

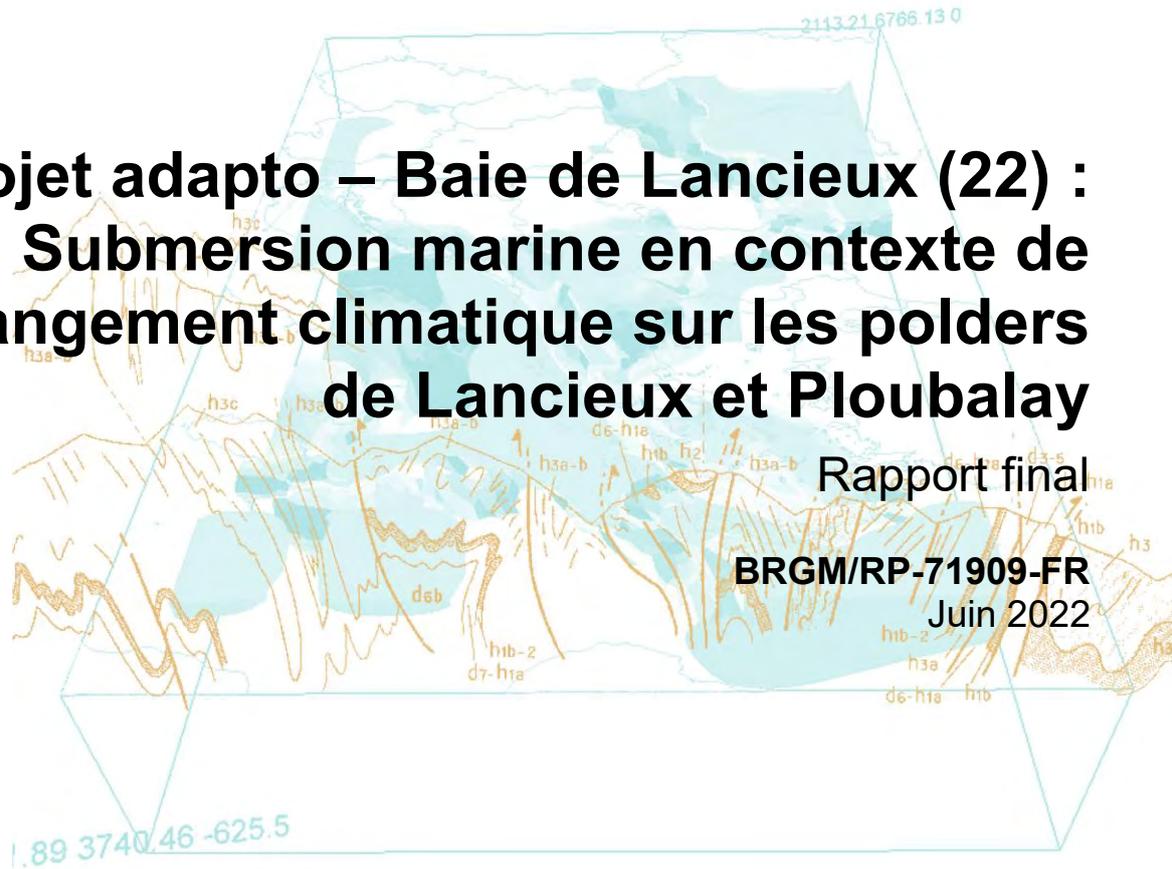


Projet adapto – Baie de Lancieux (22) : Submersion marine en contexte de changement climatique sur les polders de Lancieux et Ploubalay

Rapport final

BRGM/RP-71909-FR

Juin 2022



Projet adapto – Baie de Lancieux (22) : Submersion marine en contexte de changement climatique sur les polders de Lancieux et Ploubalay

Rapport final

BRGM/RP-71909-FR

Juin 2022

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de recherche du BRGM

S. Le Roy et O. Brivois

Avec la collaboration de

T. Durozier (Conservatoire du littoral), G. Hervouët (Conservatoire du littoral) et Louisor J.

Vérificateur :

Nom : Jessie LOUISOR
Fonction : Ingénieure Littoral

Date : 02/02/2023

Signature :



Approbateur :

Nom : Eric DAVID
Fonction: Responsable de l'unité
Risques Côtiers et Changement
Climatique

Date : 10/02/2023

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



Mots-clés : adapto, Conservatoire du littoral, Aléas, Risques côtiers, Modélisation numérique, Submersion marine, Changement Climatique, Polder, Baie de Lancieux, Ploubalay, Beausais-sur-Mer, Lancieux

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

Le Roy S. et Brivois O. avec la collaboration de Durozier T., Hervouët G. et Louisor J. (2022) – Projet adapto – Baie de Lancieux (22) : Submersion marine en contexte de changement climatique sur les polders de Lancieux et Ploubalay. Rapport final BRGM/RP-71909-FR, 219 p., 79 ill., 29 ann.

Synthèse

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

Le site de la Baie de Lancieux, dans les Côtes d'Armor, est l'un de ces sites « en devenir », dans la mesure où 2 polders (polder de Lancieux au Nord et polder de Ploubalay au Sud), en grande partie propriétés du Conservatoire du littoral, correspondent à des zones basses submersibles protégées par des digues en terre dont l'entretien et les réparations pourraient s'avérer très coûteux. Il convient toutefois de noter qu'une brèche est apparue dans la digue de Ploubalay en mars 2020, durant l'étude, entraînant une submersion partielle du polder de Ploubalay. Les différents échanges entre le Conservatoire du littoral et les collectivités ont conduit à laisser cette brèche en libre évolution, le projet adapto permettant d'accompagner cette remise en eau du polder auprès des différents intervenants.

Les travaux du BRGM dans le cadre du projet adapto en Baie de Lancieux ont permis d'accompagner le Conservatoire du littoral dans ces diverses réflexions. Les premiers éléments ont permis de préciser le fonctionnement hydrodynamique de la baie vis-à-vis des risques de submersion marine, et notamment :

- Le rôle des vagues, qui ne génèrent pas de surcote (*wave-setup*) importante au sein de la baie, mais qui, même réduites en fond de baie, contribuent à l'érosion de la digue en terre de Ploubalay ;
- Les durées de submersion potentielle selon les coefficients de marée (dans l'hypothèse où les digues seraient arasées), afin de quantifier combien de temps chaque secteur des polders pourrait être submergé. Ces résultats, fournis au Conservatoire du littoral, ont permis au Conservatoire et au Museum d'Histoire Naturelle d'anticiper les évolutions possibles des habitats naturels des polders ;
- Les périodes durant lesquelles des submersions sont possibles sous forme de calendriers de surveillance à usage du Conservatoire du littoral et des différents intervenants : les périodes de grandes marées susceptibles d'engendrer des submersions peuvent être anticipées et surveillées vis-à-vis des différents enjeux selon les prévisions de surcotes disponibles.

Les simulations numériques de submersion marine ont permis d'affiner la connaissance des inondations susceptibles d'affecter les polders de Lancieux et de Ploubalay et leurs évolutions sous l'effet de l'élévation du niveau de la mer par le changement climatique. Elles ont notamment montré que :

- Si les digues actuelles suffisent à contenir les grandes marées, elles subiraient une surverse limitée en cas de niveau centennal (et compte-tenu de leur nature, une telle surverse se traduirait probablement par l'apparition de brèches) ;
- La brèche apparue dans la digue du polder de Ploubalay en Mars 2020 (pour laquelle il a été décidé de la laisser évoluer librement) conduit, du fait de son élargissement rapide, à un niveau d'eau dans le polder de Ploubalay équivalent au niveau marin, ce qui en cas de niveau exceptionnel (centennal) entraîne une submersion généralisée du polder et des enjeux qui s'y trouvent ;
- L'élévation du niveau de la mer sous l'effet du changement climatique va amplifier assez largement ces submersions, tant en termes d'amplitude que de fréquence ; tous les enjeux identifiés dans les polders seront alors susceptibles d'être atteints, notamment dans le polder de Lancieux, même si la digue est maintenue dans son état actuel (les maisons à l'extrémité Nord du polder de Lancieux, au Sud du front de mer, seraient assez largement atteintes par une submersion liée à un niveau marin centennal quand la mer aura monté de 40 cm, soit à une échéance que l'on pourrait situer autour de l'année 2050).

Des scénarios prospectifs et exploratoires d'aménagement au niveau du polder de Lancieux ont toutefois permis de montrer que la construction de digues rétro-littorales en arrière du polder de Lancieux pourrait permettre, même en cas de brèche dans la digue de Lancieux, de préserver les principaux enjeux exposés, moyennant une augmentation limitée de la submersion entre la digue de la Roche et la nouvelle digue rétro-littorale (cette augmentation dépend de la position de la digue rétro-littorale et s'amplifie si celle-ci est reportée vers le Sud). Une solution alternative à court terme pourrait consister à combler les brèches existantes dans la digue des Moines afin de limiter le risque de submersion dans le polder de Lancieux (sous réserve de s'assurer de ne pas augmenter le risque d'inondation par ruissellement), mais cette solution deviendrait rapidement inefficace sous l'effet de l'élévation du niveau de la mer. Les décisions concernant de tels aménagement relèvent toutefois de la collectivité, et sont en cours de discussion avec les élus locaux et les riverains lors d'ateliers pratiques organisés par le Conservatoire du littoral. Cette phase participative est en effet cruciale puisqu'elle renforce la crédibilité, la légitimité et permet de susciter l'intérêt des élus pour le projet. Ces trois éléments sont, d'après Leitch et al. (2019), des indicateurs d'une transition efficace entre technique (ici la modélisation numérique) et prise de décision pratique ou politique (dans ce cas, mise en place d'une zone d'extension de la submersion ou poursuite de l'endigement).

Compte-tenu de la situation actuelle du polder de Ploubalay (brèche apparue en mars 2020 et laissée en libre évolution, gestion des principaux enjeux exposés par le Conservatoire du littoral, la Communauté de communes de la Côte d'Emeraude et la commune de Beaussais-sur-Mer...), de tels scénarios d'aménagement n'ont pas été envisagés dans le cadre de la présente étude.

L'ensemble de ces éléments a été fourni au Conservatoire du littoral et aux collectivités concernées afin d'accompagner à la fois la remise en eau du polder de Ploubalay depuis mars 2020 et les réflexions prospectives concernant l'avenir du polder de Lancieux.

Sommaire

1. Description du site et objectifs de l'étude	13
1.1. CONTEXTE ET DESCRIPTION DU SITE.....	13
1.1.1. Le projet adapto.....	13
1.1.2. La Baie de Lancieux	14
1.1.3. Le polder de Lancieux.....	15
1.1.4. Le polder de Ploubalay	18
1.2. RAPPELS THEORIQUES SUR LES PHENOMENES DE SUBMERSION MARINE	27
1.2.1. Processus physiques	27
1.2.2. Types de submersion marine.....	28
1.3. OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	29
2. Données disponibles	31
2.1. DONNEES TOPOGRAPHIQUES.....	31
2.1.1. RGE Alti (©IGN).....	31
2.1.2. Levers topographiques du Conservatoire du littoral	32
2.2. OCCUPATION DU SOL.....	34
2.2.1. LittoMOS (CEREMA)	34
2.2.2. Cartographie des habitats naturels	35
2.3. CARACTERISTIQUES OCEANOGRAPHIQUES.....	35
2.3.1. Courants et régime de marée	35
2.3.2. Instrumentation et mesures in situ	37
2.3.3. Niveaux marins et surcotes.....	Erreur ! Signet non défini.
2.3.4. Etat des mers.....	41
3. Fonctionnement de la Baie de Lancieux.....	47
3.1. COEFFICIENTS DE MAREE ET NIVEAUX MARINS.....	47
3.2. PROPAGATION DES VAGUES A L'INTERIEUR DE LA BAIE	47
3.3. CARTOGRAPHIE DES DUREES POTENTIELLES DE SUBMERSION.....	50
3.4. CALENDRIERS DE SURVEILLANCE DE LA SUBMERSION.....	53
3.5. EVOLUTIONS DU CORDON DUNAIRE DE LA ROCHE MORIN.....	56
4. Simulation numérique de la submersion marine	61
4.1. MODELE ET IMPLANTATION	61
4.1.1. Le modèle MARS.....	61

4.1.2. Emprise et résolution spatiale du domaine	62
4.1.3. Données d'entrée	63
4.2. SCENARIOS ETUDIES	70
4.2.1. Changement climatique	70
4.2.2. Conditions de forçage.....	70
4.2.3. Hypothèses sur les digues existantes.....	72
4.3. RESULTATS DES SIMULATIONS NUMERIQUES	73
4.3.1. Scénario A_2020 (Digue de la Roche intacte, Digue des Marais-Neufs intacte, Echéance actuelle).....	74
4.3.2. Scénario B_2020 (Digue de la Roche intacte, Brèche dans la Digue des Marais-Neufs, Echéance actuelle).....	75
4.3.3. Scénario B_2030 (Digue de la Roche intacte, Brèche dans la Digue des Marais-Neufs, Echéance circa 2030).....	78
4.3.4. Scénario B_2050 (Digue de la Roche intacte, Brèche dans la Digue des Marais-Neufs, Echéance circa 2050).....	79
4.3.5. Scénario B_2100 (Digue de la Roche intacte, Brèche dans la Digue des Marais-Neufs, Echéance post 2050)	81
4.3.6. Scénario C_2020 (Brèche dans la Digue de la Roche, Brèche dans la Digue des Marais-Neufs, Echéance actuelle).....	82
4.3.7. Scénario C_2030 (Brèche dans la Digue de la Roche, Brèche dans la Digue des Marais-Neufs, Echéance circa 2030).....	84
4.3.8. Scénario C_2050 (Brèche dans la Digue de la Roche, Brèche dans la Digue des Marais-Neufs, Echéance circa 2050).....	85
4.3.9. Scénario C_2100 (Brèche dans la Digue de la Roche, Brèche dans la Digue des Marais-Neufs, Echéance post 2050).....	86
5. Scénarios d'aménagement.....	88
5.1. SCENARIOS D'AMENAGEMENT ENVISAGES	88
5.1.1. Scénario d'aménagement CA1	88
5.1.2. Scénario d'aménagement CA2	89
5.1.3. Scénario d'aménagement CA3.....	89
5.1.4. Scénario d'aménagement CA4	90
5.1.5. Scénario d'aménagement CA5.....	91
5.2. IMPACTS DE CES AMENAGEMENTS SUR LA SUBMERSION	92
6. Conclusion	95
7. Bibliographie.....	97

Liste des illustrations

Illustration 1 – Principales actions du projet adapto et localisation des 10 sites du projet (d'après https://www.lifeadapt.eu/); le site de la Baie de Lancieux, objet du présent rapport, est représenté en rouge sur la carte.....	13
Illustration 2 – Situation de la Baie de Lancieux (22) ; les zones en bleu-foncé représentent les propriétés du Conservatoire du littoral, les zones en bleu-clair son périmètre d'intervention autorisé (d'après www.geoportail.gouv.fr).....	14
Illustration 3 – Carte des ingénieurs géographes de 1776, avant la construction des digues du polder de Ploubalay (d'après les données collectées par le Conservatoire du littoral).	15
Illustration 4 – Extrait du Journal « Le Publicateur des Côtes du Nord » du 13 Mars 1869 relatant des dommages aux digues et aux cultures à Lancieux.....	16
Illustration 5 – Localisation des principaux enjeux dans le polder de Lancieux, avec les propriétés et périmètre d'intervention du Conservatoire du littoral et les zones submersibles identifiées par la DDTM22.....	17
Illustration 6 – Localisation de la digue de la Roche et propriétaires des différents tronçons.	18
Illustration 7 – Aperçu de la Baie de Lancieux et des polders de Lancieux et Ploubalay sur la carte d'Etat-Major (entre 1820 et 1866) et la carte topographique actuelle (d'après www.geoportail.gouv.fr); le trait bleu représente le trait de côte actuel Histolitt (@Shom) ; à droite, les zones vertes et rouges représentent respectivement les secteurs empierrés et érodés, la cible noire représente l'emplacement de la brèche apparue en Mars 2020.	19
Illustration 8 – Extrait du Journal « Le Publicateur des Côtes du Nord » du 13 Mars 1869 relatant des dommages aux digues et aux cultures à Ploubalay.	19
Illustration 9 – Aperçu des dommages au polder de Ploubalay en Février 1990 : Vue d'une brèche (à gauche, d'après Acquaviva et al., 2016) et de la submersion occasionnée (à droite) (d'après Bonnot-Courtois et al., 2008).....	20
Illustration 10 – Brèche formée dans la digue de Ploubalay en 2006 (à gauche) et submersion associée (à droite) (clichés du Conservatoire du littoral et de la CCCE).....	20
Illustration 11 - Aperçu des dommages au polder de Ploubalay le 10 Mars 2008 : Vue de la principale brèche (à gauche) et de l'état intérieur de la digue (à droite) (Conservatoire du littoral, 2008).	21
Illustration 12 – Aperçu des dommages sur la face externe de la digue après l'hiver 2009-2010 (Conservatoire du littoral, 2011).	21
Illustration 13 - Aperçu des dommages sur la digue après l'hiver 2013-2014 : Face externe rongée par la mer (à gauche) et apparition d'une petite brèche (à droite) (Conservatoire du littoral, 2014).	22
Illustration 14 – Vue de la brèche actuelle depuis l'estran à son apparition le 12 Mars 2020 (à gauche, Conservatoire du littoral) et durant son agrandissement le 12 Janvier 2021 (à droite, BRGM).	22
Illustration 15 – Vue de la brèche depuis la digue côté Sud le 04 Juin 2020 (Conservatoire du littoral). ...	23
Illustration 16 - Vue de la brèche depuis la digue côté Sud le 20 Octobre 2020 (3 heures après la pleine mer, coefficient 112) avec l'eau sortant du polder à marée descendante (Conservatoire du littoral).	23
Illustration 17 - Vue de la brèche depuis la digue côté Sud le 08 Mars 2021, avec la végétation du polder brulée par l'eau de mer (Conservatoire du littoral).	23
Illustration 18 – Vue de la brèche depuis la digue côté Sud le 30 Août 2022 avec le chenal qui s'est creusé en une marée en avril 2021 (Conservatoire du littoral).	23

Illustration 19 – Vue aérienne en orthomosaique du polder de Ploubalay le 06/11/2021, montrant la brèche, le chenal et les zones submergées (conception Conservatoire du littoral d’après des images acquises par Cartodrone pour le compte de la DDTM des Côtes d’Armor)..	24
Illustration 20 - Localisation des principaux enjeux dans le polder de Ploubalay, avec les propriétés et périmètre d’intervention du Conservatoire du littoral et les zones submersibles identifiées par la DDTM22.....	25
Illustration 21 – Aperçu de la partie encore empierrée (à gauche) et de la partie érodée (à droite) de la digue des Marais-Neufs le 07 Juin 2020 (BRGM).	26
Illustration 22 - Schéma des différentes contributions au niveau du plan d’eau lors d’une tempête (surcotes) jusqu’au rivage.....	28
Illustration 23 - Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer / dégradation des ouvrages / débordement, ©BRGM).	29
Illustration 24 – Aperçu de la topographie de la Baie de Lancieux (D’après les données du RGE Alti de l’IGN).	32
Illustration 25 – Aperçu des levés topographiques réalisés sur le secteur par le Conservatoire du littoral	33
Illustration 26 – Occupation du sol sur le secteur de la Baie de Lancieux d’après les données LittoMOS.	34
Illustration 27 – Aperçu de la cartographie des habitats naturels sur les propriétés du Conservatoire du littoral (d’après les données du Conservatoire du littoral).	35
Illustration 28 - Caractéristiques des marées : en haut, marnage maximum pour un coefficient 120 et courants de marée au maximum du flot pour un coefficient 95 ; en bas, vitesses maximales des courants de marée pour un coefficient 95 et courants de marée au maximum du jusant pour un coefficient 95 (Source : data.shom.fr).	36
Illustration 29 – Localisation des mesures disponibles autour du site de la Baie de Lancieux (marégraphes en bleu, houlographes en orange, point d’analyse statistique des vagues issu de l’atlas numérique d’états de mer BoBWA en vert).	38
Illustration 30 – Rattachement des ports du golfe normano-breton, dont le port de référence est celui de Saint-Malo, et références altimétriques maritimes sur la Côte d’Emeraude (Source : Shom, 2019).....	39
Illustration 32 - Période de retour des hauteurs/niveaux marins extrêmes de pleine mer (à gauche) et des surcotes (à droite) à Saint-Malo (extrait de SHOM-CEREMA, 2012).	40
Illustration 33 – Statistiques des niveaux extrêmes de pleines mers (en m NGF) à Saint-Malo (d’après Bulteau et al., 2015).	41
Illustration 34 - Niveaux centennaux de pleine mer dans le golfe normano-breton (d’après SHOM-CEREMA, 2012).....	41
Illustration 35 – Hauteurs significatives des vagues au large pour des périodes de retour de 10 ans (à gauche) et 100 ans (à droite) estimées à partir de la base BoBWA (Charles et al., 2012) sur la période 1958-2001 à pas de temps 6 heures (Bulteau et al., 2013).	42
Illustration 36 – Analyse statistique des vagues au point BoBWA Bretagne_2 (Bulteau et al., 2013).....	44
Illustration 37 - Rose des houles mesurées à la bouée 02202 – Minquiers 2 -, sur la période 1997– 2009 (http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr).	45
Illustration 38 - Histogramme représentant la fréquence des hauteurs significatives des houles mesurées à la bouée 02202 – Minquiers 2, sur la période 1997 – 2009, en considérant toute la période à gauche, puis la période hivernale au centre et la période estivale à droite (http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr).	45

Illustration 39 – Prédiction des niveaux de pleine-mer aux Hébihens en fonction des coefficients de marée sur la période 2006-2015 (à gauche) et sélection de niveaux de pleine-mer et de basse-mer et de marnages représentatifs par décile de coefficients de marée (à droite).	47
Illustration 40 – Exemple de simulation de la propagation des vagues depuis le large jusqu'à l'intérieur de la Baie de Lancier : Aperçu des hauteurs significatives des vagues	48
Illustration 41 - Exemple de simulation de la propagation des vagues depuis le large jusqu'à l'intérieur de la Baie de Lancier : Aperçu du wave setup (surcote générée par le déferlement des vagues)	49
Illustration 42 – Aperçu des niveaux marins prévus aux Hébihens pour l'année 2015.....	50
Illustration 43 – Durées de submersion potentielle par la marée en Baie de Lancier selon l'altitude.	51
Illustration 44 – Cartographie des durées potentielles de submersion estimées selon les niveaux de pleines-mers par coefficients de marée.....	53
Illustration 45 – Exemple de calendrier de surveillance pour la submersion de la route RD768 sur la base de l'annuaire des marées du Shom pour l'année 2021.....	54
Illustration 46 – Exemple de calcul de niveaux de surveillance pour la submersion de la route RD768 pour les marées de coefficient supérieur à 105 pour l'année 2021 (colonnes de gauche) en fonction des surcotes qui pourraient engendrer une submersion de la route (colonnes du milieu) ; les niveaux de surveillance (colonnes de droite) sont établis pour différentes élévations du niveau de la mer afin de visualiser l'augmentation de fréquence des alertes avec le changement climatique.	55
Illustration 47 – Position du trait de côte au niveau du cordon dunaire de la Roche Morin en 1952 (en bleu) et en 2008 (en rouge), sur fond de photographie aérienne orthorectifiée de 1952 en haut, et d'orthophotographies de 2012 au milieu et de 2018 en bas (d'après les données de Schroëtter et Blaise, 2015).	57
Illustration 48 - Représentation du calcul du volume du stock maximal mobilisable par un événement caractérisé par un niveau d'eau centennal, valeur limite avant disparition de la dune (Source : FEMA, 1995).	58
Illustration 49 – Position des 6 profils analysés sur le cordon dunaire de la Roche Morin.	58
Illustration 50 – Vue des 6 profils topographiques analysés sur le cordon dunaire de la Roche Morin (d'après les données du RGE Alti du début des années 2010) et estimation des stocks sédimentaires totaux.....	59
Illustration 51 - 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).....	61
Illustration 52 --- Emprise utilisée pour les simulations numériques de submersion (cadre rouge).....	63
Illustration 53 --- Réalisation du MNT topo-bathymétrique par assemblage du MNT du RGE Alti (en vert) et du MNT bathymétrique de façade (en bleu).	64
Illustration 54 – Identification des éléments structurants susceptibles d'avoir été « gommés » lors de l'élaboration du MNT topo-bathymétrique	65
Illustration 55 – Aperçu des corrections apportées aux éléments structurants à travers l'exemple d'un profil sur la digue de la Roche.	66
Illustration 56 – Construction du MNT : A gauche : RGE Alti à 1 m ; Au centre : après ré-échantillonnage à 5 m ; A droite : Après correction des éléments structuraux.....	67
Illustration 57 – Carte des coefficients de Manning (frottements au sol) établie sur la base des données d'occupation des sols.	68
Illustration 58 – Positions et caractéristiques des connexions hydrauliques intégrées dans les simulations.	69

Illustration 59 – Grande marée du 10 au 13 Mars 2020 (coefficients 111 à 117) : prédiction de marée (en bleu), scénario centennal (en rouge) et surcote correspondante (en vert).	71
Illustration 60 – Signal de forçage de la marée utilisé pour les différentes échéances considérées.	71
Illustration 61 – Aperçu des brèches envisagées dans les digues de la Roche et des Marais-Neufs et de leurs localisations.....	72
Illustration 62 – Liste des scénarios retenus pour les simulations de submersion.	73
Illustration 63 – Matrice de définition des niveaux d'aléa en fonction des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulements instantanées.	73
Illustration 64 – Carte d'aléa pour le scénario centennal A_2020 (Digues de la Roche et des Marais-Neufs intactes, échéance actuelle).	75
Illustration 65 – Carte d'aléa pour le scénario centennal B_2020 (Digue de la Roche intacte, brèche dans la digue des Marais-Neufs, échéance actuelle).....	76
Illustration 66 – Evolution des niveaux d'eau dans la partie principale du polder de Ploubalay (en blanc) et dans le compartiment Sud du polder (en rouge) pendant la simulation du scénario B_2020, avec estimation des vitesses de vidange associées.	77
Illustration 67 – Estimation des durées de ressuyage dans le compartiment Sud du polder de Ploubalay en partant d'un remplissage au niveau marin centennal.	78
Illustration 68 – Carte d'aléa pour le scénario centennal B_2030 (Digue de la Roche intacte, brèche dans la digue des Marais-Neufs, échéance circa 2030).....	79
Illustration 69 – Carte d'aléa pour le scénario centennal B_2050 (Digue de la Roche intacte, brèche dans la digue des Marais-Neufs, échéance circa 2050).....	80
Illustration 70 – Carte d'aléa pour le scénario centennal B_2100 (Digue de la Roche intacte, brèche dans la digue des Marais-Neufs, échéance post 2050).	82
Illustration 71 – Carte d'aléa pour le scénario centennal C_2020 (Brèches dans les digue de la Roche et des Marais-Neufs, échéance actuelle).	83
Illustration 72 – Carte d'aléa pour le scénario centennal C_2030 (brèche dans la digue de la Roche intacte, brèche dans la digue des Marais-Neufs, échéance circa 2030).	85
Illustration 73 – Carte d'aléa pour le scénario centennal C_2050 (brèche dans la digue de la Roche intacte, brèche dans la digue des Marais-Neufs, échéance circa 2050).	86
Illustration 74 – Carte d'aléa pour le scénario centennal C_2100 (brèche dans la digue de la Roche intacte, brèche dans la digue des Marais-Neufs, échéance post 2050).	87
Illustration 75 – Scénario d'aménagement CA1 : Comblement des 2 brèches dans la digue des Moines à Lancieux (en bleu).	88
Illustration 76 – Scénario d'aménagement CA2 : Construction d'une digue rétro-littorale protégeant l'extrémité Nord du polder de Lancieux (en rouge).....	89
Illustration 77 – Scénario d'aménagement CA3 : Construction d'une digue rétro-littorale suivant la rue des Bénédictins à Lancieux (en orange).	90
Illustration 78 – Scénario d'aménagement CA4 : Construction d'une digue rétro-littorale suivant la digue des Moines à Lancieux (en vert).	91
Illustration 79 – Scénario d'aménagement CA5 : Construction de 3 digues rétro-littorales au plus près des enjeux à Lancieux (en violet).	92

Liste des annexes

Annexe 1 - Résultats obtenus pour le scénario A_2020	101
Annexe 2 - Résultats obtenus pour le scénario B_2020	105
Annexe 3 - Résultats obtenus pour le scénario B_2030	109
Annexe 4 - Résultats obtenus pour le scénario B_2050	113
Annexe 5 - Résultats obtenus pour le scénario B_2100	117
Annexe 6 - Résultats obtenus pour le scénario C_2020	121
Annexe 7 - Résultats obtenus pour le scénario C_2030	125
Annexe 8 - Résultats obtenus pour le scénario C_2050	129
Annexe 9 - Résultats obtenus pour le scénario C_2100	133
Annexe 10 - Résultats obtenus pour le scénario CA1_2020	137
Annexe 11 - Résultats obtenus pour le scénario CA1_2030	141
Annexe 12 - Résultats obtenus pour le scénario CA1_2050	145
Annexe 13 - Résultats obtenus pour le scénario CA1_2100	149
Annexe 14 - Résultats obtenus pour le scénario CA2_2020	153
Annexe 15 - Résultats obtenus pour le scénario CA2_2030	157
Annexe 16 - Résultats obtenus pour le scénario CA2_2050	161
Annexe 17 - Résultats obtenus pour le scénario CA2_2100	165
Annexe 18 - Résultats obtenus pour le scénario CA3_2020	169
Annexe 19 - Résultats obtenus pour le scénario CA3_2030	173
Annexe 20 - Résultats obtenus pour le scénario CA3_2050	177
Annexe 21 - Résultats obtenus pour le scénario CA3_2100	181
Annexe 22 - Résultats obtenus pour le scénario CA4_2020	185
Annexe 23 - Résultats obtenus pour le scénario CA4_2030	189
Annexe 24 - Résultats obtenus pour le scénario CA4_2050	193
Annexe 25 - Résultats obtenus pour le scénario CA4_2100	197
Annexe 26 - Résultats obtenus pour le scénario CA5_2020	201
Annexe 27 - Résultats obtenus pour le scénario CA5_2030	205
Annexe 28 - Résultats obtenus pour le scénario CA5_2050	209
Annexe 29 - Résultats obtenus pour le scénario CA5_2100	213

1. Description du site et objectifs de l'étude

1.1. CONTEXTE ET DESCRIPTION DU SITE

1.1.1. Le projet adapto

Dans un contexte de changement climatique, les zones côtières basses sont potentiellement plus vulnérables à l'élévation du niveau de la mer ou aux événements climatiques extrêmes qui engendrent la submersion marine. Le projet Life adapto, initié par le Conservatoire du littoral en partenariat avec le BRGM, a pour objectif d'explorer des solutions possibles sur le littoral pour faire face aux effets du changement climatique, en intégrant les écosystèmes dans une gestion souple du trait de côte. L'objectif est de mettre en œuvre une approche pluridisciplinaire, afin de pouvoir envisager et comparer 3 modes de gestion face aux conséquences attendues de l'élévation du niveau de la mer sous l'effet du changement climatique : « Résister », « S'adapter », « Laissez-faire ». Ainsi, 10 sites pilotes aux problématiques côtières variées sont étudiés en France métropolitaine, Corse, et Guyane (Illustration 1).



Illustration 1 – Principales actions du projet adapto et localisation des 10 sites du projet (d'après <https://www.lifeadaptto.eu/>); le site de la Baie de Lancieux, objet du présent rapport, est représenté en rouge sur la carte.

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 essentiellement d'obtenir un retour d'expériences sur ces dépoldérisations. Pour d'autres sites en devenir, un accompagnement pluridisciplinaire est proposé de manière à faire émerger une stratégie prenant en compte les différents enjeux. C'est le cas du site de la Baie de Lancieux, objet du présent rapport et présenté au paragraphe suivant.

1.1.2. La Baie de Lancieux

La Baie de Lancieux est localisée au Nord-Est du département des Côtes d’Armor (22), en Bretagne. Elle est bordée par les communes de Lancieux au Nord-Est, Beausais-sur-Mer au Sud et au Sud-Est (commune nouvelle issue de la fusion de Ploubalay, Trégon et Plessix-Balisson), et de Saint-Jacut-de-la-Mer à l’Ouest, et son entrée est partiellement protégée par l’archipel des Hébihens (Illustration 2).

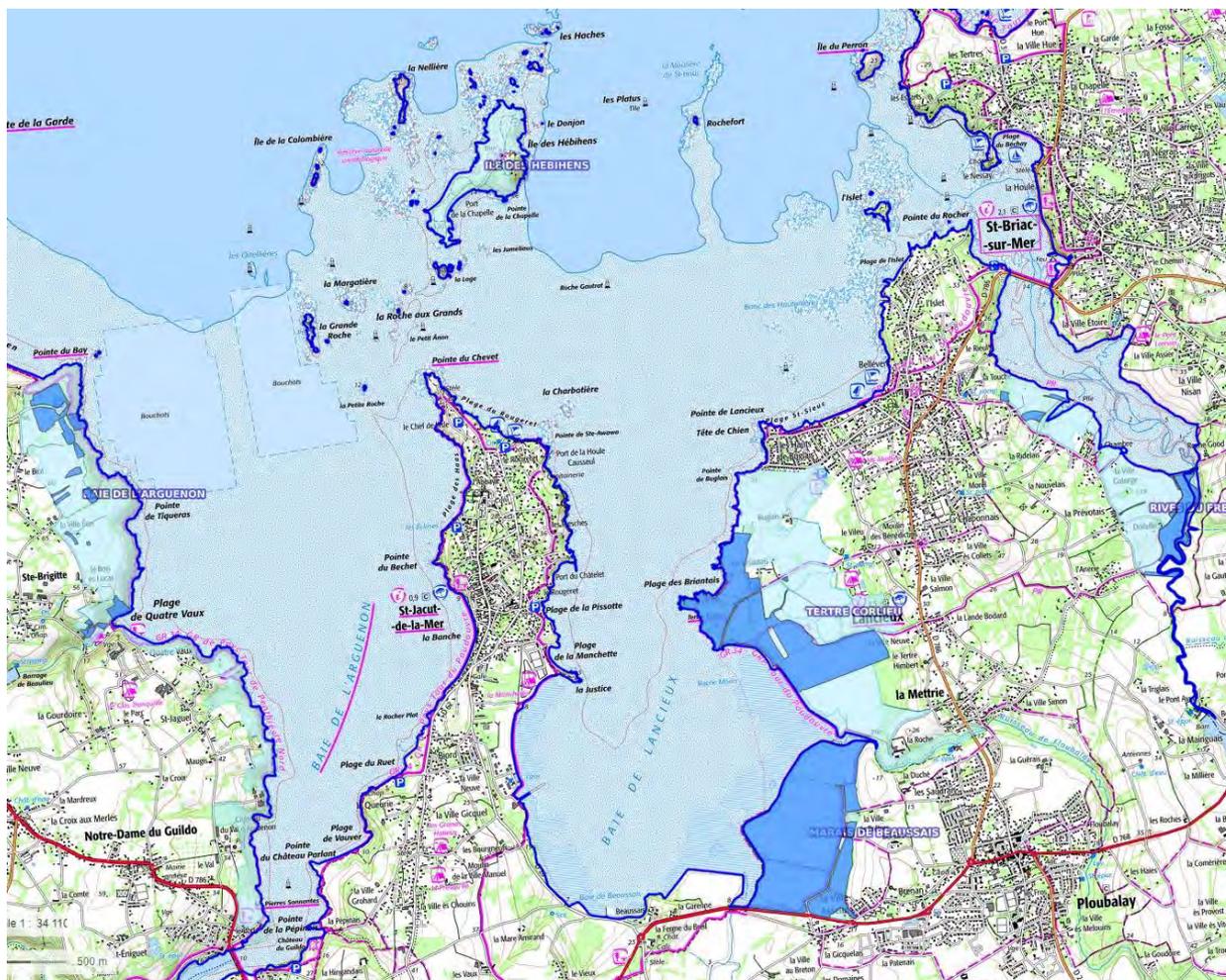


Illustration 2 – Situation de la Baie de Lancieux (22) ; les zones en bleu-foncé représentent les propriétés du Conservatoire du littoral, les zones en bleu-clair son périmètre d’intervention autorisé (d’après www.geoportail.gouv.fr).

Très plate et peu profonde, la Baie de Lancieux est exposée à des marées macrotidales (parfois même qualifiées de mégatidales) de par sa proximité avec la Baie du Mont-Saint-Michel. Les marnages extrêmes peuvent y dépasser les 13 m, ce qui conduit à un remplissage de la Baie qui reste souvent partiel et temporaire, uniquement aux alentours des pleines-mers, et même des pleines-mers de vives-eaux pour un remplissage complet (cf. paragraphe 3.3).

Cette configuration a permis, dans la moitié Sud de la Baie, le développement d’un marais maritime, caractérisé par une végétation halophile constituant des prés salés (ou « schorre ») surmontant des vasières (« slikke »).

La zone d'étude correspond essentiellement aux secteurs environnant les propriétés du Conservatoire du littoral (en bleu à l'illustration 2), et notamment les polders de Lancieux au Nord et de Ploubalay au Sud, séparés par un ruisseau (le Floubalay). L'ensemble des zones étudiées se situent donc sur les communes de Lancieux et de Beaussais-sur-Mer, toutes deux membres de la Communauté de Communes de la Côte d'Emeraude (CCCE). Toutefois, à la date de publication du présent rapport, des discussions sont en cours pour que Beaussais-sur-Mer rejoigne prochainement Dinan Agglomération.

1.1.3. Le polder de Lancieux

Bref historique

Le polder de Lancieux a été construit en plusieurs phases (Illustration 3).

D'après les travaux des étudiants de l'Ecole Nationale Supérieure des Paysages de Versailles (Acquaviva et al., 2016), les moines de l'abbaye de Saint-Jacut exploitaient au moyen-âge les terrains situés de l'autre côté de la baie, à Lancieux. C'est donc à partir du XIV^{ème} siècle qu'ils contribuèrent à la première poldérisation du site, par la construction de la « Digue des Moines ». Cette digue en pierre existe toujours, partiellement couverte de végétation, mais elle n'est aujourd'hui plus en contact direct avec la mer. Elle a de plus été volontairement percée de 2 brèches : l'une en 1929, afin de faciliter l'évacuation de l'eau pluviale accumulée en arrière de la digue, tandis que la seconde aurait pu être creusée en 1974 également en lien avec une inondation pluviale (<https://patrimoine.region-bretagne.fr/gertrude-diffusion/dossier/la-digue-des-moines-lancieux/7eabe938-806d-4a37-ad5e-481cd38429a5>).

La digue de la Roche fut quant à elle construite et achevée en 1749, ajoutant une surface de 48 hectares au polder. Elle comporte un certain nombre d'ouvrages hydrauliques destinés à faciliter les écoulements, dont certains ne sont plus fonctionnels depuis très longtemps.

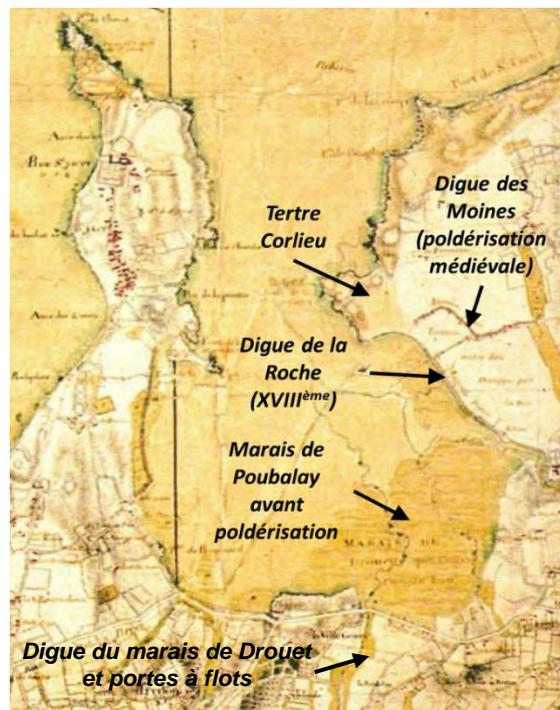
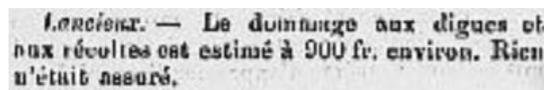


Illustration 3 – Carte des ingénieurs géographes de 1776, avant la construction des digues du polder de Ploubalay (d'après les données collectées par le Conservatoire du littoral).

Aujourd'hui, c'est la digue de la Roche qui protège le polder de Lancieux de la submersion marine. Déconnectés de l'apport sédimentaire marin, les terrains situés en arrière immédiat de la digue sont légèrement plus bas, de quelques décimètres, que l'estran devant la digue.

Historiquement, peu de dommages de submersion ont pu être recensés sur le polder de Lancieux à partir des données disponibles. Outre les problèmes pluviaux déjà évoqués, qui ont justifié la création de brèches dans la Digue des Moines, le seul événement recensé dans la base de données des impacts de tempêtes du BRGM en Bretagne (Le Roy et al., 2020 ; Schroëtter et Blaise, 2016) correspond à la **tempête du 28 Février au 03 Mars 1869**, qui outre des dommages importants à Ploubalay et sur toute la Côte d'Emeraude aurait causé pour 900 francs de dommages aux digues et aux récoltes de Lancieux, ce qui laisse entendre qu'une brèche aurait pu se former dans la digue de la Roche occasionnant une submersion des terres agricoles en arrière (Illustration 4).



Lancieux. — Le dommage aux digues et aux récoltes est estimé à 900 fr. environ. Rien n'était assuré.

Illustration 4 – Extrait du Journal « Le Publicateur des Côtes du Nord » du 13 Mars 1869 relatant des dommages aux digues et aux cultures à Lancieux.

Enjeux

D'après la cartographie des zones submersibles de la Direction des Territoires et de la Mer des Côtes d'Armor, les enjeux protégés par cette digue, bien que limités, sont significatifs. On peut noter notamment, du Sud vers le Nord (Illustration 5) :

- Au Sud de la Digue des Moines :
 - o Des espaces naturels appartenant au Conservatoire du littoral, entretenus en partie par un pâturage extensif et fauche
 - o Une peupleraie et certains champs cultivés, près de la saline, n'appartenant pas au Conservatoire du littoral ;
 - o Un terrain n'appartenant pas au Conservatoire du littoral, et utilisé pour la pratique de l'aéromodélisme ;
 - o La Digue des Moines elle-même, dont l'intérêt patrimonial est indéniable, acquise en 2019 par le Conservatoire du littoral.
- Au Nord de la Digue des Moines, on peut recenser dans la zone basse protégée par les digues :
 - o Des espaces naturels appartenant au Conservatoire du littoral, entretenus en partie par un pâturage extensif et fauche
 - o Des cultures et prairies privées
 - o Le camping du Villeu et le centre équestre accolé ;
 - o La rue des Bénédictins, permettant l'accès routier au Tertre Corlieu ;
 - o Les quelques maisons situées près de la rue des Bénédictins, du Tertre Corlieu et de la rue Jules Jeunet (dont 2 pavillons témoins d'un projet immobilier de village-vacances sur 9 ha, acquis en 2019 par le Conservatoire du littoral et renaturés en 2021) ;
 - o Le Golf de Lancieux Gaea ;
 - o Le lotissement situé entre le golf et le camping municipal les Mielles ;
 - o Une partie du camping municipal les Mielles.

