies suivantes montrent les résultats des simulations avec brèches pour les scénarios 2B (trentennal), 3B (centennal) et 4B (exceptionnel).

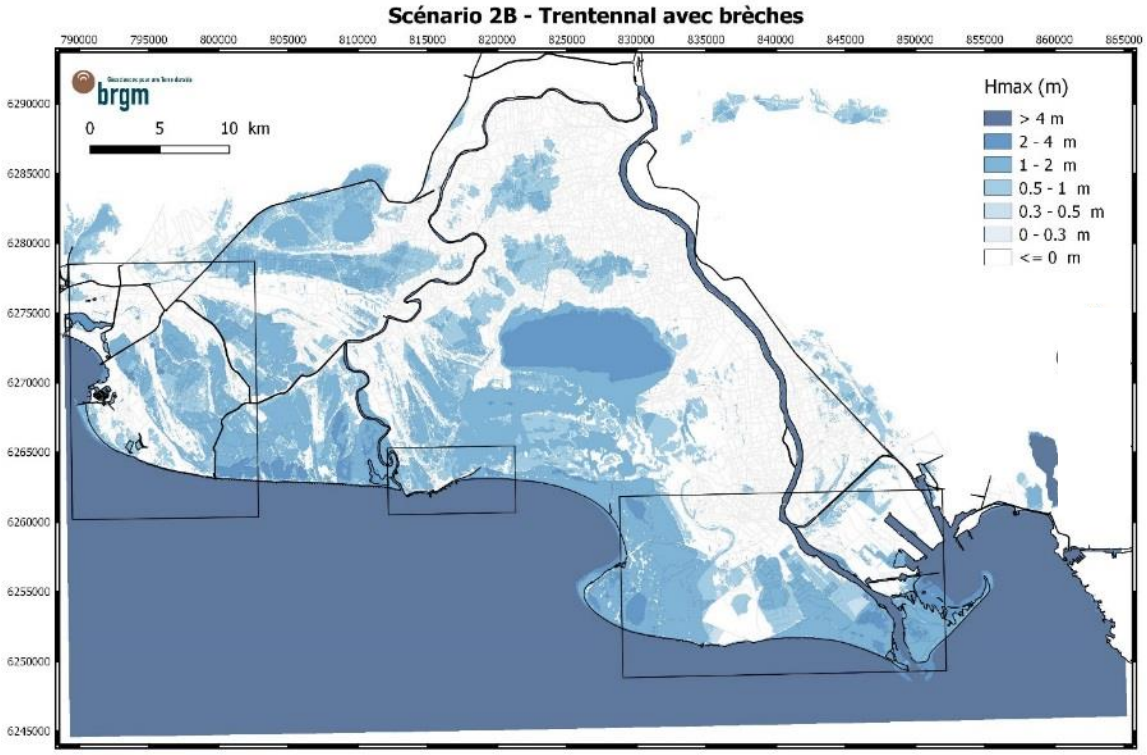


Figure 27 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour le scénario 2B - Trentennal avec brèches.