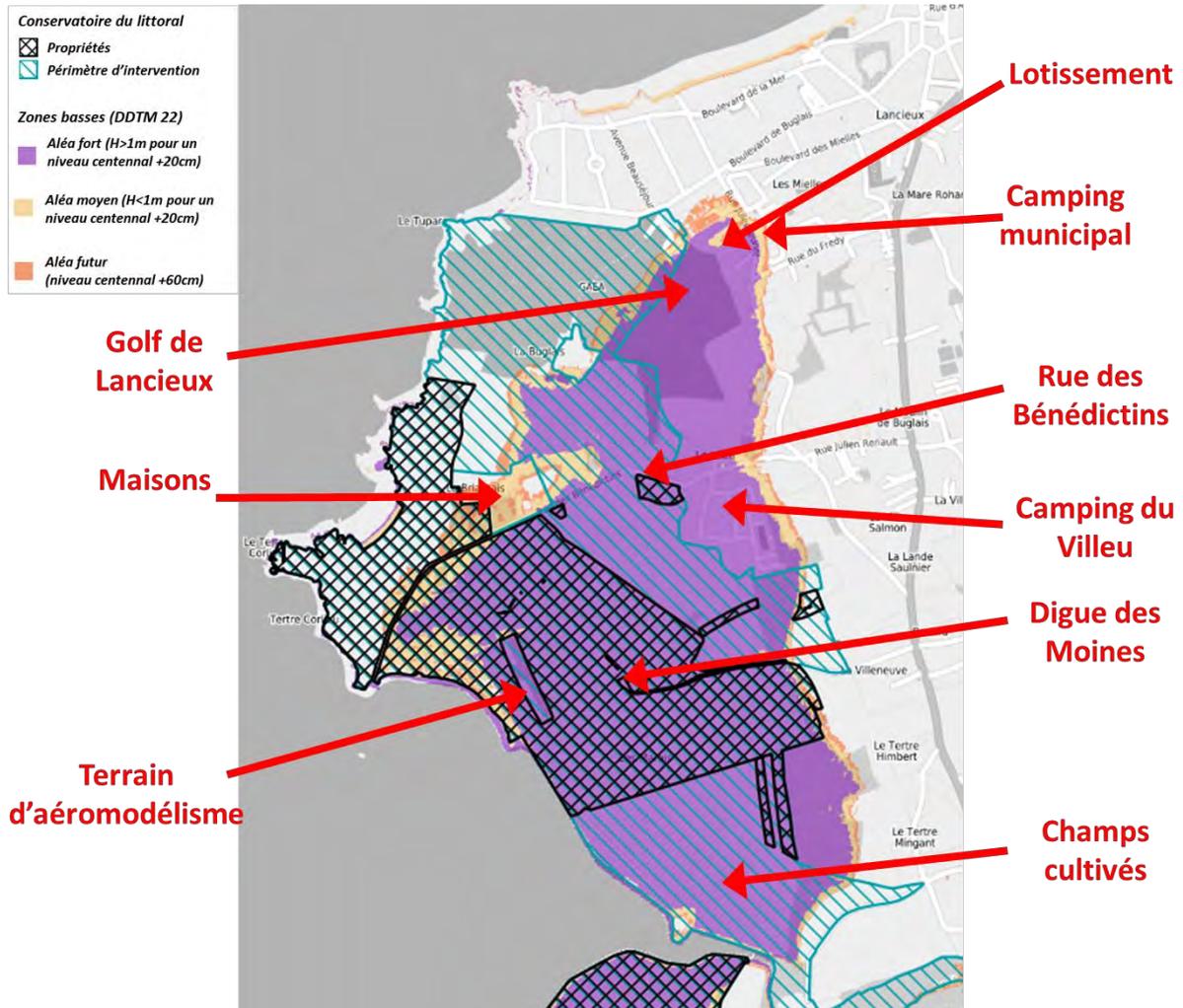


Illustration 5 – Localisation des principaux enjeux dans le polder de Lancieux, avec les propriétés et périmètre d'intervention du Conservatoire du littoral et les zones submersibles identifiées par la DDTM22.

Etat et statut actuel

La digue de la Roche est un ouvrage en terre de typiquement 2 m de haut, en relativement bon état, mais fragile du fait de ses dimensions et de sa nature. Pendant les pleines-mers de grandes marées, le niveau marin vient quasiment lécher le haut de la digue.

Cette digue est classée C¹, et environ un tiers de cette digue appartient au Conservatoire du littoral (Illustration 6), qui y fait régulièrement des études et des travaux d'entretien pour réparer des dommages (érosion, renards hydrauliques...), conformément à la réglementation en vigueur.

¹ Les systèmes d'endiguement, sont classés en fonction de la population qu'ils protègent.

Un système est classé C lorsqu'il protège moins de 3 000 personnes et que le système d'endiguement comporte essentiellement une ou plusieurs digues établies antérieurement à la date de publication du décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques.

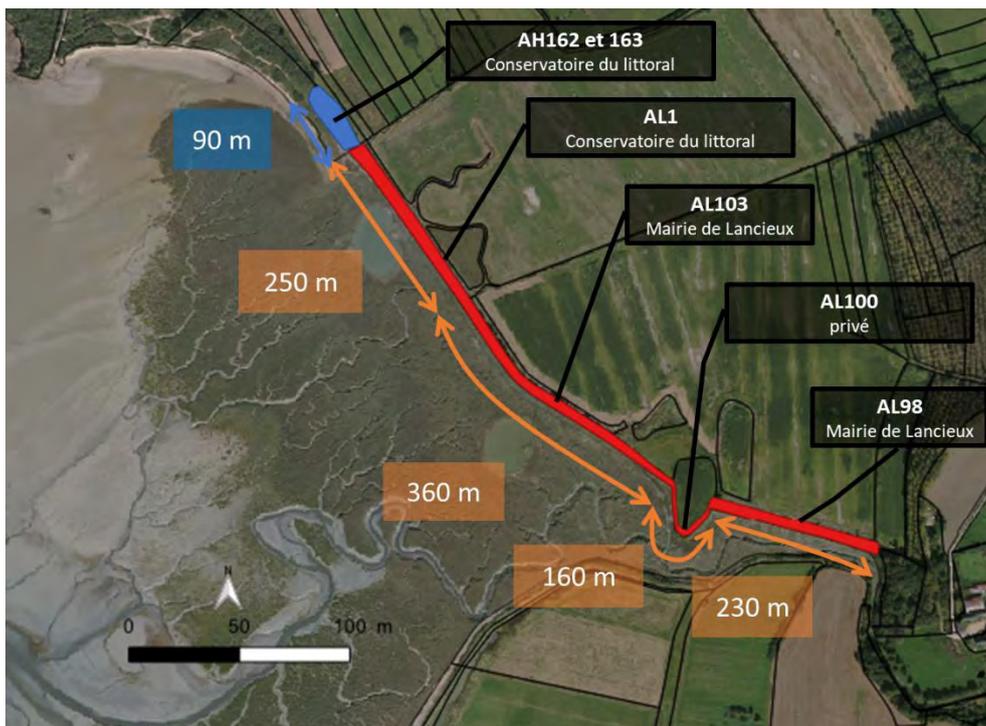


Illustration 6 – Localisation de la digue de la Roche et propriétaires des différents tronçons.

1.1.4. Le polder de Ploubalay

Bref historique

Le pont-vannes sous l'actuelle route départementale 768 a été construit vers 1760 pour éviter le passage à gué de la rivière du Drouet et assécher le marais de Drouet. Le polder de Ploubalay a été créée plus récemment que celui de Lancieux, puisque la digue de Ploubalay (parfois appelée Digue des Marais-Neufs), qui isole le Marais de la Duché (toponymie du site avant la création de la digue), a été construite au début du XIX^{ème} siècle afin de gagner des terres cultivables sur les prés-salés (il est déjà visible sur le cadastre napoléonien de 1827).



Illustration 7 – Aperçu de la Baie de Lancieux et des polders de Lancieux et Ploubalay sur la carte d'Etat-Major (entre 1820 et 1866) et la carte topographique actuelle (d'après www.geoportail.gouv.fr); le trait bleu représente le trait de côte actuel Histolitt (©Shom); à droite, les zones vertes et rouges représentent respectivement les secteurs empierrés et érodés, la cible noire représente l'emplacement de la brèche apparue en Mars 2020.

Pendant deux siècles, la digue des Marais-Neufs a protégé le polder de Ploubalay de la submersion marine. Les terrains situés en arrière immédiat de la digue sont significativement plus bas, globalement de quelques décimètres à plus de 50 cm, que l'estran devant la digue.

Plusieurs dommages sont connus historiquement sur ce polder, relevant de la dégradation de la digue des Marais-Neufs et de la submersion du polder. Parmi les dommages recensés dans la base de données des impacts de tempêtes du BRGM en Bretagne (Le Roy et al., 2020; Schroëtter et Blaise, 2016), on peut retenir :

- La tempête du 28 Février au 03 Mars 1869, qui outre des dommages importants à Lancieux et sur toute la Côte d'Emeraude, a occasionné la rupture de la digue protégeant le Marais de la Duché ; 200 francs de dommages ont été causés aux récoltes inondées, et un bateau a été jeté par-dessus la digue dans les champs (Illustration 8).

Ploubalay. — On évalue les dommages à 200 fr. environ pour les récoltes inondées.
Un petit bateau appartenant à M. Frostin, capitaine au long-cours, était amarré au lieu dit le Rocouin. Les vagues étaient si fortes qu'elles l'ont brisé et jeté par-dessus la digue, dans les champs. La perte est de 150 fr.
M. l'abbé Rouxel, recteur desservant de Oréhen, avait invité les hommes valides de la paroisse à se porter promptement à la digue qui renferme le marais de la Duché, en Ploubalay. Cette digue s'était rompue; on la fit ainsi réparer, avant que le dommage devint plus considérable.

Illustration 8 – Extrait du Journal « Le Publicateur des Côtes du Nord » du 13 Mars 1869 relatant des dommages aux digues et aux cultures à Ploubalay.

- **En 1985**, une submersion du polder de Ploubalay aurait été causée par la grande marée d'après Acquaviva et al. (2016). Les exutoires ne suffisant pas à évacuer l'inondation, une brèche a dû être creusée dans la digue, puis reconstruite.
- En **Février 1990** (Illustration 9), la marée d'équinoxe a entraîné la submersion du polder (Acquaviva et al., 2016) : des brèches se sont creusées sur plusieurs dizaines de mètres, provoquant l'inondation de toute la partie Nord du polder (Bonnot-Courtois, 2000) ; la maison du polder a les pieds dans l'eau. Une brèche a dû être creusée dans la digue pour faciliter le ressuyage avant d'être comblée ; sur 250 m au Nord du bec de la digue, le perré d'origine a été réparé par des rechargements de vase suite aux dégâts.



Illustration 9 – Aperçu des dommages au polder de Ploubalay en Février 1990 : Vue d'une brèche (à gauche, d'après Acquaviva et al., 2016) et de la submersion occasionnée (à droite) (d'après Bonnot-Courtois et al., 2008).

- **En 2006**, une nouvelle brèche se forme dans la digue, occasionnant de nouveau une submersion du polder (Illustration 10).



Illustration 10 – Brèche formée dans la digue de Ploubalay en 2006 (à gauche) et submersion associée (à droite) (clichés du Conservatoire du littoral et de la CCCE).

- Le **10 Mars 2008**, lors de la tempête Johanna, la digue des Marais-Neufs a été assez fortement endommagée (Conservatoire du littoral, 2008) : des petites brèches ou début de brèches se sont formés sous la surverse, et le côté intérieur de la digue est fortement dégradé, avec des petits effondrements dans le canal (Illustration 11) ; divers travaux ont été nécessaires pour combler les brèches, renforcer le côté intérieur des digues, reprofiler

le côté extérieur soumis à l'érosion, réinstaller les ouvrages hydrauliques et nettoyer les fossés de drainage.



Illustration 11 - Aperçu des dommages au polder de Ploubalay le 10 Mars 2008 : Vue de la principale brèche (à gauche) et de l'état intérieur de la digue (à droite) (Conservatoire du littoral, 2008).

- Durant l'hiver **2009-2010**, les fortes marées et l'occurrence de tempêtes (notamment la tempête Xynthia le 28 Février 2010) ont rongé le côté externe de la digue (Illustration 12). La digue a dû être reprise sur 300 mètres linéaires pour éviter une rupture, et l'étanchéité de 2 buses a dû être réparée (Conservatoire du littoral, 2011).



Illustration 12 – Aperçu des dommages sur la face externe de la digue après l'hiver 2009-2010 (Conservatoire du littoral, 2011).

- Durant l'hiver **2013-2014**, la succession des tempêtes a de nouveau rongé la digue sur sa face externe (300 mètres linéaires ont dû être repris) et une brèche de dimensions modérées s'est formée juste au Sud de l'éperon de la digue (Illustration 13) ; du côté intérieur, juste au Nord de l'éperon de la digue, 10 mètres linéaires de talus ont glissé dans le fossé et des débuts de brèches sont apparus en liens avec des terriers d'animaux fouisseurs (Conservatoire du littoral, 2014).



Illustration 13 - Aperçu des dommages sur la digue après l'hiver 2013-2014 : Face externe rongée par la mer (à gauche) et apparition d'une petite brèche (à droite) (Conservatoire du littoral, 2014).

- Enfin, lors de la grande marée du **12 Mars 2020**, une nouvelle brèche est apparue, toujours dans la partie la plus fragilisée de la digue (Illustration 14). Depuis lors (voir paragraphe Etat et statut actuel), à chaque grande marée (coefficients supérieurs à 100-110), la mer peut rentrer dans le polder et agrandit la brèche, dont la largeur est passée de 2-3 m en Juin 2020 à 25-30 m en Décembre 2020 en s'accompagnant d'une érosion régressive de l'estran (Illustrations 15, 16 et 17 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) puis du creusement d'un chenal sur l'estran conduisant lors de la grande marée de fin Avril 2021 à une reconnexion du polder à la mer (illustrations 18 et 19).



Illustration 14 – Vue de la brèche actuelle depuis l'estran à son apparition le 12 Mars 2020 (à gauche, Conservatoire du littoral) et durant son agrandissement le 12 Janvier 2021 (à droite, BRGM).



Illustration 15 – Vue de la brèche depuis la digue côté Sud le 04 Juin 2020 (Conservatoire du littoral).



Illustration 16 - Vue de la brèche depuis la digue côté Sud le 20 Octobre 2020 (3 heures après la pleine mer, coefficient 112) avec l'eau sortant du polder à marée descendante (Conservatoire du littoral).



Illustration 17 - Vue de la brèche depuis la digue côté Sud le 08 Mars 2021, avec la végétation du polder brulée par l'eau de mer (Conservatoire du littoral).



Illustration 18 – Vue de la brèche depuis la digue côté Sud le 30 Août 2022 avec le chenal qui s'est creusé en une marée en avril 2021 (Conservatoire du littoral).



Illustration 19 – Vue aérienne en orthomosaïque du polder de Ploubalay le 06/11/2021, montrant la brèche, le chenal et les zones submergées (conception Conservatoire du littoral d’après des images acquises par Cartodrone pour le compte de la DDTM des Côtes d’Armor).

Enjeux

Là encore, les enjeux dans le polder de Ploubalay restent assez limités (l’essentiel du polder appartenant au Conservatoire du littoral), mais significatifs. On peut noter notamment, du Nord vers le Sud (Illustration 20) :

- Des espaces naturels appartenant au Conservatoire du littoral et entretenus par pâturage extensif et fauche ;
- La route communale reliant la route départementale 768 aux hameaux de la Ville-es-Prêtres et la Duché (cette route communale a depuis été en partie condamnée et interdite à la circulation, et son transfert au Conservatoire du littoral est en cours) ;
- La maison du polder, seule habitation installée sur les terrains gagnés sur la mer (la maison était jusqu'à récemment occupée par un locataire, qui a été récemment évacué ; les démarches pour l'acquisition de la maison par le Conservatoire du littoral sont en cours) ; Depuis 2008, un petit merlon de terre utilisé comme sentier du littoral a été créé à l'Ouest de la maison et de la route communale dans l'objectif de les protéger d'une submersion en cas de rupture de la digue ;
- Une station de relevage, juste au Nord de la route départementale 768 à son intersection avec la route communale ; là aussi, un merlon de terre a été créé pour la protéger des submersions dans l'attente d'un déplacement de cette station ;
- La route départementale 768 elle-même, qui clôture le polder au Sud et qui constitue un axe majeur de circulation pour le secteur ; autrefois installée quelques dizaines de mètres plus au Sud sur une route-digue qui protégeait la vallée du Drouet (elle-même fermée côté mer par des portes à flots), la route départementale 768 n'a pas été conçue pour être exposée à la mer ; Le point bas de la route culmine à une altitude d'environ 7,3 m NGF, à peine supérieure à la hauteur de la mer pendant des pleines mers de coefficients exceptionnels ;
- Enfin, extérieure aux terrains gagnés sur la mer (plus ancienne que la construction du polder), mais située juste en bordure, la maison la plus basse du hameau de la Ville-ès-Prêtres pourrait être inondée lors d'événements extrêmes ou sous l'effet de la remontée du niveau de la mer sous l'effet du changement climatique.

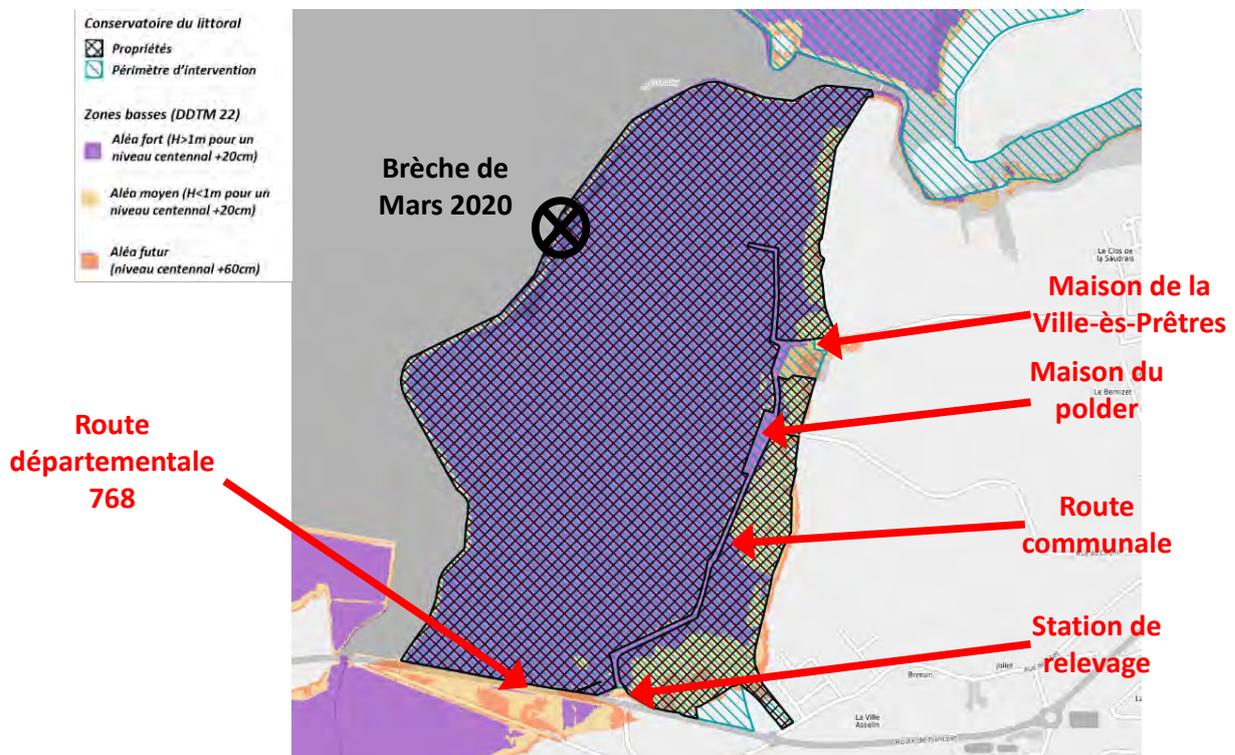


Illustration 20 - Localisation des principaux enjeux dans le polder de Ploubalay, avec les propriétés et périmètre d'intervention du Conservatoire du littoral et les zones submersibles identifiées par la DDTM22.

Etat et statut actuel

En dehors de sa partie maçonnée, la digue des Marais-Neufs est un ouvrage en terre d'une hauteur de 2 à 3 m, pour une largeur d'une dizaine de mètres pouvant se réduire à quelques mètres dans les secteurs en érosion. Elle est donc fragile du fait de ses dimensions et de sa nature. Pendant les pleines-mers de grandes marées, le niveau marin vient lécher le haut de la digue.

Le principal secteur montrant des signes d'érosion s'étend sur 300 m environ, depuis quelques dizaines de mètres plus au Sud que la brèche actuelle vers le Nord (Illustration 21 à droite).

Les dommages historiques d'érosion et de submersion recensés sur le polder de Ploubalay s'expliquent probablement en grande partie par la nature et l'orientation de la digue par rapport à l'entrée de la baie, qui permet aux vagues résiduelles (qui parviennent à pénétrer la baie) de venir impacter une partie de la digue des Marais-Neufs (cf. paragraphe 3.2). Ce sont ces vagues qui, même réduites, provoquent l'érosion chronique observée sur une partie de la digue, et c'est probablement ce même phénomène qui explique qu'une partie de la digue ait été anciennement empierrée pour résister à l'érosion (illustrations 7 et 21).



Illustration 21 – Aperçu de la partie encore empierrée (à gauche) et de la partie érodée (à droite) de la digue des Marais-Neufs le 07 Juin 2020 (BRGM).

Cette digue, propriété du Conservatoire du littoral, n'est pas classée², et le Conservatoire n'est donc pas tenu de l'entretenir par la réglementation en vigueur. C'est pourquoi il a été convenu, en concertation avec la mairie de Beaussais-sur-Mer, de ne pas colmater la brèche survenue en Mars 2020, afin de rendre à la mer les terrains poldérisés au XIX^{ème} siècle. Cette démarche s'inscrit dans le cadre du projet adapto, et s'appuie sur des considérations économiques qui montrent des coûts de mise aux normes et d'entretien de la digue très importants au regard des services qu'elle rend (enjeux humains et naturels).

En 2020-2021, la mer pouvait par conséquent librement rentrer dans le polder par pleines-mers de vives-eaux, et la brèche et une fosse d'érosion s'agrandissaient progressivement (Illustration 14). Une érosion régressive s'est produite entre la digue et le schorre, sous l'effet du passage de la mer dans le polder en périodes de grandes marées. Une fois l'intégralité de la largeur du chemin érodée, un chenal s'est rapidement formé lors de la grande marée de fin Avril 2021 à

² Les systèmes d'endiguement sont classés en fonction de la population (en nombre d'habitants concernés) qu'ils protègent.

travers le marais maritime de l'estran, permettant à la mer de pénétrer beaucoup plus facilement dans le polder à pleine-mer (même en dehors des périodes de vives-eaux), comme présenté aux illustrations 18 et 19.

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, qui s'ajoutent aux effets de marée.

En dehors des tsunamis, les surélévations temporaires du niveau de la mer, dites surcotes marines, sont contrôlées par deux processus principaux (Illustration 22) :

- **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 » (Illustration 22). 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 (Illustration 22).

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).

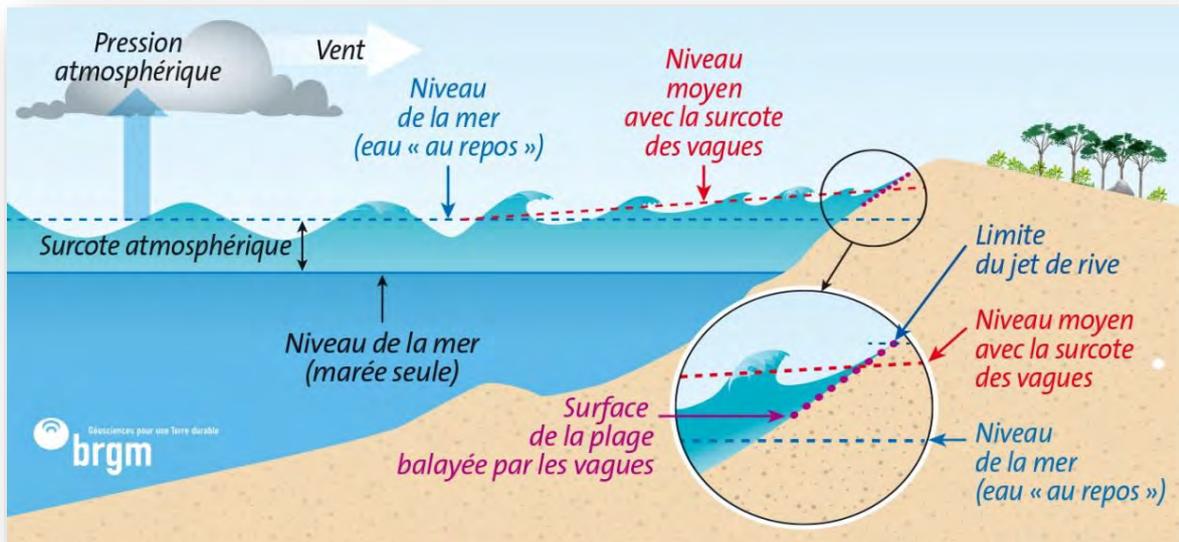


Illustration 22 - Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête (surcotes) jusqu'au rivage.

1.2.2. Types de submersion marine

La submersion peut se manifester sous trois formes différentes (Illustration 23) :

- 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 (Illustration 23), 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 de l'illustration 23). Au-delà d'une certaine intensité, il peut y avoir franchissements par paquets de mer, la submersion associée restant en général limitée (temps 2 de l'illustration 23). 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 de l'illustration 23). 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 de l'illustration 23). 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 de l'illustration 23).

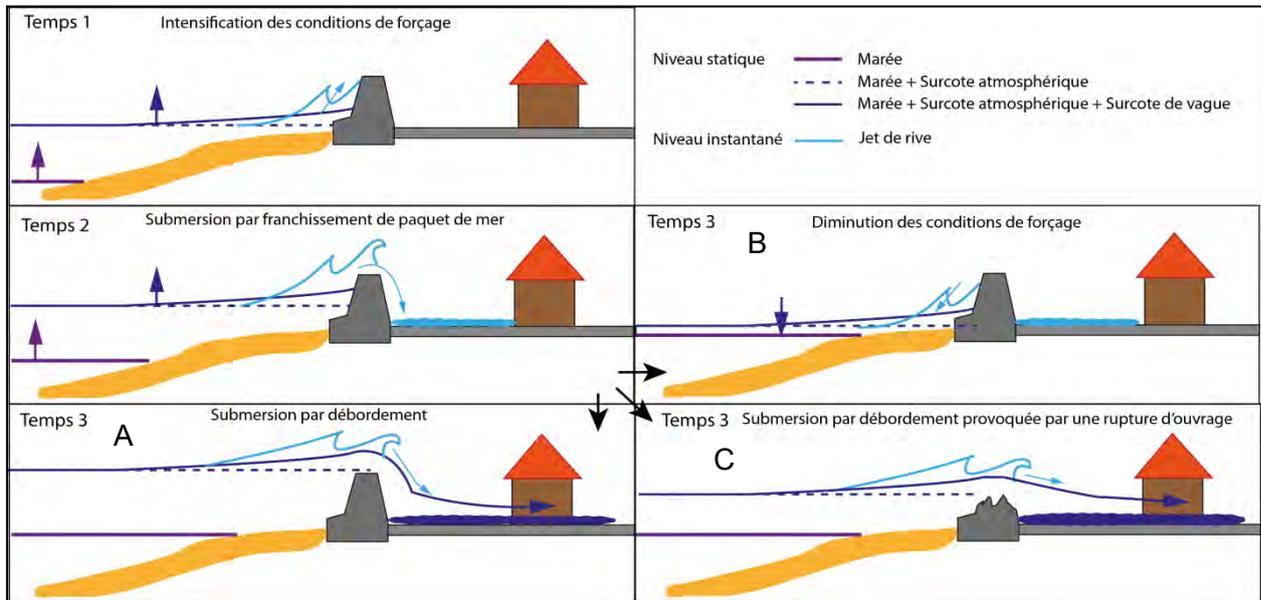


Illustration 23 - Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer / dégradation des ouvrages / débordement, ©BRGM).

1.3. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Dans le cadre du projet adapto et de son application au site de la Baie de Lancieux, l'objectif du BRGM est de mettre à disposition du Conservatoire du littoral son expertise sur le littoral et les risques côtiers afin :

- De mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique de la baie ;
- De fournir des éléments susceptibles d'aider à anticiper l'évolution future de la baie et des polders ;
- De mieux connaître les risques de submersion marine dans les polders de Lancieux et Ploubalay en contexte de changement climatique ;
- De quantifier l'effet de solutions de gestion qui pourraient être mises en œuvre ;
- De s'appuyer en cas de survenue d'événement marquant pendant le projet afin d'optimiser la « gestion de crise ».

2. Données disponibles

2.1. DONNEES TOPOGRAPHIQUES

2.1.1. RGE Alti (©IGN)

Le RGE Alti (©IGN) est établi par l'IGN à partir de levés LiDAR aéroportés, et correspond à un modèle numérique de terrain (MNT) topographique à haute résolution (1 m) et grande précision (erreur verticale de l'ordre de 15 à 20 cm).

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

L'acquisition LiDAR est réalisée à marée basse, de façon à couvrir également au mieux l'estran. Dans certains secteurs, en présence d'eau (plans d'eau, rivières...), la donnée ne contient qu'une valeur uniforme ou une interpolation de valeurs qui n'est pas représentatif du fond (ce cas ne se présente toutefois pas dans la baie de Lancieux, mais on le retrouve par exemple dans la baie voisine de l'Argueson, de l'autre côté de Saint-Jacut-de-la-Mer).

La topographie de la Baie de Lancieux a été levée par l'IGN au début des années 2010 pour le RGE Alti. Un aperçu en est disponible à l'illustration 24.

On perçoit bien sur ces données que l'estran se retrouve plus haut que l'intérieur des polders de quelques décimètres. L'intérieur des 2 polders présente une altitude relativement homogène (à l'exception des réseaux de drainages qui les occupent), avec des altitudes typiquement de l'ordre de 5,2 à 5,7 m NGF selon les secteurs.

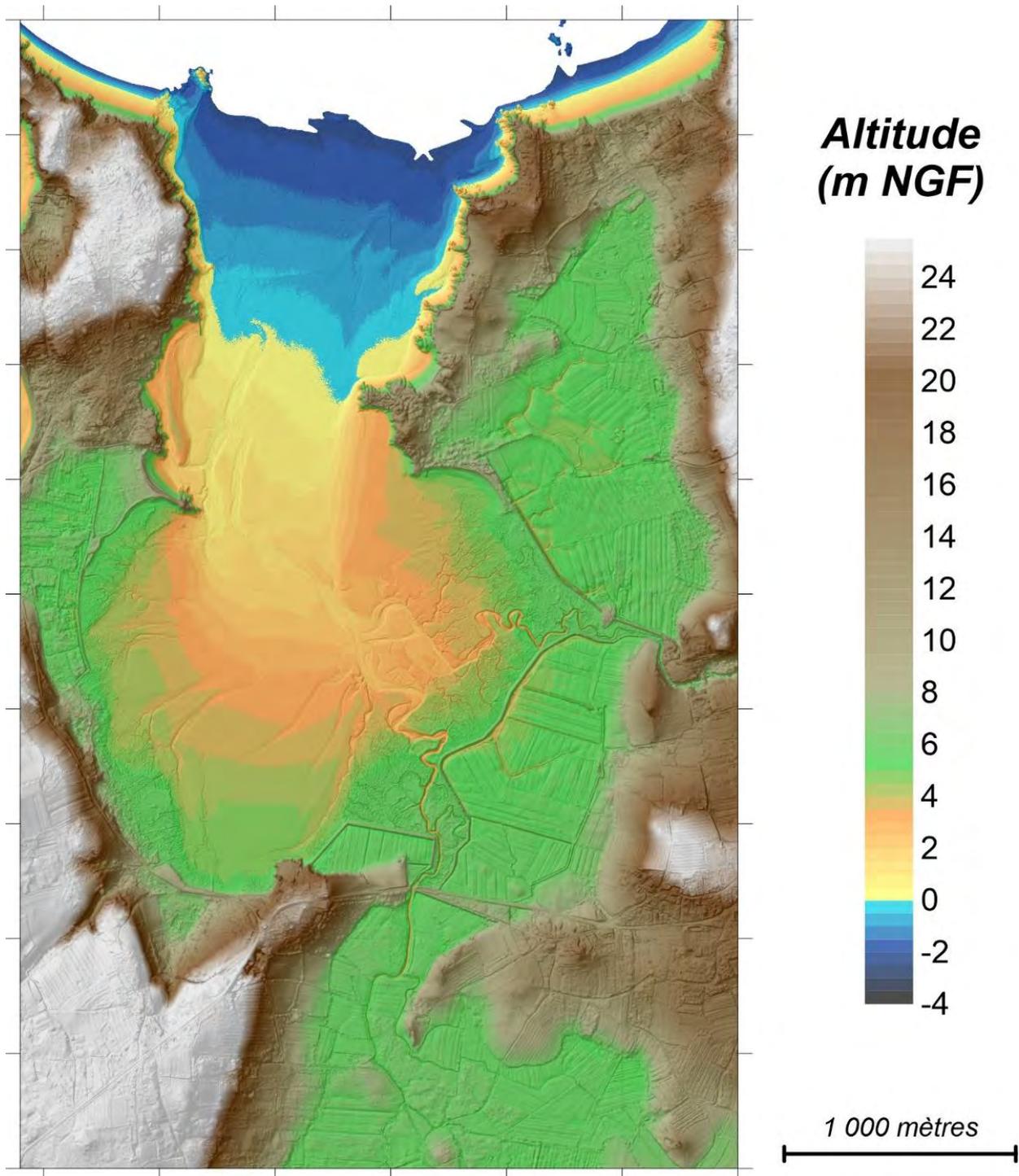


Illustration 24 – Aperçu de la topographie de la Baie de Lancieux (D'après les données du RGE Alti de l'IGN).

2.1.2. Levers topographiques du Conservatoire du littoral

Les digues présentes sur le site d'étude appartenant en grande partie au Conservatoire du littoral et à la commune de Lancieux, qui s'en retrouvent gestionnaire, plusieurs études ont été commanditées par ces derniers afin d'en assurer une gestion adéquate et conforme à la réglementation :

- Sur la digue de la Roche à Lancieux : EDD (Etude De Dangers ; Le Gouriérec, 2015) DIS (Diagnostic Initial de Sécurité) et VTA (Visite Technique Approfondie) en 2015 (Renault, 2015).
- Sur la digue des Marais-Neufs à Ploubalay : Dossier de l'ouvrage (SOCOTEC, 2012).

Pour affiner ces différentes études, le Conservatoire du littoral a fait réaliser divers levés topographiques par des cabinets d'experts géomètres, notamment au niveau des digues :

- Lever topographique de la digue de la Roche à Lancieux en Mars 2015 (pieds et crête de la digue incluant l'ancienne saline) ;
- Lever topographique de la digue des Moines dans le polder de Lancieux, en Octobre 2016 ;
- Lever topographique de la rue des Bénédictins et de ses abords, dans le polder de Lancieux, en Novembre 2016 ;
- Lever topographique de la digue des Marais-Neufs à Ploubalay, en Octobre 2016.

Ces données ont notamment permis d'identifier des défauts de représentation des digues dans les données du RGE Alti, notamment au niveau de la digue de la Roche qui est représentée comme trop élevée par le RGE Alti (probable défaut dans l'effacement de la végétation).

Un aperçu des points levés par les géomètres est représenté à l'illustration 25 (pour plus de détails, il convient de se référer directement aux données du Conservatoire du littoral).

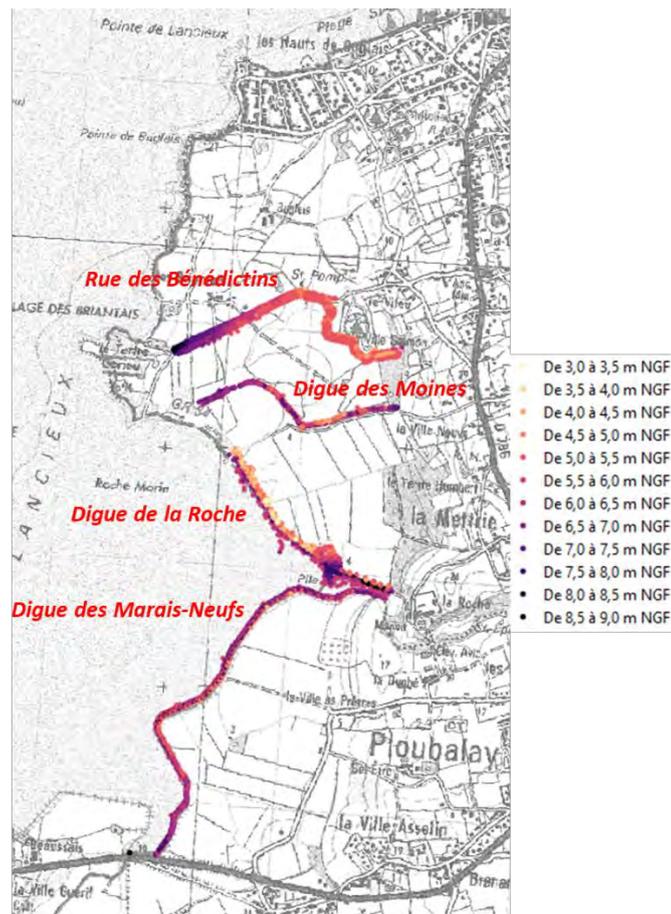


Illustration 25 – Aperçu des levés topographiques réalisés sur le secteur par le Conservatoire du littoral.

2.2. OCCUPATION DU SOL

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

Deux jeux de données ont été ici utilisés : les données d'occupation du sol en zone littorale LittoMOS et la cartographie des habitats naturels réalisée par le Conservatoire du littoral sur ses terrains.

2.2.1. LittoMOS (CEREMA)

La base de données *LittoMOS*, réalisée par le CEREMA, résulte d'un travail de reconstitution et d'actualisation d'un Inventaire Permanent du Littoral (IPLI). Il s'agit d'une couche d'occupation du sol actualisée pour la Métropole (données de 2000 à 2006) qui s'appuie sur des données d'occupation du sol existantes localement et sur une nomenclature harmonisée élaborée à partir de la nomenclature de *Corine Land Cover*. Deux niveaux d'information sont accessibles selon l'échelle considérée ; dans le cadre de la présente étude c'est le niveau 4 (i.e. le plus fin des deux niveaux disponibles) qui a été considéré. Cette couche permet au final d'obtenir une description de l'occupation des sols plus fine que celle de *Corine Land Cover* (échelle 1/25 000) sur une bande côtière de 5 km de large.

Un aperçu des données d'occupation du sol de LittoMOS est présenté à l'illustration 26.

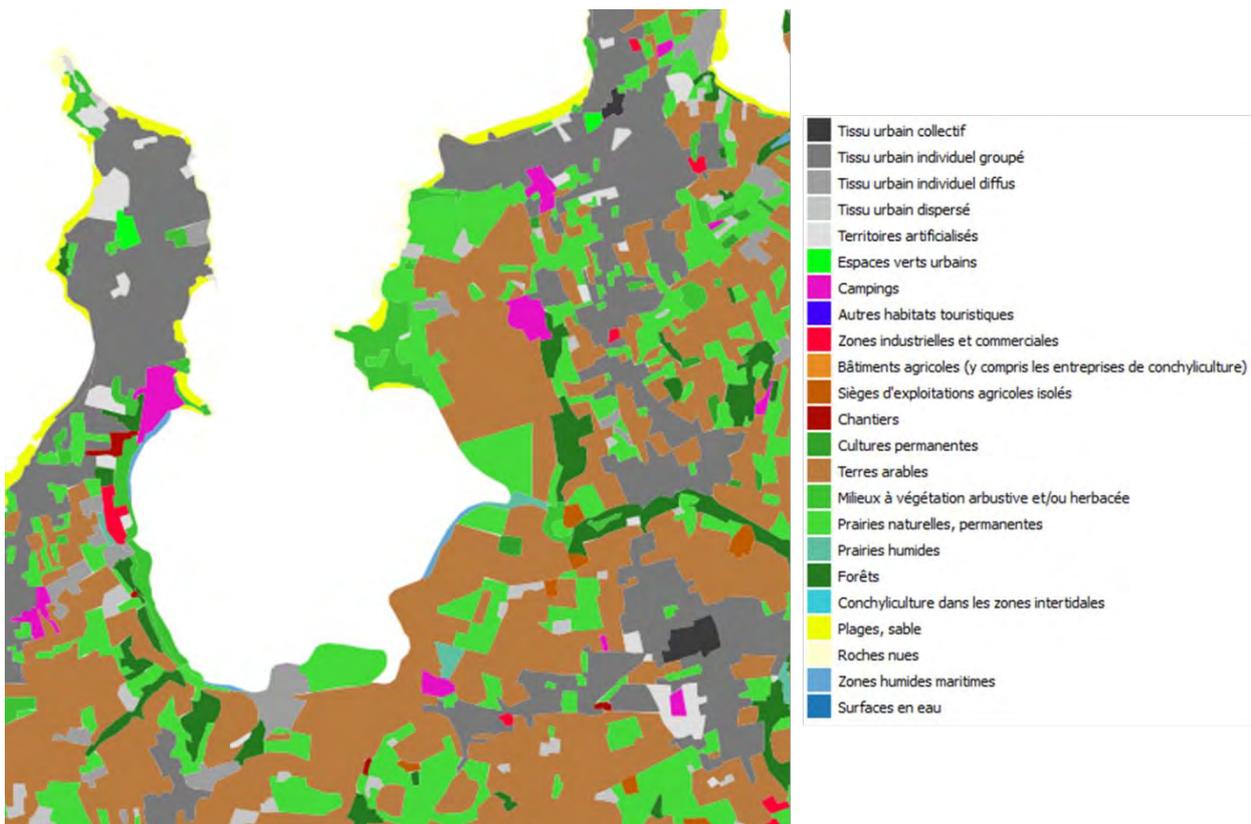


Illustration 26 – Occupation du sol sur le secteur de la Baie de Lancieux d'après les données LittoMOS.

2.2.2. Cartographie des habitats naturels

Le Conservatoire du littoral a réalisé en 2016 sur ses propriétés une cartographie des habitats naturels (Stéphan, 2016).

Cette cartographie est beaucoup plus fine, mais ne couvre que les propriétés du Conservatoire du littoral (à l'exception de quelques routes bordant ou traversant ces propriétés). Du fait de sa finalité, elle s'attache surtout à distinguer les différents écosystèmes selon la botanique et la situation. Un aperçu de cette cartographie est présenté à l'illustration 27.

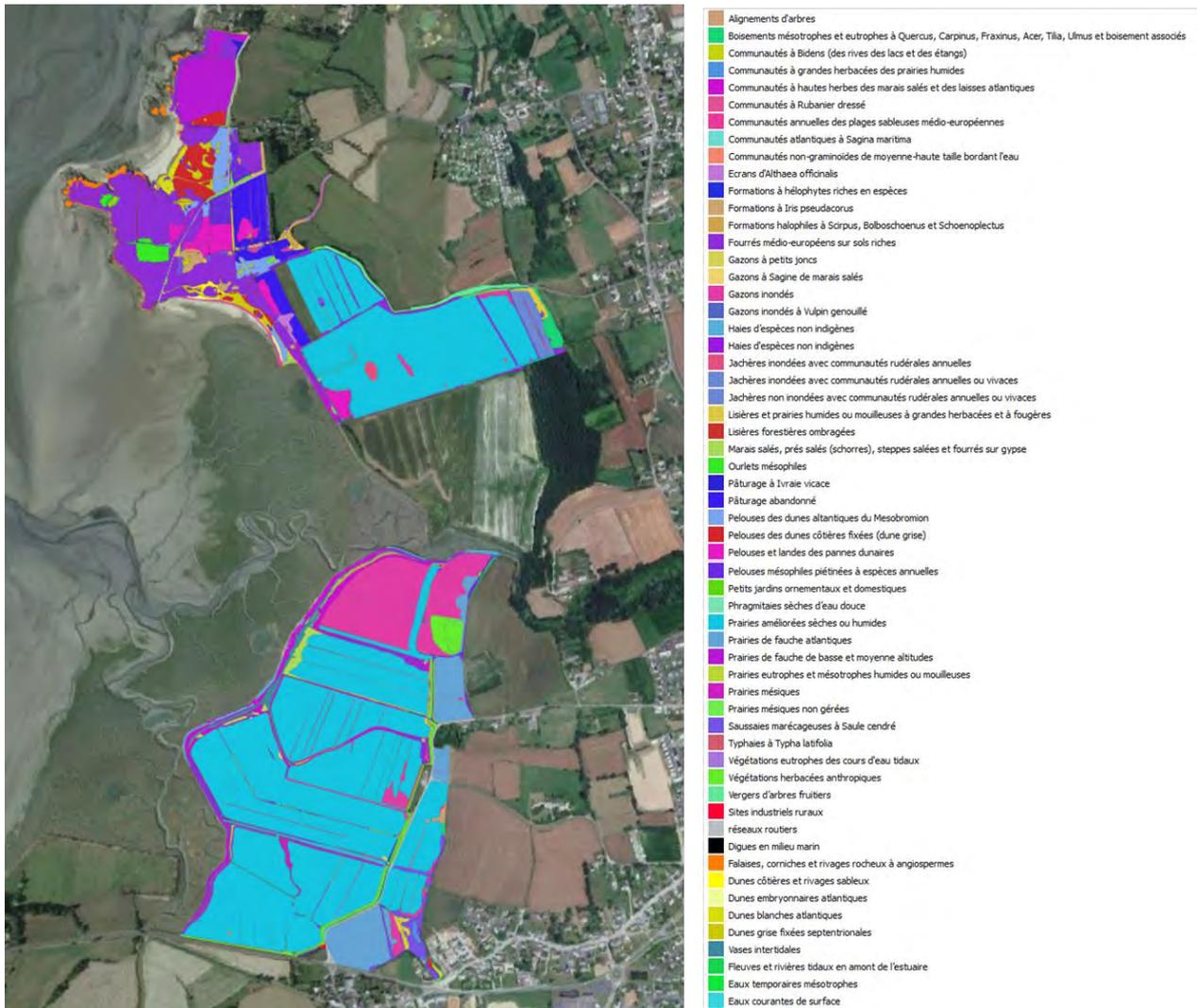


Illustration 27 – Aperçu de la cartographie des habitats naturels sur les propriétés du Conservatoire du littoral (d'après les données du Conservatoire du littoral).

2.3. CARACTERISTIQUES OCEANOGRAPHIQUES

2.3.1. Courants et régime de marée

La Côte d'Emeraude est soumise à un régime de marée macrotidal semi-diurne (marnage supérieur à 4 m, deux basses mers et 2 pleines mers d'amplitudes similaires par jour). De par sa proximité avec la Baie du Mont-Saint-Michel, le marnage y est même extrême, et parfois qualifié

de méga-tidal. D'après les données de Stéphan (2011), le marnage en vive-eau exceptionnelle y est de l'ordre de 13 m à 13,5 m, et il reste de l'ordre de 5 m en morte-eau.

Les vitesses des courants de marées peuvent dépasser les 3 nœuds³ au large, et restent généralement inférieures à 1,5 nœud¹ à proximité de la côte (Illustration 28). D'après le modèle numérique utilisé par le Shom pour établir ces cartes, les courants de marée maximaux dépasseraient les 3 nœuds¹ à l'entrée de la Baie de Lanciaux, entre la Briantais à Lanciaux et le port du Chatelet à Saint-Jacut-de-la-Mer. Ce résultat peut toutefois être imprécis selon les caractéristiques de ce modèle (modèle à grande échelle pas forcément dédié au proche côtier, résolution, gestion des bancs découvrants...). Ainsi, comme nous le verrons par la suite, les simulations numériques détaillées menées dans le cadre du présent projet confirment une accélération des courants dans le goulet, mais indiquent une vitesse maximale de l'ordre d'un peu plus de 2 nœuds¹.

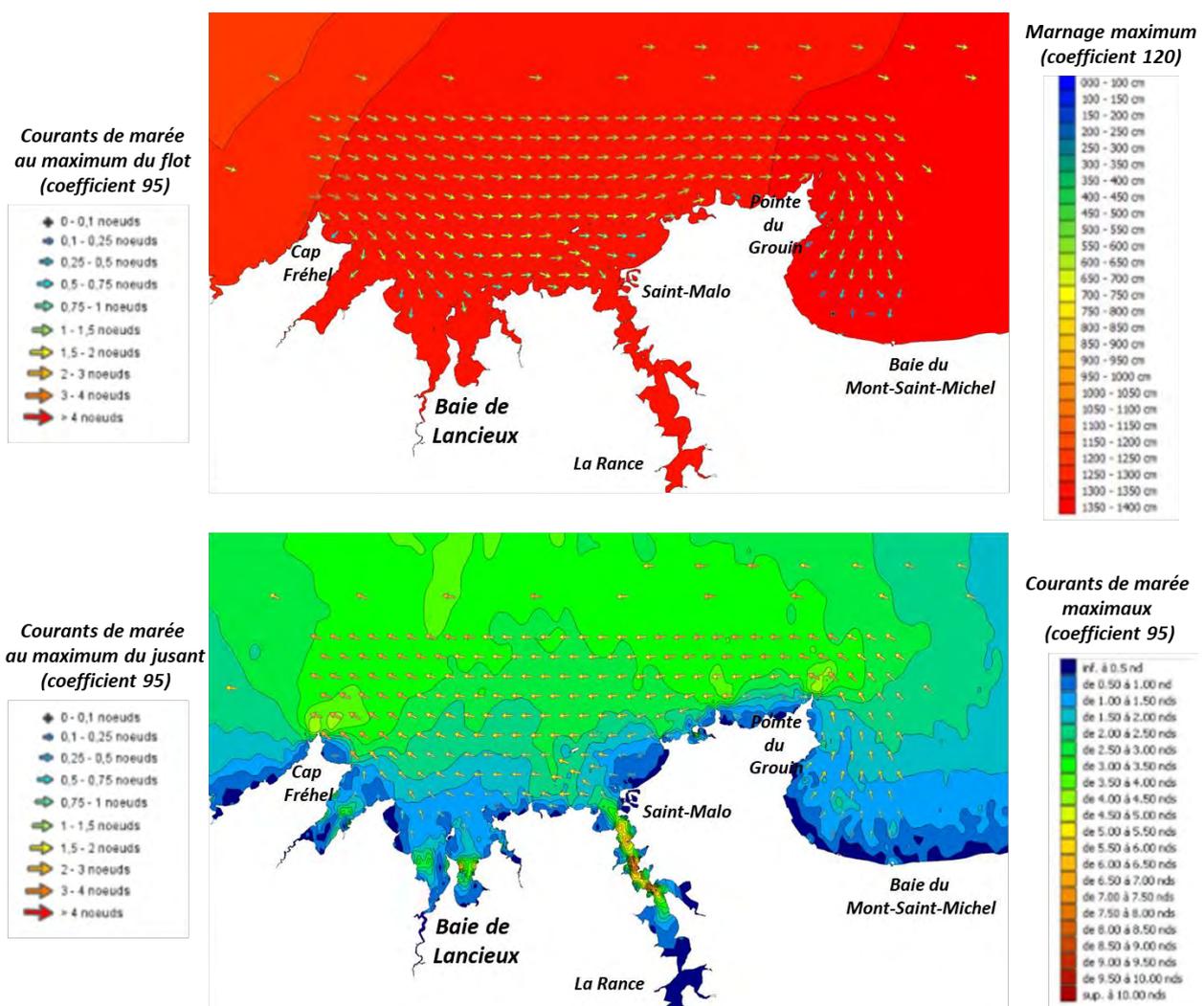


Illustration 28 - Caractéristiques des marées : en haut, marnage maximum pour un coefficient 120 et courants de marée au maximum du flot pour un coefficient 95 ; en bas, vitesses maximales des courants de marée pour un coefficient 95 et courants de marée au maximum du jusant pour un coefficient 95 (Source : data.shom.fr).

³ 1 nœud = 1,852 km/h

2.3.2. Instrumentation et mesures in situ

Peu d'instruments sont installés de manière pérenne au niveau du littoral de la côte d'Emeraude pour un suivi continu des conditions océaniques (la localisation de ces points de mesure est présentée à l'illustration 29) :

- Le marégraphe de Saint-Malo (réseau REFMAR, géré par le Shom), permet le suivi en temps réel du niveau marin (données consultables sur data.shom.fr) depuis le 09 Avril 1986 ; des mesures plus anciennes existent (d'après data.shom.fr, les toutes premières mesures connues à Saint-Malo – Saint-Servan remontent à 1829), mais des traitements spécifiques peuvent être nécessaires pour les raccorder aux observations actuelles (montée effective du niveau de la mer sur les derniers siècles, modification des repères et de la localisation de l'observation dans le temps, fréquence et moyen d'acquisition à l'époque où les mesures étaient « visuelles »... Voir par exemple Wöppelmann et al. (2008) pour un raccordement des mesures anciennes à Brest, après la destruction du port pendant la guerre, en utilisant d'autres mesures anciennes dont celles de Saint-Servan). Par sa proximité, il peut être considéré comme assez représentatif du site de la Baie de Lancieux, avec toutefois une amplitude des marées légèrement plus importante à Saint-Malo qu'à Lancieux. Le marégraphe suivant vers l'Ouest est assez éloigné, situé à Saint-Quay-Portrieux, et donc peu représentatif pour la Baie de Lancieux.
- Plusieurs campagnes de mesures houlographiques sont référencées dans le golfe normano-breton par le réseau CANDHIS du CEREMA, mais essentiellement pour des périodes de temps limitées :
 - o Une campagne s'est déroulée entre Février et Avril 2003 dans la Baie du Mont-Saint-Michel (bouée 5007 « Mont-Saint-Michel 2 » mouillée à environ 10 km au Nord-Est de la Pointe du Grouin par 15 m de fond) ;
 - o Une campagne s'est déroulée entre Février et Mars 2003, à travers 2 houlographes mouillés au large des îles Chausey (bouée 5005 « Chausey Sud » à environ 6 km au Sud-Ouest des îles Chausey par 26 m de fond et bouée 5006 « Chausey Ouest » à environ 25 km à l'Ouest des îles Chausey et environ 24 au Nord de la Baie de Lancieux par 33 m de fond) ;
 - o Une campagne s'est déroulée entre Août 1993 et Septembre 1995 au large de Saint-Malo (bouée 3501 « Saint-Malo » mouillée à environ 4 km au large de la plage du Sillon à Saint-Malo) ;
 - o Une campagne s'est déroulée entre Mars 2011 et Octobre 2013 près de la bordure Ouest du plateau des Minquiers (bouée 2203 « Minquiers Nord » à une trentaine de kilomètres au Nord du Cap Fréhel mouillée par 35 m de fond) ;
 - o Une campagne s'est déroulée entre Août 1997 et Mai 2009 au Sud-Ouest du plateau des Minquiers (bouée 2202 « Minquiers 2 » à environ 25 km au Nord d'Erquy mouillée par 38 m de fond) ;
 - o Le seul houlographe qui fonctionne en continu dans ce secteur est celui situé au large de Bréhat depuis Juin 2016, avec toutefois des lacunes importantes depuis 2020 (bouée 02204 « Bréhat » à une quinzaine de kilomètres au Nord-Nord-Est de l'île de Bréhat, en bordure Ouest du plateau de Barnouic, mouillée par 50 m de fond) ; il est cependant éloigné du site de la Baie de Lancieux par une distance de l'ordre de 70 km.
- D'autres mesures ponctuelles peuvent être trouvées dans la littérature scientifique et utilisées en cas de besoin. On pourra citer notamment les mesures de niveaux d'eau et de vagues menées par l'EPHE-PSL (Ecole Pratique des Hautes Etudes) de Dinard pour quantifier l'atténuation des vagues par la végétation du shore (Lambert, 2017) : pour cela, 17 capteurs ont été déployés le long de 4 transects devant les digues de la Roche et des Marais-Neufs pendant 4 campagnes d'une semaine chacune, autour d'une grande marée (11-18/01/2017, 09-17/02/2017, 25/03-03/04/2017, 26/04-02/05/2017).

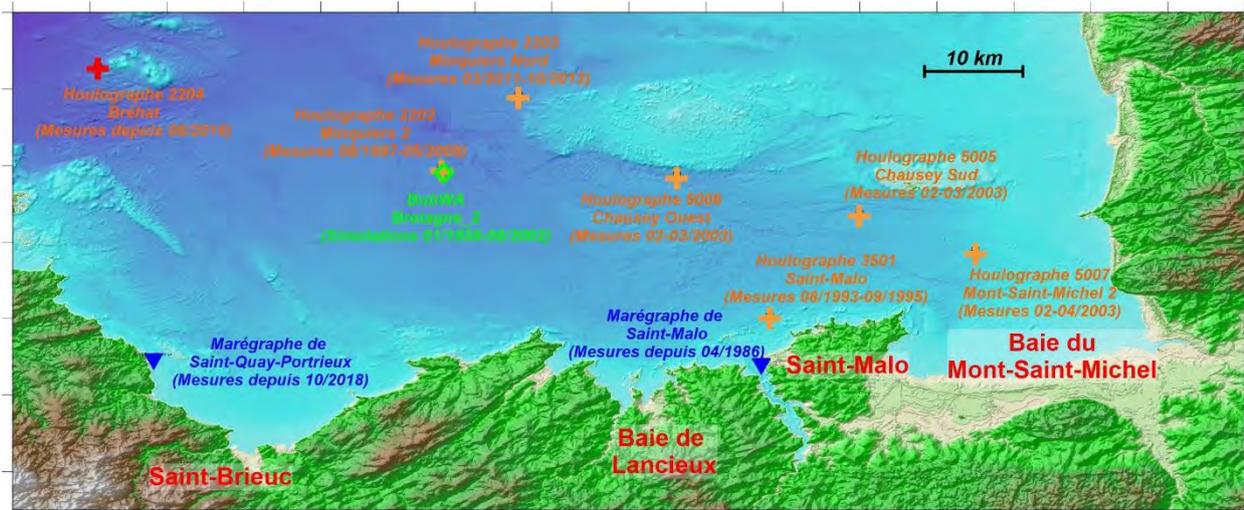


Illustration 29 – Localisation des mesures disponibles autour du site de la Baie de Lancier (marégraphes en bleu, houlographes en orange, point d'analyse statistique des vagues issu de l'atlas numérique d'états de mer BoBWA en vert).

2.3.3. Référencement altimétrique

Pour la Côte d'Émeraude, comme pour l'ensemble du golfe Norman-breton de la pointe de Goury dans la Manche aux Héaux de Bréhat dans les Côtes-d'Armor, le port de référence est celui de Saint-Malo.

La carte de la zone de marée rattachée à Saint-Malo et les références altimétriques maritimes pour la Côte d'Émeraude (valeurs caractéristiques de la marée et des rattachements altimétriques entre le repère fondamental, le zéro hydrographique, la référence IGN 69 et l'ellipsoïde) sont présentées à l'illustration 30, extraites du document de référence du Shom.

Le « port » le plus proche du site la Baie de Lancier est celui de l'Île des Hébihens. Le rattachement des différents systèmes de référence n'y étant toutefois pas connu, il convient de se référer à celui de Saint-Briac pour changer de référentiel (notamment entre le zéro hydrographique et la référence IGN 69).

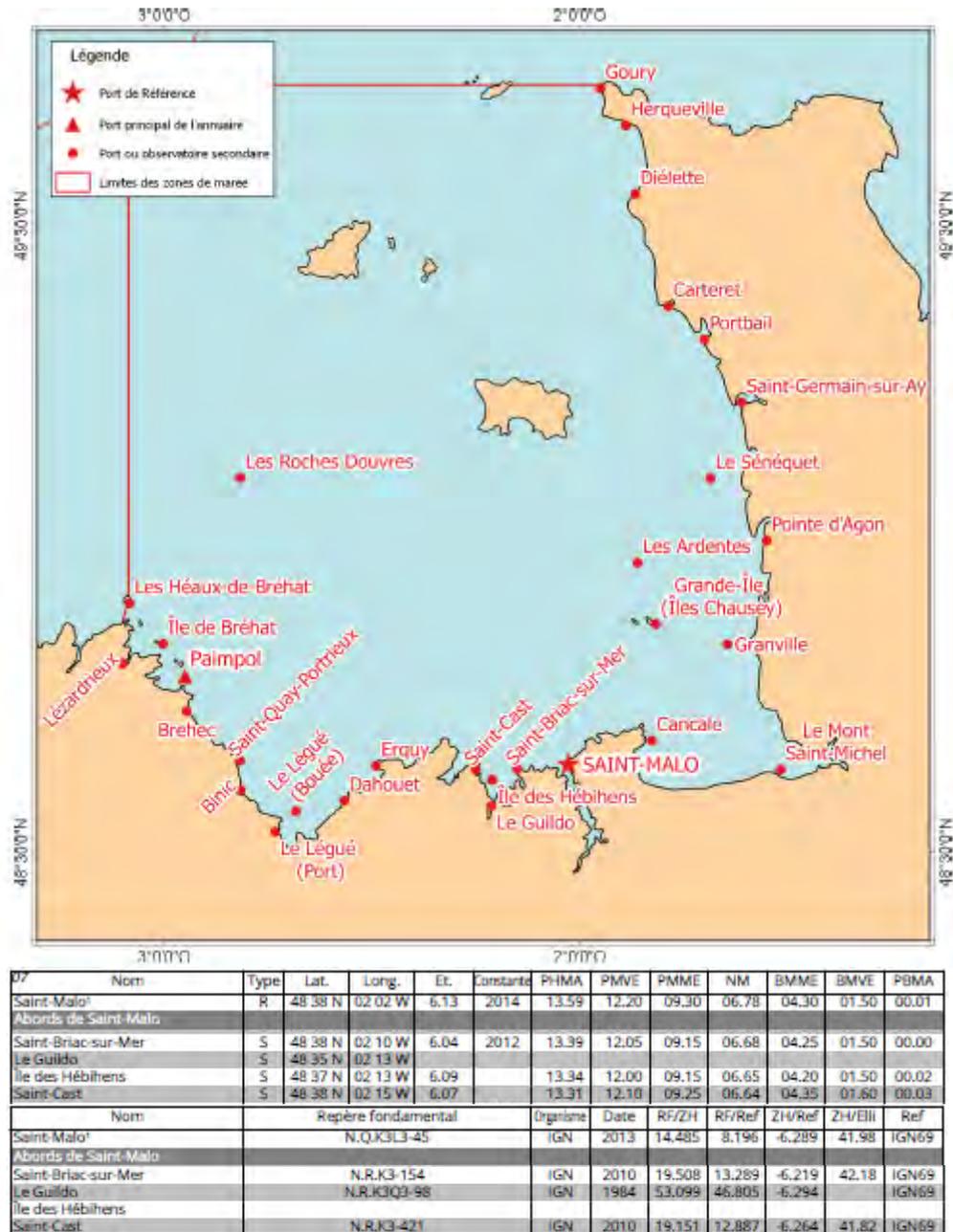


Illustration 30 – Rattachement des ports du golfe normano-breton, dont le port de référence est celui de Saint-Malo, et références altimétriques maritimes sur la Côte d’Emeraude (Source : Shom, 2019).

2.3.4. Niveaux marins et surcotes

Comme rappelé au paragraphe 1.2.1, les aléas littoraux sont le plus souvent associés à des surélévations temporaires du niveau de la mer lors de tempêtes. Ces surcotes marines sont contrôlées par deux processus principaux (surcote atmosphérique et surcote liée aux vagues), et contribuent avec la marée au niveau moyen du plan d’eau.

La combinaison de la surcote atmosphérique et de la surcote liée aux vagues avec des forts coefficients de marées et/ou des pleines mers peut considérablement surélever l’altitude du plan d’eau par rapport au niveau marin prédit (marée seule), conduisant à des niveaux extrêmes qui peuvent aggraver les aléas côtiers (submersion et érosion marines).

Les statistiques des niveaux marins extrêmes ont été calculés par Shom-Cerema⁴ (2012) sur un certain nombre de ports de référence, en s'appuyant sur une convolution entre le signal de surcote mesuré (Illustration 31) et les niveaux de pleine-mer de marée astronomique. Dans le secteur de la Côte d'Emeraude, le port de Saint-Malo a fait l'objet de ce traitement (Illustration 32). Il convient toutefois de noter que certains travaux ont montré qu'il pouvait y avoir à Saint-Malo une interaction entre la surcote et la marée (i.e. une surcote donnée ne peut pas se produire avec la même probabilité à n'importe quel niveau de marée, car la marée elle-même module une partie de la surcote). Des calculs menés par le BRGM en considérant comme le Shom une convolution entre la marée et la surcote aboutissent à des résultats très similaires à ceux du Shom (à quelques centimètres près), tandis que des calculs menés directement sur le niveau marin total (donc intégrant les éventuelles interactions marée-surcote) indiquent des niveaux extrêmes significativement plus faibles (de plus de 20 cm pour une période de retour centennale).

L'interpolation des résultats avec d'autres ports (dont des ports secondaires, correspondant à des enregistrements du niveau marin de plus courte durée) permet de visualiser la répartition géographique de ces niveaux marins extrêmes (Illustration 33). Dans le cadre de la présente étude, il a été choisi à partir des données du Shom-Cerema (2012) de retenir que **le niveau marin centennal pour la Baie de Lancier est de 7,55 m NGF**. Ce niveau pourrait toutefois être surestimé du fait des outils d'analyse statistique et d'une dépendance entre la surcote et la marée, comme le montre Bulteau et al. (2015) sur les données du port de Saint-Malo (Illustration 32).

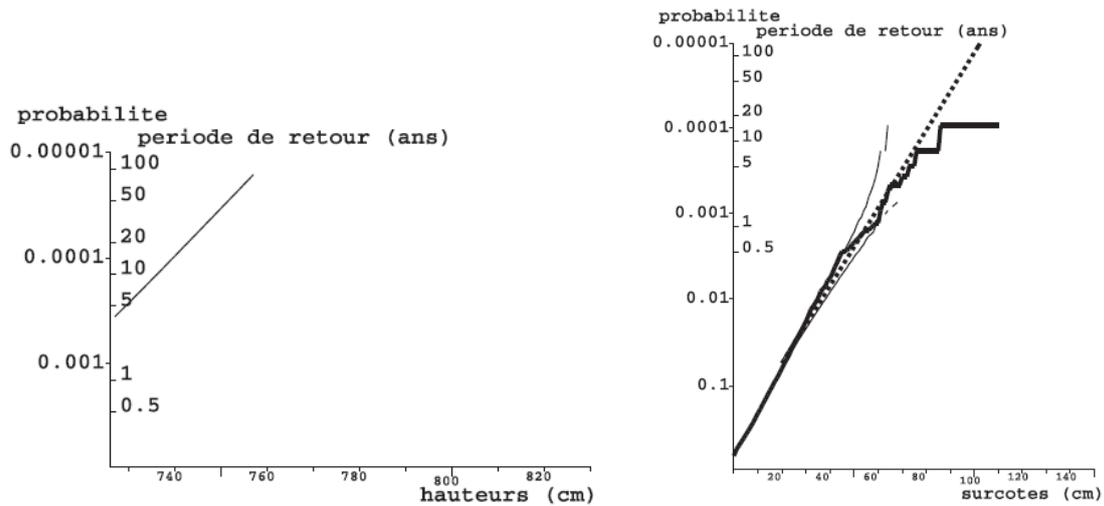


Illustration 31 - Période de retour des hauteurs/niveaux marins extrêmes de pleine mer (à gauche) et des surcotes (à droite) à Saint-Malo (extrait de SHOM-CEREMA, 2012).

Période de retour	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Niveau de pleine-mer à Saint-Malo Avec convolution surcote-marée (Shom-Cerema, 2012)	7,20 m NGF	7,27 m NGF	7,34 m NGF	7,43 m NGF	7,49 m NGF

⁴ Anciennement CETMEF

Niveau de pleine-mer à Saint-Malo Avec convolution surcote-marée (Bulteau et al., 2015)	7,16 m NGF	7,22 m NGF	7,28 m NGF	7,36 m NGF	7,43 m NGF
Niveau de pleine-mer à Saint-Malo Sans convolution surcote-marée (Bulteau et al., 2015)	7,11 m NGF	7,15 m NGF	7,18 m NGF	7,21 m NGF	7,22 m NGF

Illustration 32 – Statistiques des niveaux extrêmes de pleines mers (en m NGF) à Saint-Malo (d'après Bulteau et al., 2015).

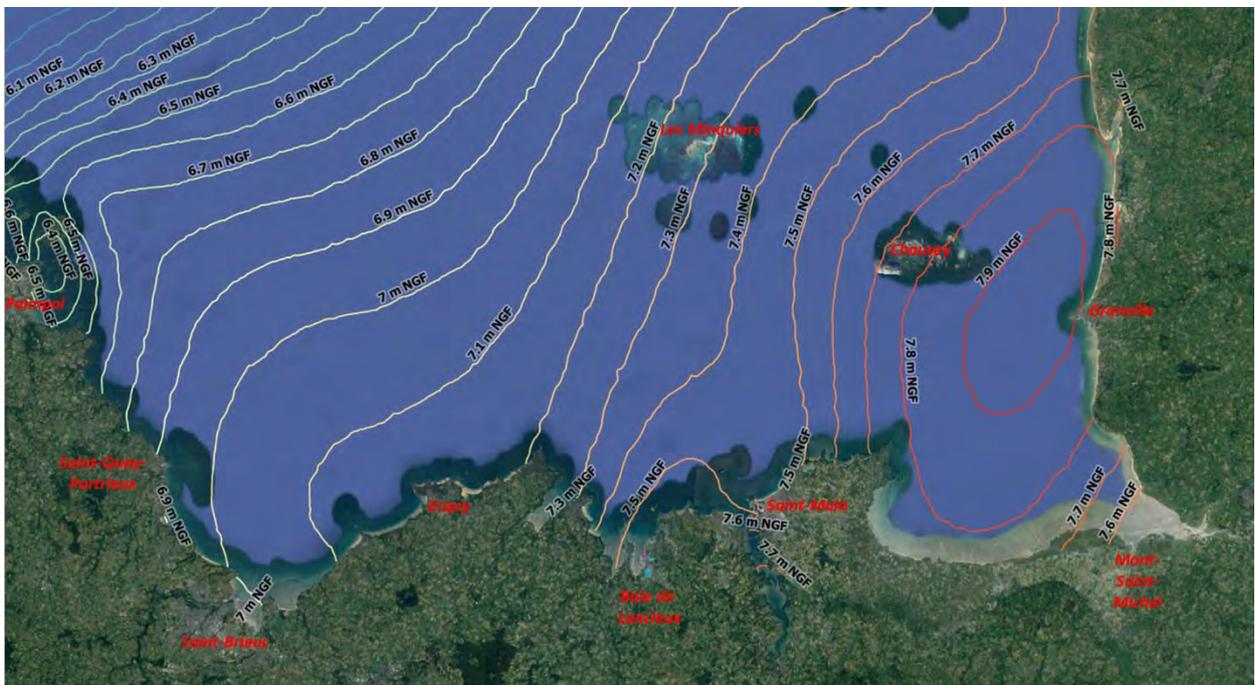


Illustration 33 - Niveaux centennaux de pleine mer dans le golfe normano-breton (d'après SHOM-CEREMA, 2012).

2.3.5. Etat des mers

Houles et vagues

Bulteau et al. (2013) ont analysé les valeurs extrêmes des vagues le long de la côte Atlantique et de la Manche à partir de la base BoBWA (Charles, et al., 2012) simulant les conditions de mer, entre 1958 et 2001. A l'échelle de la Bretagne, les hauteurs significatives des vagues les plus importantes se retrouvent sur la pointe bretonne, et elles diminuent vers l'Est, tant en Bretagne Nord qu'en Bretagne Sud. Elles sont un peu plus faibles dans le golfe Norman-breton, du fait de sa configuration plus abritée (Illustration 34).

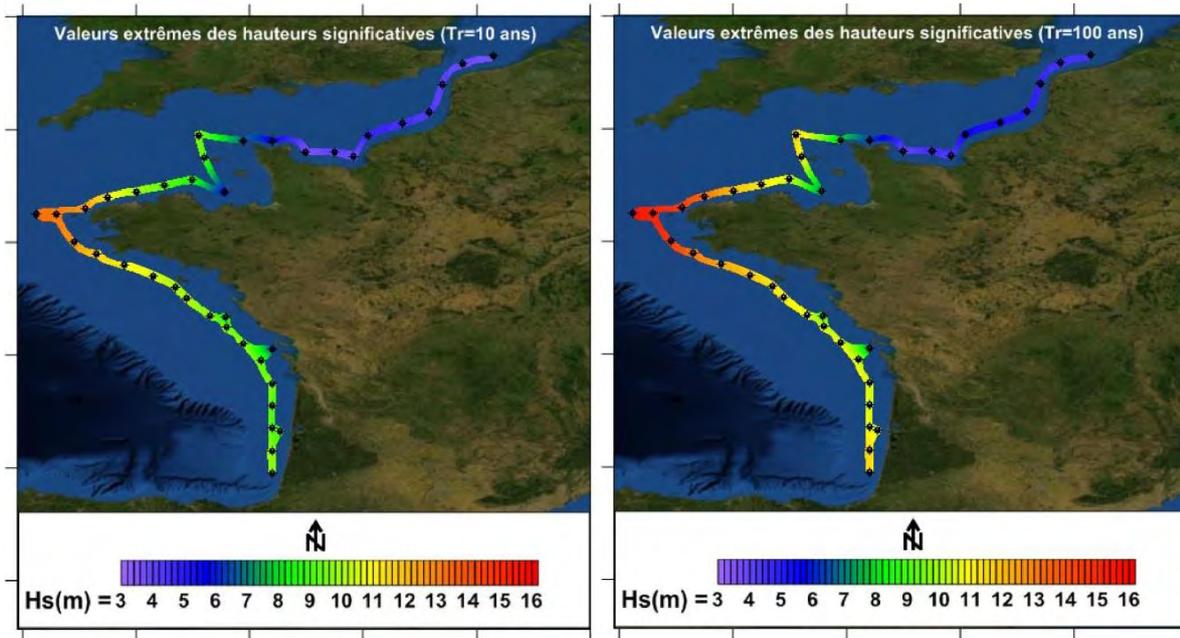


Illustration 34 – Hauteurs significatives des vagues au large pour des périodes de retour de 10 ans (à gauche) et 100 ans (à droite) estimées à partir de la base BoBWA (Charles et al., 2012) sur la période 1958-2001 à pas de temps 6 heures (Bulteau et al., 2013).

L'analyse statistique des données simulées par Charles et al. (2012) sur des bouées virtuelles implantées dans la simulation permet de calculer les caractéristiques des vagues au large, ainsi que leurs extrêmes. Le point le plus proche de la Baie de Lancier, nommé Bretagne_2 (Illustration 29), est localisé à la latitude 48,89 °N et à la longitude 2,44°O, à 27 km des côtes, par 38 m de fond.

L'analyse statistique sur ce point (Illustration 35) montre que les houles au large du golfe normano-breton font en moyenne de l'ordre de 1 m, et sont la plupart du temps de secteur Ouest-Nord-Ouest, s'orientant parfois plus au Nord lors des épisodes marqués, mais restant relativement modérés en termes de vagues. Les vagues les plus importantes issues de la simulation 1958-2001 (ligne en pointillés noirs sur la rose des vagues de l'illustration 35) correspondent également à ce régime d'Ouest-Nord-Ouest, avec des hauteurs significatives pouvant approcher les 7 m. D'autres vagues importantes ont pu être observées entre Ouest-Nord-Ouest et Nord-Nord-Ouest, avec des hauteurs significatives maximales de l'ordre de 4 m. Pour les autres orientations de vagues, les hauteurs significatives maximales des vagues ne dépassent pas 2 à 3 m.

En termes de valeurs extrêmes, la hauteur significative des vagues centennales a été calculée à 7 m (au large), avec un intervalle de confiance à 95 % de +/- 1 m.

Les séries temporelles de vagues simulées sur la période 1958-2001 permettent par ailleurs d'identifier quelques événements majeurs en termes de hauteurs significatives de vagues. Il s'agit des tempêtes :

- Du 15/12/1979 (hauteur significative des vagues de 6,79 m, soit une période de retour théorique pour les hauteurs de vagues de 65 ans) ; les coefficients de marée étaient ce jour-là de 49 et 53 ;
- Du 17/01/1965 (hauteur significative des vagues de 6,50 m, soit une période de retour théorique pour les hauteurs de vagues de 37 ans) ; les coefficients de marée étaient ce jour-là de 93 et 98 ;

- Du 12/02/1990 (hauteur significative des vagues de 6,11 m, soit une période de retour théorique pour les hauteurs de vagues de 17 ans) ; les coefficients de marée étaient ce jour-là de 93 et 91 ;
- Du 16/01/1974 (hauteur significative des vagues de 5,95 m, soit une période de retour théorique pour les hauteurs de vagues de 13 ans) ; les coefficients de marée étaient ce jour-là de 53 et 47 ;
- Du 24/01/1984 (hauteur significative des vagues de 5,91 m, soit une période de retour théorique pour les hauteurs de vagues de 12 ans). Les coefficients de marée étaient ce jour-là de 77 et 71 ;

Parmi ces dates, seule celle de Février 1990 correspond à des dommages connus sur le polder de Ploubalay. Il convient toutefois de rappeler que :

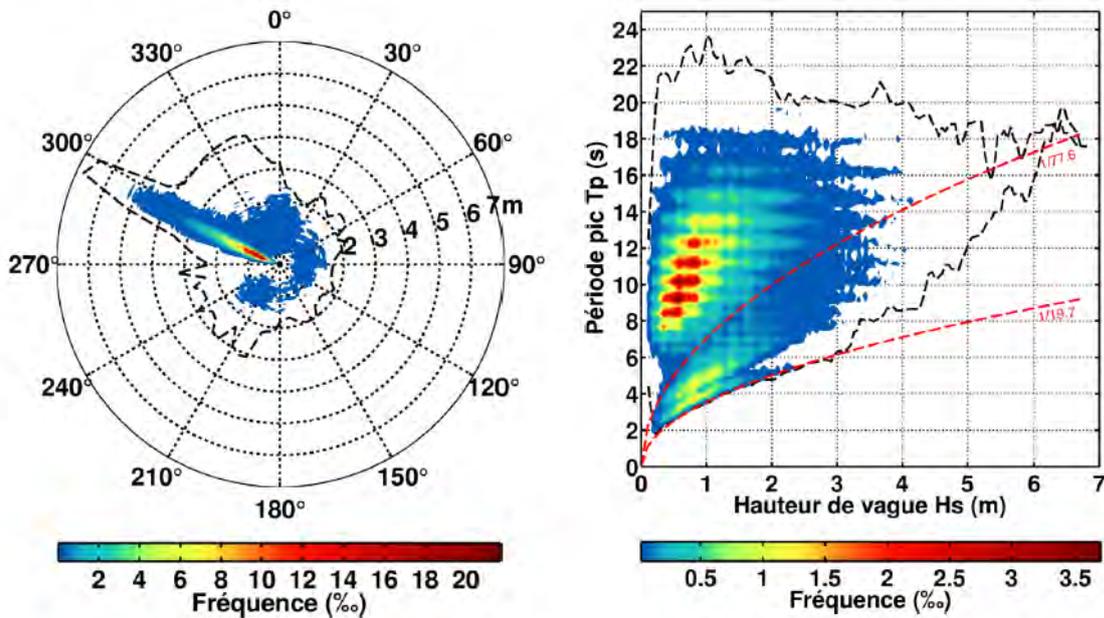
- La base de données de vagues analysée couvre la période 1958-2001, et ne peut donc inclure des événements plus récents tels que les tempêtes Johanna en 2008 et Xynthia en 2010, ou les tempêtes de l'hiver 2013-2014 ;
- L'identification de ces dates s'appuie uniquement sur les caractéristiques des vagues, indépendamment des niveaux marins (coefficients de marée, heure de la marée, surcotes). Ainsi, seuls les événements du 17/01/1965 (pour lequel aucun dommage n'est à ce jour recensé en Baie de Lancier, mais on peut noter que plusieurs impacts sur les ouvrages sont recensés à cette date à Saint-Malo) et du 12/02/1990 sont survenus en période de grande marée (coefficients de marée respectivement de 93/98 et 93/91), tandis que les autres sont survenus en période de marée limitées (coefficients de 48/53 pour le 15/12/1979, de 53/47 pour le 16/01/1974 et de 77/71 pour le 24/01/1984).
- Ces caractéristiques correspondent à des valeurs importantes au large, mais l'appréhension de leurs impacts potentiels à la côte nécessiterait des simulations plus fines de la propagation des vagues du large à la côte et de leur éventuelle coïncidence avec la pleine-mer.

Les enregistrements houlographiques de la base de données CANDHIS permettent d'obtenir le même type d'informations, à partir cette fois-ci de mesures *in situ*.

Par exemple, les enregistrements houlographiques réalisés sur la période 1997-2009 à la bouée Minquiers 2 (emplacement à l'illustration 29, à proximité immédiate du point Bretagne_2 de la base BobWA analysé ci-dessus), confirment la provenance des houles (principalement de l'Ouest-Nord-Ouest, illustration 36). Entre 1997 et 2009, les hauteurs significatives des houles restaient inférieures ou égales à 2,5 m pendant 95% du temps, et les vagues les plus importantes (3,5 m ou plus) apparaissent quasi-exclusivement en période hivernale (illustration 37).

	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Mode
Hs (m)	0,06	6,79	1,08	0,91	0,72
Dp (°)	0	360	279	292	293
Tp (s)	1,5	-	10,4	10,5	10,1

Hs = hauteur significative ; Dp = direction pic de provenance des vagues (convention nautique) ; Tp = période pic



Période de retour (ans)	Valeur de retour (m)	Intervalle de confiance à 68% (m)	Intervalle de confiance à 95% (m)
1	4,48	[4,42 ; 4,54]	[4,37 ; 4,60]
10	5,81	[5,62 ; 6,01]	[5,44 ; 6,19]
20	6,18	[5,92 ; 6,45]	[5,66 ; 6,71]
50	6,66	[6,25 ; 7,06]	[5,86 ; 7,45]
100	7,00	[6,47 ; 7,53]	[5,96 ; 8,04]

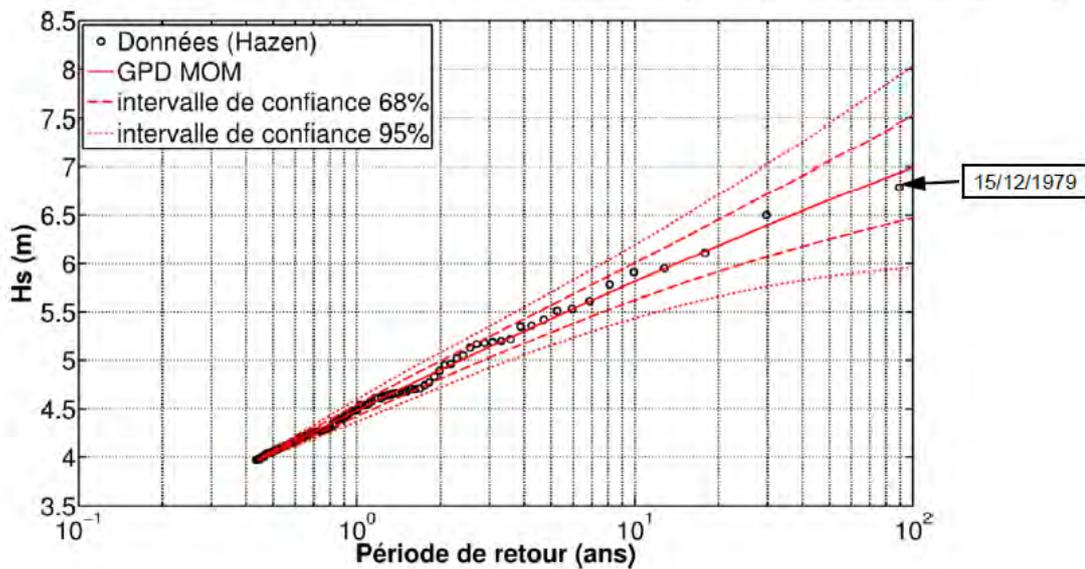


Illustration 35 – Analyse statistique des vagues au point BoBWA Bretagne_2 (Bulteau et al., 2013).

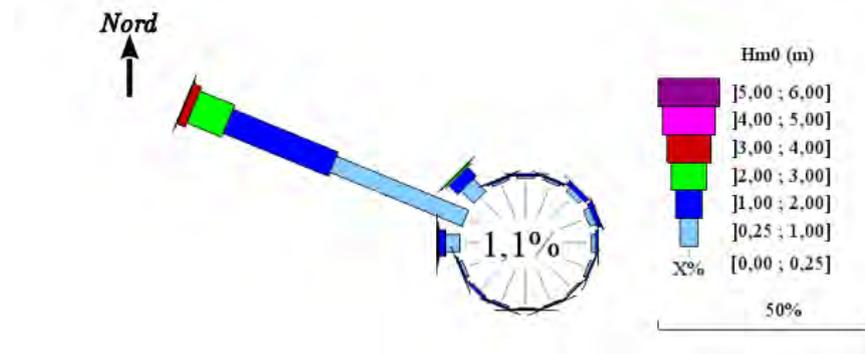


Illustration 36 - Rose des houles mesurées à la bouée 02202 – Minquiers 2 -, sur la période 1997– 2009 (<http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr>).

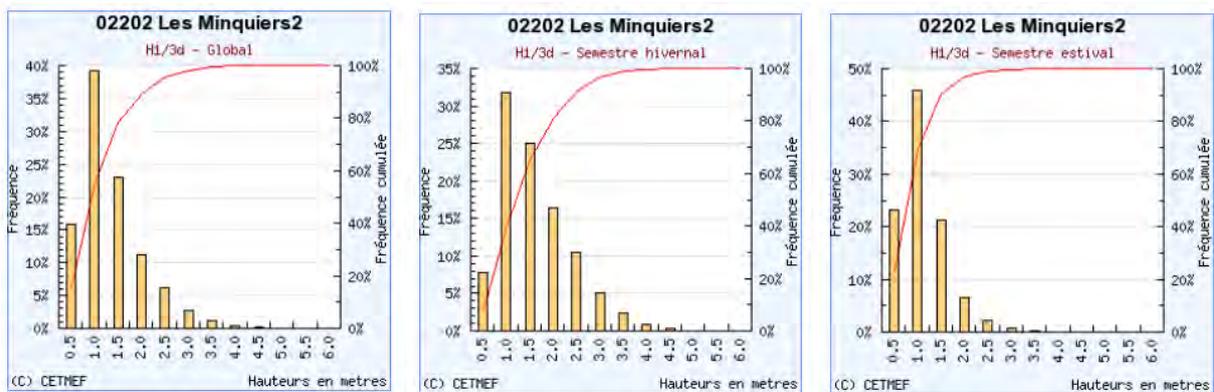


Illustration 37 - Histogramme représentant la fréquence des hauteurs significatives des houles mesurées à la bouée 02202 – Minquiers 2, sur la période 1997 – 2009, en considérant toute la période à gauche, puis la période hivernale au centre et la période estivale à droite (<http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr>).