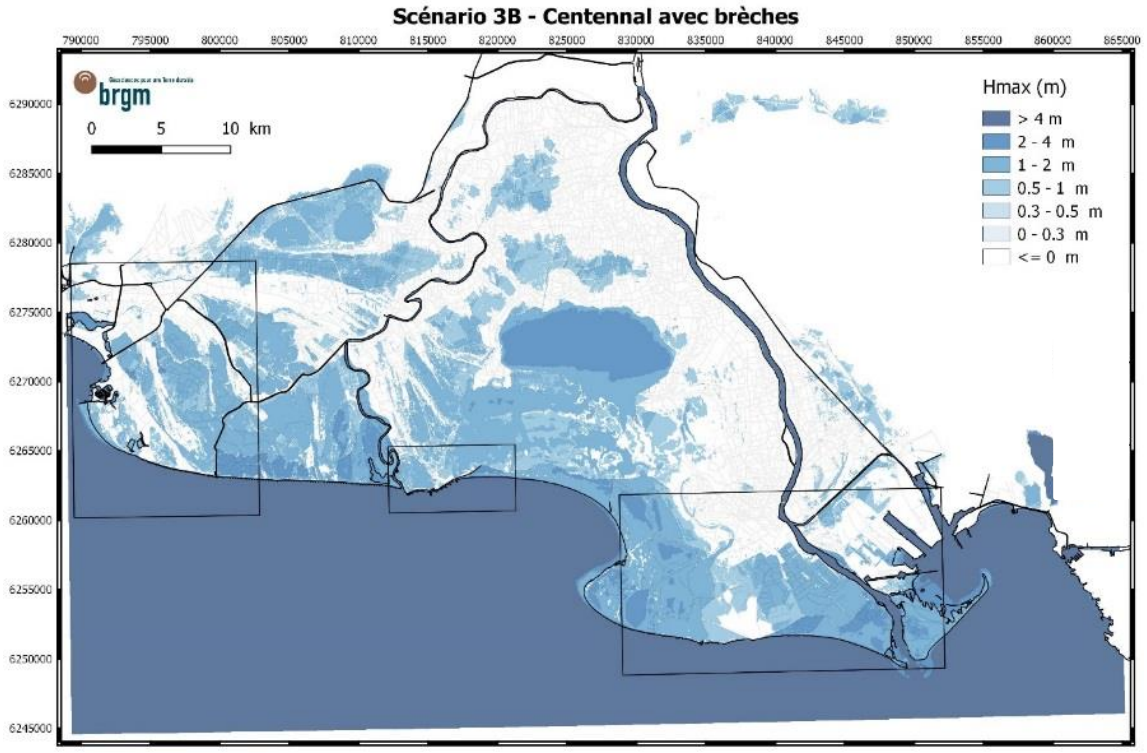


Figure 28 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour le scénario 3B - Centennal avec brèches.

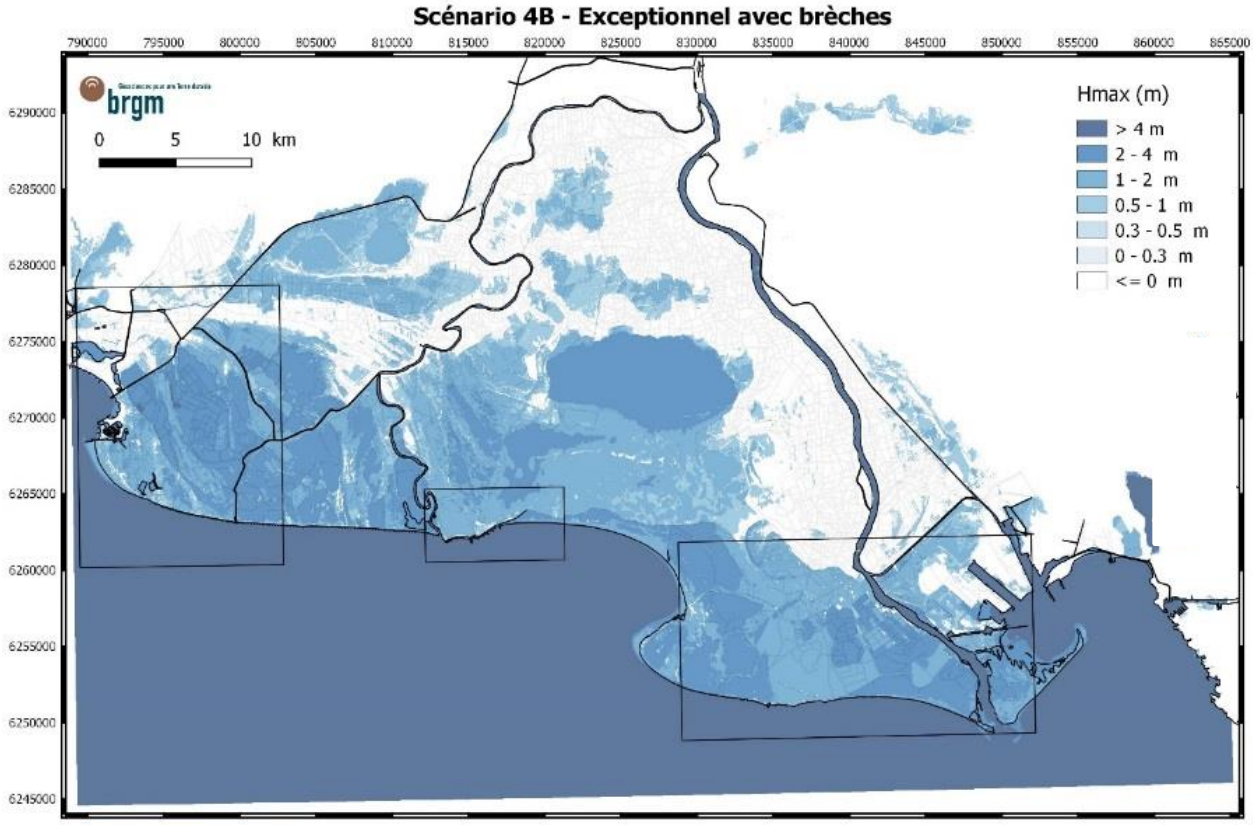


Figure 29 : Cartographie des hauteurs d'eau maximales pour le scénario 4B - Exceptionnel avec brèches.