3. Fonctionnement hydrodynamique de la Baie de Lancier

3.1. COEFFICIENTS DE MAREE ET NIVEAUX MARINS

Afin de faciliter les échanges avec les élus et la population, une analyse des niveaux de marée en fonction des coefficients de marée a été réalisée, ces derniers étant généralement beaucoup plus familiers aux riverains que les niveaux de marée prédits.

Rappelons que les coefficients de marée sont une spécificité française, et se présentent sous la forme d'un coefficient, de valeur comprise entre 20 (morte-eau extrême) et 120 (vive-eau extrême), représentative du marnage associé à la marée considérée (et non directement aux niveaux marins atteints durant la marée, ce qui implique que 2 marées de même coefficient peuvent ne pas correspondre aux mêmes niveaux marins de pleine-mer).

Pour cela, les prévisions de marée du Shom ont été extraites au niveau de l'archipel des Hébihens sur une période de 10 ans (2006-2015), tant en termes de coefficients que de niveaux marins de pleine-mer et de basse-mer. La comparaison de ces 2 paramètres (coefficient de marée et niveau de pleine-mer) a permis de proposer une relation entre eux, et donc d'établir des niveaux marins de pleine-mer représentatifs des coefficients de marée (Illustration 38). Les données montrent toutefois que selon les marées, les niveaux marins prédits peuvent en fait varier d'une cinquantaine de centimètres autour des niveaux caractéristiques retenus.

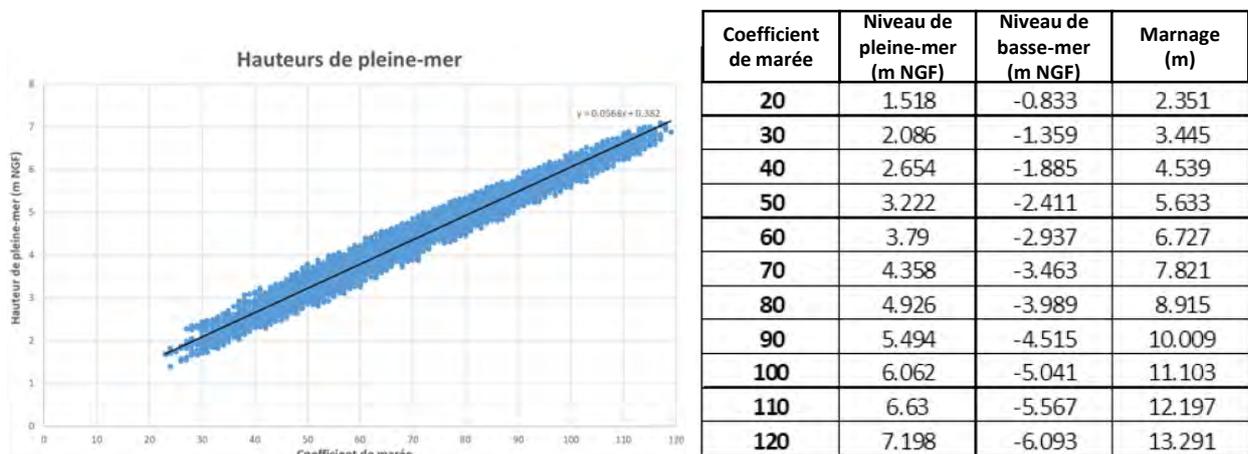


Illustration 38 – Prédiction des niveaux de pleine-mer aux Hébihens en fonction des coefficients de marée sur la période 2006-2015 (à gauche) et sélection de niveaux de pleine-mer et de basse-mer et de marnages représentatifs par décile de coefficients de marée (à droite).

3.2. PROPAGATION DES VAGUES A L'INTERIEUR DE LA BAIE

Quelques simulations numériques de la propagation des champs de houle depuis le large jusqu'à l'intérieur de la Baie de Lancier ont été réalisées, afin de mieux comprendre le rôle éventuel des vagues dans le niveau marin à l'intérieur de la Baie de Lancier (*wave setup* : surcote générée par le déferlement des vagues) et dans la submersion marine (franchissements par paquets de mer).

Ces simulations ont été réalisées avec le modèle spectral SWAN (*Simulating WAVes Nearshore* ; Booij et al., 2004), développé à l'Université de Technologie de Delft (Pays-Bas), et qui permet de calculer les paramètres décrivant la houle au niveau des zones côtières, des lacs et des estuaires. SWAN est basé sur l'équation spectrale de conservation de l'action de la houle qui est résolue suivant un schéma implicite en différences finies.

Les simulations réalisées montrent que les vagues sont très fortement atténuées au passage de l'archipel des Hébihens, et que les vagues résiduelles à l'intérieur de la Baie de Lancieux restent très modérées (Illustration 39), généralement avec des hauteurs significatives ne dépassant pas quelques décimètres (10 à 20 cm au niveau des digues).

On peut toutefois noter que du fait de l'orientation de la baie, quelques faisceaux de vagues légèrement plus importantes peuvent venir impacter plus directement la côte au niveau de Trégon (où elles peuvent dépasser 50 cm), et dans une moindre mesure au niveau de la digue des Marais-Neufs à Ploubalay, au Nord de l'éperon de la digue (où elles peuvent atteindre 30 à 40 cm). C'est justement dans ce secteur de la digue de Ploubalay qu'une érosion chronique de la digue a pu être observée.

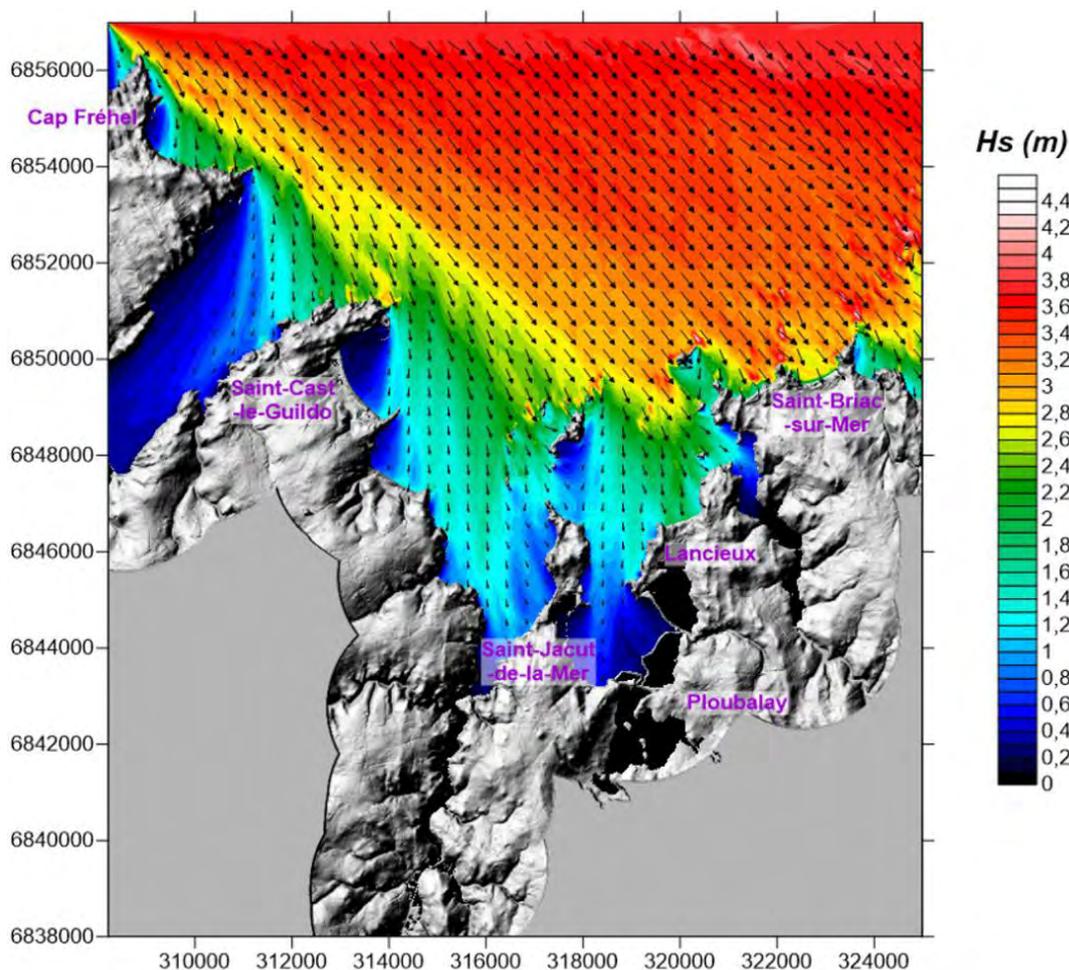


Illustration 39 – Exemple de simulation de la propagation des vagues depuis le large jusqu'à l'intérieur de la Baie de Lancieux : Aperçu des hauteurs significatives des vagues (configuration stationnaire avec un niveau marin correspondant aux Plus Hautes Mers Astronomiques et à des vagues au large du type de celles de la tempête *Eléonor* le 03/01/2018 : $H_s = 3,75$ m et $T_p = 12$ s).

Ces simulations ont permis de vérifier que la submersion des polders de la Baie de Lancieux n'est pas directement liée à des franchissements de paquets de mer, qui ne pourraient pas occasionner des volumes à terre très importants, mais que la problématique principale reste le débordement (niveau marin devenant supérieur à la crête des ouvrages) et aux défaillances des digues (qui peuvent-elles être liées aux impacts des vagues).

La submersion des polders étant fortement dépendante des niveaux marins qui se produisent dans la baie, ces mêmes simulations spectrales avec SWAN ont été utilisées pour vérifier que le *setup* (surcote générée par le déferlement des vagues) restait négligeable dans la baie, même pour des houles très importantes qui pourraient déferler à l'entrée de la baie et générer un *setup* généralisé au sein de cette dernière (Illustration 40). Les résultats obtenus montrent que le *setup* reste très faible, et ne dépasse pas quelques centimètres même pour des conditions de vagues importantes.

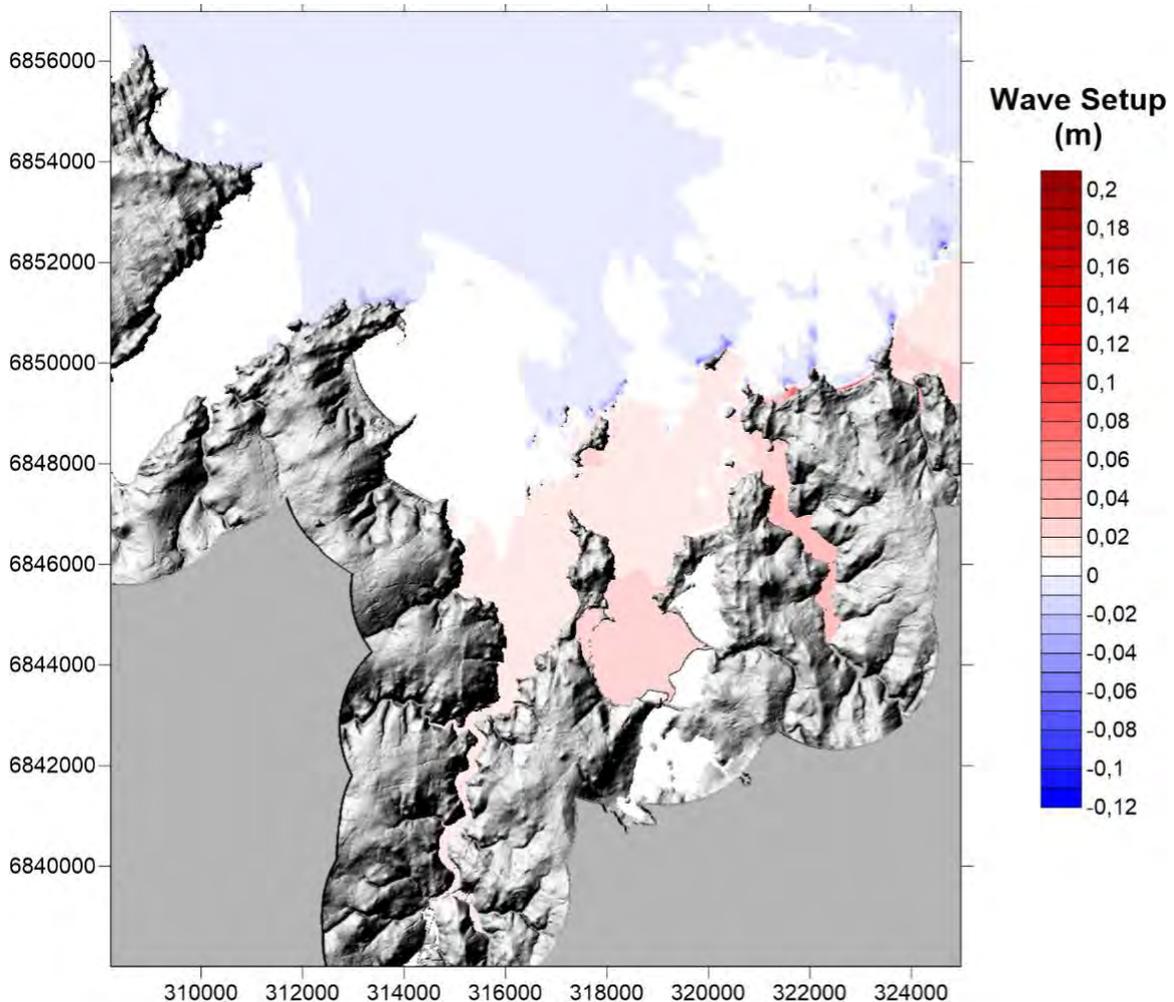


Illustration 40 - Exemple de simulation de la propagation des vagues depuis le large jusqu'à l'intérieur de la Baie de Lancieux : Aperçu du wave setup (surcote générée par le déferlement des vagues) configuration stationnaire avec un niveau marin correspondant aux Plus Hautes Mers Astronomiques et à des vagues au large du type de celles de la tempête Éléonor le 03/01/2018 : $H_s = 3,75$ m et $T_p = 12$ s.

Au final, les conditions de vagues n'ont que peu d'influence sur la submersion qui peut se produire en Baie de Lancieux, en dehors bien évidemment des effets érosifs qui pourraient causer une brèche dans les digues des polders.

3.3. CARTOGRAPHIE DES DUREES POTENTIELLES DE SUBMERSION

En complément des simulations numériques de submersion marine (présentées au chapitre suivant), des cartes de durée potentielle de submersion ont été produites. Ces cartes suivent une approche très simplifiée (projection statique des niveaux marins), et visent à fournir aux biologistes du MNHN (Museum National d'Histoire Naturelle) des éléments pour anticiper l'évolution botanique et paysagère que pourraient connaître les polders en cas de réouverture des digues.

Afin de quantifier les durées de « submersion », la prévision de marée aux Hébihens a été extraite avec un pas de 5 minutes pour l'ensemble de l'année 2015 (Illustration 41).

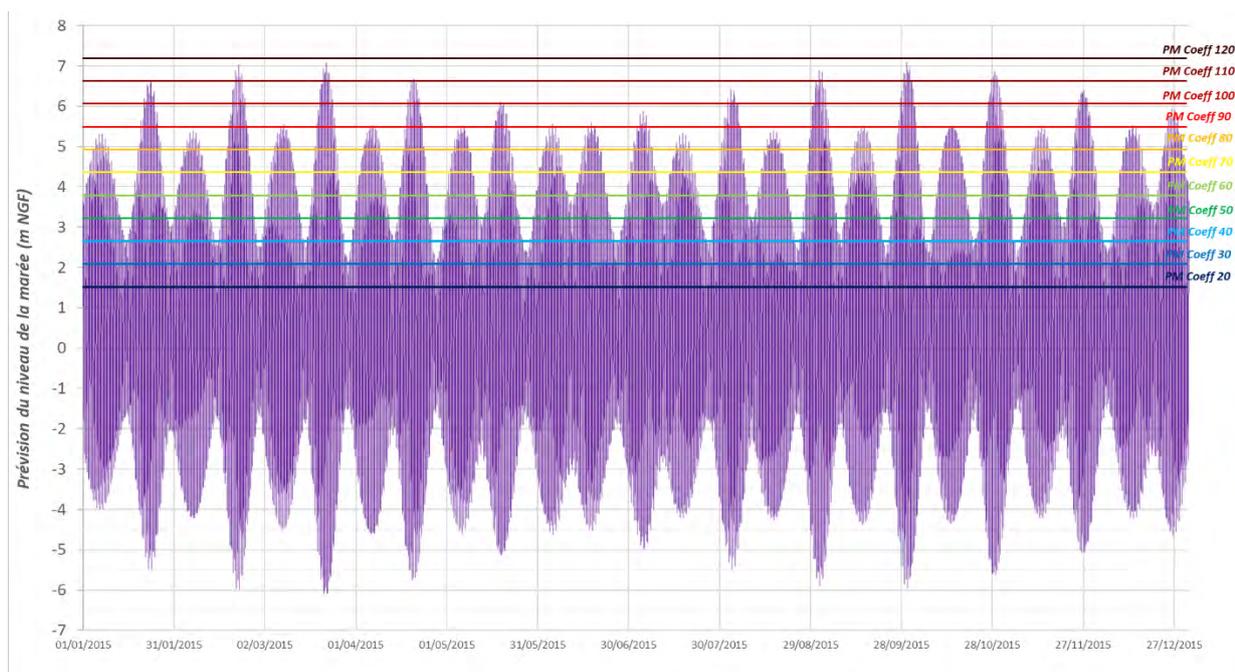


Illustration 41 – Aperçu des niveaux marins prévus aux Hébihens pour l'année 2015 (les droites horizontales correspondent aux niveaux moyens caractéristiques des pleines mers selon les coefficients déterminés au paragraphe 3.1).

L'analyse de ce signal a permis de quantifier pour toute altitude « submersible » (i.e. en dessous des plus hautes mers, seule la marée étant considérée ici) pendant combien de temps le niveau marin était supérieur, et donc pendant combien de temps les terrains situés plus bas pouvaient être potentiellement submergés. Pour cela, les niveaux marins ont été rangés en 71 classes de 20 cm chacune, et il suffit ensuite de calculer le cumul de temps pendant lequel le niveau marin était supérieur à chaque classe. L'élévation du niveau de la mer attribuée au changement climatique a également été intégrée en considérant une translation des niveaux de la valeur de l'élévation du niveau de la mer (ici + 20 cm pour une échéance circa 2030, + 40 cm pour une échéance circa 2050 et + 60 cm pour une échéance postérieure). La synthèse de ces résultats est présentée à l'illustration 42.

Intervalle d'Altitude (m NGF)		Échéance actuelle		Circa 2030 (+20 cm)		Circa 2050 (+40 cm)		Post-2050 (+60 cm)	
Altitude inf (m NGF)	Altitude sup (m NGF)	Nombre de jours de submersion / an (t0)	Pourcentage de temps de submersion par an (t0)	Nombre de jours de submersion / an (t0 + 20 cm)	Pourcentage de temps de submersion / an (t0 + 20 cm)	Nombre de jours de submersion / an (t0 + 40 cm)	Pourcentage de temps de submersion / an (t0 + 40 cm)	Nombre de jours de submersion / an (t0 + 60 cm)	Pourcentage de temps de submersion / an (t0 + 60 cm)
-6.40	-6.20	365.00 j	100.00 %	365.00 j	100.00 %	365.00 j	100.00 %	365.00 j	100.00 %
-6.20	-6.00	365.00 j	100.00 %	365.00 j	100.00 %	365.00 j	100.00 %	365.00 j	100.00 %
-6.00	-5.80	364.95 j	99.99 %	365.00 j	100.00 %	365.00 j	100.00 %	365.00 j	100.00 %
-5.80	-5.60	364.72 j	99.92 %	364.95 j	99.99 %	365.00 j	100.00 %	365.00 j	100.00 %
-5.60	-5.40	364.14 j	99.77 %	364.72 j	99.92 %	364.95 j	99.99 %	365.00 j	100.00 %
-5.40	-5.20	363.26 j	99.52 %	364.14 j	99.77 %	364.72 j	99.92 %	364.95 j	99.99 %
-5.20	-5.00	362.31 j	99.26 %	363.26 j	99.52 %	364.14 j	99.77 %	364.72 j	99.92 %
-5.00	-4.80	360.89 j	98.87 %	362.31 j	99.26 %	363.26 j	99.52 %	364.14 j	99.77 %
-4.80	-4.60	359.24 j	98.42 %	360.89 j	98.87 %	362.31 j	99.26 %	363.26 j	99.52 %
-4.60	-4.40	357.40 j	97.92 %	359.24 j	98.42 %	360.89 j	98.87 %	362.31 j	99.26 %
-4.40	-4.20	354.71 j	97.18 %	357.40 j	97.92 %	359.24 j	98.42 %	360.89 j	98.87 %
-4.20	-4.00	350.64 j	96.06 %	354.71 j	97.18 %	357.40 j	97.92 %	359.24 j	98.42 %
-4.00	-3.80	345.38 j	94.63 %	350.64 j	96.06 %	354.71 j	97.18 %	357.40 j	97.92 %
-3.80	-3.60	339.41 j	92.99 %	345.38 j	94.63 %	350.64 j	96.06 %	354.71 j	97.18 %
-3.60	-3.40	333.24 j	91.30 %	339.41 j	92.99 %	345.38 j	94.63 %	350.64 j	96.06 %
-3.40	-3.20	326.75 j	89.52 %	333.24 j	91.30 %	339.41 j	92.99 %	345.38 j	94.63 %
-3.20	-3.00	320.10 j	87.70 %	326.75 j	89.52 %	333.24 j	91.30 %	339.41 j	92.99 %
-3.00	-2.80	313.19 j	85.80 %	320.10 j	87.70 %	326.75 j	89.52 %	333.24 j	91.30 %
-2.80	-2.60	305.84 j	83.79 %	313.19 j	85.80 %	320.10 j	87.70 %	326.75 j	89.52 %
-2.60	-2.40	297.98 j	81.64 %	305.84 j	83.79 %	313.19 j	85.80 %	320.10 j	87.70 %
-2.40	-2.20	289.95 j	79.44 %	297.98 j	81.64 %	305.84 j	83.79 %	313.19 j	85.80 %
-2.20	-2.00	281.75 j	77.19 %	289.95 j	79.44 %	297.98 j	81.64 %	305.84 j	83.79 %
-2.00	-1.80	273.18 j	74.84 %	281.75 j	77.19 %	289.95 j	79.44 %	297.98 j	81.64 %
-1.80	-1.60	263.86 j	72.29 %	273.18 j	74.84 %	281.75 j	77.19 %	289.95 j	79.44 %
-1.60	-1.40	254.41 j	69.70 %	263.86 j	72.29 %	273.18 j	74.84 %	281.75 j	77.19 %
-1.40	-1.20	245.03 j	67.13 %	254.41 j	69.70 %	263.86 j	72.29 %	273.18 j	74.84 %
-1.20	-1.00	236.61 j	64.82 %	245.03 j	67.13 %	254.41 j	69.70 %	263.86 j	72.29 %
-1.00	-0.80	228.90 j	62.71 %	236.61 j	64.82 %	245.03 j	67.13 %	254.41 j	69.70 %
-0.80	-0.60	221.60 j	60.71 %	228.90 j	62.71 %	236.61 j	64.82 %	245.03 j	67.13 %
-0.60	-0.40	214.60 j	58.79 %	221.60 j	60.71 %	228.90 j	62.71 %	236.61 j	64.82 %
-0.40	-0.20	207.84 j	56.94 %	214.60 j	58.79 %	221.60 j	60.71 %	228.90 j	62.71 %
-0.20	0.00	201.21 j	55.13 %	207.84 j	56.94 %	214.60 j	58.79 %	221.60 j	60.71 %
0.00	0.20	194.67 j	53.33 %	201.21 j	55.13 %	207.84 j	56.94 %	214.60 j	58.79 %
0.20	0.40	188.16 j	51.55 %	194.67 j	53.33 %	201.21 j	55.13 %	207.84 j	56.94 %
0.40	0.60	181.75 j	49.79 %	188.16 j	51.55 %	194.67 j	53.33 %	201.21 j	55.13 %
0.60	0.80	175.38 j	48.05 %	181.75 j	49.79 %	188.16 j	51.55 %	194.67 j	53.33 %
0.80	1.00	169.01 j	46.30 %	175.38 j	48.05 %	181.75 j	49.79 %	188.16 j	51.55 %
1.00	1.20	162.54 j	44.53 %	169.01 j	46.30 %	175.38 j	48.05 %	181.75 j	49.79 %
1.20	1.40	156.06 j	42.76 %	162.54 j	44.53 %	169.01 j	46.30 %	175.38 j	48.05 %
1.40	1.60	149.44 j	40.94 %	156.06 j	42.76 %	162.54 j	44.53 %	169.01 j	46.30 %
1.60	1.80	142.74 j	39.11 %	149.44 j	40.94 %	156.06 j	42.76 %	162.54 j	44.53 %
1.80	2.00	135.79 j	37.20 %	142.74 j	39.11 %	149.44 j	40.94 %	156.06 j	42.76 %
2.00	2.20	128.48 j	35.20 %	135.79 j	37.20 %	142.74 j	39.11 %	149.44 j	40.94 %
2.20	2.40	120.63 j	33.05 %	128.48 j	35.20 %	135.79 j	37.20 %	142.74 j	39.11 %
2.40	2.60	112.09 j	30.71 %	120.63 j	33.05 %	128.48 j	35.20 %	135.79 j	37.20 %
2.60	2.80	102.86 j	28.18 %	112.09 j	30.71 %	120.63 j	33.05 %	128.48 j	35.20 %
2.80	3.00	94.07 j	25.77 %	102.86 j	28.18 %	112.09 j	30.71 %	120.63 j	33.05 %
3.00	3.20	85.77 j	23.50 %	94.07 j	25.77 %	102.86 j	28.18 %	112.09 j	30.71 %
3.20	3.40	77.90 j	21.34 %	85.77 j	23.50 %	94.07 j	25.77 %	102.86 j	28.18 %
3.40	3.60	70.18 j	19.23 %	77.90 j	21.34 %	85.77 j	23.50 %	94.07 j	25.77 %
3.60	3.80	63.01 j	17.26 %	70.18 j	19.23 %	77.90 j	21.34 %	85.77 j	23.50 %
3.80	4.00	56.03 j	15.35 %	63.01 j	17.26 %	70.18 j	19.23 %	77.90 j	21.34 %
4.00	4.20	49.41 j	13.54 %	56.03 j	15.35 %	63.01 j	17.26 %	70.18 j	19.23 %
4.20	4.40	43.33 j	11.87 %	49.41 j	13.54 %	56.03 j	15.35 %	63.01 j	17.26 %
4.40	4.60	37.23 j	10.20 %	43.33 j	11.87 %	49.41 j	13.54 %	56.03 j	15.35 %
4.60	4.80	31.51 j	8.63 %	37.23 j	10.20 %	43.33 j	11.87 %	49.41 j	13.54 %
4.80	5.00	25.93 j	7.10 %	31.51 j	8.63 %	37.23 j	10.20 %	43.33 j	11.87 %
5.00	5.20	20.50 j	5.62 %	25.93 j	7.10 %	31.51 j	8.63 %	37.23 j	10.20 %
5.20	5.40	15.22 j	4.17 %	20.50 j	5.62 %	25.93 j	7.10 %	31.51 j	8.63 %
5.40	5.60	10.84 j	2.97 %	15.22 j	4.17 %	20.50 j	5.62 %	25.93 j	7.10 %
5.60	5.80	7.97 j	2.18 %	10.84 j	2.97 %	15.22 j	4.17 %	20.50 j	5.62 %
5.80	6.00	6.07 j	1.66 %	7.97 j	2.18 %	10.84 j	2.97 %	15.22 j	4.17 %
6.00	6.20	4.50 j	1.23 %	6.07 j	1.66 %	7.97 j	2.18 %	10.84 j	2.97 %
6.20	6.40	3.07 j	0.84 %	4.50 j	1.23 %	6.07 j	1.66 %	7.97 j	2.18 %
6.40	6.60	1.90 j	0.52 %	3.07 j	0.84 %	4.50 j	1.23 %	6.07 j	1.66 %
6.60	6.80	1.06 j	0.29 %	1.90 j	0.52 %	3.07 j	0.84 %	4.50 j	1.23 %
6.80	7.00	0.40 j	0.11 %	1.06 j	0.29 %	1.90 j	0.52 %	3.07 j	0.84 %
7.00	7.20	0.07 j	0.02 %	0.40 j	0.11 %	1.06 j	0.29 %	1.90 j	0.52 %
7.20	7.40	0.00 j	0.00 %	0.07 j	0.02 %	0.40 j	0.11 %	1.06 j	0.29 %
7.40	7.60	0.00 j	0.00 %	0.00 j	0.00 %	0.07 j	0.02 %	0.40 j	0.11 %
7.60	7.80	0.00 j	0.00 %	0.00 j	0.00 %	0.00 j	0.00 %	0.07 j	0.02 %

Illustration 42 – Durées de submersion potentielle par la marée en Baie de Lancier selon l'altitude.

Ces résultats peuvent alors être projetés de façon « statique » sur la topographie (RGE Alti à 1 m de résolution) pour anticiper les conséquences potentielles de ces submersions en termes de paysages et de botanique. Il convient toutefois de rappeler que cette approche simplifiée comporte de nombreux biais et incertitudes :

- La cartographie derrière les ouvrages suppose que ces **ouvrages sont transparents** à l'eau ;
- La cartographie par projection statique des niveaux marins sur la topographie **ne prend pas en compte les effets dynamiques** de la marée : en effet, la submersion est fortement conditionnée par les cycles de marée, les ouvrages de protection et les écoulements à terre, et il est probable que pour un niveau marin maximal donné la submersion n'ait pas le temps de remplir l'intégralité des zones basses identifiées ;
- La cartographie suppose que les **dépressions topographiques se remplissent** dès que le niveau marin est plus haut que leur altitude, ce qui n'est pas forcément vérifié en réalité car elles sont isolées et protégées par les terrains alentours ;
- A contrario, la cartographie suppose que les **dépressions topographiques se vident** dès que le niveau marin est plus bas que leur altitude, ce qui n'est pas forcément vérifié en réalité car l'eau va rester y stagner pendant un certain temps.

L'illustration 43 présente une cartographie de ce type, avec un classement correspondant aux niveaux de pleine-mer caractéristiques des coefficients de marée (déterminés au paragraphe 3.1, avec les limites associées), pour faciliter la communication avec les élus et les riverains.

Cette carte montre que le bas-schorre devant les digues des polders n'est submergé qu'à partir de pleines-mers de coefficients 60 à 70, soit 10 à 15 % du temps, tandis que le haut-schorre ne peut être submergé que par des pleines-mers de coefficients 80 à 90, soit entre 2,5 et 6 % du temps selon les secteurs.

La carte met également en évidence qu'une submersion significative des polders sous l'effet de la marée seule ne peut apparaître qu'à partir de marées typiquement de coefficients 80, et que les polders ne seraient pas inondés plus de 6,1 % du temps. Les secteurs des polders les plus éloignés des digues et les plus hauts ne peuvent être quant à eux potentiellement submergés que pendant des durées très courtes, par des pleines-mers de coefficients supérieurs à 90 (soit 2,5 % du temps).

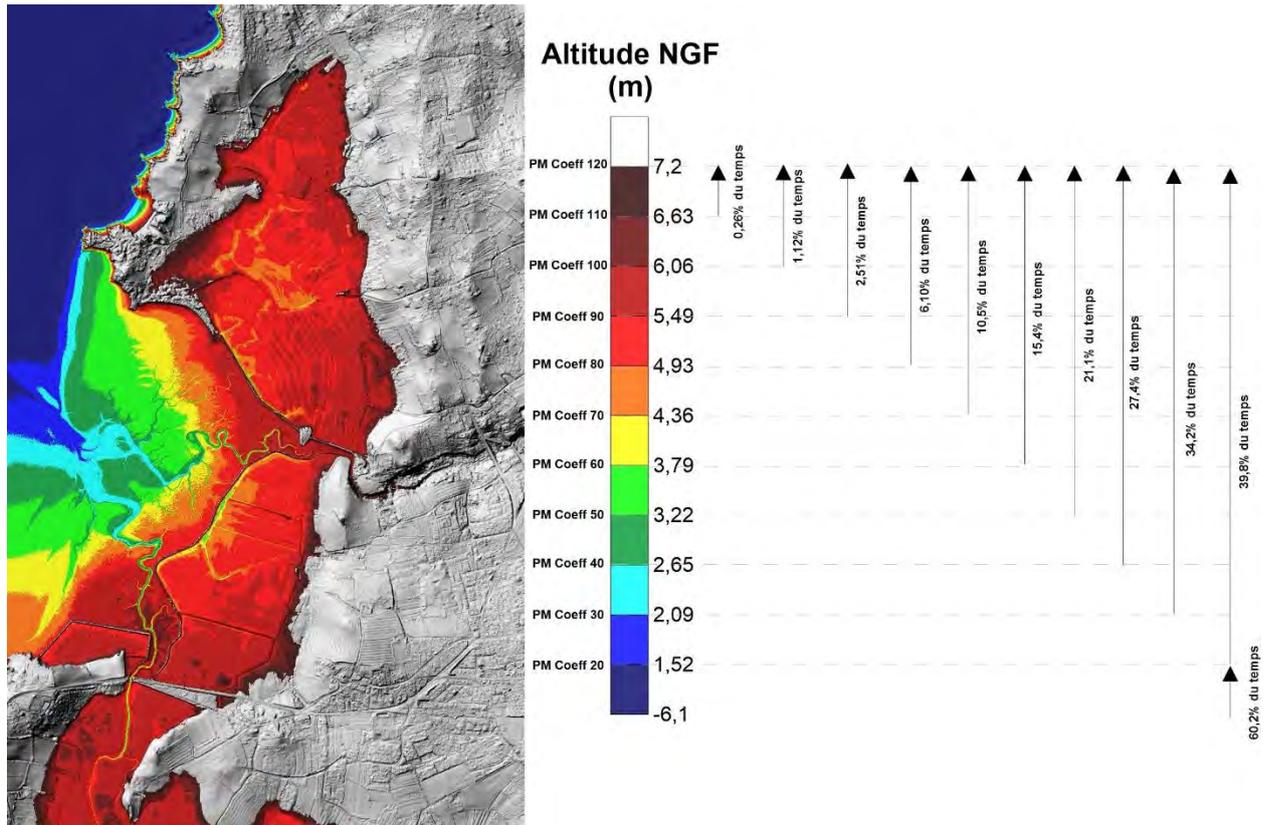


Illustration 43 – Cartographie des durées potentielles de submersion estimées selon les niveaux de pleines-mers par coefficients de marée.

3.4. CALENDRIERS DE SURVEILLANCE DE LA SUBMERSION

L'ensemble des données présentées ci-dessus a permis de proposer des calendriers de surveillance de la submersion marine dans la Baie de Lancieux. Ces calendriers, établis par croisement de la topographie et des coefficients de marée, permettent d'anticiper les submersions et de surveiller les prévisions de surcote pour prévoir les conséquences éventuelles d'une submersion. Ils peuvent également être utilisés pour appréhender l'augmentation de fréquence des submersions sous l'effet de la montée du niveau de la mer par le changement climatique. Le Conservatoire du littoral et son gestionnaire, la CCCE, ont été formés à l'utilisation de ces calendriers et à l'établissement de calendriers similaires pour les années à venir.

Les illustrations suivantes présentent un exemple de calendrier établi pour l'année 2021 au niveau de la route RD768 : l'illustration 44 identifie les périodes les plus propices à la submersion sur la base des coefficients de marée, tandis que l'illustration 45 propose des niveaux de surveillance en fonction des surcotes qui seraient susceptibles d'engendrer une submersion la route, pour les grandes marées de coefficient supérieur à 105 de l'année 2021 ; les niveaux de surveillance sont également calculés sur cette même année 2021 en considérant différentes valeurs de l'élévation du niveau de la mer sous l'effet du changement climatique, afin d'estimer l'augmentation de fréquence des alertes dans le temps : si pour l'année « 2021 actuelle », une seule période atteint un niveau de surveillance 4 (i.e. submersion possible avec une surcote de moins de 0,5 m), on aurait pour une année « 2021 pour laquelle la mer aurait monté de 60 cm » cinq périodes à ce même niveau de surveillance 4, et trois périodes atteignant un niveau de surveillance 5 (i.e. submersion possible sans surcote, sous l'effet de la marée seule).

Janvier 2021			Février 2021			Mars 2021			Avril 2021			Mai 2021			Juin 2021		
Date	Coef	Date	Coef	Date	Coef	Date	Coef	Date	Coef	Date	Coef	Date	Coef	Date	Coef	Date	Coef
1 Ve	81	13 Ma	84	23 Sa	84	1 Lu	82	12 Ve	88	23 Ve	89	12 Lu	88	13 Me	85	1 Ma	58
2 Sa	80	13 Me	89	24 Di	85	2 Ma	105	13 Sa	88	2 Sa	88	13 Me	85	13 Me	85	2 Me	53
3 Di	77	14 Je	91	25 Jr	84	3 Me	102	14 Di	87	3 Sa	79	14 Me	80	14 Ve	76	3 Je	47
4 Lu	75	15 Ve	92	26 Me	86	4 Jr	93	15 Lu	85	4 Di	83	15 Sa	71	15 Sa	71	4 Ve	45
5 Ma	69	16 Sa	87	27 Me	88	5 Jr	87	16 Ma	83	5 Lu	83	16 Sa	47	16 Sa	47	5 Sa	49
6 Me	63	17 Di	80	28 Jr	86	6 Sa	91	17 Me	82	6 Ma	83	17 Lu	44	17 Lu	44	6 Di	54
7 Jr	58	18 Lu	71	29 Jr	87	7 Di	104	18 Me	88	7 Ma	82	18 Me	51	18 Me	51	7 Lu	57
8 Ve	56	19 Ma	60	30 Sa	89	8 Lu	112	19 Ve	85	8 Ma	81	19 Ma	41	19 Ma	41	8 Ma	63
9 Sa	59	20 Me	49	31 Di	93	9 Ma	112	20 Sa	89	9 Jr	70	20 Sa	40	20 Sa	40	9 Me	69
10 Di	66	21 Je	40		93	10 Me	107	10 Me	87	10 Sa	79	21 Me	30	21 Me	30	10 Je	72
11 Lu	75	22 Ve	35		88	11 Jr	88	11 Jr	78	11 Di	87	22 Je	42	22 Je	42	11 Ve	73

Juillet 2021			Août 2021			Septembre 2021			Octobre 2021			Novembre 2021			Décembre 2021		
Date	Coef	Date	Coef	Date	Coef	Date	Coef	Date	Coef	Date	Coef	Date	Coef	Date	Coef	Date	Coef
1 Je	55	12 Lu	76	23 Ve	81	1 Me	27	12 Di	81	23 Sa	84	1 Lu	53	12 Ve	47	1 Me	66
2 Ve	51	13 Ma	76	24 Sa	88	2 Jr	24	13 Lu	66	24 Di	76	2 Ma	70	13 Sa	45	2 Jr	73
3 Sa	47	14 Me	75	25 Me	92	3 Ve	39	14 Ma	51	25 Sa	78	3 Me	85	14 Di	52	3 Ve	80
4 Di	43	15 Jr	93	26 Jr	89	4 Sa	46	15 Me	45	26 Di	67	4 Lu	69	15 Lu	61	4 Sa	86
5 Lu	42	16 Jr	92	27 Me	81	5 Di	60	16 Je	42	27 Me	61	5 Ma	84	16 Ma	69	5 Di	102
6 Ma	48	16 Ve	66	27 Me	71	6 Lu	73	17 Me	43	27 Lu	54	6 Ma	84	17 Me	73	6 Lu	103
7 Me	54	17 Sa	60	28 Me	85	7 Ma	85	17 Ve	52	28 Ma	41	7 Ma	76	18 Me	60	7 Ma	103
8 Jr	57	18 Di	56	29 Jr	72	8 Me	80	18 Sa	66	29 Me	35	8 Me	78	19 Me	50	8 Me	103
9 Jr	60	19 Lu	55	30 Jr	40	9 Ma	72	19 Sa	66	30 Me	26	9 Ma	81	20 Sa	42	9 Me	98
10 Sa	63	20 Ma	57	31 Sa	34	10 Me	100	20 Me	89	31 Di	45	10 Me	85	21 Di	79	10 Me	104
11 Di	74	21 Me	67		83	11 Lu	85	21 Je	90		85	11 Lu	79	22 Lu	74	11 Sa	103
		22 Jr	72		88			22 Me	88		86			23 Me	71		
		23 Jr	77		87			23 Lu	86		86			24 Lu	70		

Illustration 44 – Exemple de calendrier de surveillance pour la submersion de la route RD768 sur la base de l'annuaire des marées du Shom pour l'année 2021.

		Prévision SHOM			Surcote pouvant entrainer une submersion de la route				Niveau de surveillance			
		Heure légale de pleine-mer	Coefficient	Pleine-Mer NGF	Actuel	circa 2030 (+20cm)	circa 2050 (+40 cm)	Post-2050 (+60cm)	Actuel	circa 2030 (+20cm)	circa 2050 (+40 cm)	Post-2050 (+60cm)
Grande marée du 27/02 au 03/03 Coeff max 106	27-févr	07:16	91	5.46	1.74	1.54	1.34	1.14	1	1	2	2
		19:43	96	5.57	1.63	1.43	1.23	1.03	1	2	2	2
	28-févr	07:57	101	6.01	1.19	0.99	0.79	0.59	2	3	3	3
		20:23	104	5.99	1.21	1.01	0.81	0.61	2	2	3	3
	01-mars	08:37	106	6.36	0.84	0.64	0.44	0.24	3	3	4	4
		21:02	106	6.19	1.01	0.81	0.61	0.41	2	3	3	4
	02-mars	09:15	105	6.41	0.79	0.59	0.39	0.19	3	3	4	4
		21:39	102	6.08	1.12	0.92	0.72	0.52	2	3	3	3
03-mars	09:53	98	6.13	1.07	0.87	0.67	0.47	2	3	3	4	
	22:16	93	5.67	1.53	1.33	1.13	0.93	1	2	2	3	
Grande marée du 27/03 au 01/04 Coeff max 112	27-mars	06:09	82	4.81	2.39	2.19	1.99	1.79	1	1	1	1
		18:38	90	5.2	2	1.8	1.6	1.4	1	1	1	2
	28-mars	07:53	97	5.68	1.52	1.32	1.12	0.92	1	2	2	3
		20:20	103	5.94	1.26	1.06	0.86	0.66	2	2	3	3
	29-mars	08:36	107	6.34	0.86	0.66	0.46	0.26	3	3	4	4
		21:01	111	6.44	0.76	0.56	0.36	0.16	3	3	4	4
	30-mars	09:17	112	6.72	0.48	0.28	0.08	-0.12	4	4	4	5
		21:40	112	6.63	0.57	0.37	0.17	-0.03	3	4	4	5
	31-mars	09:56	111	6.73	0.47	0.27	0.07	-0.13	4	4	4	5
		22:18	107	6.47	0.73	0.53	0.33	0.13	3	3	4	4
	01-avr	10:35	102	6.34	0.86	0.66	0.46	0.26	3	3	4	4
		22:55	96	5.95	1.25	1.05	0.85	0.65	2	2	3	3
Grande marée du 25/04 au 30/04 Coeff max 111	25-avr	06:37	83	4.8	2.4	2.2	2	1.8	1	1	1	1
		19:06	91	5.26	1.94	1.74	1.54	1.34	1	1	1	2
	26-avr	07:24	98	5.68	1.52	1.32	1.12	0.92	1	2	2	3
		19:51	103	6.02	1.18	0.98	0.78	0.58	2	3	3	3
	27-avr	08:09	107	6.32	0.88	0.68	0.48	0.28	3	3	4	4
		20:34	110	6.5	0.7	0.5	0.3	0.1	3	4	4	4
	28-avr	08:53	111	6.65	0.55	0.35	0.15	-0.05	3	4	4	5
		21:16	111	6.65	0.55	0.35	0.15	-0.05	3	4	4	5
	29-avr	09:36	108	6.58	0.62	0.42	0.22	0.02	3	4	4	4
		21:57	105	6.44	0.76	0.56	0.36	0.16	3	3	4	4
	30-avr	10:18	99	6.12	1.08	0.88	0.68	0.48	2	3	3	4
		22:38	93	5.88	1.32	1.12	0.92	0.72	2	2	3	3
Grande marée du 05/10 au 10/10 Coeff max 108	05-oct	07:16	84	5.01	2.19	1.99	1.79	1.59	1	1	1	1
		19:32	91	5.49	1.71	1.51	1.31	1.11	1	1	2	2
	06-oct	07:56	97	5.71	1.49	1.29	1.09	0.89	2	2	2	3
		20:12	101	6.12	1.08	0.88	0.68	0.48	2	3	3	4
	07-oct	08:35	105	6.21	0.99	0.79	0.59	0.39	3	3	3	4
		20:52	107	6.51	0.69	0.49	0.29	0.09	3	4	4	4
	08-oct	09:14	108	6.46	0.74	0.54	0.34	0.14	3	3	4	4
		21:30	107	6.6	0.6	0.4	0.2	0	3	4	4	5
	09-oct	09:51	105	6.39	0.81	0.61	0.41	0.21	3	3	4	4
		22:09	101	6.33	0.87	0.67	0.47	0.27	3	3	4	4
	10-oct	10:29	95	5.98	1.22	1.02	0.82	0.62	2	2	3	3
		22:47	89	5.69	1.51	1.31	1.11	0.91	1	2	2	3
Grande marée du 03/11 au 08/11 Coeff max 108	03-nov	05:42	85	5.06	2.14	1.94	1.74	1.54	1	1	1	1
		17:59	92	5.49	1.71	1.51	1.31	1.11	1	1	2	2
	04-nov	06:25	98	5.82	1.38	1.18	0.98	0.78	2	2	3	3
		18:43	102	6.15	1.05	0.85	0.65	0.45	2	3	3	4
	05-nov	07:07	106	6.35	0.85	0.65	0.45	0.25	3	3	4	4
		19:27	108	6.52	0.68	0.48	0.28	0.08	3	4	4	4
	06-nov	07:49	108	6.57	0.63	0.43	0.23	0.03	3	4	4	4
		20:09	107	6.56	0.64	0.44	0.24	0.04	3	4	4	4
	07-nov	08:30	104	6.46	0.74	0.54	0.34	0.14	3	3	4	4
		20:52	100	6.21	0.99	0.79	0.59	0.39	3	3	3	4
	08-nov	09:11	95	6.01	1.19	0.99	0.79	0.59	2	3	3	3
		21:35	88	5.54	1.66	1.46	1.26	1.06	1	2	2	2

Niveau de surveillance	Surcote pouvant causer une submersion de la RD
1	> 1,5 m
2	1,0 à 1,5 m
3	0,5 à 1,0 m
4	< 0,5 m
5	Pas de surcote

Illustration 45 – Exemple de calcul de niveaux de surveillance pour la submersion de la route RD768 pour les marées de coefficient supérieur à 105 pour l’année 2021 (colonnes de gauche) en fonction des surcotes qui pourraient engendrer une submersion de la route (colonnes du milieu) ; les niveaux de surveillance (colonnes de droite) sont établis pour différentes élévations du niveau de la mer afin de visualiser l’augmentation de fréquence des alertes avec le changement climatique.

3.5. EVOLUTIONS DU CORDON DUNAIRE DE LA ROCHE MORIN

Les données de l'atlas de la géomorphologie du littoral en Bretagne, produit par le BRGM (Schroëtter et Blaise, 2015 ; Le Roy et al., 2020) comprennent entre autres les éléments pour une analyse diachronique de la position du trait de côte sur les côtes meubles entre les années 1950 et la fin des années 2000.

Ces données (Illustration 46) montrent une relative stabilité de la partie Ouest du cordon dunaire, un recul de la partie centrale (à une vitesse qui pourrait être de l'ordre de -14 cm/an sur la période 1952-2008) et une tendance à l'accrétion sur la partie Est (à une vitesse qui pourrait être de l'ordre de +9 cm/an sur la période 1952-2008). L'analyse de photographies plus récentes (Illustration 46) montre toutefois que les parties centrale et Est ont subi un recul marqué entre 2008 et 2012, puis qu'une accrétion marquée s'est produite entre 2012 et 2018, conduisant dans la partie Ouest à un trait de côte significativement plus avancé que sur les autres images disponibles, tandis que les parties centrale et Est se retrouvent dans une situation intermédiaire entre 1952 et 2008.

Afin d'estimer la capacité du massif dunaire à éviter l'apparition d'une brèche, une estimation du stock sédimentaire de la dune a été réalisée (à partir de profils topographiques issus des données topographiques du RGE Alti). D'après la méthode FEMA (1995), qui s'appuie sur une répartition des volumes de dune érodés sur le profil de plage et sur des séries d'observation post-tempête, un événement centennal peut éroder 50 m² (ou 540 pieds carrés) de sédiments dans un profil de dune (à calculer sur le profil initial comme le volume de sédiments disponible au dessus du niveau centennal statique et jusqu'à la crête de la dune, Illustration 47). L'analyse de 6 profils (Illustration 48) issus de la topographie RGE Alti du massif dunaire de la Roche Morin montre toutefois que les stocks sédimentaire du cordon dunaire sont assez largement inférieurs à ce seuil de 50 m² (Illustration 49), puisque le stock sédimentaire situé au dessus du niveau centennal (même pris sur l'ensemble du cordon dunaire) s'étale entre quelques mètres carrés et une trentaine de mètres carrés. La rupture du cordon dunaire lors d'un tel évènement apparaît donc comme possible.

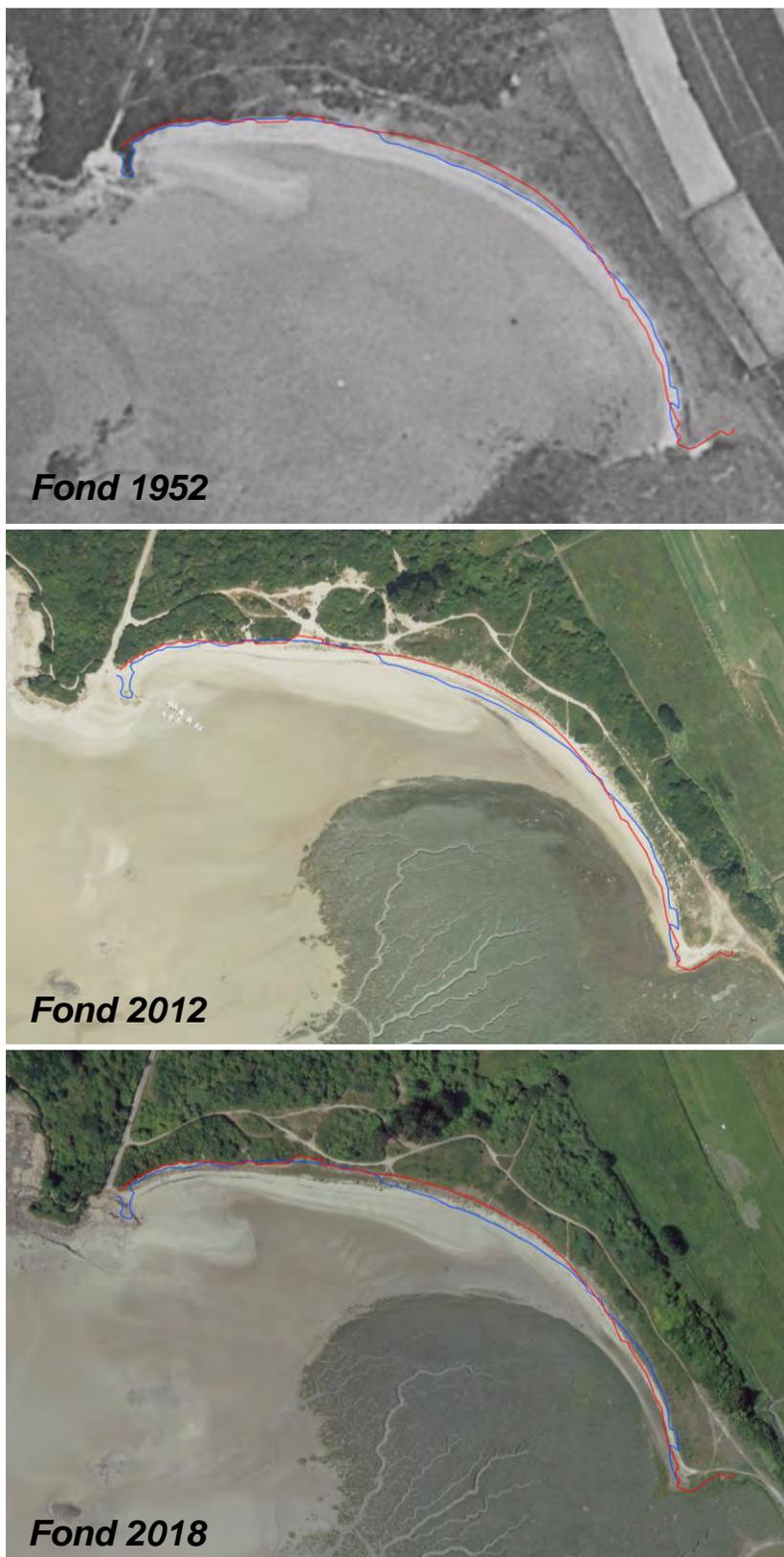


Illustration 46 – Position du trait de côte au niveau du cordon dunaire de la Roche Morin en 1952 (en bleu) et en 2008 (en rouge), sur fond de photographie aérienne orthorectifiée de 1952 en haut, et d'orthophotographies de 2012 au milieu et de 2018 en bas (d'après les données de Schroëtter et Blaise, 2015).

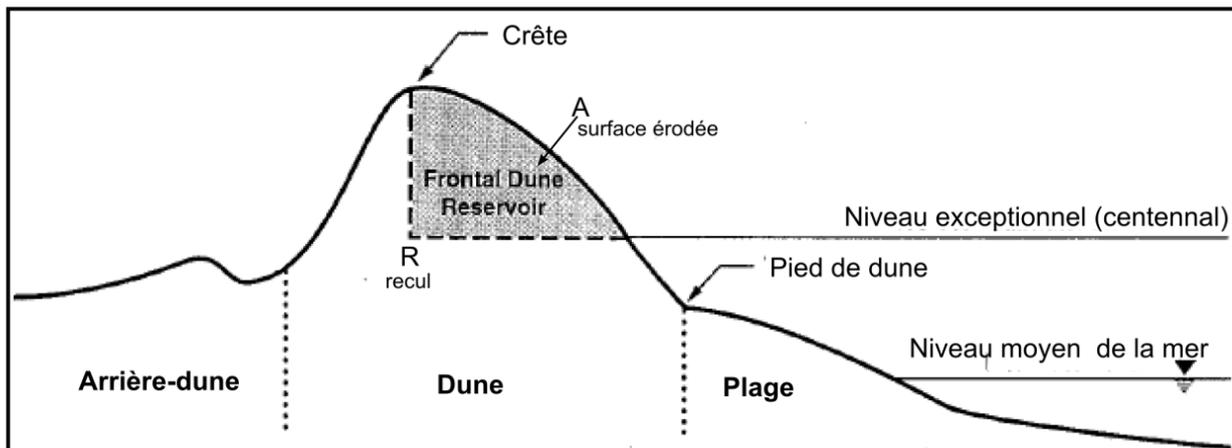


Illustration 47 - Représentation du calcul du volume du stock maximal mobilisable par un événement caractérisé par un niveau d'eau centennal, valeur limite avant disparition de la dune (Source : FEMA, 1995).



Illustration 48 – Position des 6 profils analysés sur le cordon dunaire de la Roche Morin.

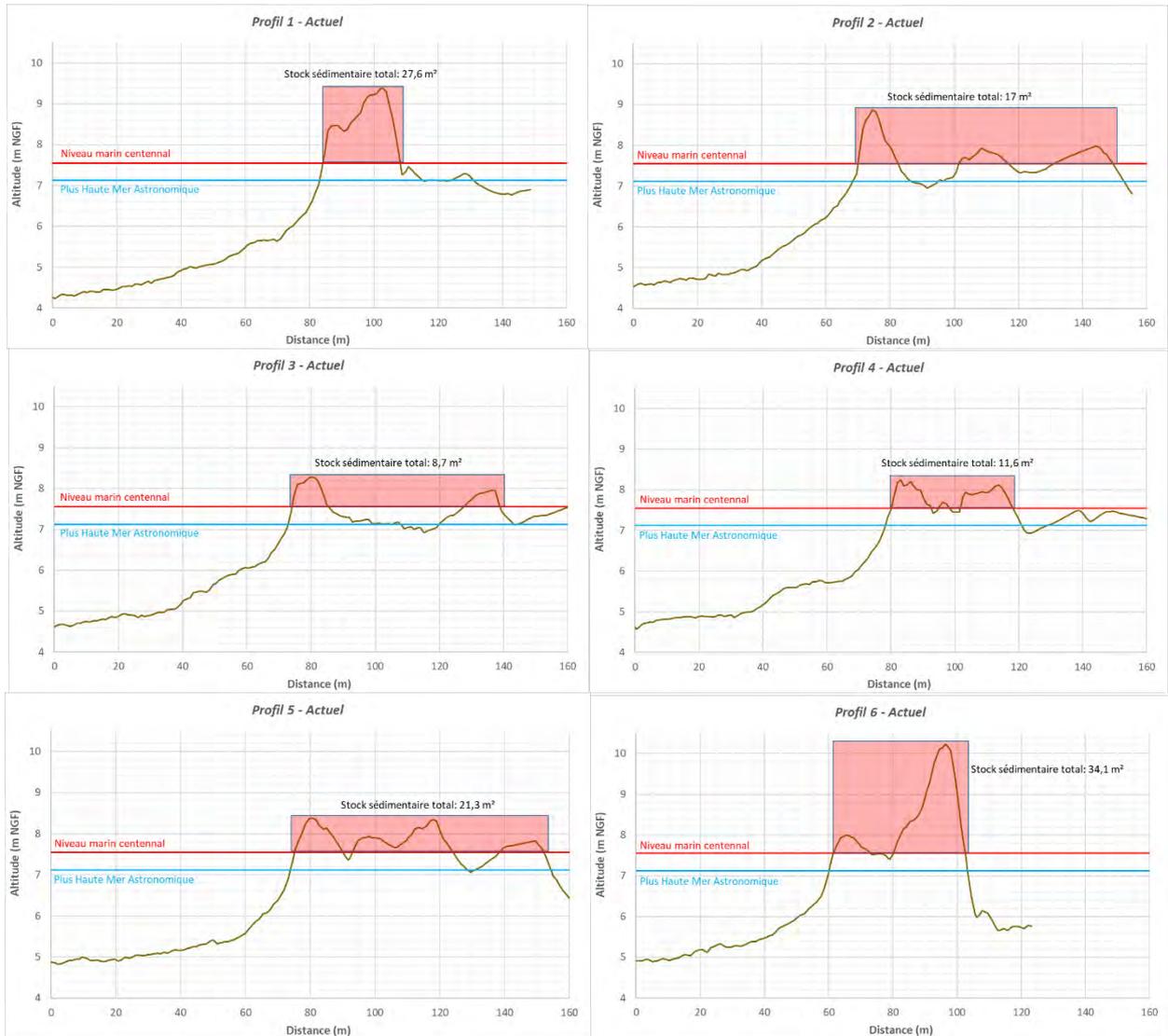


Illustration 49 – Vue des 6 profils topographiques analysés sur le cordon dunaire de la Roche Morin (d'après les données du RGE Alti du début des années 2010) et estimation des stocks sédimentaires totaux.

4. Simulation numérique de la submersion marine

Les éléments disponibles (cf. paragraphes 1.1 et 3) montrent que la submersion sur les polders de Lancieux et Ploubalay 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 n'interviennent donc que très peu, hormis leur rôle dans la création de ces brèches.

Il a donc été choisi de mettre en place un modèle de submersion par débordement, de manière à avoir des estimations réalistes de la submersion et des écoulements dans les polders. En effet, l'approche « statique », telle que présentée au paragraphe 3.3, reste très approximative, puisqu'elle ne prend pas en compte la dynamique des phénomènes, et notamment la durée limitée de la submersion sous l'effet de la marée et les écoulements à terre (Illustration 50). Cette approche par modélisation permettra donc d'estimer de façon réaliste les zones submersibles et l'impact de brèches dans les digues des polders.

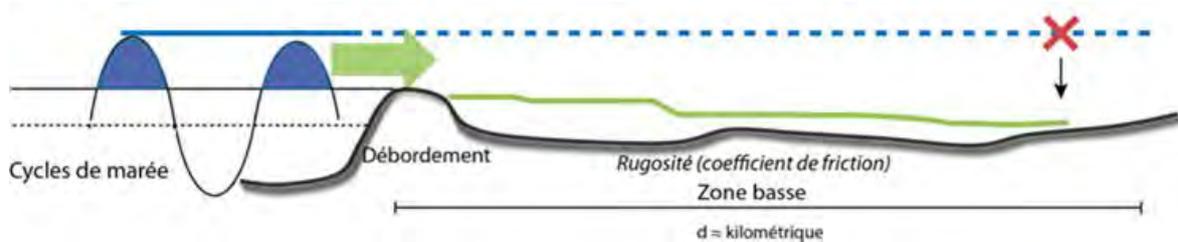


Illustration 50 - Schéma de principe de la méthodologie employée pour la propagation de la submersion marine : le niveau marin de référence (bleu continu) n'est pas simplement projeté sur la topographie (bleu pointillé) mais bien propagé suivant une dynamique de submersion (vert).

4.1. MODELE ET IMPLANTATION

4.1.1. Le modèle MARS

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 ainsi que l'équation de dispersion-diffusion d'un élément transporté, dans le plan horizontal. 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).

4.1.2. Emprise et résolution spatiale du domaine

La première étape est de définir le domaine de calcul qui sera utilisé par le modèle MARS pour simuler les niveaux marins et la submersion associée. Ce domaine de calcul est défini en projection WGS 84 (code EPSG 4326).

Dans certains cas spécifiques, et notamment dans des estuaires ou dans certaines baies assez fermées, des phénomènes d'écrêtage peuvent se produire lors de submersions marines : le volume d'eau déversé dans les zones basses à terre est alors tellement important que le niveau marin dans la zone « fermée » (estuaire ou baie) ne suit plus le niveau marin plus au large, car la connexion de la zone fermée au large ne permet pas de débits assez importants pour compenser le déversement d'eau à terre. C'est par exemple ce qui a été observé sur le marégraphe de Rochefort (17), dans l'estuaire de la Charente, pendant la tempête Xynthia, et qui a été montré par la modélisation par Bertin et al. (2014).

Afin de pouvoir capturer ce phénomène s'il devait se produire en Baie de Lancieux, mais aussi pour limiter d'éventuels effets de bords, l'emprise du domaine utilisé pour les simulations a été volontairement considéré comme plus étendu que la zone d'étude : il inclut l'intégralité de la Baie de Lancieux, Saint-Jacut-de-la-Mer, et s'étend au large des Hébihens et de l'île Agot (Illustration 51).



Illustration 51 --- Emprise utilisée pour les simulations numériques de submersion (cadre rouge).

Les simulations n'ont toutefois pas montré d'effet d'écrêtage au niveau de la Baie de Lancelieux. Par la suite, seuls seront illustrés les résultats au niveau de la zone d'étude, bien que des submersions significatives aient été simulées ailleurs, notamment au niveau de Saint-Jacut-de-la-Mer.

Les dimensions de cette emprise restant relativement modérées (de l'ordre de 8,5 km par 4,5 km), il a été choisi de réaliser un maillage à une résolution de l'ordre de 5 m. Le modèle MARS utilisant un système de double grille pour les calculs de flux suivant X et Y, les résultats de la simulation seront donc au final à une **résolution de 10 m**.

4.1.3. Données d'entrée

Topo-bathymétrie

Le support principal pour les simulations de submersion marine est un MNT topo-bathymétrique qui doit être construit sur l'emprise et la résolution souhaitées (paragraphe 4.1.2), en respectant certaines contraintes pour être adapté aux simulations de submersion, notamment au niveau des lignes de crête topographique.

- **Etape 1 : Assemblage d'un MNT topo-bathymétrique**

La première étape pour l'élaboration de ce MNT est d'assembler la topographie issue du RGE Alti à 1 m (paragraphe 2.1.1) avec les données bathymétriques issue du MNT bathymétrique de façade Atlantique du Shom (Shom, 2015), afin de prolonger les données bathymétriques au-delà de l'estran couvert par le RGE Alti (Illustration 52). Ces 2 jeux de données étant à l'origine à des résolutions différentes (1 m pour le RGE Alti et 111 m environ pour le MNT bathymétrique), cette manipulation nécessite un ré-échantillonnage des 2 jeux de données pour atteindre la résolution finale des grilles de calcul (5 m). Les données du RGE Alti sont donc ré-échantillonnées de 1 m à 5 m par la méthode du plus proche voisin, tandis que celles du MNT bathymétrique de façade sont ré-échantillonnées de 11 m à 5 m par interpolation bilinéaire, puis les 2 MNT sont assemblés en un MNT unique.

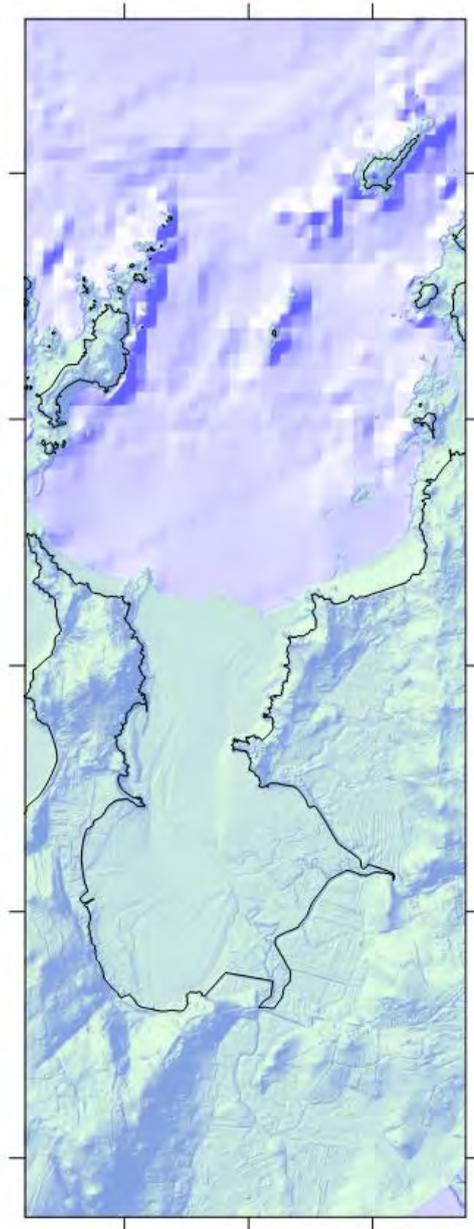


Illustration 52 --- Réalisation du MNT topo-bathymétrique par assemblage du MNT du RGE Alti (en vert) et du MNT bathymétrique de façade (en bleu).

- **Etape 2 : Prise en compte des éléments structurants**

Pour que les simulations de submersion soient les plus précises possible, il convient d'apporter un soin tout particulier à la représentation des éléments structurants qui pourraient influencer les écoulements dans la zone inondée, et notamment les digues et levées de terre qui peuvent arrêter ou détourner les écoulements. En effet, si ces ouvrages peuvent être correctement représentés dans les données d'origine (ici le RGE Alti à 1 m de résolution), le ré-échantillonnage pour arriver à la résolution de la grille de calcul (ici à 5 m) a pu modifier sensiblement la représentation de l'altitude de ces ouvrages. De plus, comme précisé au paragraphe 2.1.2, les levés topographiques mis à disposition par le Conservatoire du littoral ont montré que la hauteur de certaines digues était surévaluée par les données du RGE Alti.

A partir de méthodes de filtrages adaptées aux changements de résolution effectués, les principaux éléments structurants (type digue, levées ou talus naturels) qui avaient pu être gommés ou atténués lors de l'élaboration du MNT topo-bathymétrique ont été identifiés et digitalisés (24 lignes sur les polders de Lancieux et Ploubalay, représentées à l'illustration 53, et 2 complémentaires sur Saint-Jacut-de-la-Mer).

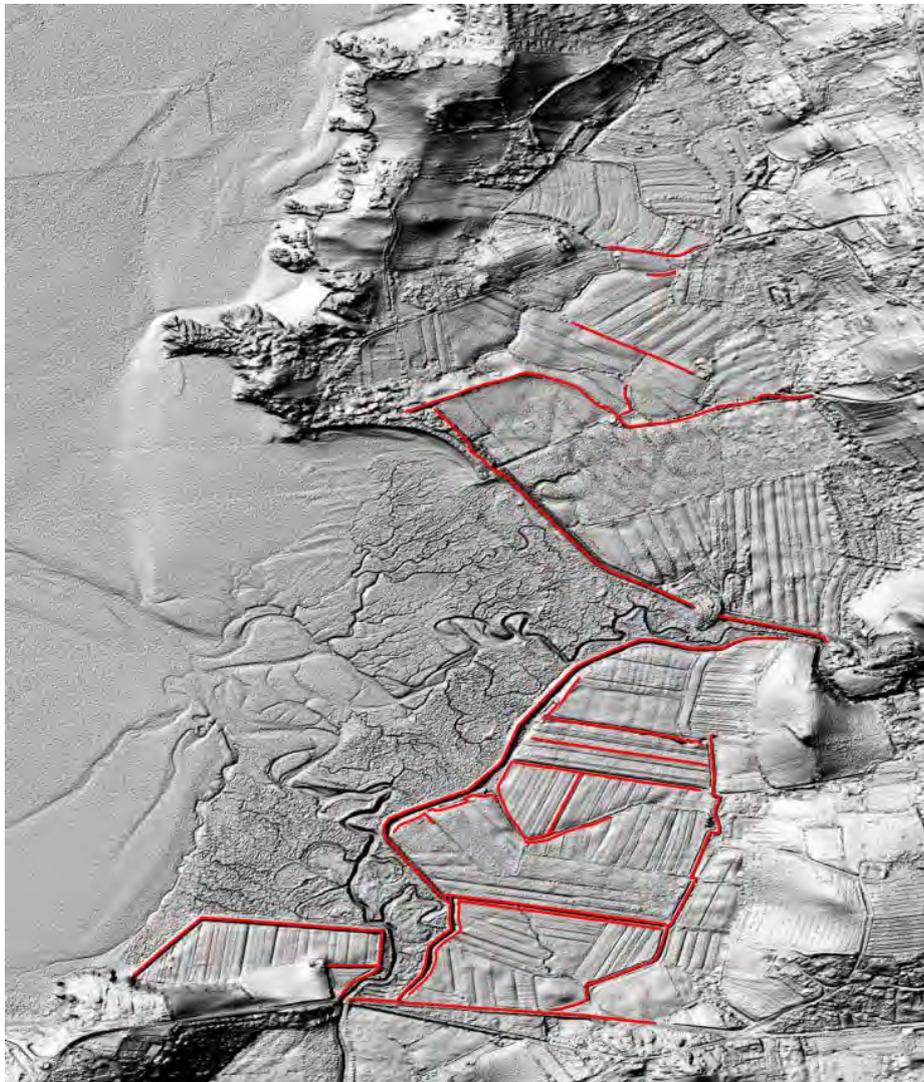


Illustration 53 – Identification des éléments structurants susceptibles d'avoir été « gommés » lors de l'élaboration du MNT topo-bathymétrique

Le MNT topo-bathymétrique est ensuite corrigé le long de ces éléments structurants afin d’attribuer aux nœuds du maillage correspondant à ces éléments l’altitude maximale, dans un voisinage correspondant au changement de résolution (ici 5 m), qui était indiquée soit dans les données d’origine (RGE Alti) si aucune autre donnée plus précise n’est disponible, soit dans les données topographiques mises à disposition par le Conservatoire du littoral.

Ceci est illustré à l’Illustration 54, qui montre l’évolution de la vue en profil de la digue de la Roche au cours de la construction du MNT : la donnée RGE Alti (en bleu) indique sur ce secteur une altitude de la digue supérieure d’une trentaine de centimètres à celle relevée par leviers topographiques (en noir). Après ré-échantillonnage à 5 m (en orange), le MNT sous-évalue la hauteur de la digue de la Roche de près de 50 cm par rapport aux leviers topographiques. La correction des éléments structurants dans le MNT final (en rouge) permet de revenir à une hauteur cohérente avec celle qui avait été mesurée sur le terrain (le très léger écart s’explique par l’attribution de la cote maximale dans le voisinage de chaque nœud, et suivant le secteur la hauteur de la digue peut varier légèrement).

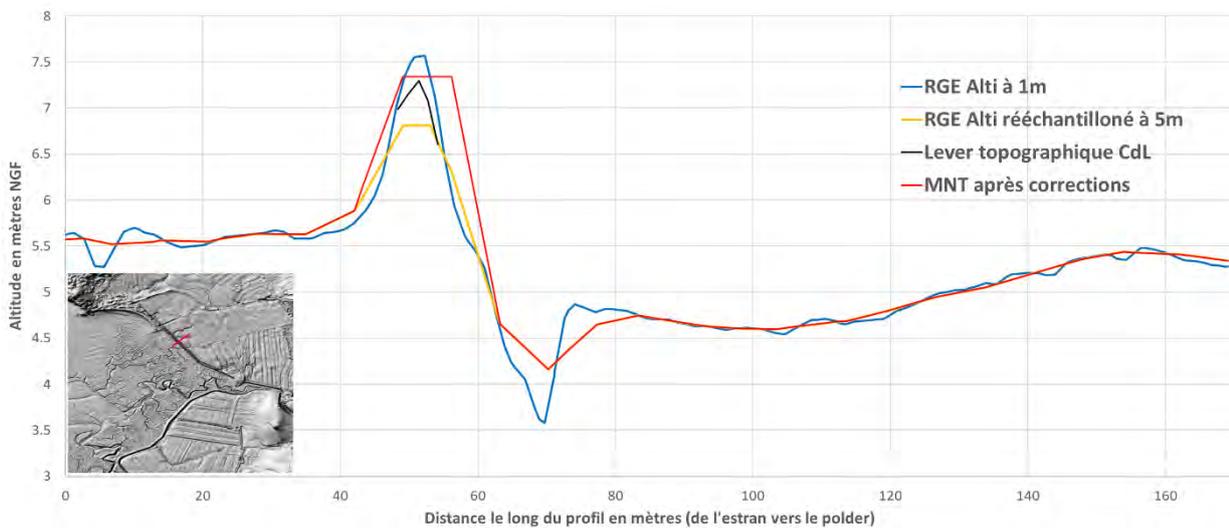


Illustration 54 – Aperçu des corrections apportées aux éléments structurants à travers l'exemple d'un profil sur la digue de la Roche.

L’Illustration 55 montre également l’effet du ré-échantillonnage du RGE Alti (gommage des éléments structurants) et de la correction de ces éléments à partir des leviers topographiques disponibles et des données du RGE Alti d’origine.

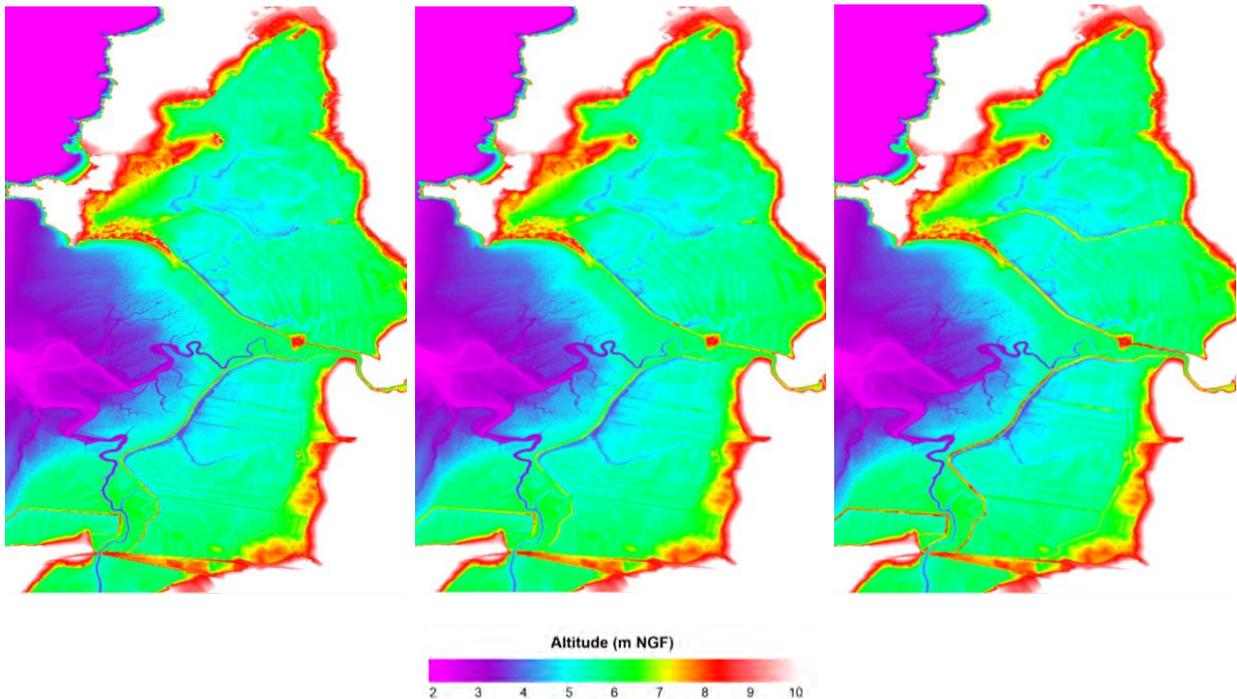


Illustration 55 – Construction du MNT : A gauche : RGE Alti à 1 m ; Au centre : après ré-échantillonnage à 5 m ; A droite : Après correction des éléments structuraux.

Coefficients de frottement

L'impact 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 (inverse du coefficient de Manning). Une représentation spatialisée de la rugosité peut être obtenue à partir d'une classification synthétique de l'occupation des sols issue des cartes d'occupation des sols. Les valeurs utilisées sont celle 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). Elles sont intégrées aux modèles afin que ceux-ci puissent reproduire de la façon la plus réaliste possible les écoulements se produisant en domaine terrestre.

Sur la baie de Lancieux, une carte des coefficients de frottement a ainsi été établie à partir des données LITTOMOS (paragraphe 2.2.1) et de la cartographie des habitats naturels du Conservatoire du littoral (paragraphe 2.2.2). Les valeurs retenues pour les coefficients de Manning varient entre $0,02 \text{ s.m}^{1/3}$ pour les secteurs présentant le moins de friction et $0,2 \text{ s.m}^{1/3}$ pour les secteurs intensément urbanisés (ce qui permet de tenir compte en moyenne de la densité des obstacles aux écoulements, comme les bâtiments, les clôtures et haies...). Cette carte des coefficients de frottement est présentée à l'illustration 56.

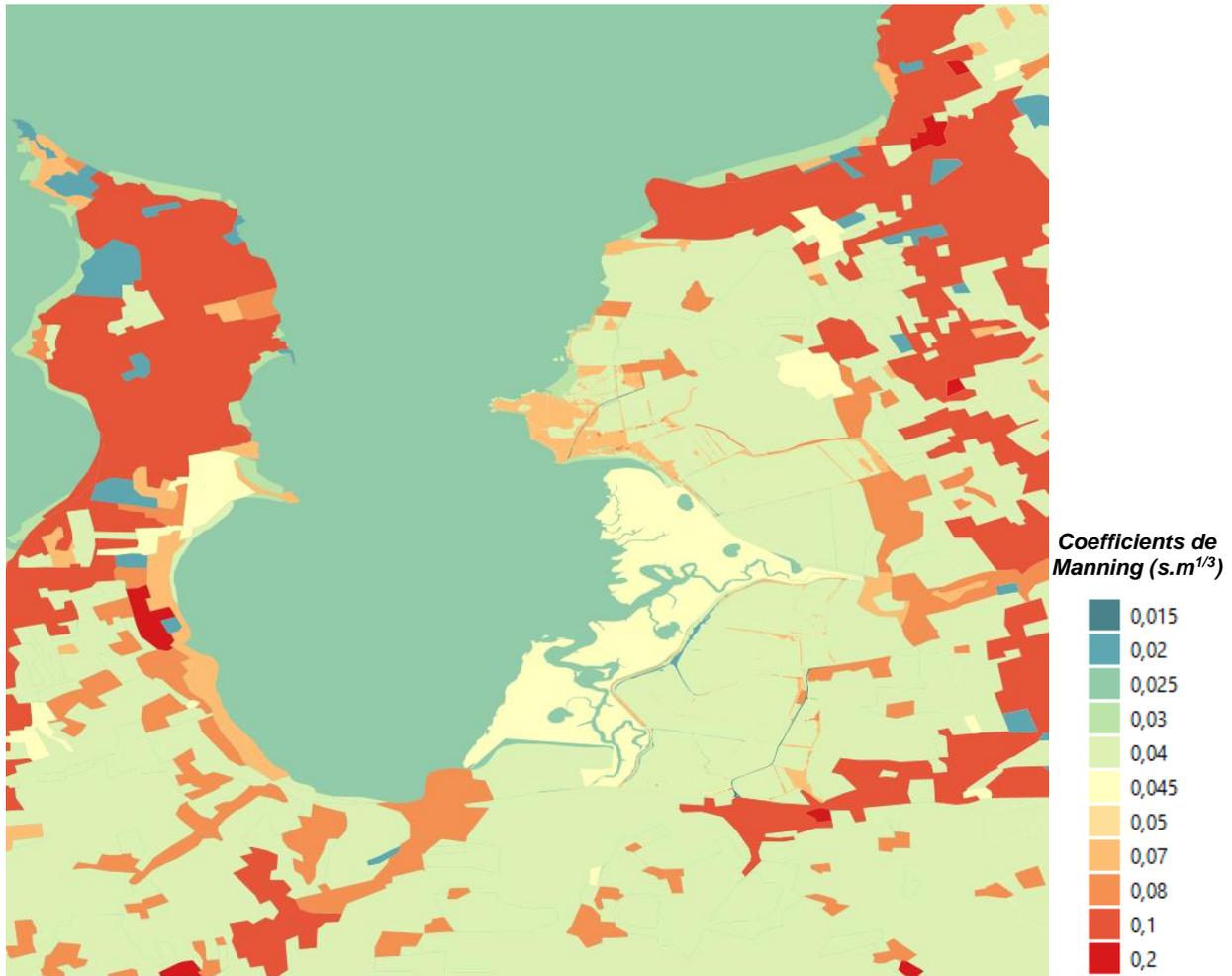


Illustration 56 – Carte des coefficients de Manning (frottements au sol) établie sur la base des données d'occupation des sols.

Connexions hydrauliques

Les connexions hydrauliques (de type buses, ponceaux, écluses, pertuits...) peuvent jouer un rôle important lors des submersions marines en permettant ou empêchant l'eau de pénétrer dans certaines zones basses protégées par des ouvrages ou par la topographie.

Sur le site d'étude, 7 buses ont été repérées et intégrées dans la modélisation : 3 buses sous la digue des Marais-Neufs, 2 sous la digue de la Roche, 1 sous la digue des Moines et 1 sous la rue des Bénédictins. Il convient de noter que 2 de ces buses n'ont aucun rôle dans les simulations car elles sont aujourd'hui fermées ou envasées, et en mauvais état.



Illustration 57 – Positions et caractéristiques des connexions hydrauliques intégrées dans les simulations.

D'autres ouvrages hydrauliques situés dans la zone mériteraient d'être analysés plus en détails, mais n'ont pas été pris en compte pour l'instant car ils sont situés en dehors du périmètre d'intervention du Conservatoire du littoral. C'est notamment le cas des 6 portes à flots du Drouet, situées sous la route départementale 768 : ces portes à flots sont constituées de panneaux de bois qui jouent naturellement le rôle de clapets anti-retour, permettant l'évacuation du Drouet à marée basse et bloquant la mer à marée haute. Ces ouvrages ne sont pas entretenus, bien qu'ils puissent jouer un rôle essentiel sur la submersion susceptible d'affecter la vallée du Drouet.

4.2. SCENARIOS ETUDIES

4.2.1. Changement climatique

L'évolution des polders de Lancieux et de Ploubalay devant se réfléchir à long terme, l'augmentation du niveau de la mer sous l'effet du changement climatique a été considérée à travers plusieurs échéances :

- Échéance actuelle (T0) : Niveau marin actuel avec les statistiques disponibles ;
- Échéance de l'ordre de 2030 : Niveau marin augmenté de 20 cm ;
- Échéance de l'ordre de 2050 : Niveau marin augmenté de 40 cm ;
- Échéance postérieure à 2050 : Niveau marin augmenté de 60 cm.

Les échéances évoquées restent approximatives compte tenu des incertitudes importantes sur l'élévation du niveau de la mer. Elles sont basées sur les estimations Bernon et al. (2017), en considérant un scénario de changement climatique « pessimiste » RCP 8.5 (Church et al. 2013) et les valeurs d'élévation vraisemblables hautes.

A titre de comparaison, on rappelle que pour un Plan de Prévention des Risques Littoraux (PPRL, visant à réglementer l'urbanisme dans les zones exposées aux risques littoraux), 2 échéances sont considérées : une échéance « actuelle », impliquant une élévation du niveau de la mer de 20 cm, et une échéance « à 100 ans », impliquant une élévation du niveau de la mer de 60 cm. Il convient toutefois de noter également qu'un PPRL considère des événements de probabilité centennale, mais que les niveaux marins sont encore augmentés (généralement de 25 cm) pour intégrer l'effet des diverses incertitudes aux différentes étapes des calculs. Cette marge au titre des incertitudes n'a pas été prise en compte dans la présente étude.

4.2.2. Conditions de forçage

En concertation avec le Conservatoire du littoral, il a été choisi d'étudier la submersion qui pourrait être causée par un événement de période de retour centennale (i.e. qui a tous les ans une chance sur 100 de se produire). Cependant, afin de ne pas se cantonner à cet événement extrême et de pouvoir estimer l'impact d'une marée de vives-eaux classique, il a été convenu de simuler plusieurs cycles de marée, basés sur une marée de vives-eaux, avec uniquement un événement centennal au cours de cette période temporelle.

Pour cela, il a été choisi d'appuyer les simulations sur la grande marée du 10 au 13 Mars 2020 (coefficient 117). 6 cycles de marée ont été considérés, le 5^{ème} constituant le cycle de marée atteignant le niveau le plus élevé (6,95 m NGF).