4.3.4. Sur-impact lié aux brèches

Pour étudier les effets aggravants, en terme de submersion marine, de la rupture de zone de brèches dans les aménagements, la différence entre la hauteur maximale atteinte pour le scénario avec brèche et pour le scénario sans brèche correspondant, a été cartographiée pour les 3 scénarios (2, 3 et 4, cf. Figures 30, 31 et 32).

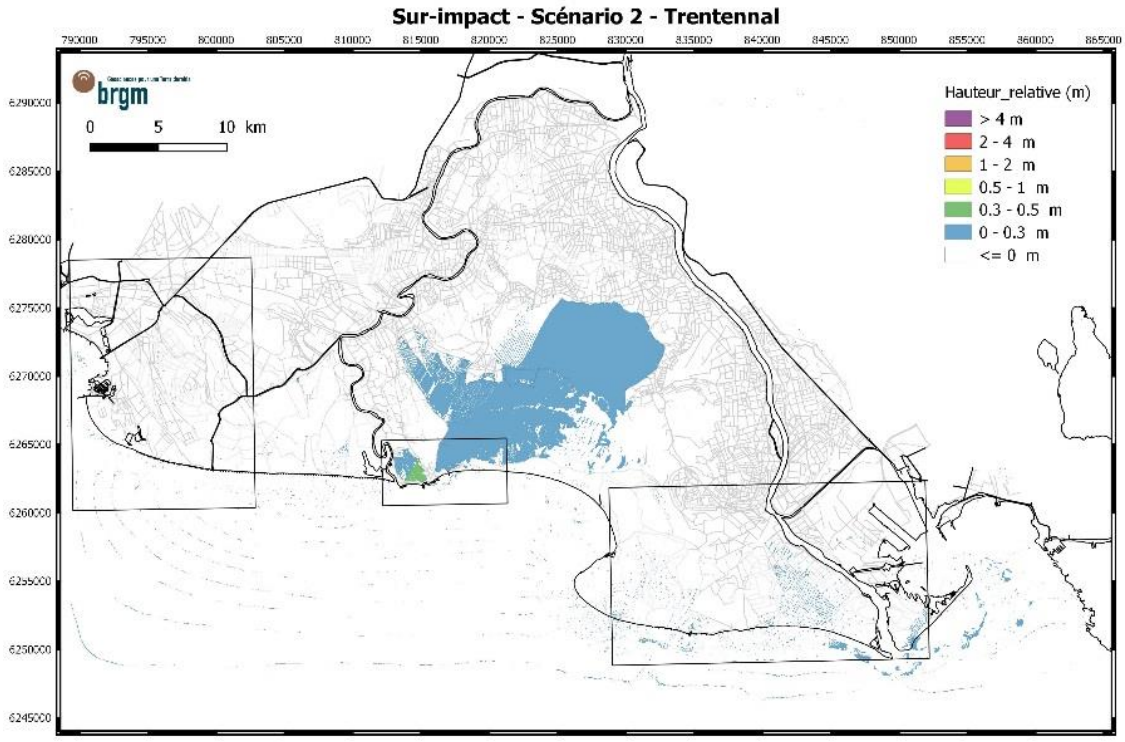


Figure 30 : Cartographie de sur-impact (hauteurs d'eau maximales) pour les scénarios 2 (Trentennal) avec brèches.