Les éléments disponibles ayant montré que l'impact des vagues était négligeable sur la submersion (en dehors des effets érosifs pouvant conduire à l'apparition d'une brèche, mais peu de franchissements par paquets de mer et de *wave setup*), le scénario centennal a été défini en ajoutant simplement une surcote d'une soixantaine de centimètres à ce 5^{ème} cycle de marée, de façon à atteindre le niveau centennal défini par le Shom (7,55 m NGF, cf. paragraphe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Ceci est illustré à l'illustration 58. Ainsi, les 4 premiers cycles de marée vont permettre d'estimer les impacts d'une grande marée « normale » selon les hypothèses de changement climatique et d'aménagements retenus, le cinquième cycle permettra de visualiser l'effet d'un événement extrême, tandis que le dernier cycle permettra d'appréhender le ressuyage de l'inondation. L'élévation du niveau de la mer est ensuite ajoutée directement au signal obtenu (Illustration 59).

Scénario basé sur la grande marée de Mars 2020 (coefficient 117)

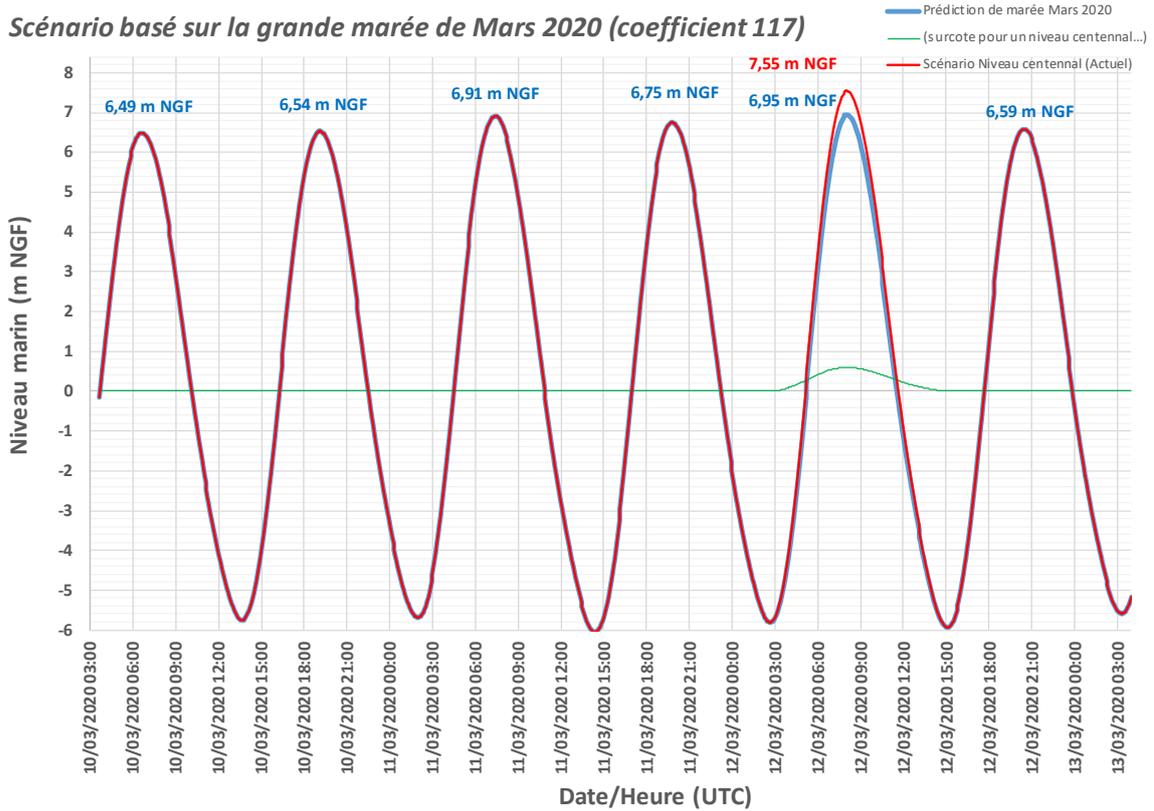


Illustration 58 – Grande marée du 10 au 13 Mars 2020 (coefficients 111 à 117) : prédiction de marée (en bleu), scénario centennial (en rouge) et surscote correspondante (en vert).

Forçage de la marée selon l'élévation du niveau de la mer

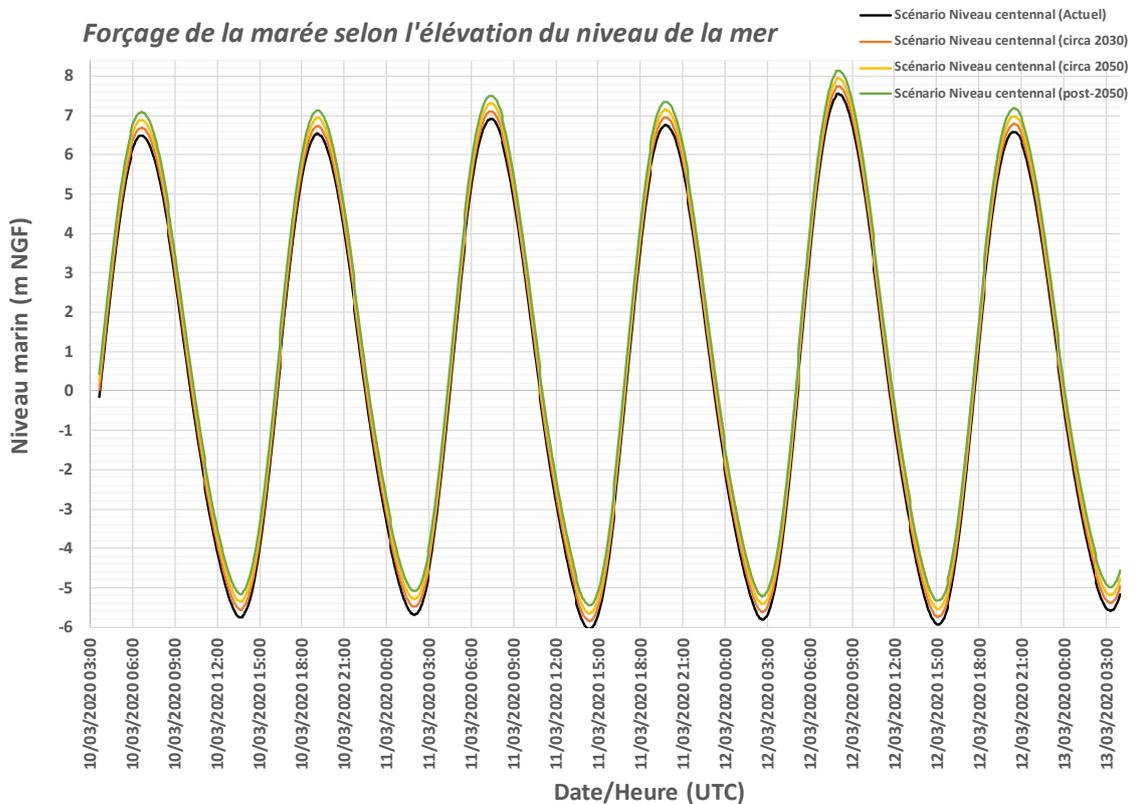


Illustration 59 – Signal de forçage de la marée utilisé pour les différentes échéances considérées.

4.2.3. Hypothèses sur les digues existantes

Plusieurs hypothèses ont été envisagées concernant les digues de la Roche et des Marais-Neufs, selon qu'elles soient considérées comme « intactes » (i.e. avec leurs caractéristiques actuelles, sans brèches) ou « endommagées » (i.e. avec une brèche).

Les principales brèches envisagées dans les digues de la Roche et des Marais-Neufs ont été localisées aux points faibles respectifs de ces digues (point bas pour la digue de la Roche et emplacement de la brèche actuelle pour la digue des Marais-Neufs). Bien que possible, la rupture du cordon dunaire de la Roche-Morin au Sud Est du Tertre Corlieu n'a pas été envisagée dans les simulations. La brèche envisagée dans la digue de la Roche correspond à un effacement de la digue sur une centaine de mètres, tandis que la brèche envisagée sur la digue des Marais-Neufs correspond à un effacement de la digue sur environ 300 m (soit la ruine totale de la partie de la digue en érosion manifeste). La localisation de ces brèches est présentée à l'illustration 60.

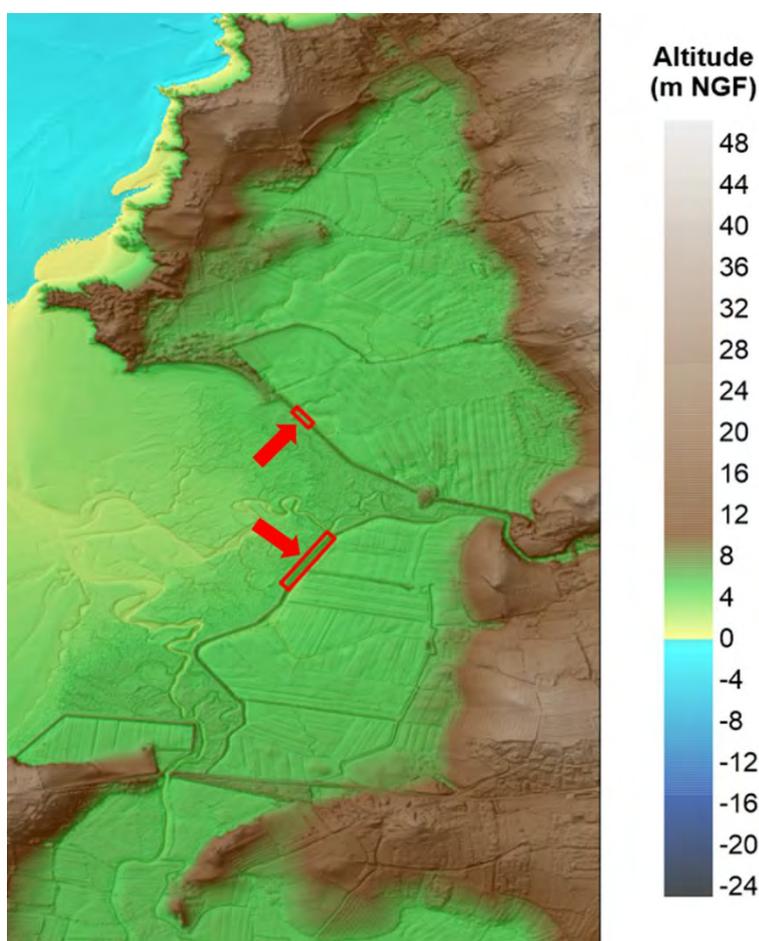


Illustration 60 – Aperçu des brèches envisagées dans les digues de la Roche et des Marais-Neufs et de leurs localisations.

Plusieurs autres scénarios de brèches ont été envisagés sur la digue des Marais-Neufs (brèches d'une dizaine à plusieurs centaines de mètres de large) ; Toutefois, seuls sont présentés ici les résultats finaux qui correspondent à la brèche de 300 m de large, notamment car les simulations menées avec d'autres hypothèses de brèche l'ont été à des fins de « gestion de crise », avec des hypothèses différentes (grandes marées de l'année 2020) et une implantation du modèle incomplète (pas de connexions hydrauliques, friction liée à l'occupation du sol moins raffinée...).

Le tableau de l'illustration 61 résume les scénarios simulés, avec les hypothèses et échéances associées.

Nom du scénario	Montée du niveau de la mer (échéance)	Brèche Digue de la Roche (Lancier)	Brèche Digue des Marais-Neufs (Ploubalay)
A_2020	T0 (actuel)		
B_2020	T0 (actuel)		X
C_2020	T0 (actuel)	X	X
B_2030	T0 + 20 cm (circa 2030)		X
C_2030	T0 + 20 cm (circa 2030)	X	X
B_2050	T0 + 40 cm (circa 2050)		X
C_2050	T0 + 40 cm (circa 2050)	X	X
B_2100	T0 + 60 cm (post 2050)		X
C_2100	T0 + 60 cm (post 2050)	X	X

Illustration 61 – Liste des scénarios retenus pour les simulations de submersion.

4.3. RESULTATS DES SIMULATIONS NUMERIQUES

Les simulations numériques permettent de connaître, en tous points du domaine et à chaque instant, les principales caractéristiques des écoulements.

Pour faciliter la lecture des résultats, des niveaux d'aléa ont été définis à partir de ces résultats, par croisement « dynamique » des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement (i.e. à chaque pas de temps et à chaque nœud de calcul, le croisement de la hauteur et de la vitesse fournit un niveau d'aléa, et la carte d'aléa qui en résulte correspond en chaque nœud au niveau d'aléa maximal atteint au cours de la simulation). La matrice de définition des niveaux d'aléa correspond à celle utilisée pour les Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL), et est issue de travaux classiques sur les inondations, basés sur la capacité d'un être humain à résister et à se déplacer dans l'écoulement (Illustration 62).

Niveau d'aléa		Vitesse de l'écoulement		
		< 0,2 m/s	0,2 à 0,5 m/s	> 0,5 m/s
Hauteur d'eau	< 0,5 m	Faible	Modéré	Fort
	0,5 à 1 m	Modéré	Modéré	Fort
	> 1 m	Fort	Fort	Très Fort

Illustration 62 – Matrice de définition des niveaux d'aléa en fonction des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulements instantanées.

Les résultats présentés ci-après correspondent aux cartes d'aléa issues de ce traitement. Les cartes correspondant aux hauteurs d'eau maximales et vitesses maximales sont présentées en annexe, tant pour des grandes marées « normales » (4 premiers cycles de marée simulés, sans surcote) que pour l'événement centennal (intégralité des 6 cycles de marée simulés dont le 5^{ème} qui intègre une surcote).

4.3.1. Scénario A_2020 (Digue de la Roche intacte, Digue des Marais-Neufs intacte, Echéance actuelle)

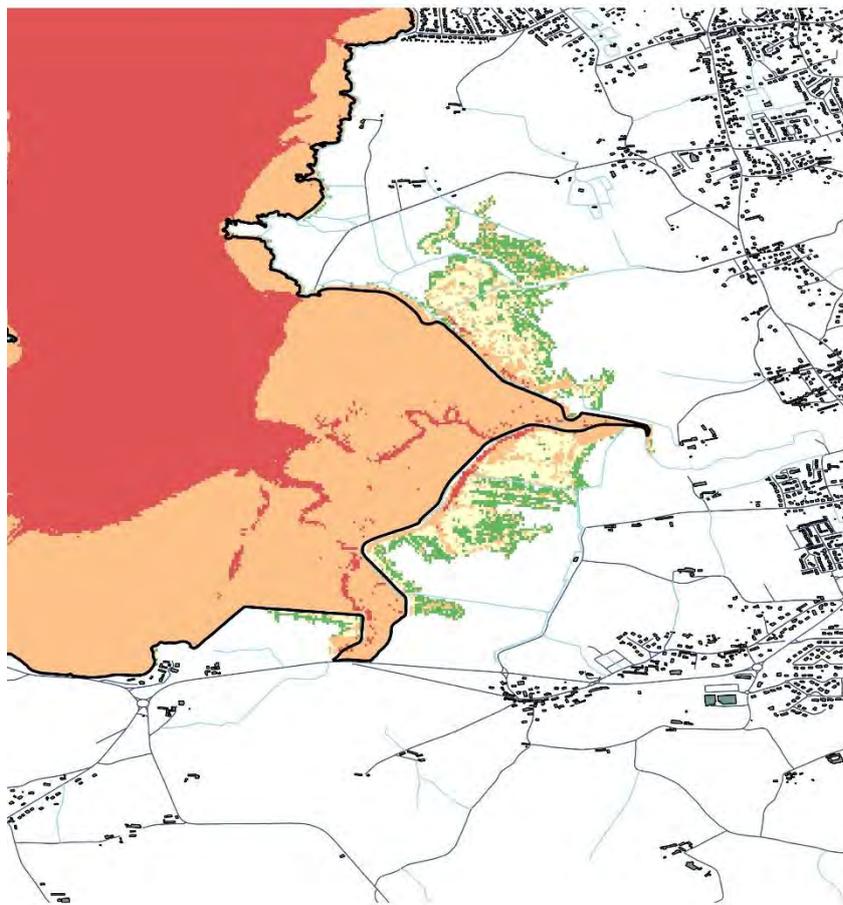
Ce scénario, qui correspond à des digues intactes à Lancieux et Ploubalay, a été réalisé avant l'apparition de la brèche sur la digue des Marais-Neufs à Ploubalay. Les échéances ultérieures ont également été simulées, mais ne sont pas présentées ici, du fait de la décision de ne pas réparer la brèche.

Le résultat de la simulation sur ce scénario (Illustration 63) montre qu'un niveau marin centennal peut provoquer une submersion limitée des 2 polders :

- A Lancieux, la submersion reste limitée et ne dépasse qu'à peine la digue des Moines, par les brèches artificielles qui y sont actuellement présentes ; parmi les enjeux identifiés, seul le terrain d'aéromodélisme serait inondé par un à quelques décimètres d'eau.
- A Ploubalay, la submersion (à la fois par surverse de la digue et par les canalisations reliant l'estran au polder) reste aussi très limitée (quelques décimètres d'eau qui n'impactent aucun des enjeux identifiés).

Il convient toutefois de rappeler que du fait de la nature des digues (matériaux meubles et friables), il est très probable qu'une surverse des digues provoquerait l'apparition d'une brèche, qui même de dimensions limitées contribuerait à une submersion plus importante.

Les résultats des simulations en ne considérant que des grandes marées « normales » (soit les 4 premiers cycles de marée, sans surcote) montrent que les digues seraient alors assez hautes pour contenir la submersion, et que l'eau ne pénètre alors dans les polders que par les buses reliant l'estran aux fossés des polder (Annexe 1).



Submersion sur les polders de Lancieux et de Ploubalay

Scénario centennal
Digue de Ploubalay intacte
Digue de Lancieux intacte

Pas de nouvelles digues

Situation actuelle

Niveau d'aléa

- Faible
- Modéré
- Fort
- Très Fort



Illustration 63 – Carte d'aléa pour le scénario centennal A_2020 (Digues de la Roche et des Marais-Neufs intactes, échéance actuelle).

4.3.2. Scénario B_2020 (Digue de la Roche intacte, Brèche dans la Digue des Marais-Neufs, Echéance actuelle)

Le résultat de la simulation sur ce scénario (Illustration 64) montre cette fois qu'un niveau marin centennal provoque une inondation importante du polder de Ploubalay, du fait de la présence de la brèche :

- A Lancieux, la submersion pour ce scénario est la même que pour le scénario A_2020, ce qui montre que les submersions des 2 polders sont indépendantes (pas d'écrêtage du niveau marin dans la baie par le déversement de la mer dans la zone basse à Ploubalay).
- A Ploubalay, le polder est largement rempli par la mer : les hauteurs d'eau dépassent globalement les 2 à 2,5 m (sauf dans le caisson Sud, plus haut et protégé par une digue interne, qui se remplit plutôt par 1,5 à 2 m d'eau). Du fait des vitesses importantes devant la brèche (1 à 1,5 m/s), le niveau d'aléa dans ce secteur est considéré comme très fort. La totalité des enjeux identifiés sont submergés, avec des hauteurs d'eau variables :
 - 0,80 à 1,90 m sur la route communale du polder,
 - 1,40 à 1,60 m à la station de relevage,
 - 1,10 à 1,30 m à la maison du polder,
 - 0,10 à 0,60 m à la maison de la Ville-es-Prêtres,
 - moins de 0,4 m d'eau sur la route départementale RD 768.

Les résultats montrent que cette brèche de 300 m dans la digue des Marais-Neufs à Ploubalay suffit pour que le niveau marin dans le polder de Ploubalay soit le même que celui de la baie : le polder est donc parfaitement rempli, et il est possible de s'appuyer sur des projections « statiques » du niveau marin sur la topographie pour estimer la submersion. Les simulations préliminaires réalisées à des fins de « gestion de crise » ont montré que cet effet apparaissait déjà pour une brèche de 100 m de large, mais pas encore pour une brèche de 20 m de large, insuffisante pour permettre un débit suffisant.

Les résultats des simulations en ne considérant que des grandes marées « normales » (soit les 4 premiers cycles de marée, sans surcote) montrent une submersion à Ploubalay assez similaire, mais impliquant des hauteurs d'eau moins importantes de 50 à 60 cm au droit des enjeux, ce qui implique que la maison de la Ville-es-Prêtres et la route RD 768 seraient cette fois épargnées (Annexe 2).

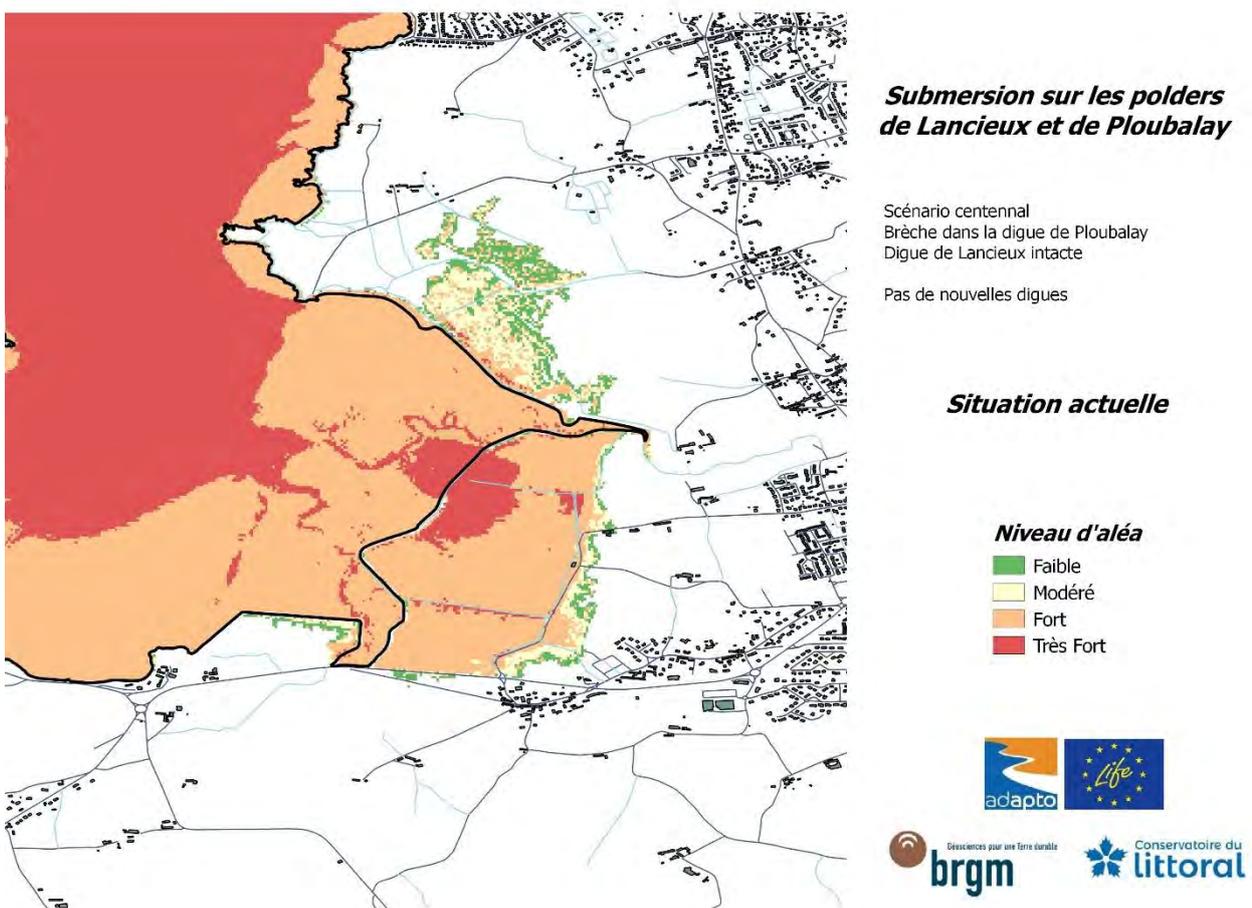


Illustration 64 – Carte d'aléa pour le scénario centennal B_2020 (Digue de la Roche intacte, brèche dans la digue des Marais-Neufs, échéance actuelle).

Les résultats de ce scénario ont également été utilisés pour estimer la durée du ressuyage de l'inondation dans le compartiment Sud du polder de Ploubalay, contre la Route Départementale 768. En effet, après l'apparition de la brèche, les premières grandes marées qui ont permis à la mer d'inonder ce compartiment (par surverse de la digue interne au polder, qui sépare le compartiment Sud) ont permis de constater que le ressuyage était très long et conduisait à une inondation durable à proximité de la route et des habitations, ce qui s'explique par le fait que l'eau ne puisse s'évacuer que par la buse A1 (Illustration 57), reliant sous la digue le caisson Sud à

l'estran. L'analyse des marées descendantes dans la simulation (Illustration 65) ont permis de déterminer que :

- la vidange de la partie principale du polder s'effectue par surverse de la brèche et par la buse A3 (la buse A2 étant fermée, Illustration 57) ; très rapide au début, cette vidange se ralentit progressivement pour atteindre une vitesse assez stable de l'ordre de -2 cm/h ;
- la vidange du compartiment Sud s'effectue en 2 temps :
 - o tant que le niveau d'eau dans le compartiment Sud est supérieur à celui de la digue interne qui l'isole du reste du polder (soit environ 6,10 m NGF), la vidange du compartiment s'effectue à la fois par surverse de la digue interne (vers le reste du polder) et par la buse A1, et atteint assez rapidement une vitesse de l'ordre de -1 cm/h ;
 - o quand le niveau d'eau dans le compartiment n'est plus suffisant pour avoir une surverse par-dessus la digue interne, seule la buse A1 contribue à la vidange, avec une vitesse qui a été estimée à environ -0,5 à -0,6 cm/h.

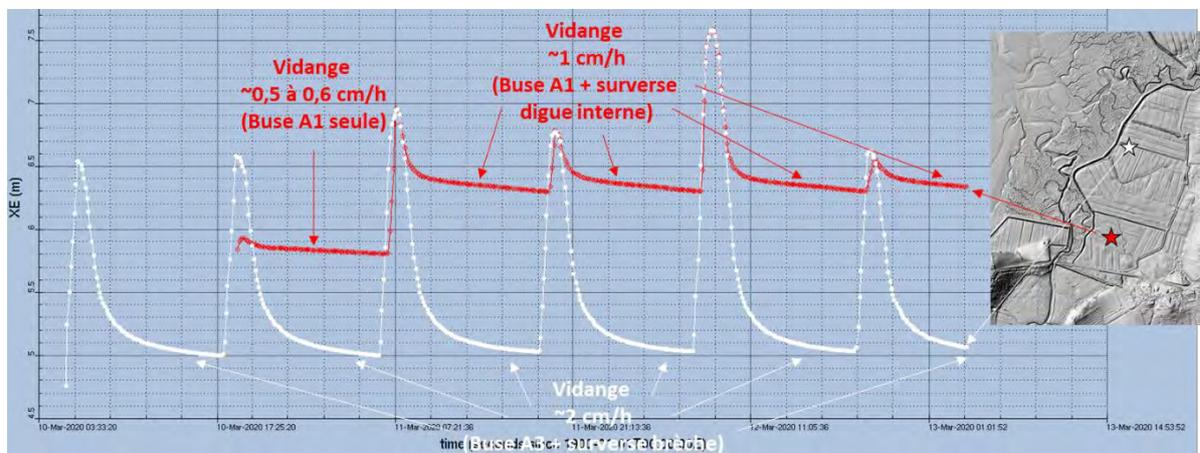


Illustration 65 – Evolution des niveaux d'eau dans la partie principale du polder de Ploubalay (en blanc) et dans le compartiment Sud du polder (en rouge) pendant la simulation du scénario B_2020, avec estimation des vitesses de vidange associées.

Si l'on fait l'hypothèse simplificatrice que le polder a été rempli à la pleine-mer jusqu'au niveau centennal (7,55 m NGF), on peut alors estimer que la première phase de vidange du compartiment Sud (surverse + buse) va prendre une trentaine d'heures, puis que l'assèchement du compartiment par la buse seule va prendre 1 à plus de 5 jours selon l'endroit considéré. Cette estimation indique donc au final que la vidange du compartiment Sud pourrait prendre un peu plus de 6 jours, hors canaux de drainage (l'hypothèse simplificatrice d'un remplissage brutal suivi d'une longue phase de vidange est toutefois très optimiste, car il est probable que plusieurs marées successives vont contribuer à l'inondation du polder, rallongeant d'autant la durée de l'inondation). Ces estimations de durée de ressuyage peuvent être représentées sous forme cartographique, selon l'altitude des différents points du compartiment Sud (Illustration 66).

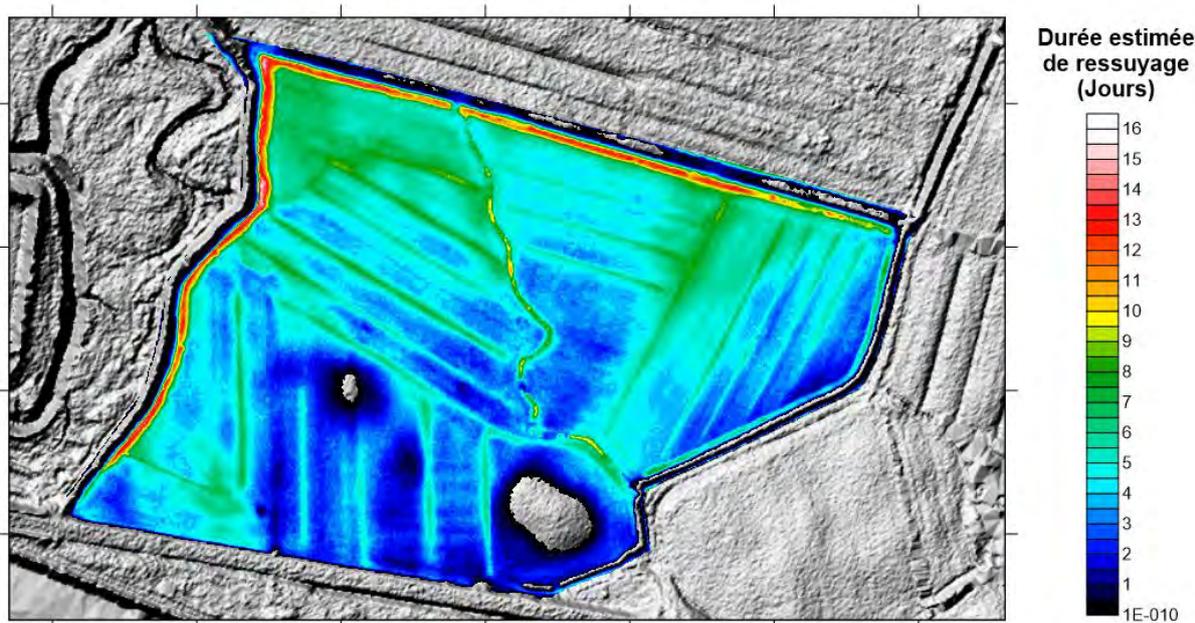


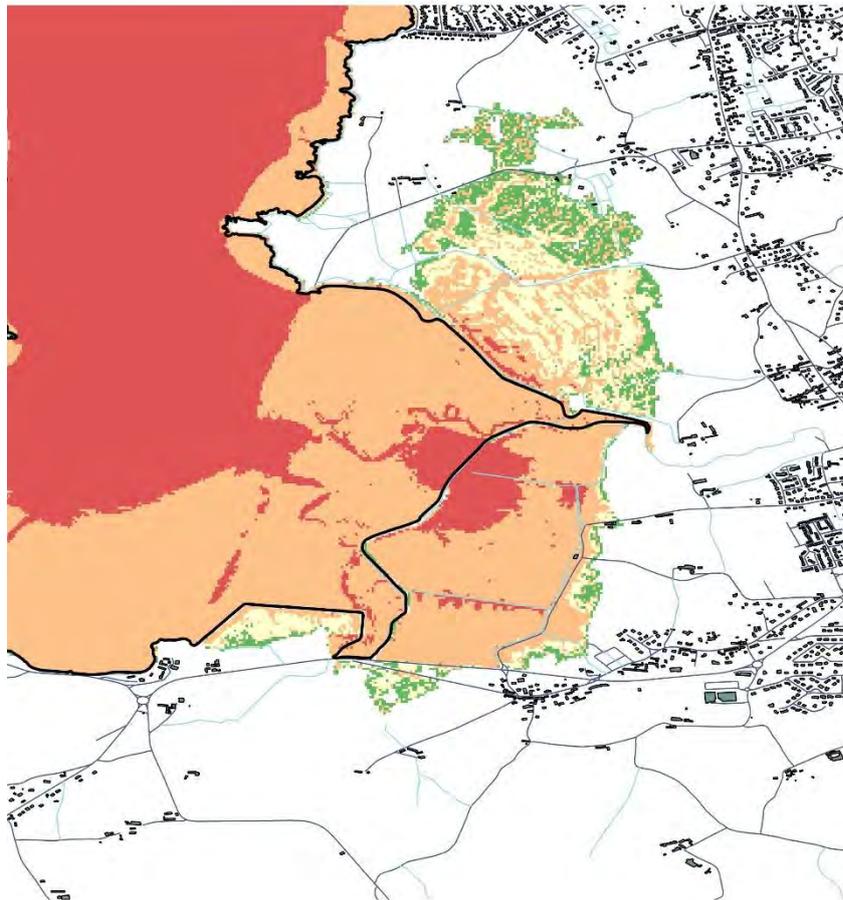
Illustration 66 – Estimation des durées de ressuyage dans le compartiment Sud du polder de Ploubalay en partant d'un remplissage au niveau marin centennal.

4.3.3. Scénario B_2030 (Digue de la Roche intacte, Brèche dans la Digue des Marais-Neufs, Echéance circa 2030)

Le résultat de la simulation sur ce scénario (Illustration 67) montre, comme pour le scénario B_2020, une inondation importante du polder de Ploubalay et une inondation restant limitée du polder de Lancier :

- A Lancier, la submersion pour ce scénario devient plus importante que pour le scénario B-2020 : la mer déborde par-dessus la digue de la Roche, sans toutefois que les niveaux n'aient le temps de s'équilibrer de part et d'autres de la digue (l'altitude maximale du plan d'eau derrière la digue reste inférieure d'environ 1,70 m à la cote maximale atteinte par la mer) ; l'eau passe beaucoup plus significativement au Nord de la digue des Moines et franchit par conséquent de manière limitée la rue des Bénédictins. Les hauteurs d'eau deviennent conséquentes entre la digue de la Roche et la digue des Moines (généralement supérieures à 1 m), et significatives entre la digue des Moines et la rue des Bénédictins (généralement quelques décimètres à localement plus de 1 m ; le camping du Villeu et le centre équestre subissent une inondation par quelques décimètres d'eau). Au Nord de la rue des Bénédictins, les hauteurs d'eau restent de l'ordre de quelques décimètres, et n'affectent pas les enjeux situés plus au Nord.
- A Ploubalay, du fait du remplissage total du polder par la brèche, la submersion est directement amplifiée de 20 cm (correspondant à l'élévation du niveau de la mer) : les hauteurs d'inondation sont donc 20 cm plus élevées que celles obtenues au scénario B_2020, et l'emprise inondée se trouve très légèrement augmentée, en lien avec le contrôle topographique de la submersion sur les coteaux. On peut toutefois noter que la submersion plus significative de la route départementale RD768 s'accompagne d'une légère surverse par l'eau du polder, qui parvient à franchir le terre-plein et l'ancienne route pour se déverser dans la vallée du Drouet avec des hauteurs d'eau qui restent très limitées (inférieures à 40 cm).

Les résultats des simulations en ne considérant que des grandes marées « normales » (soit les 4 premiers cycles de marée, sans surcote) montrent des résultats similaires à ceux du scénario B_2020 sous les mêmes hypothèses : la digue de la Roche suffit encore à protéger le polder de Lanciaux (l'eau ne rentre que par la buse A4, et reste donc cantonnée aux fossés et aux zones très basses) sans atteindre la digue des Moines, tandis que le polder de Ploubalay est inondé de manière importante du fait de la brèche, avec des hauteurs d'eau environ 20 cm plus importantes que celles obtenues au scénario B_2020 du fait de l'élévation du niveau de la mer (Annexe 3).



Submersion sur les polders de Lanciaux et de Ploubalay

Scénario centennal
Brèche dans la digue de Ploubalay
Digue de Lanciaux intacte

Pas de nouvelles digues

Situation circa 2030 (T0 + 20 cm)

Niveau d'aléa

- Faible
- Modéré
- Fort
- Très Fort



Illustration 67 – Carte d'aléa pour le scénario centennal B_2030 (Digue de la Roche intacte, brèche dans la digue des Marais-Neufs, échéance circa 2030).

4.3.4. Scénario B_2050 (Digue de la Roche intacte, Brèche dans la Digue des Marais-Neufs, Echéance circa 2050)

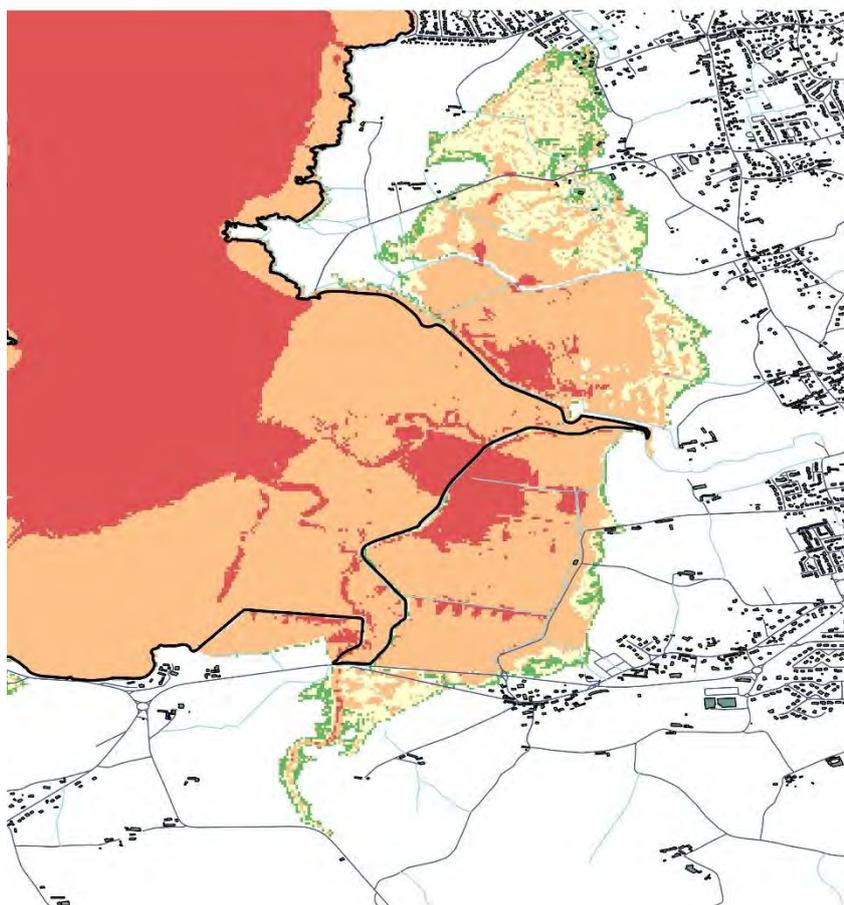
Le résultat de la simulation sur ce scénario (Illustration 68) confirme que l'augmentation du niveau de la mer amplifie encore la submersion dans les 2 polders :

- A Lanciaux, la submersion devient importante : l'altitude maximale du plan d'eau derrière la digue reste encore environ 1,25 m plus bas que le niveau de la mer, et plus loin la digue des Moines contribue encore à limiter la submersion (le plan d'eau reste plus bas de près de 75 cm au Nord de la digue des Moines qu'au Sud), mais ne suffit pas à la contenir (l'eau passe notamment par les 2 brèches), et l'eau franchit par conséquent significativement la rue des Bénédictins et atteint les premières maisons au Sud du front de mer de Lanciaux. Les hauteurs d'eau peuvent dépasser 1,5 m entre la digue de la

Roche et la digue des Moines, et atteignent encore 0,5 à 1,5 m entre la digue des Moines et la rue des Bénédictins. Au Nord de la rue des Bénédictins, les hauteurs d'eau restent généralement comprises entre 0,4 et 0,7 m, les maisons les plus au Nord (au Sud du front de mer de Lancieux) pouvant être affectées par 0,2 à 0,4 m d'eau.

- A Ploubalay, du fait du remplissage total du polder par la brèche, on retrouve une submersion directement amplifiée de 40 cm (par rapport au scénario B_2020), avec des hauteurs d'inondation augmentées d'autant, et une emprise inondée légèrement augmentée. Au niveau de la route RD768, la surverse devient plus importante et entraîne une inondation limitée, mais significative, de la vallée du Drouet (hauteurs d'eau restant généralement inférieure à 0,5 m).

Les résultats des simulations en ne considérant que des grandes marées « normales » (soit les 4 premiers cycles de marée, sans surcote) montrent des résultats similaires à ceux des scénarios B_2020 et B_2030 sous les mêmes hypothèses : la digue de la Roche suffit encore à protéger le polder de Lancieux et l'eau reste cantonnée aux fossés et aux zones très basses sans atteindre la digue des Moines, tandis que le polder de Ploubalay est assez largement inondé du fait de la présence d'une brèche (Annexe 4).



Submersion sur les polders de Lancieux et de Ploubalay

Scénario centennial
Brèche dans la digue de Ploubalay
Digue de Lancieux intacte

Pas de nouvelles digues

Situation circa 2050 (T0 + 40 cm)

Niveau d'aléa

- Faible
- Modéré
- Fort
- Très Fort



Illustration 68 – Carte d'aléa pour le scénario centennial B_2050 (Digue de la Roche intacte, brèche dans la digue des Marais-Neufs, échéance circa 2050).

4.3.5. Scénario B_2100 (Digue de la Roche intacte, Brèche dans la Digue des Marais-Neufs, Echéance post 2050)

Le résultat de la simulation sur ce scénario (Illustration 69) amplifie encore la submersion sous l'effet de l'augmentation du niveau de la mer :

- A Lancieux, l'extension de la submersion est légèrement agrandie (surtout à l'Est du Tertre Corlieu) : la digue de la Roche permet encore de limiter l'altitude du plan d'eau derrière la digue (environ 0,8 m plus bas que le niveau de la mer), et la digue des Moines contribue encore, dans une moindre mesure, à limiter la submersion (le plan d'eau reste plus bas d'environ 60 cm au Nord de la digue des Moines qu'au Sud). Les hauteurs d'eau peuvent dépasser 2,5 m, voir approcher les 3 m, entre la digue de la Roche et la digue des Moines, et atteignent 1,5 m à 2 m (voire localement 2,5 m) entre la digue des Moines et la rue des Bénédictins. Au Nord de la rue des Bénédictins, les hauteurs d'eau atteignent généralement 1 à 1,5 m, et les maisons les plus au Nord (au Sud du front de mer de Lancieux) peuvent cette fois être affectées par 0,8 m d'eau.
- A Ploubalay, du fait du remplissage total du polder par la brèche, on retrouve une submersion directement amplifiée de 60 cm (par rapport au scénario B_2020), avec des hauteurs d'inondation augmentées d'autant, et une emprise inondée légèrement augmentée. Au niveau de la route RD768, la surverse devient importante et entraîne une inondation significative de la vallée du Drouet (hauteurs d'eau de quelques décimètres, mais pouvant localement approcher le mètre).

Les résultats des simulations en ne considérant que des grandes marées « normales » (soit les 4 premiers cycles de marée, sans surcote) montrent cette fois que la protection offerte par la digue de la Roche s'affaiblit, puisque l'eau qui la surverse parvient à atteindre et dépasser la digue des Moines. La submersion reste toutefois limitée, les hauteurs d'eau au Sud de la digue des Moines ne dépassant guère les quelques décimètres, et typiquement 10 à 30 cm au Nord de la digue des Moines, sans atteindre la rue des Bénédictins. Le polder de Ploubalay reste lui largement inondé du fait de la présence d'une brèche (Annexe 5).

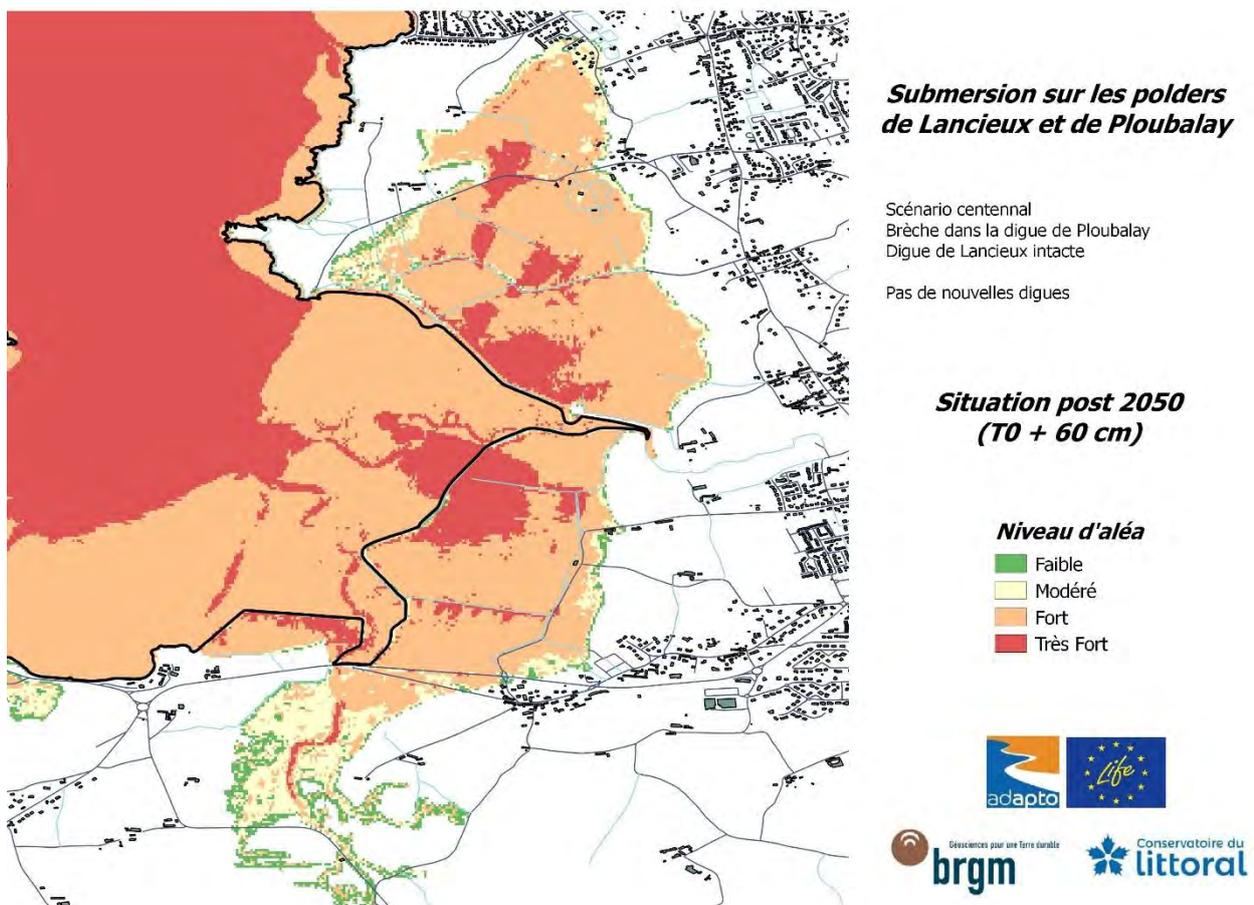


Illustration 69 – Carte d'aléa pour le scénario centennial B_2100 (Digue de la Roche intacte, brèche dans la digue des Marais-Neufs, échéance post 2050).

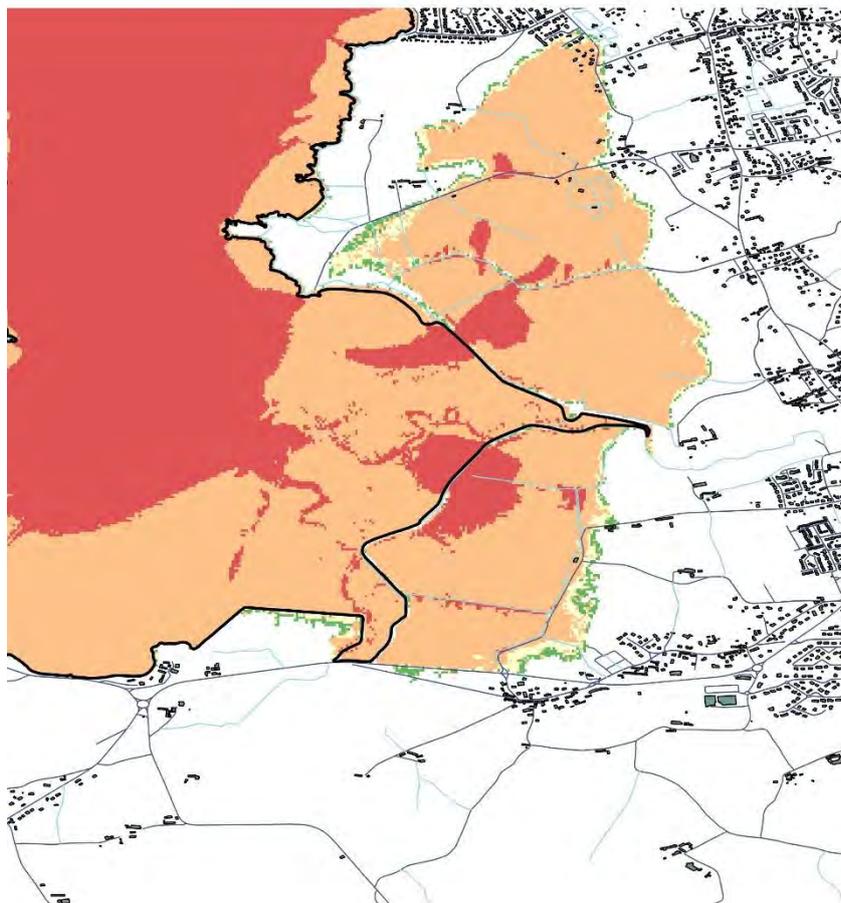
4.3.6. Scénario C_2020 (Brèche dans la Digue de la Roche, Brèche dans la Digue des Marais-Neufs, Echéance actuelle)

Le résultat de la simulation sur ce scénario (Illustration 70) montre cette fois qu'un niveau marin centennial, même sans élévation du niveau de la mer, provoque une inondation importante des 2 polders, du fait de la présence des brèches :

- A Lancieux, la submersion est cette fois très importante du fait de la brèche. La brèche reste cependant de dimensions trop limitées pour permettre un remplissage total du polder, ce qui explique que le niveau d'eau entre la digue de la Roche et la digue des Moines soit environ 20 cm plus bas que le niveau marin dans la baie (soit des hauteurs d'eau typiquement entre 1,5 et 2,5 m), tandis que le niveau d'eau au Nord de la digue des Moines est 40 à 45 cm plus bas que le niveau marin (soit des hauteurs d'eau typiquement entre 1,60 et 2,30 m entre la digue des Moines et la rue des Bénédictins, et entre 1,4 et 1,9 m plus au Nord) : le rôle protecteur des digues devient donc très réduit par la présence d'une brèche dans la digue de la Roche. Une grande partie des enjeux identifiés dans le polder de Lancieux se trouvent submergés par des hauteurs d'eau importantes :
 - o 1,70 à 2,40 m d'eau sur le terrain d'aéromodélisme ;
 - o 1,10 à 1,80 m d'eau au niveau du camping du Villeu ;

- 1,10 à 1,70 m au niveau du golf ;
 - 0,70 à 1,50 m d'eau au niveau des maisons au Sud du front de mer de Lancieux (lotissement entre le golf et le camping des Mielles) ;
 - Moins de 1,5 m d'eau au niveau du centre équestre et des maisons avoisinantes ;
 - Moins de 1,10 m d'eau au niveau des maisons les plus au Sud-Est du Tertre Corlieu (anciennes maisons-témoin).
- A Ploubalay, la submersion est la même que pour le scénario B_2020, ce qui confirme que les submersions des 2 polders sont indépendantes (pas d'écrêtage du niveau marin dans la baie par le déversement de la mer dans la zone basse à Lancieux). Les enjeux sont donc inondés avec les mêmes hauteurs d'eau que pour le scénario B_2020.

Les résultats des simulations en ne considérant que des grandes marées « normales » (soit les 4 premiers cycles de marée, sans surcote) montrent une submersion à Ploubalay logiquement similaire au même résultat avec le scénario B_2020. A Lancieux, du fait de la brèche, la submersion reste importante sous l'effet de grandes marées, bien qu'elle soit un peu moins étendue que celle provoquée par un événement centennal (mais les maisons du Sud du front de mer de Lancieux restent inondées) ; les hauteurs d'eau sont par contre sensiblement réduites, avec des enjeux inondés par des hauteurs d'eau réduites par rapport à celles de l'événement centennal d'environ 60 cm pour les enjeux les plus au Sud à 80 cm pour ceux situés au Nord de la digue des Moines et de la rue des Bénédictins (Annexe 6).



Submersion sur les polders de Lancieux et de Ploubalay

Scénario centennal
Brèche dans la digue de Ploubalay
Brèche dans la digue de Lancieux

Pas de nouvelles digues

Situation actuelle

Niveau d'aléa

- Faible
- Modéré
- Fort
- Très Fort



Illustration 70 – Carte d'aléa pour le scénario centennal C_2020 (Brèches dans les digues de la Roche et des Marais-Neufs, échéance actuelle).

4.3.7. Scénario C_2030 (Brèche dans la Digue de la Roche, Brèche dans la Digue des Marais-Neufs, Echéance circa 2030)

Le résultat de la simulation sur ce scénario (Illustration 71) montre, comme pour le scénario C_2020, une inondation importante du polder de Ploubalay et une inondation restant limitée du polder de Lancieux :

- A Lancieux, la protection relative offerte par la digue des Moines est encore réduite, puisque la différence d'altitude entre les plans d'eau au Sud et au Nord de cette digue se réduit cette fois à moins de 10 cm. Par conséquent, l'emprise de la zone inondée est légèrement augmentée par rapport au scénario C_2020, et surtout les hauteurs d'eau augmentent d'une vingtaine de centimètres au Sud de la digue des Moines (valeur équivalente à l'élévation du niveau de la mer) et d'une quarantaine de centimètres au Nord de cette même digue du fait de sa surverse plus marquée. Cela se traduit par des hauteurs d'eau de 1,5 à 3 m entre la digue de la Roche et la rue des Bénédictins, et pouvant encore dépasser les 2 m au Nord de la rue des Bénédictins (plus de 1,5 m d'eau au niveau des maisons du Sud du front de mer de Lancieux).
- A Ploubalay, du fait de l'indépendance des submersions entre les 2 polders, la submersion est la même que pour le scénario B_2030 : submersion amplifiée de 20 cm, emprise inondée légèrement augmentée, submersion plus significative de la route départementale RD768 et légère surverse dans la vallée du Drouet...

Les résultats des simulations en ne considérant que des grandes marées « normales » (soit les 4 premiers cycles de marée, sans surcote) montrent des résultats similaires à ceux du scénario C_2020 sous les mêmes hypothèses : les hauteurs d'eau dans le polder de Lancieux sont augmentées de l'ordre de 25 cm (du fait des surverses légèrement amplifiées), tandis que le polder de Ploubalay est inondé de manière importante du fait de la brèche, avec des hauteurs d'eau identiques à celles du scénario B_2030 (Annexe 7).

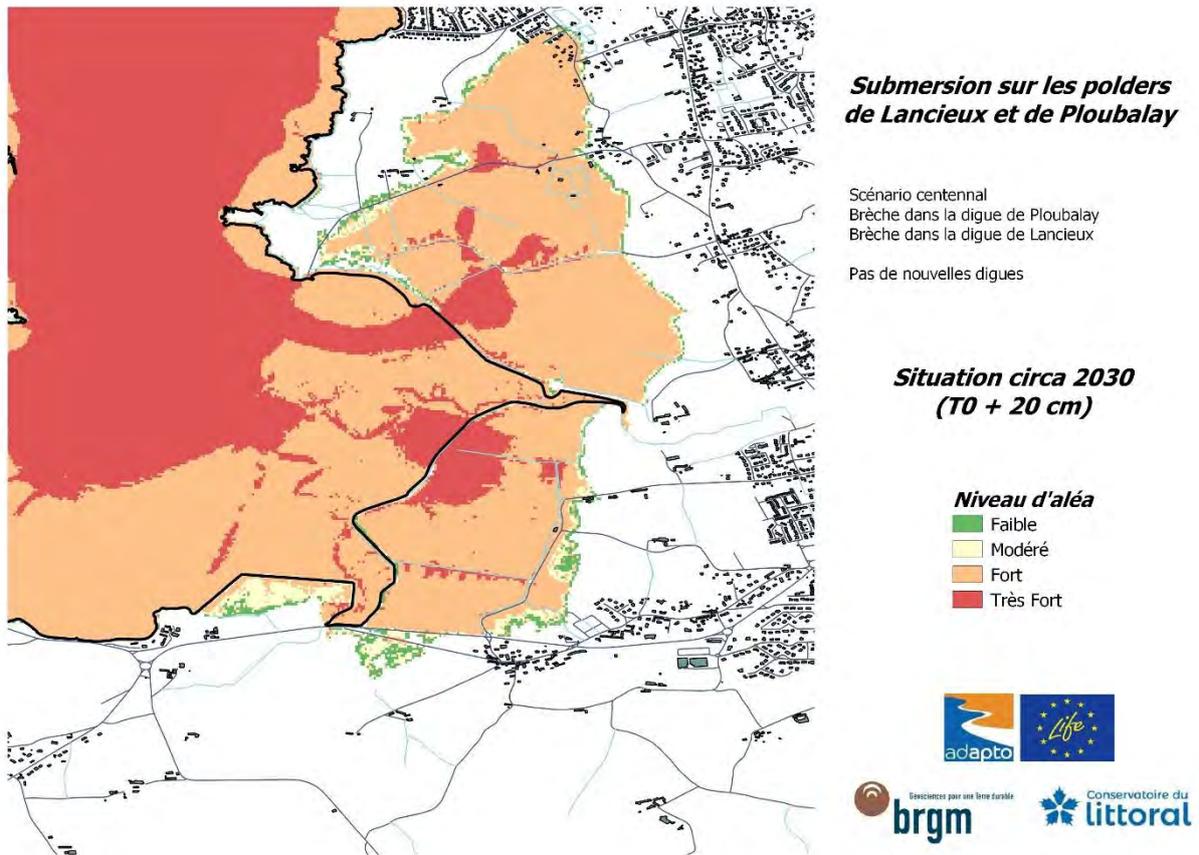


Illustration 71 – Carte d'aléa pour le scénario centennial C_2030 (brèche dans la digue de la Roche intacte, brèche dans la digue des Marais-Neufs, échéance circa 2030).

4.3.8. Scénario C_2050 (Brèche dans la Digue de la Roche, Brèche dans la Digue des Marais-Neufs, Echéance circa 2050)

Le résultat de la simulation sur ce scénario (Illustration 72) confirme que l'augmentation du niveau de la mer amplifie encore la submersion dans les 2 polders :

- A Lancieux, la surverse s'amplifie et la digue des Moines n'apporte plus aucune protection contre la submersion marine du fait d'une surverse généralisée : par rapport au scénario C_2030, l'élévation du niveau de la mer de 20 cm entraîne une augmentation de la hauteur d'inondation de l'ordre de 30 cm entre la digue de la Roche et la digue des Moines et de plus de 35 cm au Nord de la digue des Moines. La hauteur d'eau au niveau des maisons au Nord (au Sud du front de mer de Lancieux) peut donc atteindre 1,5 m à 2 m.
- A Ploubalay, du fait de l'indépendance des submersions entre les 2 polders, la submersion est la même que pour le scénario B_2050 : submersion amplifiée de 20 cm, emprise inondée légèrement augmentée, submersion de la route départementale RD768 et inondation limitée mais significative de la vallée du Drouet...

Les résultats des simulations en ne considérant que des grandes marées « normales » (soit les 4 premiers cycles de marée, sans surcote) montrent des résultats similaires à ceux du scénario C_2030 sous les mêmes hypothèses : les hauteurs d'eau dans le polder de Ploubalay sont augmentées de l'ordre de 20 à 25 cm (du fait des surverses légèrement amplifiées), tandis que le polder de Ploubalay est inondé de manière importante du fait de la brèche, avec des hauteurs d'eau identiques à celles du scénario B_2050 (Annexe 8).

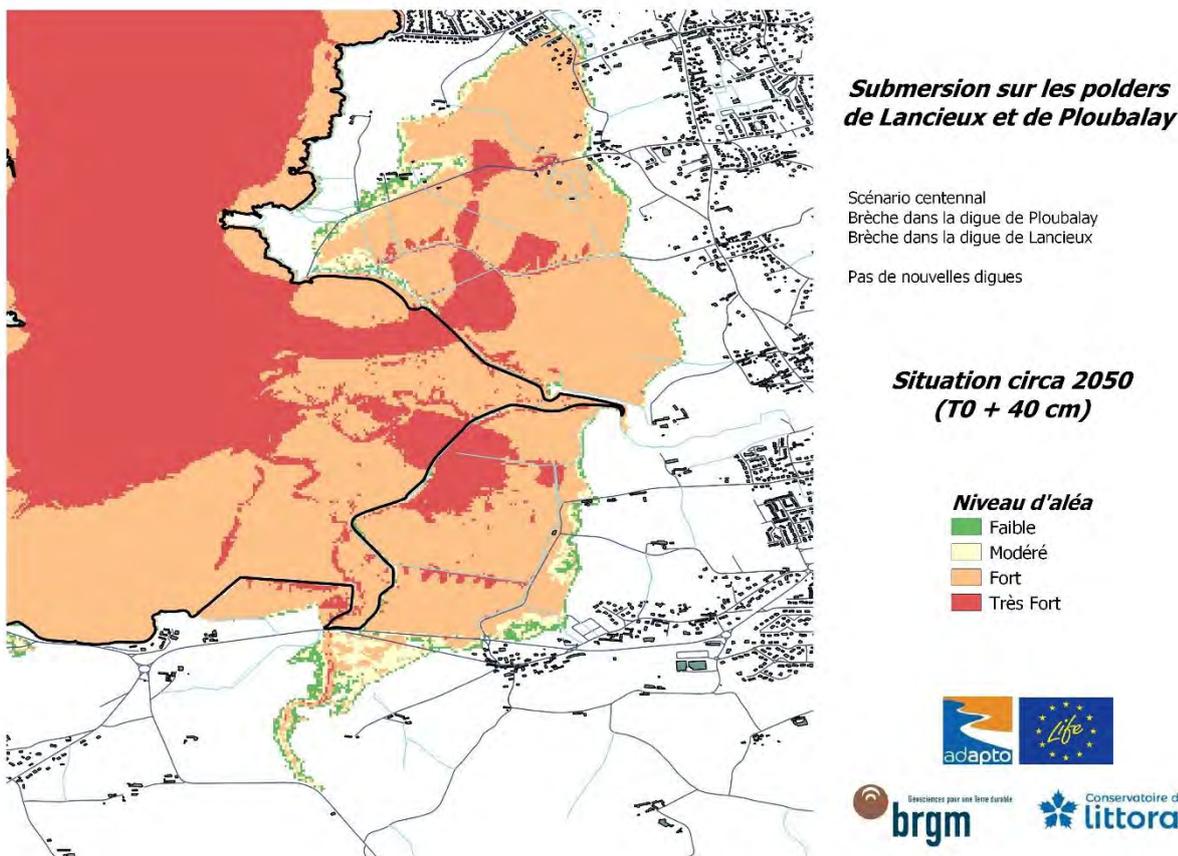


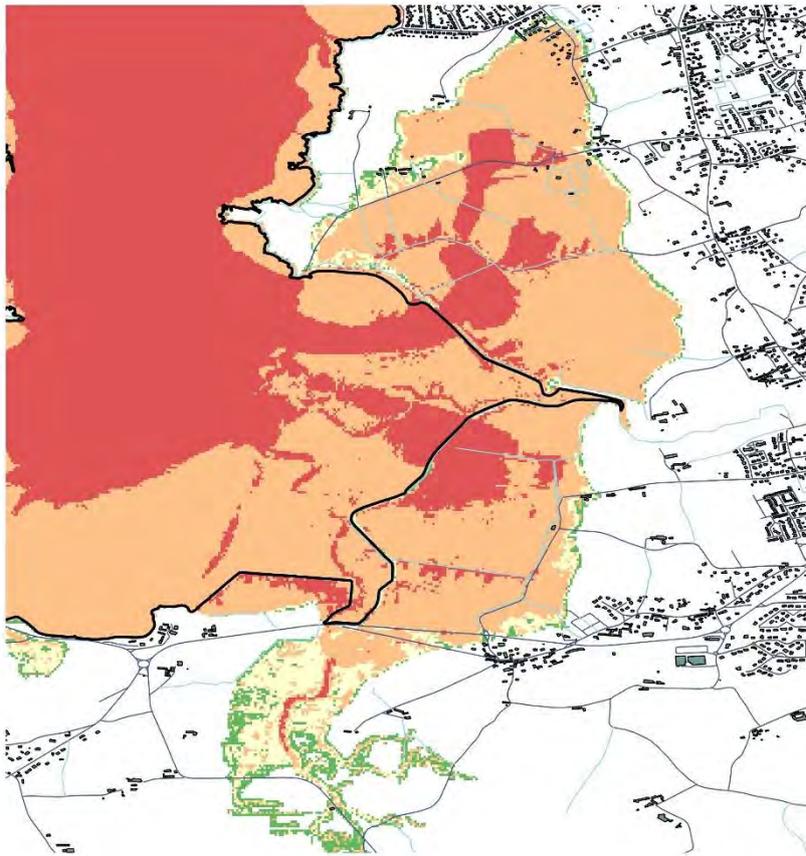
Illustration 72 – Carte d'aléa pour le scénario centennial C_2050 (brèche dans la digue de la Roche intacte, brèche dans la digue des Marais-Neufs, échéance circa 2050).

4.3.9. Scénario C_2100 (Brèche dans la Digue de la Roche, Brèche dans la Digue des Marais-Neufs, Echéance post 2050)

Le résultat de la simulation sur ce scénario (Illustration 73) amplifie encore la submersion sous l'effet de l'augmentation du niveau de la mer :

- A Lancieux, les résultats confirment que les digues n'apportent quasiment plus aucune protection, l'altitude maximale du plan d'eau étant quasi homogène dans le polder ; la submersion est par conséquent importante, et le polder est globalement rempli par 2,5 à 3 m d'eau (2 à 2,40 m au niveau des maisons au Nord, au Sud du front de mer de Lancieux)
- A Ploubalay, du fait de l'indépendance des submersions entre les 2 polders, la submersion est la même que pour le scénario B_2100, avec un remplissage général du polder et une surverse de la route départementale RD768 s'accompagnant d'une inondation de la vallée du Drouet...

Les résultats des simulations en ne considérant que des grandes marées « normales » (soit les 4 premiers cycles de marée, sans surcote) montrent des résultats similaires à ceux du scénario C_2030 sous les mêmes hypothèses : les hauteurs d'eau dans le polder de Ploubalay sont augmentées de l'ordre de 20 à 30 cm (du fait des surverses légèrement amplifiées), tandis que le polder de Ploubalay est inondé de manière importante du fait de la brèche, avec des hauteurs d'eau identiques à celles du scénario B_2100 (Annexe 9).



**Submersion sur les polders
de Lancieux et de Ploubalay**

Scénario centennal
Brèche dans la digue de Ploubalay
Brèche dans la digue de Lancieux

Pas de nouvelles digues

**Situation post 2050
(T0 + 60 cm)**

Niveau d'aléa

- Faible
- Modéré
- Fort
- Très Fort



Illustration 73 – Carte d'aléa pour le scénario centennal C_2100 (brèche dans la digue de la Roche intacte, brèche dans la digue des Marais-Neufs, échéance post 2050).

5. Scénarios d'aménagement

5.1. SCENARIOS D'AMENAGEMENT ENVISAGES

Quelques scénarios d'aménagement ont été envisagés en concertation avec le Conservatoire du littoral et les élus du territoire. Ces scénarios, qui envisagent notamment une brèche dans la digue de la Roche à Lancieux (comme pour les scénarios C sans aménagements) et la construction de digues rétro-littorales pour protéger les enjeux à Lancieux, ont fait l'objet des mêmes simulations de submersion (grande marée et niveau centennal, aux échéances actuelle, circa 2030, circa 2050 et post 2050), afin d'alimenter les concertations ultérieures qui ont été organisées par le Conservatoire du littoral avec la population du territoire et les élus. Toutes les simulations ont été menées en considérant un dimensionnement suffisant des ouvrages (altitude supérieure à la cote maximale du plan d'eau, pas de brèches).

5.1.1. Scénario d'aménagement CA1

Le scénario CA1 envisage un comblement des 2 brèches artificielles qui existent dans la digue des Moines, dans le polder de Lancieux (Illustration 74). Il ne s'agit donc pas à proprement parler de la construction d'une digue rétro-littorale, et il convient de garder à l'esprit que ces brèches ont été creusées pour faciliter l'évacuation de l'eau pluviale accumulée en arrière de la digue (inondation continentale, paragraphe 1.1.3), et qu'un tel aménagement sans précautions spécifiques pourrait faire réapparaître ce type de phénomènes.

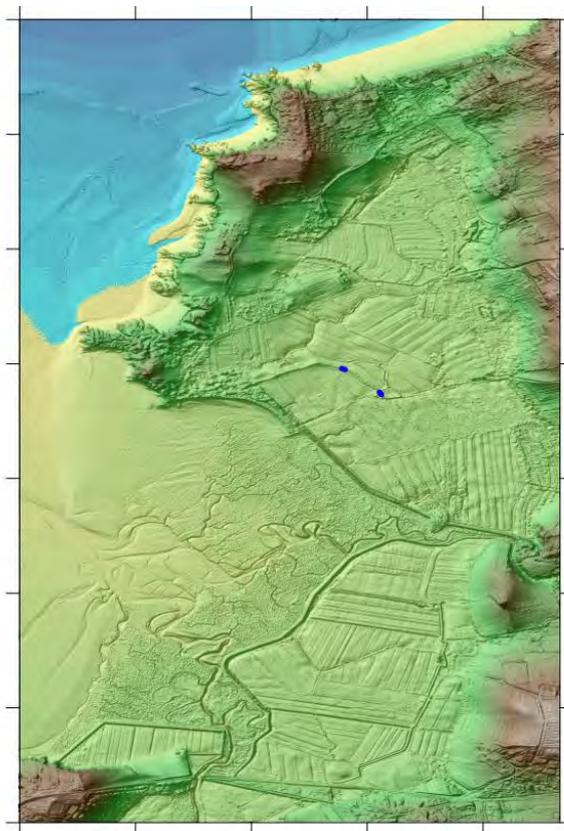


Illustration 74 – Scénario d'aménagement CA1 : Comblement des 2 brèches dans la digue des Moines à Lancieux (en bleu).

5.1.2. Scénario d'aménagement CA2

Le scénario CA2 envisage la construction d'une digue rétro-littorale ne protégeant que l'extrémité Nord du polder de Lancieux (Illustration 75).

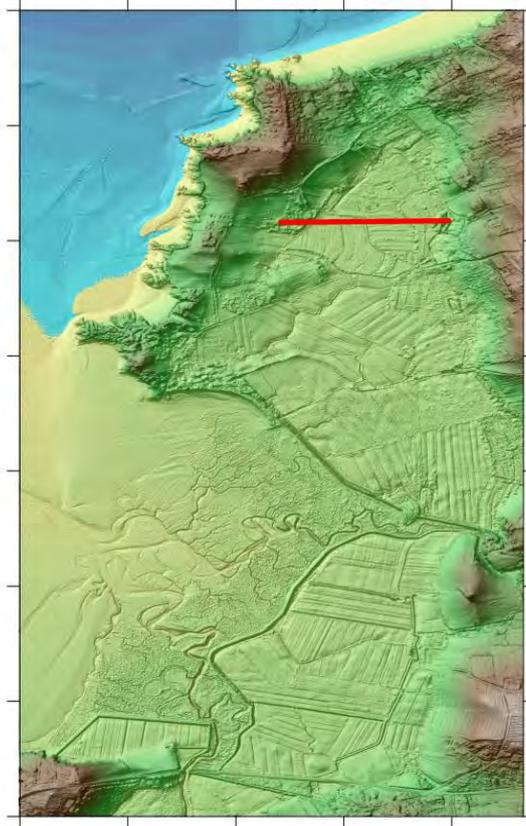


Illustration 75 – Scénario d'aménagement CA2 : Construction d'une digue rétro-littorale protégeant l'extrémité Nord du polder de Lancieux (en rouge).

5.1.3. Scénario d'aménagement CA3

Le scénario CA3 envisage la construction d'une digue rétro-littorale suivant la rue des Bénédictins et la moitié Sud du camping, afin de protéger la moitié Nord du polder de Lancieux (Illustration 76).

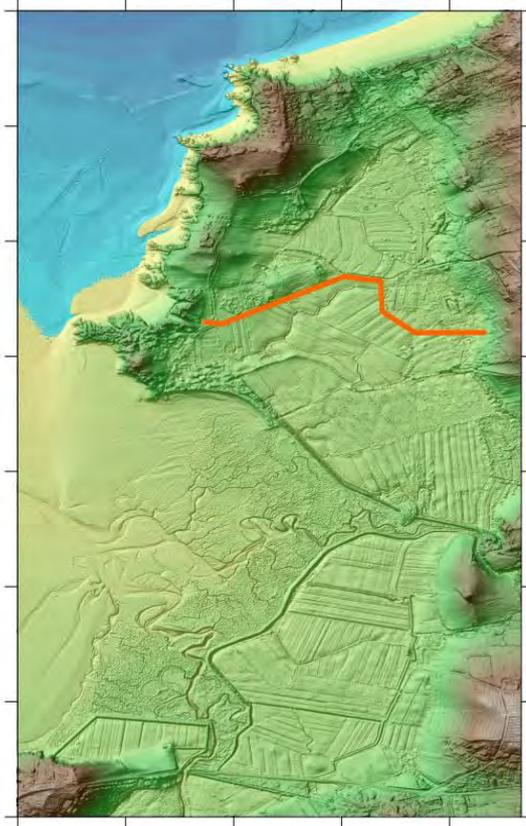


Illustration 76 – Scénario d’aménagement CA3 : Construction d’une digue rétro-littorale suivant la rue des Bénédictins à Lancieux (en orange).

5.1.4. Scénario d’aménagement CA4

Le scénario CA4 envisage la construction d’une digue rétro-littorale qui viendrait s’appuyer sur la digue des Moines (soit en la doublant, soit en la remplaçant), afin de protéger une large moitié Nord du polder de Lancieux (Illustration 77).

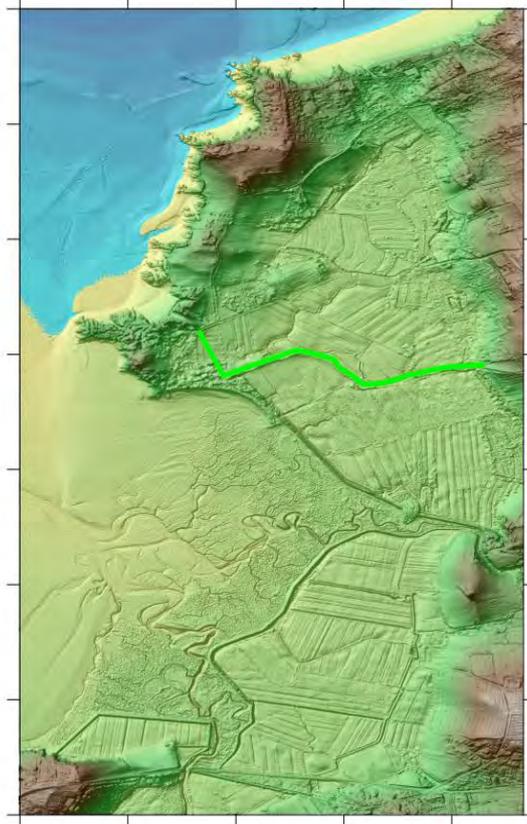


Illustration 77 – Scénario d’aménagement CA4 : Construction d’une digue rétro-littorale suivant la digue des Moines à Lancier (en vert).

5.1.5. Scénario d’aménagement CA5

Le scénario CA5 envisage la construction de 3 digues rétro-littorales localisées au plus près des enjeux (camping à l’Est, les Briantais à l’Ouest, la ville de Lancier au Nord) afin de protéger ces derniers (Illustration 78).

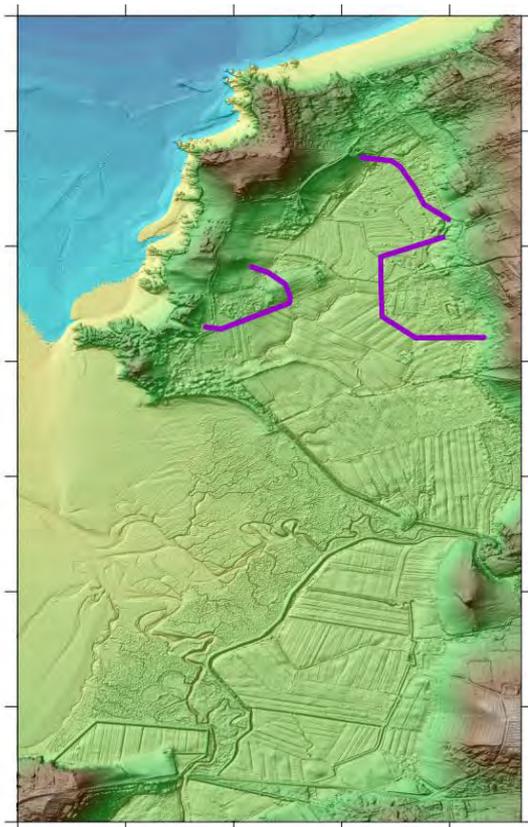


Illustration 78 – Scénario d’aménagement CA5 : Construction de 3 digues rétro-littorales au plus près des enjeux à Lancieux (en violet).

5.2. IMPACTS DE CES AMENAGEMENTS SUR LA SUBMERSION

Ces aménagements n’étant envisagés qu’à titre exploratoire, les résultats détaillés des simulations réalisées ne sont pas présentés dans le corps du présent rapport. Les résultats des simulations sont toutefois consultables en annexe, en termes de hauteurs d’eau et de vitesses des courants maximales pour des grandes marées seules et pour un niveau centennal :

- Scénario **CA1**, actuel, circa 2030, circa 2050 et post 2050 : **Annexes 10 à 13** ;
- Scénario **CA2**, actuel, circa 2030, circa 2050 et post 2050 : **Annexes 14 à 17** ;
- Scénario **CA3**, actuel, circa 2030, circa 2050 et post 2050 : **Annexes 18 à 21** ;
- Scénario **CA4**, actuel, circa 2030, circa 2050 et post 2050 : **Annexes 22 à 25** ;
- Scénario **CA5**, actuel, circa 2030, circa 2050 et post 2050 : **Annexes 26 à 29** ;

Ces scénarios ont permis de montrer que la construction de digues rétro-littorales pourraient permettre de contenir la submersion afin d’en préserver les enjeux situés au Nord de la Digue des Moines. L’installation de telles digues pourrait toutefois entraîner une légère augmentation de la submersion dans la partie Sud du polder de Lancieux (hauteur d’eau et extension), en empêchant l’étalement de l’eau vers le Nord. Cela est notamment vrai pour le secteur situé juste à l’Est du Terre Corlieu, qui peut voir la submersion s’étendre si l’on approche la digue rétro-littorale de la digue des Moines.

Un autre résultat notable correspond au scénario CA1 (comblement des brèches existant actuellement dans la digue des Moines) : cette solution, qui présenterait l’avantage d’un coût de mise en œuvre assez modeste, permettrait à court terme de limiter sensiblement les hauteurs

d'eau dans la partie Nord du polder en cas de brèche dans la digue de la Roche (réduction de l'ordre de 0,9 m). Elle s'avérerait cependant insuffisante à long terme (cette réduction ne serait plus que de l'ordre d'une quinzaine de centimètres circa 2050 et elle serait nulle post-2050). Ceci pourrait donc constituer une solution intermédiaire pour limiter le risque le temps de mener des réflexions plus approfondies sur l'avenir des digues et du polder. Il conviendrait toutefois de s'assurer que le comblement des brèches existantes dans la digue des Moines n'entraîne pas une augmentation des risques d'inondation par ruissellement (les brèches ayant été creusées pour évacuer des inondations de ce type).

6. Conclusion

Cette étude du site adapto de la Baie de Lancieux a permis d'accompagner le Conservatoire du littoral dans les réflexions sur l'adaptation des polders de Lancieux et de Ploubalay au changement climatique.

Les premiers éléments ont permis de préciser le fonctionnement hydrodynamique de la baie vis-à-vis des risques de submersion marine, et notamment :

- Le rôle des vagues, qui ne génèrent pas de surcote (*wave-setup*) importante au sein de la baie, mais qui, même réduites en fond de baie, contribuent à l'érosion de la digue en terre de Ploubalay ;
- Les durées de submersion potentielle selon les coefficients de marée (dans l'hypothèse où les digues seraient arasées), afin de quantifier combien de temps chaque secteur des polders pourrait être submergé ; ces résultats, fournis au Conservatoire du littoral, ont permis au Conservatoire et au Museum d'Histoire Naturelle d'anticiper les évolutions possibles de la botanique des polders en termes d'habitats ;
- Les périodes durant lesquelles des submersions sont possible sous forme de calendriers de surveillance à usage du Conservatoire du littoral et des différents intervenants : les périodes de grande-marée susceptibles d'engendrer des submersions peuvent être anticipées et surveillées vis-à-vis des différents enjeux selon les prévisions de surcote disponibles.

Les simulations numériques de submersion marine ont permis d'affiner la connaissance des inondations susceptibles d'affecter les polders de Lancieux et de Ploubalay et leurs évolutions sous l'effet de l'élévation du niveau de la mer par le changement climatique. Elles ont notamment montré que :

- Si les digues actuelles suffisent à contenir les grandes marées, elles subiraient une surverse limitée en cas de niveau centennal (et compte-tenu de leur nature, une telle surverse se traduirait probablement par l'apparition de brèches) ;
- La brèche apparue dans la digue du polder de Ploubalay en Mars 2020 (pour laquelle il a été décidé de la laisser évoluer librement) conduit, du fait de son élargissement rapide, à un niveau d'eau dans le polder de Ploubalay équivalent au niveau marin, ce qui en cas de niveau exceptionnel (centennal) entraîne une submersion généralisée du polder et des enjeux qui s'y trouvent ;
- L'élévation du niveau de la mer sous l'effet du changement climatique va amplifier assez largement ces submersions, tant en termes d'amplitude que de fréquence ; tous les enjeux identifiés dans les polders seront alors susceptibles d'être atteints, notamment dans le polder de Lancieux, même si la digue est maintenue dans son état actuel (les maisons à l'extrémité Nord du polder de Lancieux, au Sud du front de mer, seraient assez largement atteintes par une submersion liée à un niveau marin centennal quand la mer aura monté de 40 cm, soit à une échéance que l'on pourrait situer autour de l'année 2050).

Des scénarios prospectifs et exploratoires d'aménagement au niveau du polder de Lancieux ont toutefois permis de montrer que la construction de digues rétro-littorales en arrière du polder de Lancieux pourrait permettre, même en cas de brèche dans la digue de Lancieux, de préserver les principaux enjeux exposés, moyennant une augmentation limitée de la submersion entre la digue de la Roche et la nouvelle digue rétro-littorale (cette augmentation est d'autant plus importante que la nouvelle digue est installée vers le Sud). Une solution alternative à court terme pourrait consister à combler les brèches existantes dans la digue des Moines afin de limiter le

risque de submersion dans le polder de Lancieux (sous réserve de s'assurer de ne pas augmenter le risque d'inondation par ruissellement), mais cette solution deviendrait rapidement inefficace sous l'effet de l'élévation du niveau de la mer. Les décisions concernant de tels aménagement relèvent toutefois de la collectivité, et sont en cours de discussion avec les élus locaux et les riverains lors d'ateliers pratiques organisés par le Conservatoire du littoral. Cette phase participative est en effet cruciale puisqu'elle renforce la crédibilité, la légitimité et permet de susciter l'intérêt des élus pour le projet. Ces trois éléments sont, d'après Leitch et al. (2019), des indicateurs d'une transition efficace entre technique (ici la modélisation numérique) et prise de décision pratique ou politique (dans ce cas, mise en place d'une zone d'extension de la submersion ou poursuite de l'endiguement).

Compte-tenu de la situation actuelle du polder de Ploubalay (brèche apparue en Mars 2020 et laissée en libre évolution, gestion des principaux enjeux exposés par le Conservatoire du littoral et la commune de Beaussais-sur-Mer...), de tels scénarios d'aménagement n'ont pas été envisagés sur ce secteur dans le cadre de la présente étude.

L'ensemble de ces éléments a été fourni au Conservatoire du littoral et aux collectivités concernées afin d'accompagner à la fois la remise en eau du polder de Ploubalay depuis Mars 2020 et les réflexions prospectives concernant l'avenir du polder de Lancieux.

7. Bibliographie

Acquaviva R., Aubert D., Monthiers L., Roy-Camille A., Rozier C., Souillard A. (2016) – Les paysages de la Baie de Lancier, terrain d’entente pour projeter un nouveau rapport Terre/Mer. Travail d’étudiants de l’Ecole Nationale Supérieure de Paysages de Versailles, Mars 2016.

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.

Bonnot-Courtois C., Feiss-Jehel C., de Saint-Léger E. (2008) - Vulnérabilité des rivages en Côtes d’Armor (Bretagne Nord, France) : aléas et enjeux. X^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, 14-16 octobre 2008, Sophia Antipolis.

Bonnot-Courtois C. (2000) - Apport des études hydro-sédimentaires au projet d’aménagement d’un polder. (Ploubalay, Côtes d’Armor). VI^{èmes} Journées Nationales Génie Civil- Génie Côtier, Caen, France, 17-19 Mai 2000.

Booij N., Haagsma I.J.G., Holthuijsen L.H., Kieftenburg A.T.M.M, Ris R.C., Van der Westhuysen A.J., Zijlema M. (2004) - Swan Cycle III version 40.41. User’s Manual, 115 p.

Brown, J. D., Spencer, T., and Moeller, I. (2007) - 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., Pedreros R. et Oliveros C. (2015) – Analyses statistiques des niveaux d’eau et des vagues à Saint-Malo. Note BRGM/DRP-15-140 du 10/04/2015.

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

Charles E., Idier D., Thiébot J., Le Cozannet G., Pedreros R., Arduin F. et Planton S. (2012) – Present wave climate in Bay of Biscay : Spatiotemporal variability and trends from 1958 to 2001. Journal of Climate, 25 (6), 2020-2039, doi : 10.1175/JCLI-D-11-00086.1.

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.

Conservatoire du littoral (2014) - Cahier des charges pour des travaux de reprise d'urgence de la digue du polder de Ploubalay, Site 22 352 du marais de Beaussais, commune de Ploubalay – 22.

Conservatoire du littoral (2011) - Cahier des charges pour des travaux de reprise de la digue du polder de Ploubalay, Site 22 352 du marais de Beaussais, commune de Ploubalay – 22.