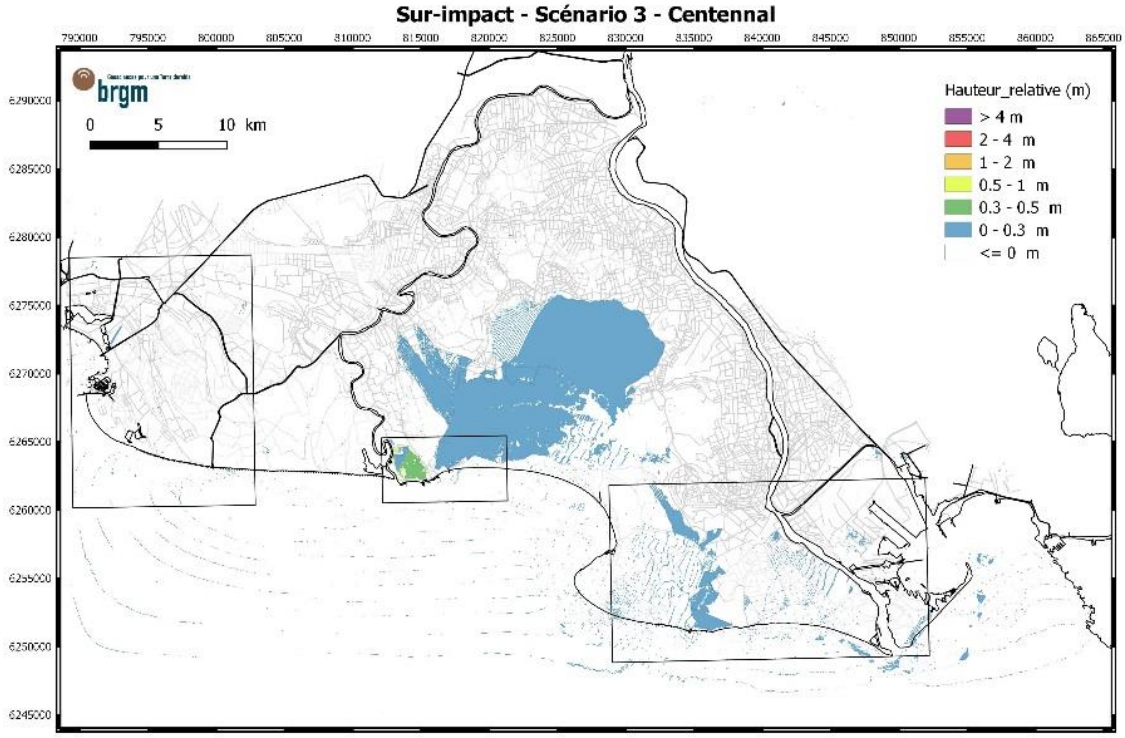


Figure 31 : Cartographie de sur-impact (hauteurs d'eau maximales) pour les scénarios 3 (Centennal) avec brèches.

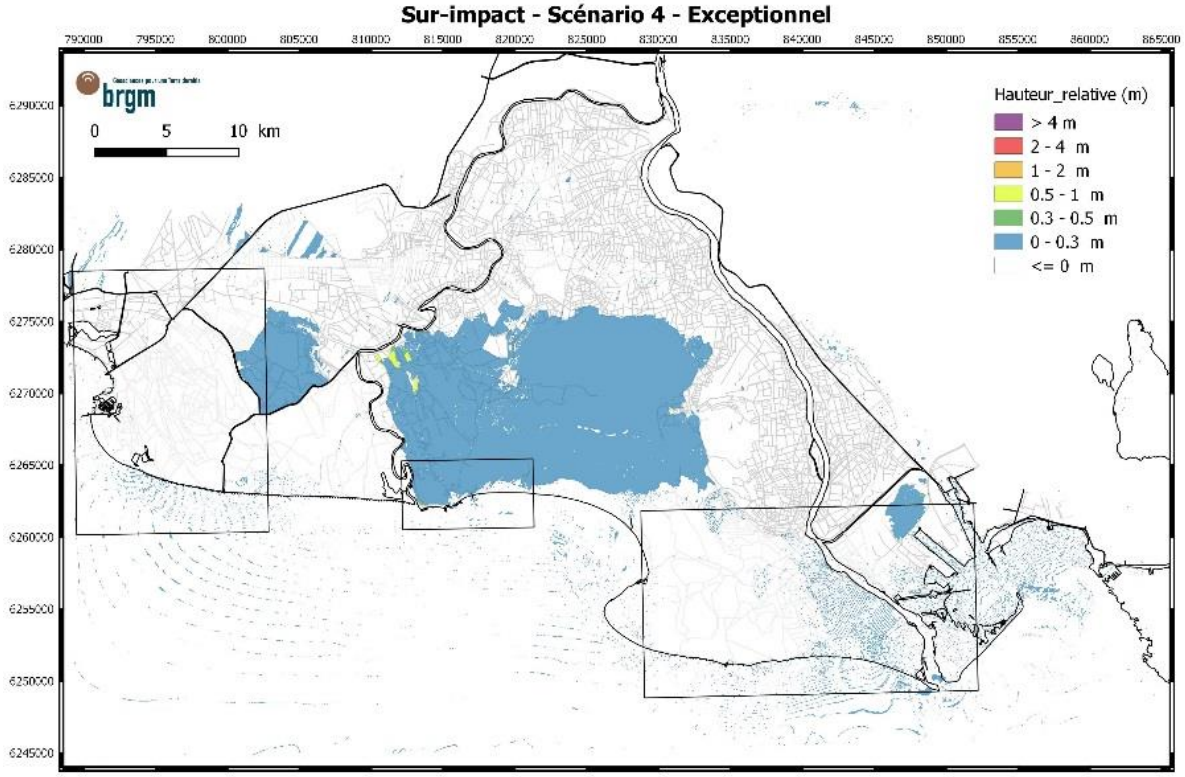


Figure 32 : Cartographie de sur-impact (hauteurs d'eau maximales) pour les scénarios 4 (Exceptionnel) avec brèches.

4.4. CARTOGRAPHIE DE L'IMPACT DES AMÉNAGEMENTS

L'état d'aménagement C ou « état aménagé » intègre différentes modifications de la topographie du modèle de l'étude DDTM13.

Ces modifications topographiques entraînent des variations de la propagation des conditions hydrodynamiques (cf. Figures 33, 34 et 35).

- les secteurs situés derrière la digue de second rang indiquent des hauteurs nettement plus faibles que pour l'aménagement A ;
- l'arasement de certaines portions de digues, au sud de la digue à la mer, permet un meilleur écoulement du Rhône sur une zone d'expansion de crue plus importante ;
- une augmentation des courants de surface est observée au niveau de la pointe de la digue à la mer, zone plus exposée suite à l'arasement de certains tronçons notamment pour le scénario exceptionnel.

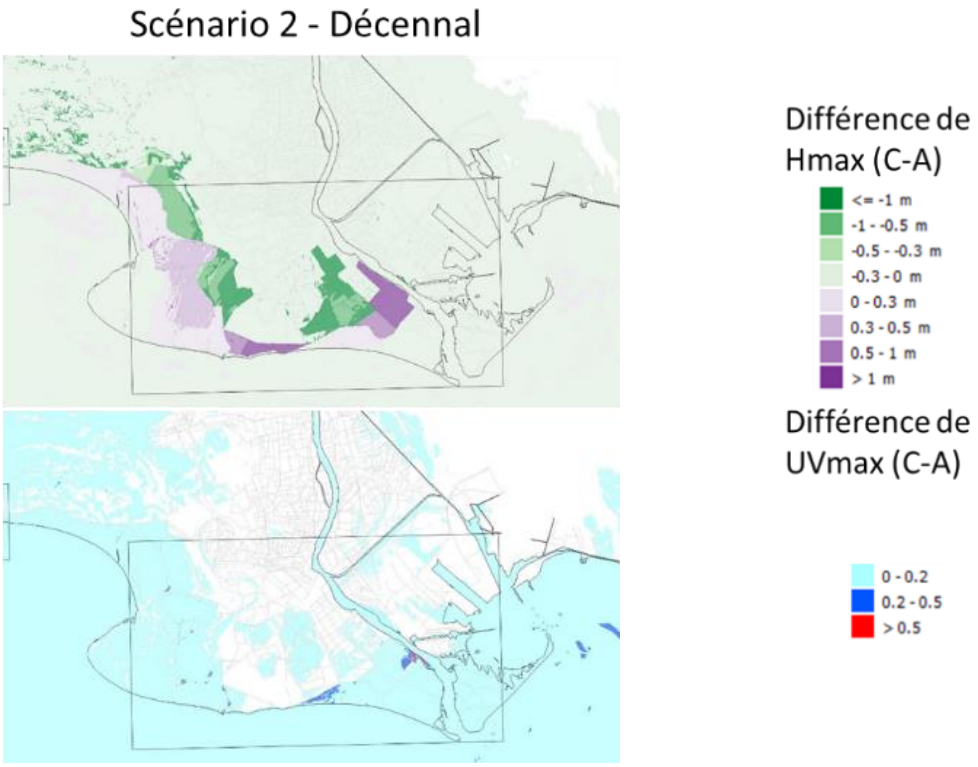


Figure 33 : Cartographie de l'impact de l'état aménagé pour le scénario 2 (Décennal).

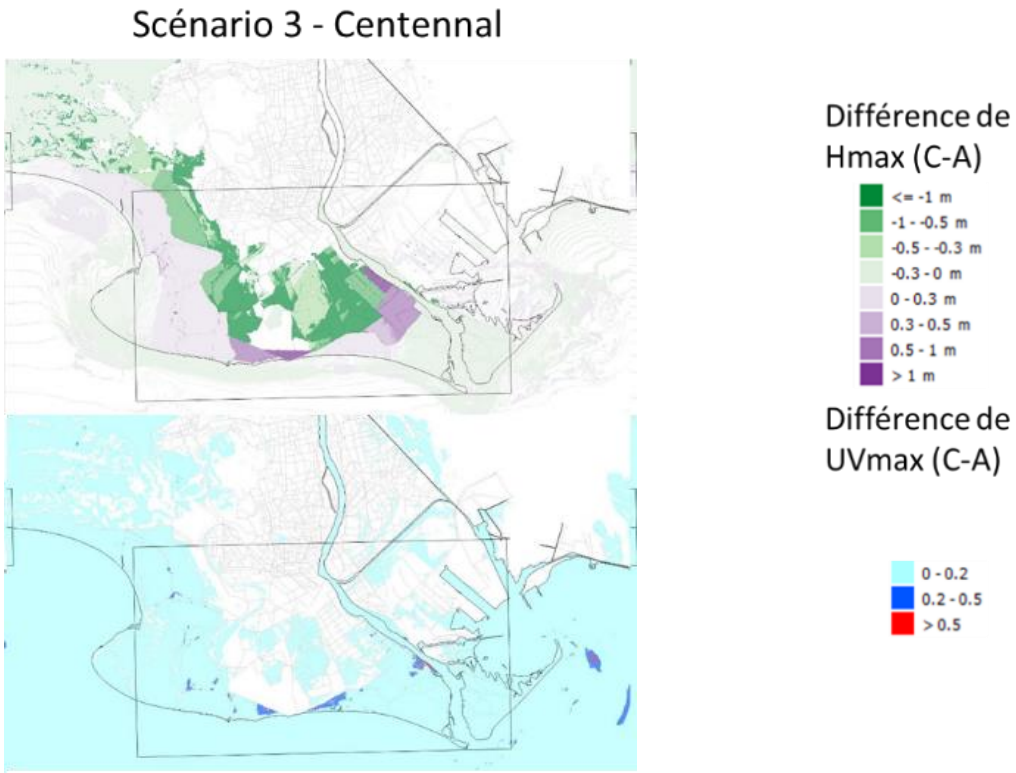


Figure 34 : Cartographie de l'impact de l'état aménagé pour le scénario 3 (Centennal).

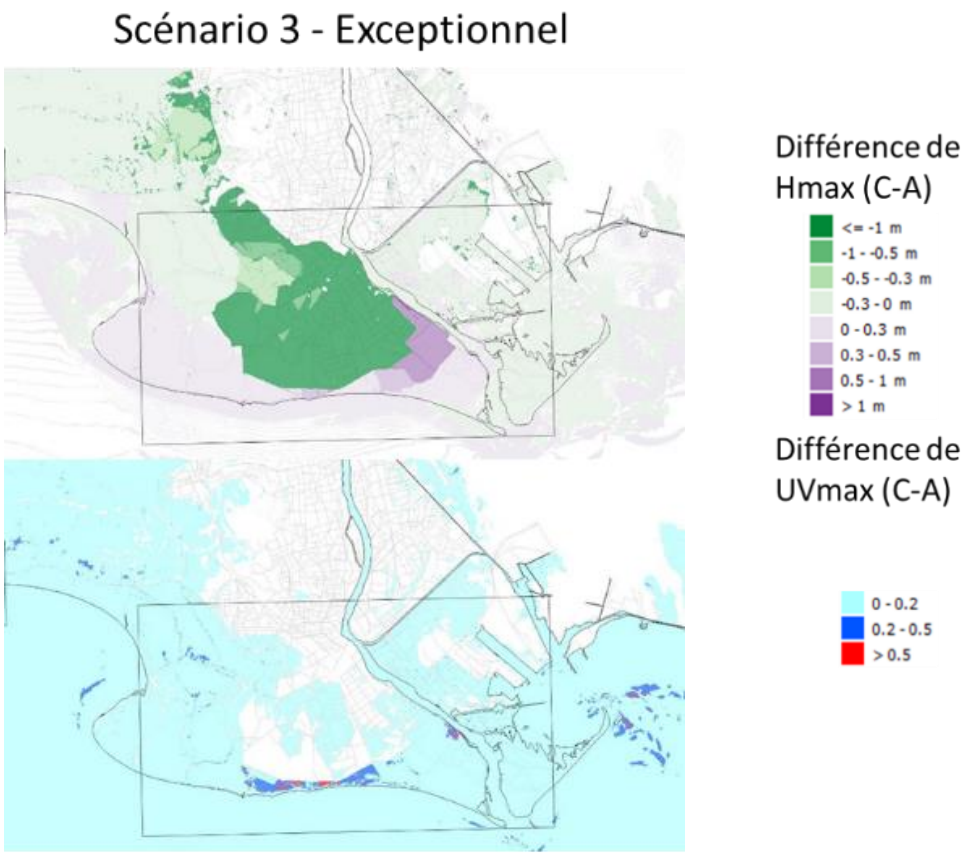


Figure 35 : Cartographie de l'impact de l'état aménagé pour le scénario 3 (Exceptionnel).

5. Conclusion

Dans le cadre d'un projet en partenariat avec la Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Bouches-du-Rhône (DDTM13), le BRGM a développé un modèle numérique permettant de réaliser des simulations dynamiques des phénomènes de submersion marine sur la totalité du littoral camarguais. Le modèle apporte des éléments d'aide à la décision à la DDTM13 en termes d'évaluation précise de l'extension de la submersion marine sur les surfaces terrestres de la Camargue et du golfe de Fos-sur-Mer.

Il permet la modélisation de scénarios de tempêtes pour une échéance actuelle (niveau de la mer aujourd'hui) et futures, en prenant en compte une remontée du niveau marin liée au changement climatique global. Ce modèle permet également de tester différents scénarios d'aménagements (abandon ou construction de digues) pour la gestion du risque de submersion marine en Camargue.

En 2018, Le BRGM et le Syndicat Mixte d'Aménagement des Digues du Delta du Rhône et de la Mer (SYMADREM) ont noué un partenariat pour une exploitation complémentaire du modèle, sur des scénarios lui permettant de mener à bien ses opérations de gestion du littoral de Camargue.

Une série de 7 scénarios de forçages ont été définis sur la base de périodes de retour conjointes des conditions de vagues et de niveau de la mer (10, 30, 100, 1000 ans) et un (1) scénario est basé sur un évènement de tempête historique (tempête de novembre 2014).

Sur la base de ces 8 scénarios, un total de 15 simulations a été réalisé en prenant en compte différentes hypothèses et différents états d'aménagement du littoral (digues en l'état actuel, digues en l'état actuel mais soumis à des brèches, aménagement futur des digues). Ces modifications topographiques ont été apportées au modèle topo-bathymétrique initial afin de simuler des scénarios avec la prise en compte de différents états d'aménagement.

Les résultats des simulations réalisées avec des hypothèses conformes aux besoins du SYMADREM en termes de gestion du littoral camarguais vont alimenter l'étude de danger (EDD) sur tout le linéaire de la Camargue en fournissant des données d'entrée pour la détermination du niveau de protection de la digue à la mer, et des données d'entrée pour la définition du niveau altimétrique de la crête de la digue de second rang.

6. Bibliographie

Ardhuin F., E. Rogers, A. Babanin, J.-F. Filipot, R. Magne, A. Roland, A. van der Westhuysen, P. Queffeulou, J.-M. Lefevre, L. Aouf, & F. Collard (2010) - Semi-empirical dissipation source functions for wind-wave models: part I, definition, calibration and validation. J. Phys. Oceanogr., 40(9):1917–1941, 2010.

Booij N., Haagsma Ij.G., Holthuijsen L.H., Kieftenburg At.M.M, Ris R.C., Van Der Westhuysen A.J., & Zijlema M. (2004) - Swan Cycle III version 40.41, User's Manual, 115 p.

Brodtkorb, P.A., Johannesson, P., Lindgren, G., Rychlik, I., Rydan, J. & Sja¶, E. (2000) - "WAFO - a Matlab toolbox for analysis of random waves and loads", Proceedings of the 10th International Offshore and Polar Engineering conference, Seattle, Vol III, pp. 343-350.

Bulteau T., Delvallee E., Thiebot J., Pedreros R. (2012) - Retour d'expérience sur l'utilisation des probabilités conjointes pour la caractérisation de niveaux marins à la côte. XII^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Cherbourg, 12-14 juin 2012, DOI:10.5150/jngcgc.2012.001-B.

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. doi:10.1016/j.advwatres.2007.06.010.

MEDDE (2014) - Guide méthodologique : plan de prévention des risques littoraux. MEDDE/DGPR, 169 p.

Paris F., Pedreros R., Stépanian A., Bulteau T., et Lecacheux S. (2017) - Modélisation de la submersion marine en Camargue. Rapport final. BRGM/RP-66804-FR, 176 p., 128 fig., 23 tabl., 2 ann.

Annexe 1

Complément étude Submersion Camargue - Forçages trentennaux

Cette étude pour le SYMADREM en 2018 utilise les résultats de l'analyse statistique produite par Paris *et al.* (2017) sur la base des travaux de Bulteau *et al.* (2012).

Le complément demandé consiste à identifier un scénario de période de retour de dépassement conjoint 30 ans, et de déterminer les différentes combinaisons de couples de valeurs Hs et SWL qui répondent à cette occurrence.

La Figure 36 ci-dessous montre les différentes courbes de périodes de retour de dépassement conjoint 1, 10, 30 et 100 ans.

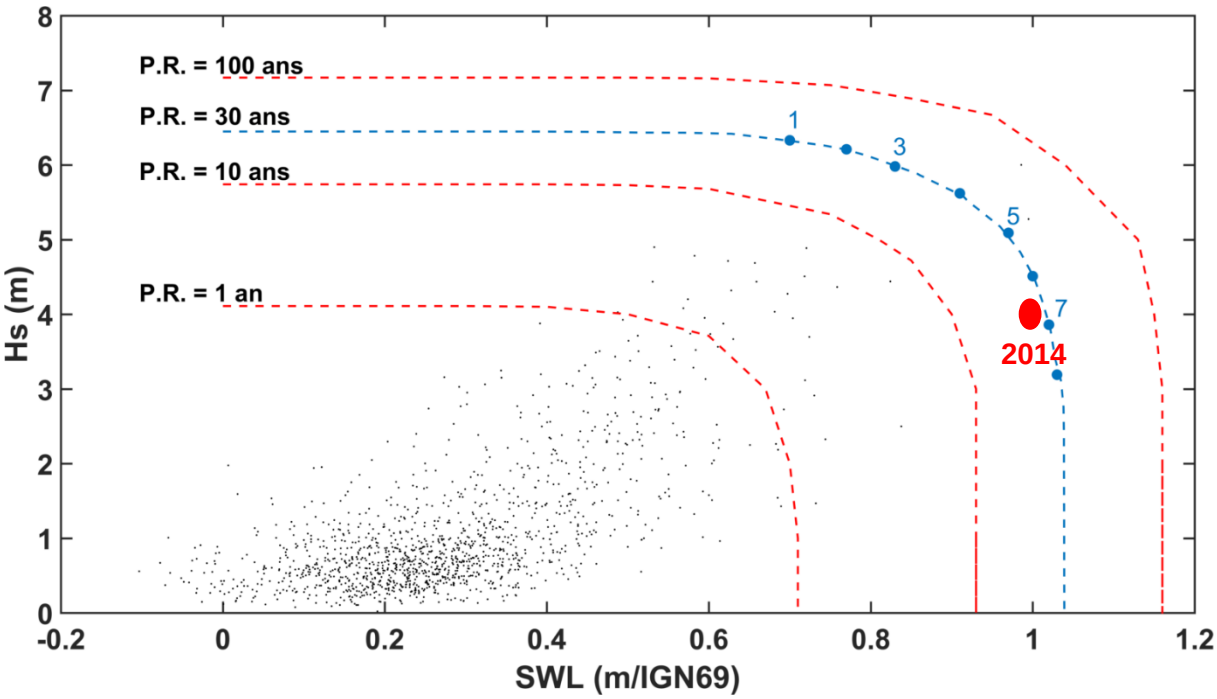


Figure 36 : Courbes d'iso-période de retour de dépassement conjoint 1, 10, 30 et 100 ans. Les points bleus sur la courbe 30 ans représentent des combinaisons (Hs,SWL) potentielles pour le choix du scénario trentennal à déterminer.

La tempête de 2014 avec des valeurs maximales de Hs de 4,04 m et de niveau maximal SWL de +0,97 m NGF/IGN69, correspond à un évènement de période de retour conjointe entre 10 et 30 ans.

Les périodes pics associées aux combinaisons identifiées sur la courbe 30 ans sont calculées via la courbe des médianes de Tp en fonction de Hs (Paris *et al.*, 2017).

Les directions pics de vagues sont choisies en fonction du corrélogramme Hs,Dp (cf. Paris *et al.*, 2017). Quelle que soit la combinaison, on retient Dp = 155° (convention nautique).

Pour les vitesses de vent, on utilise la loi polynomiale de la Figure 29 de l'étude DDTM13 (Paris *et al.*, 2017).

Enfin, pour les directions de vent, on utilise la même valeur que pour les scénarios 100 ans et 10 ans déjà simulés, à savoir 121° (Paris *et al.*,2017).

Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** synthétise des scénarios possibles pour la période d e retour 30 ans :

	N° combinaison							
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Hs (m)	6,33	6,21	5,98	5,62	5,09	4,51	3,86	3,19
Tp (s)	10,0	9,9	9,8	9,6	9,2	8,8	8,3	7,7
Dp (°)	125	125	125	125	125	125	125	125
SWL (m NGF)	0,70	0,77	0,83	0,91	0,97	1,00	1,02	1,03
U (m/s)	27,5	27,1	26,3	25,1	23,6	21,9	20,1	18,1
Dir (°)	121	121	121	121	121	121	121	121

Tableau 3 : Combinaisons issues de la discrétisation du contour de probabilité conjointe 30 ans.



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

Direction régionale Provence-Alpes-Côte d'Azur
117 avenue de Luminy
BP.168
13276 - Marseille Cedex 9 - France
Tél. : 04 91 14 74 77