Conservatoire du littoral (2008) - Cahier des charges pour des travaux d'urgence de reprise de la digue du polder de Ploubalay, Site du marais de Beaussais, commune de Ploubalay – 22. 2 annexes.

FEMA (1995) - Guidelines and specifications for wave elevation determination and v-zone mapping. 160 p.

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

Lambert N. (2017) - Biogéomorphologie et estimation du service d'atténuation du marais maritime de la Baie de Lancieux. Rapport de stage EPHE – Université de la Rochelle.

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

Le Gourierec B. (2015) – Etude de dangers de la digue de Lancieux. Rapport SOCOTEC Référence 1501_C1_005_EDD_LANCIEUX_RI_01.

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*.

Le Roy S., Voix F., Blaise E. avec la collaboration de Schroëtter J.M. et Bardeau M. (2020) – Caractérisation de la géomorphologie du trait de côte, vulnérabilité à l'érosion et inventaire des tempêtes dans le département du Morbihan (56). Rapport final. BRGM/RP-69485-FR, 191 p., 129 ill., 1 annexe

MEDDE (2014) – Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux. 169pp. Disponible en ligne: <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Guide%20PPRL%20-%20version%20finale%20mai%202014.pdf>

Renault J. (2015) – Rapport de la Visite technique approfondie (VTA) incluant le Diagnostic initial de sureté (DIS) de la digue de Lancieux (Classe C). Rapport SOCOTEC, Référence 1501_C1_005_DIS_V2.

Schroëtter J.-M. et Blaise E., avec la collaboration de V. Debert, B. Le Gall, G. Gilbert, H. Tissot, F. Meunier, J. Audo, F. Pillios, M. Prémallion, B. Gouygou, E. Palvadeau et S. Suanez (2015) - Atlas des aléas littoraux (Érosion et Submersion marine) des départements d'Ille-et-Vilaine, des Côtes-d'Armor et du Finistère : Phase 1, Rapport final. BRGM/RP-65212-FR, 1282 p., 861 ill., 19 annexes, 1 CD.

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

Shom (2015) - MNT Bathymétrie de façade Atlantique (Projet Homonim). http://dx.doi.org/10.17183/MNT_ATL100m_HOMONIM_WGS84.

Shom-Cerema (2012) – Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique). Rapport Shom. 144 p., 2 ann.

SOCOTEC (2012) – Diagnostic des ouvrages de protection du Conservatoire : Digue de Beaussais (22) – Dossier de l'ouvrage. Rapport final, Octobre 2012.

Stéphan P. (2011) - Les flèches de galets de Bretagne : évolution passée, présente et future. Collection Milieux naturels et Sociétés. L'Harmattan, 263 p.

Stéphan A. (2016) - Cartographie des habitats et des espèces végétales à forte valeur patrimoniale de 3 sites du Conservatoire du littoral et propositions de gestion : Sites du Marais de Beaussais, du Tertre Corlieu et des Rives du Frémur (Commune de Ploubalay et Lancieux, Côtes d'Armor).

Wöppelmann G., Pouvreau N., Coulomb A., Simon B. and Woodworth P.L. (2008) - Tide gauge datum continuity at Brest since 1711 : France's longest sea-level record. Geophysical Research Letters, Vol. 35, L22605, doi:10.1029/2008GL035783.

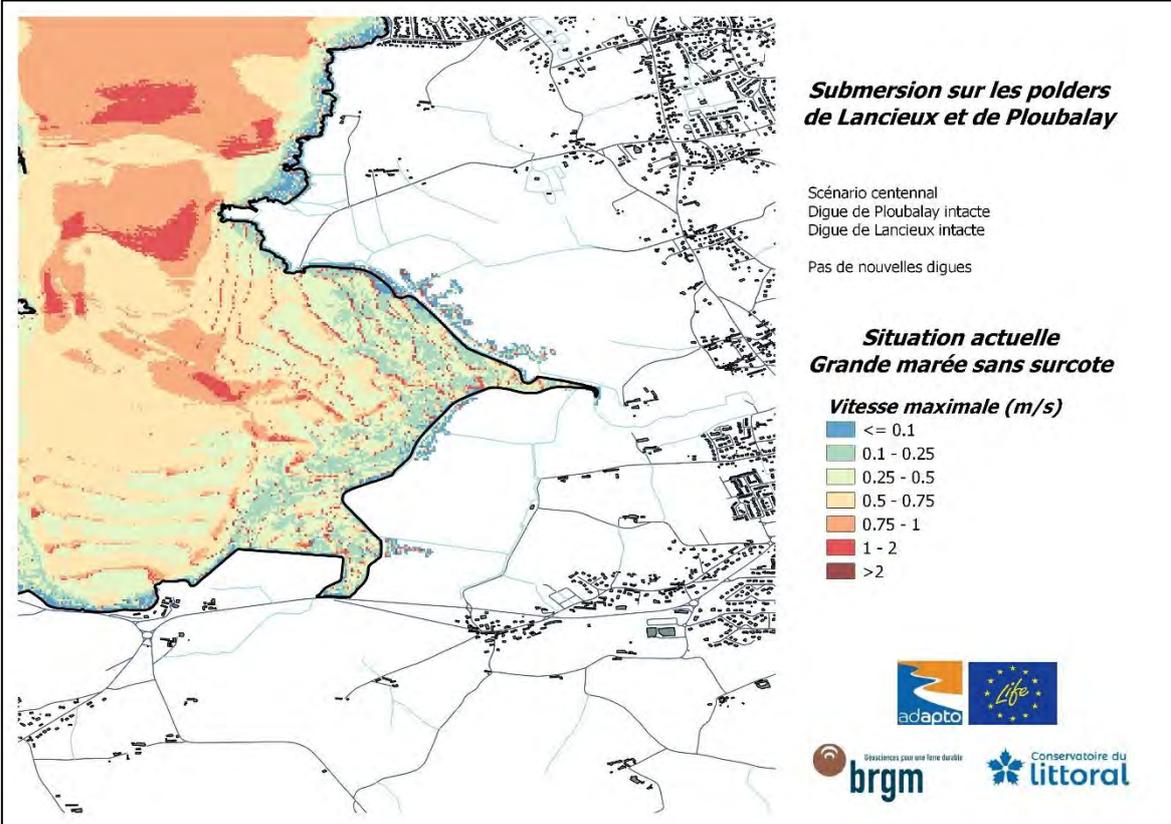
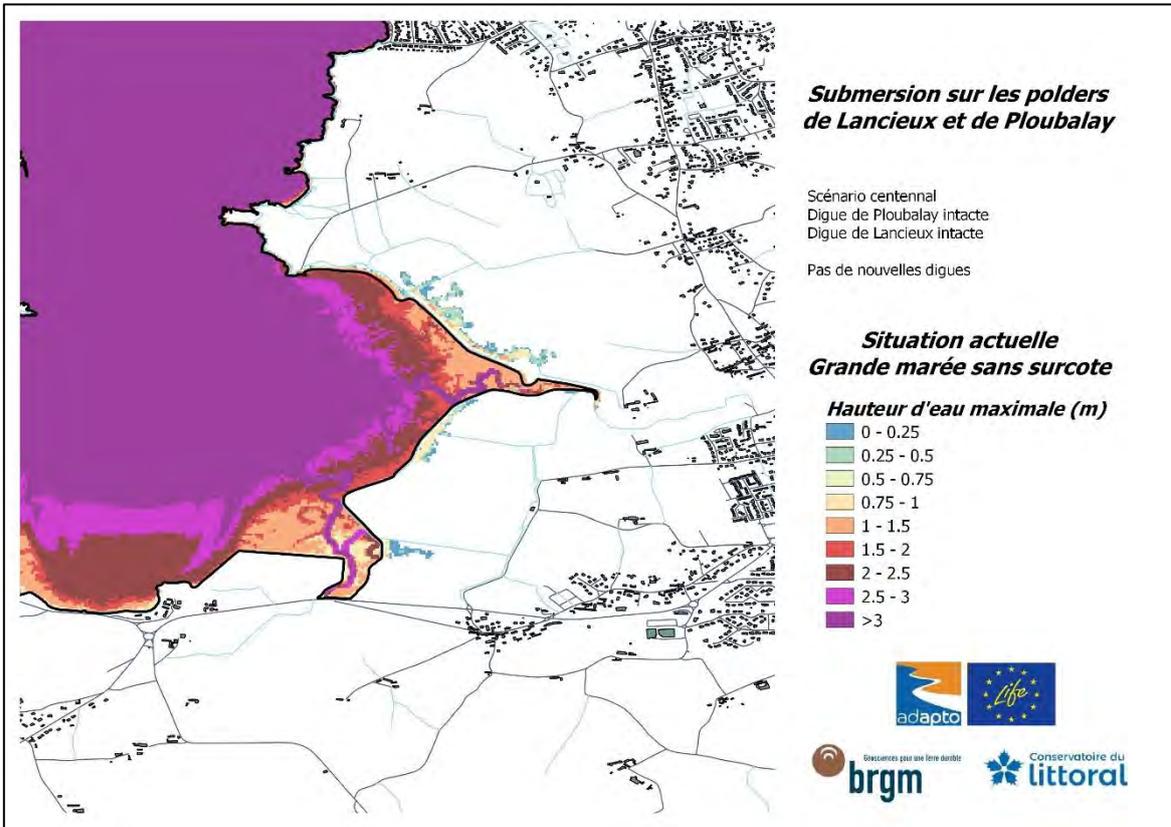
Annexe 1

Résultats obtenus pour le scénario A_2020

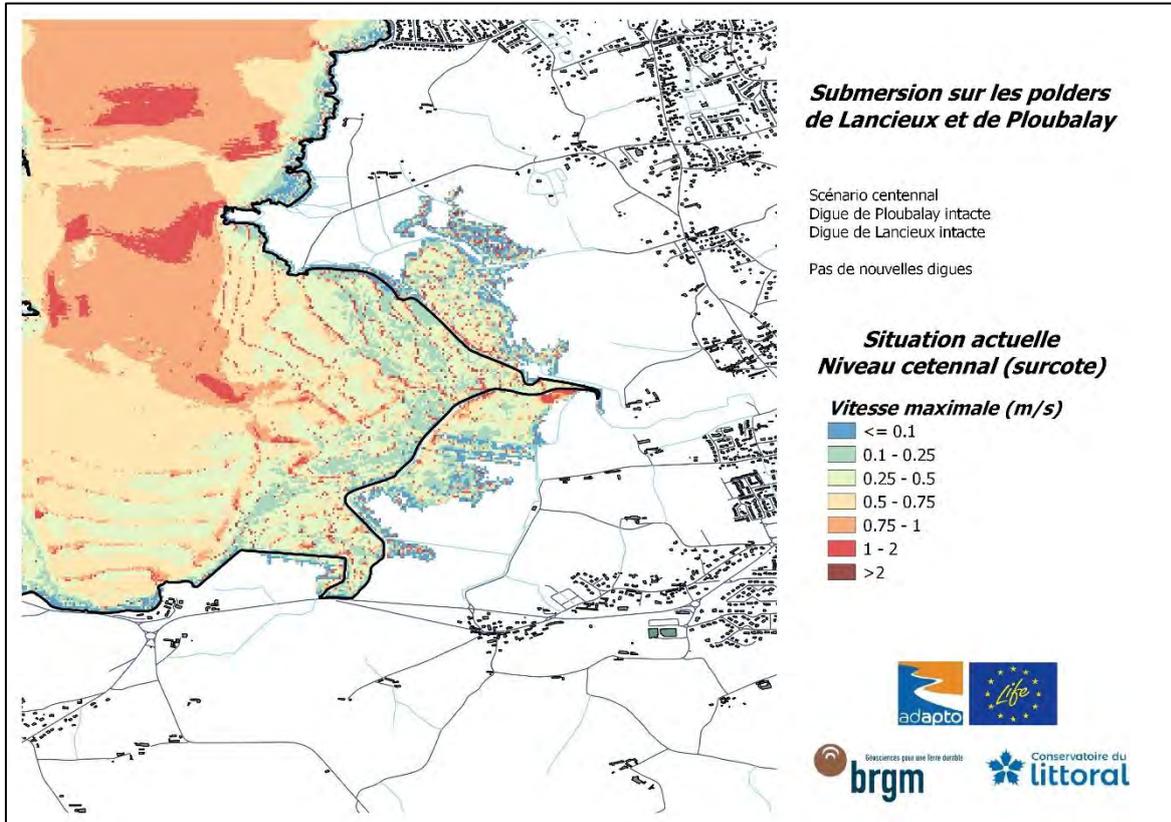
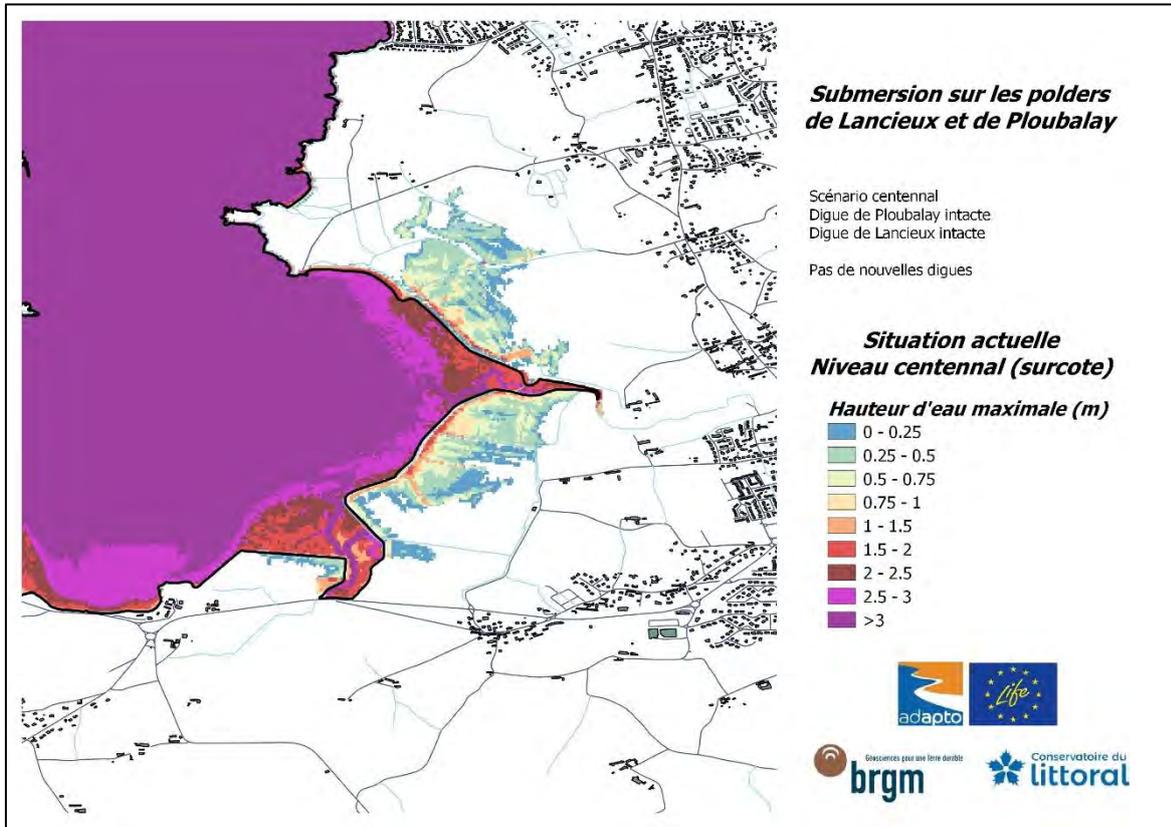
Digue de la Roche intacte
Digue des Marais-Neufs intacte
Echéance actuelle

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



Niveau centennal (grande marée + surcote)
 (l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)



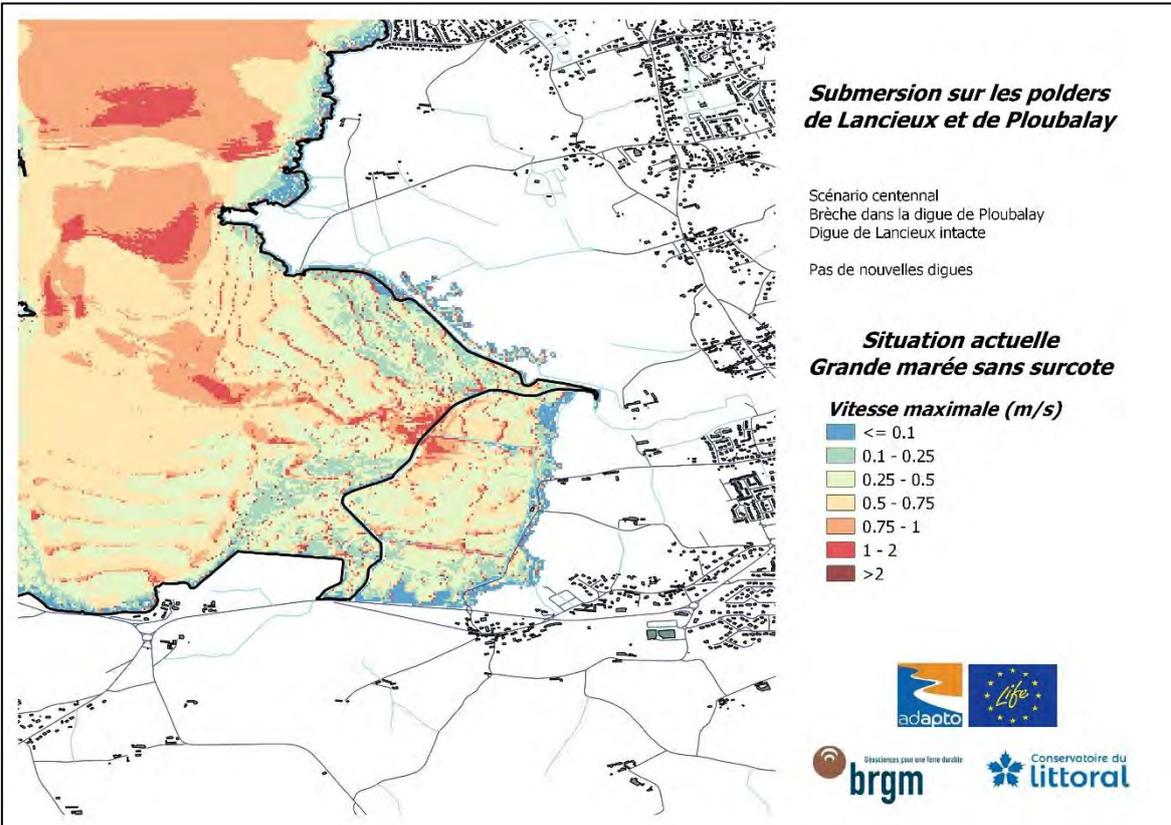
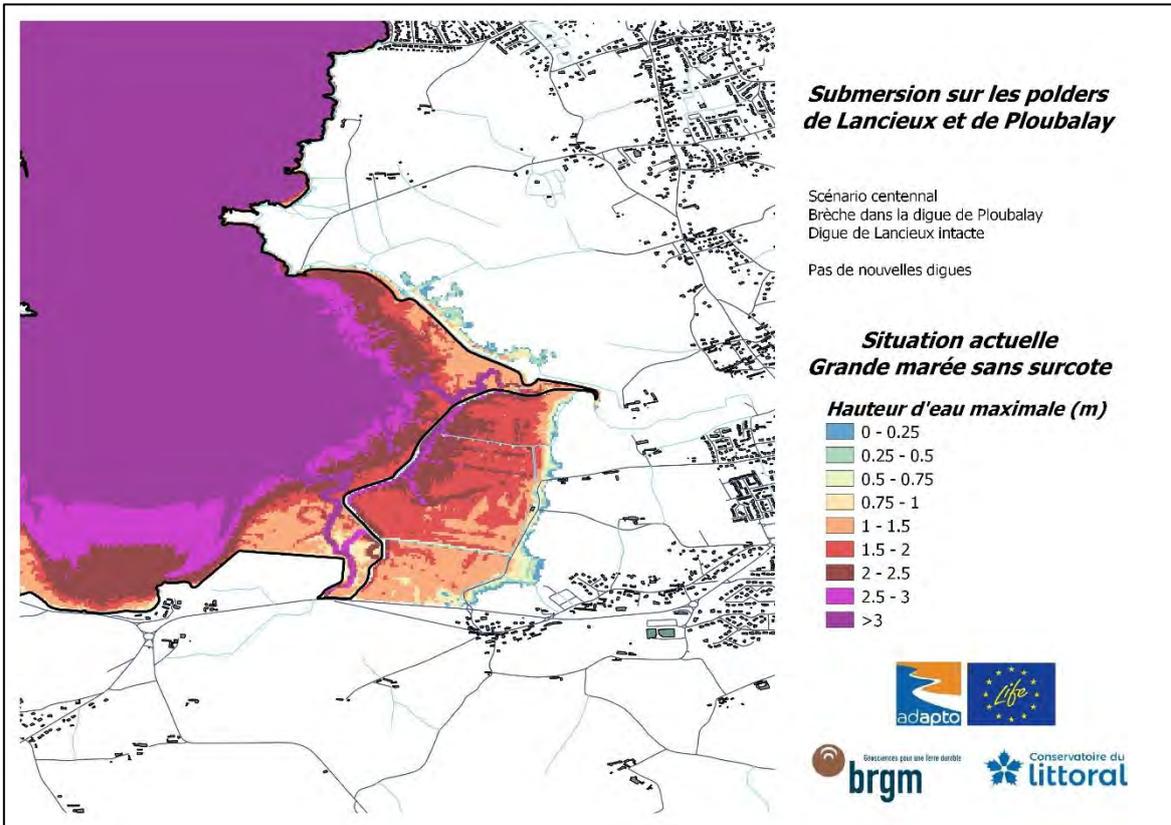
Annexe 2

Résultats obtenus pour le scénario B_2020

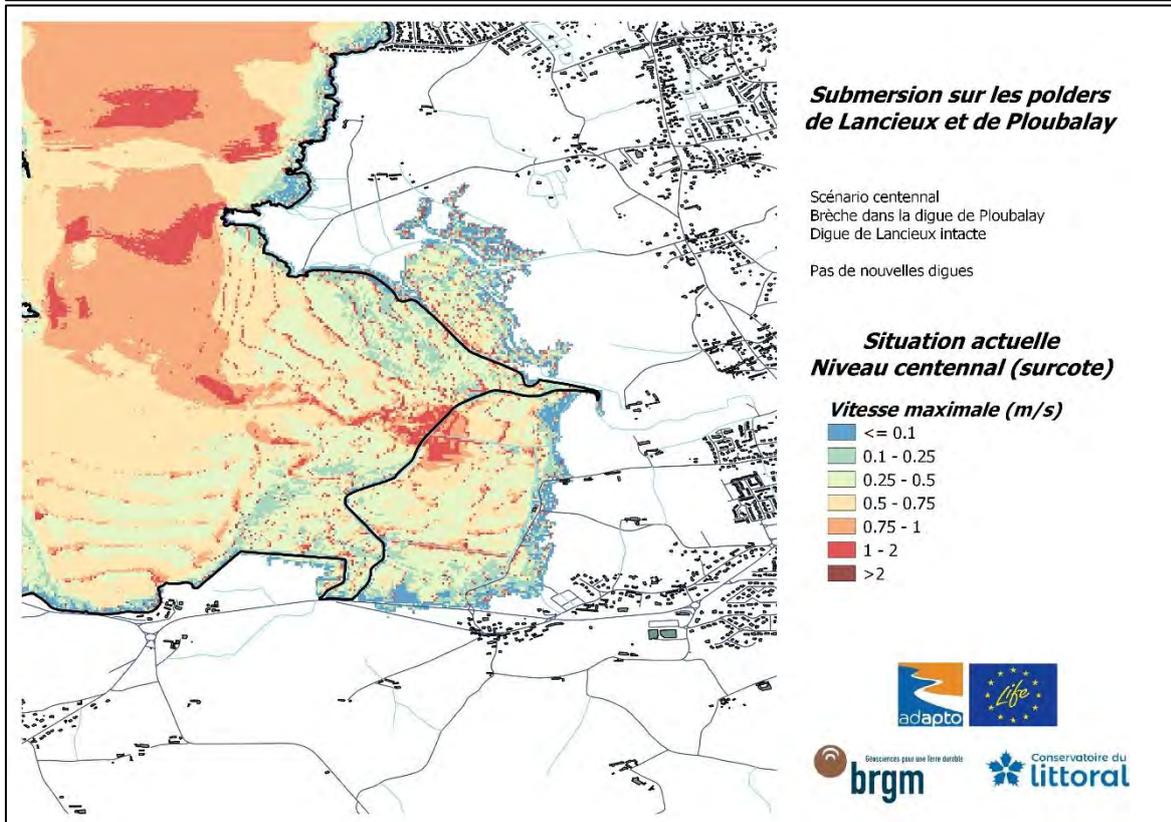
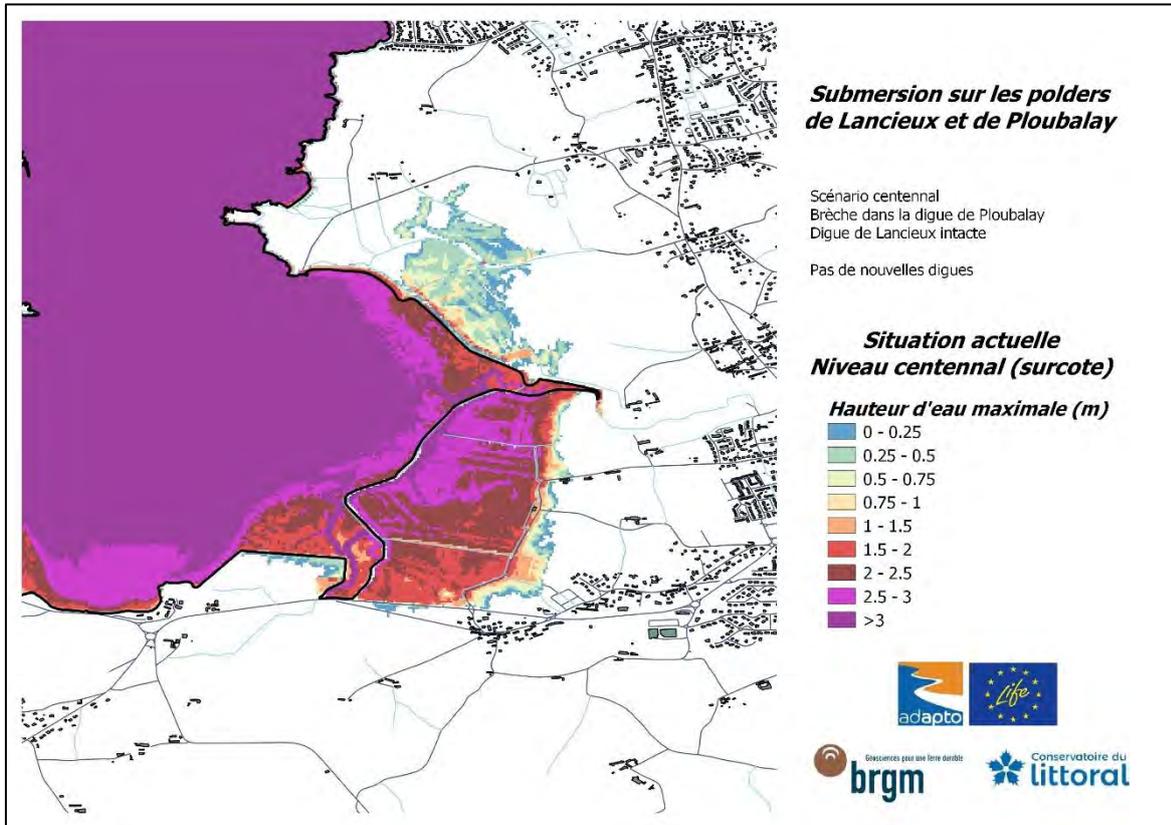
Digue de la Roche intacte Brèche dans la Digue des Marais-Neufs Echéance actuelle

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



**Niveau centennal (grande marée + surcote)
(l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)**



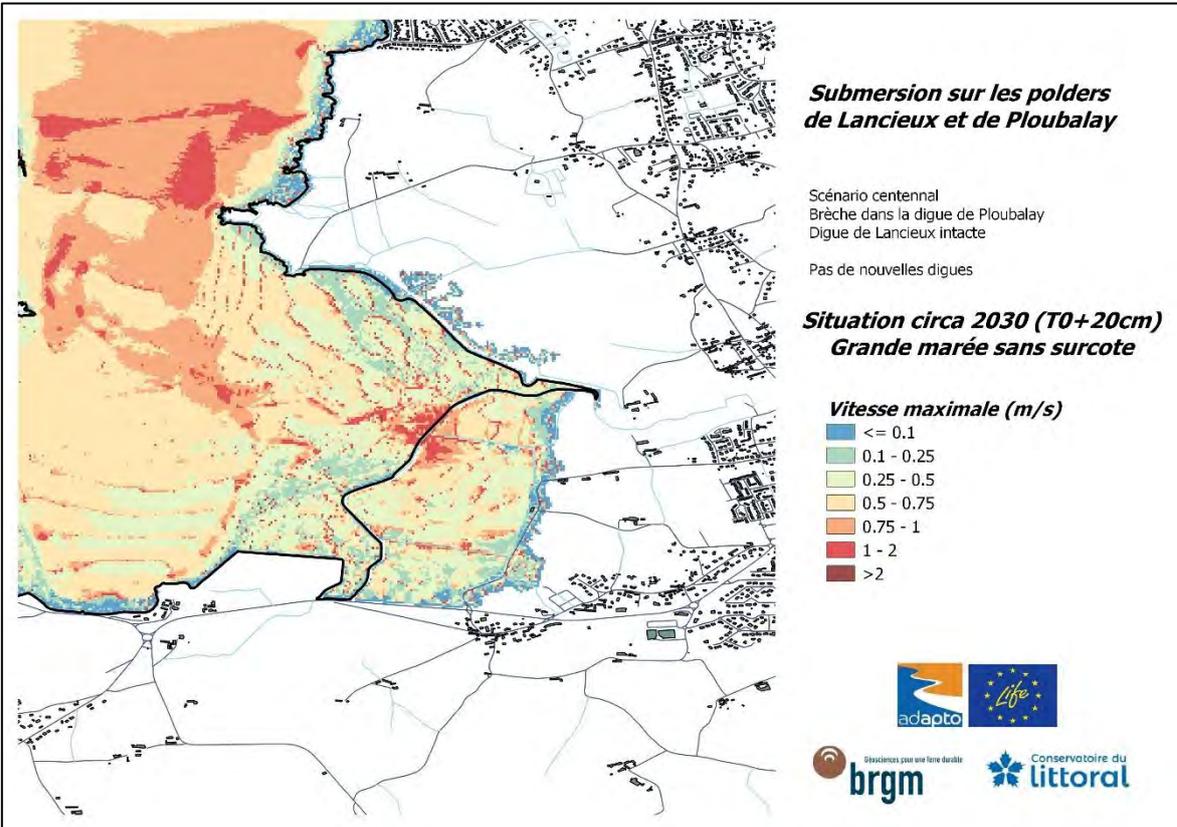
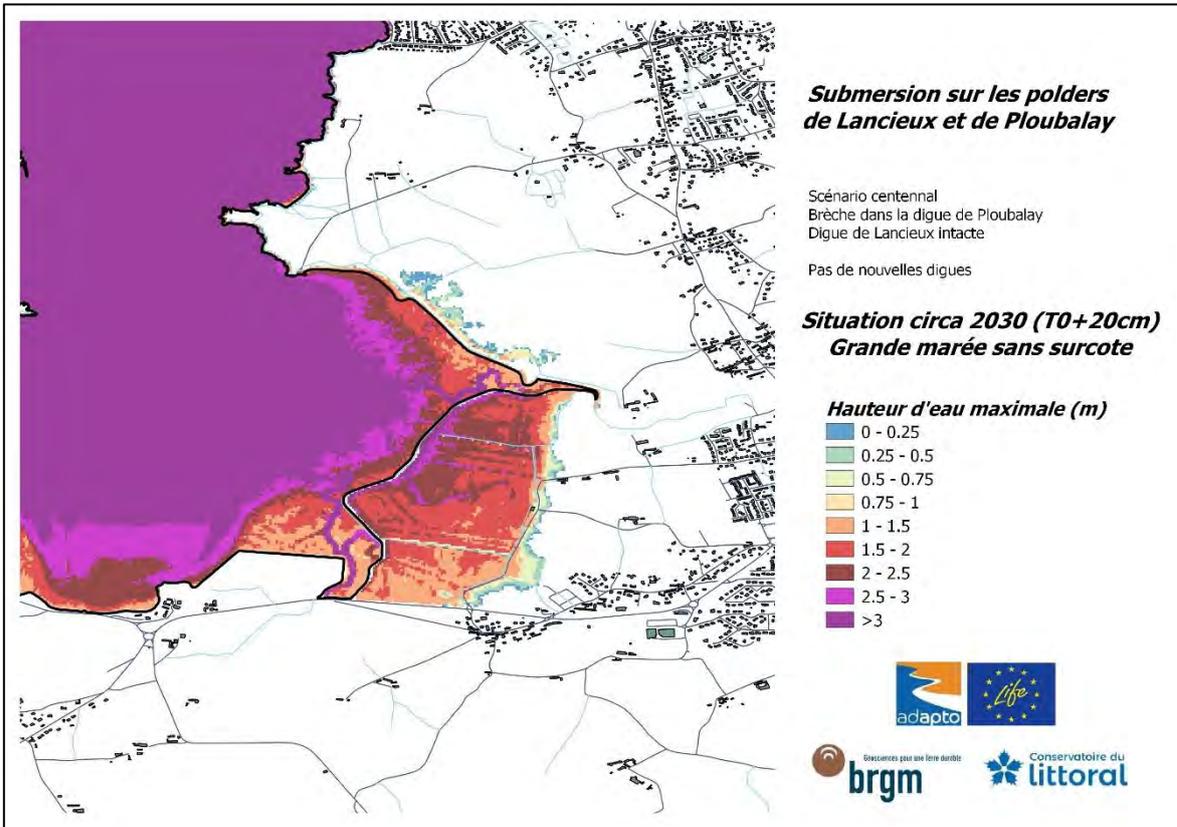
Annexe 3

Résultats obtenus pour le scénario B_2030

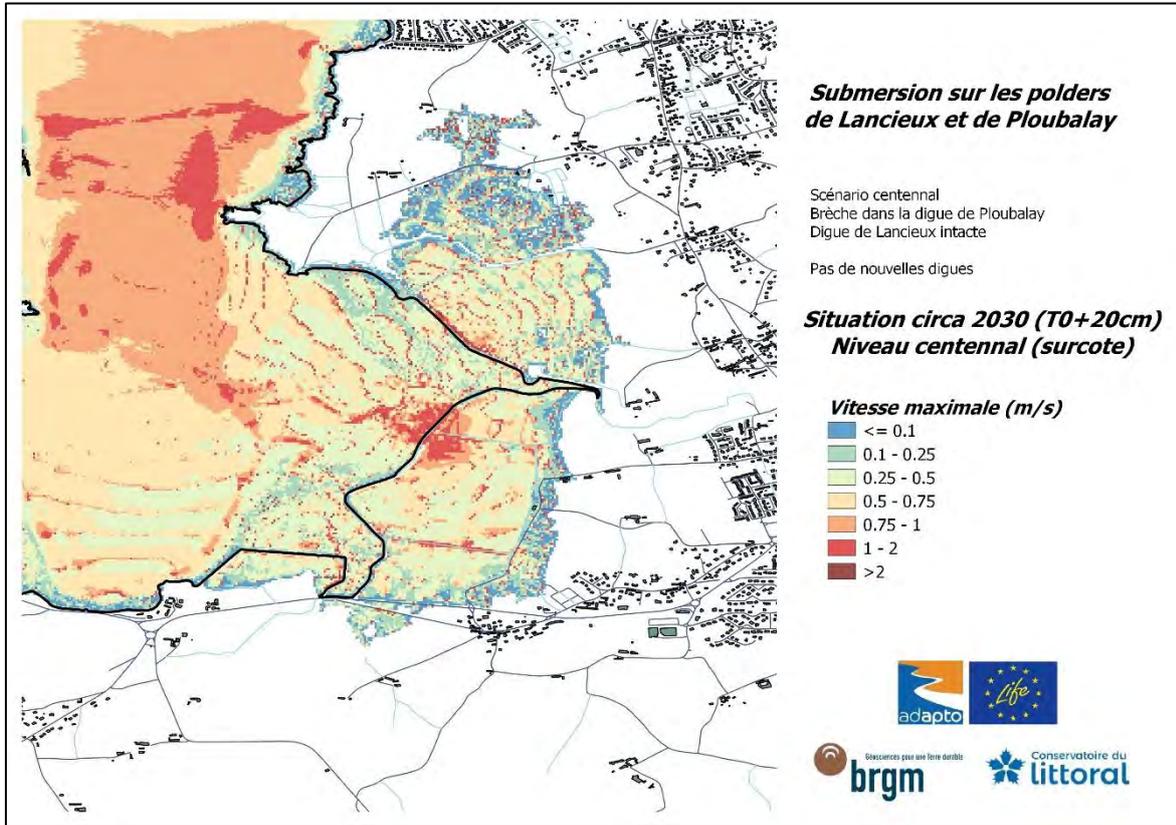
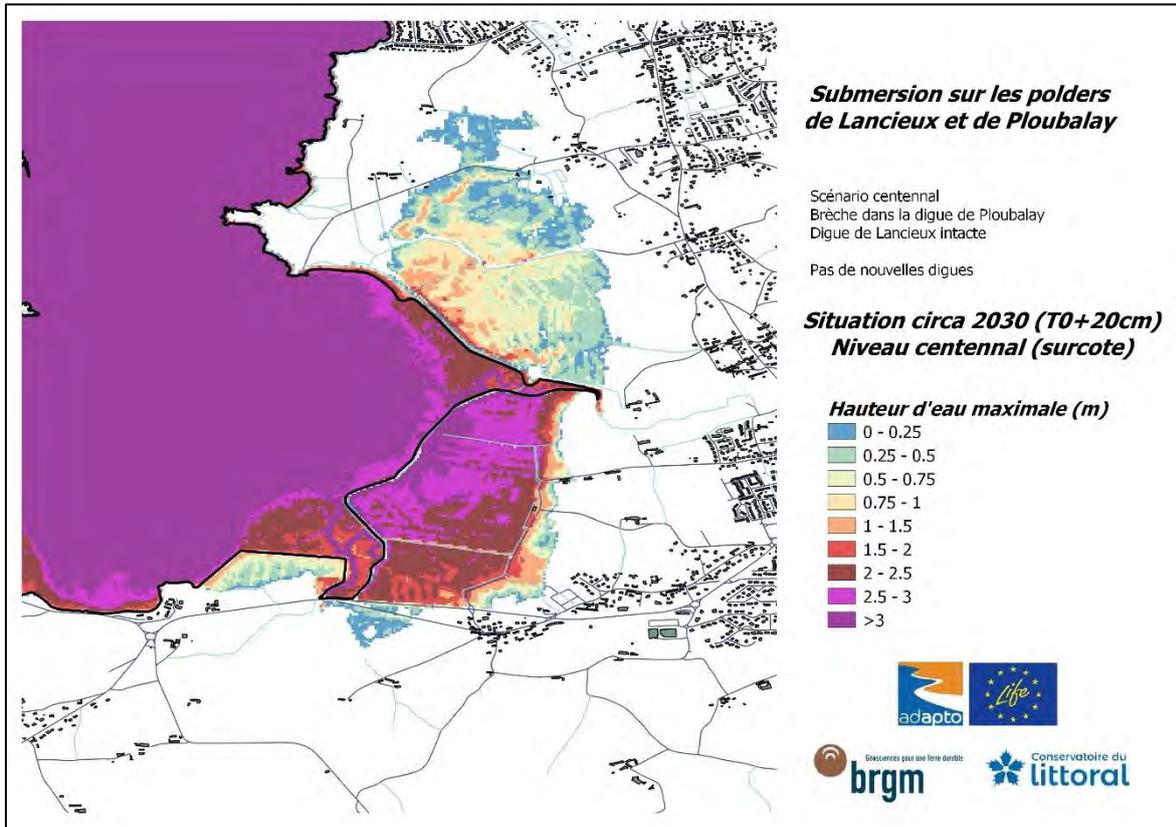
Digue de la Roche intacte Brèche dans la Digue des Marais-Neufs Echéance circa 2030 (T0 +20 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



**Niveau centennal (grande marée + surcote)
(l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)**



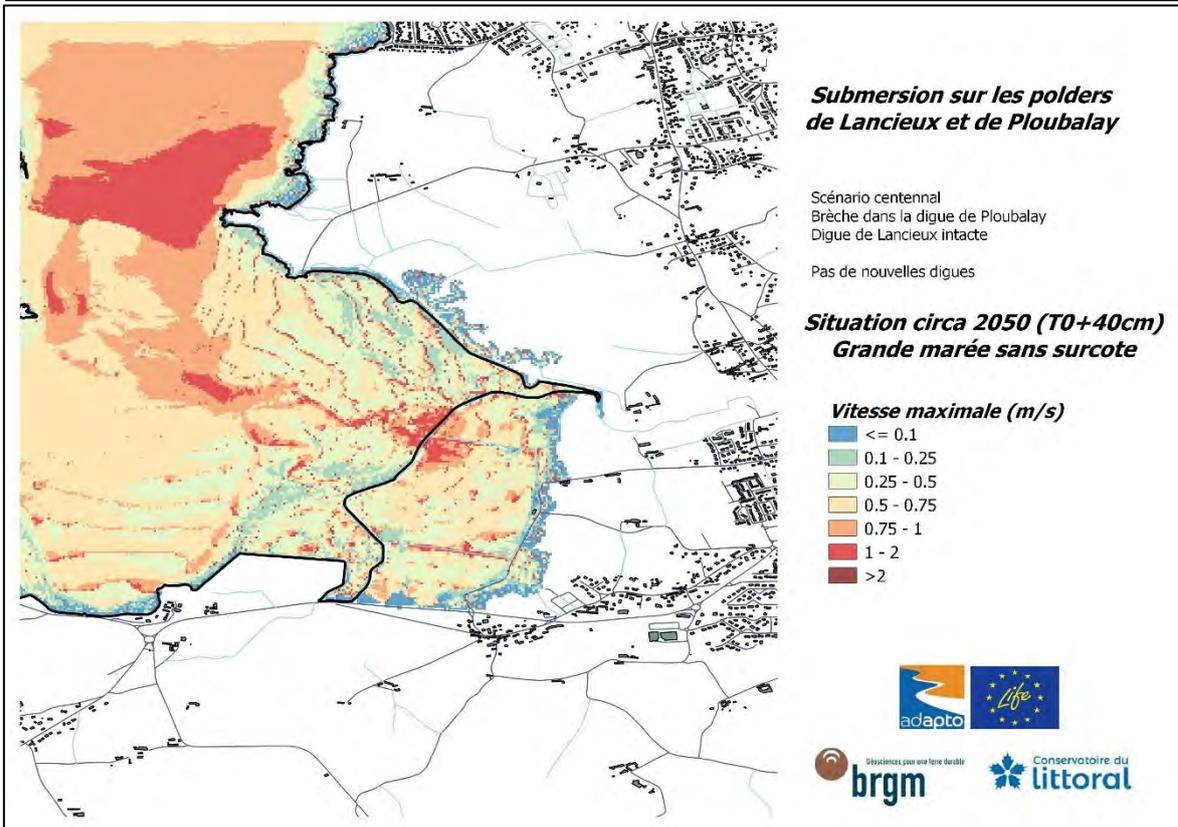
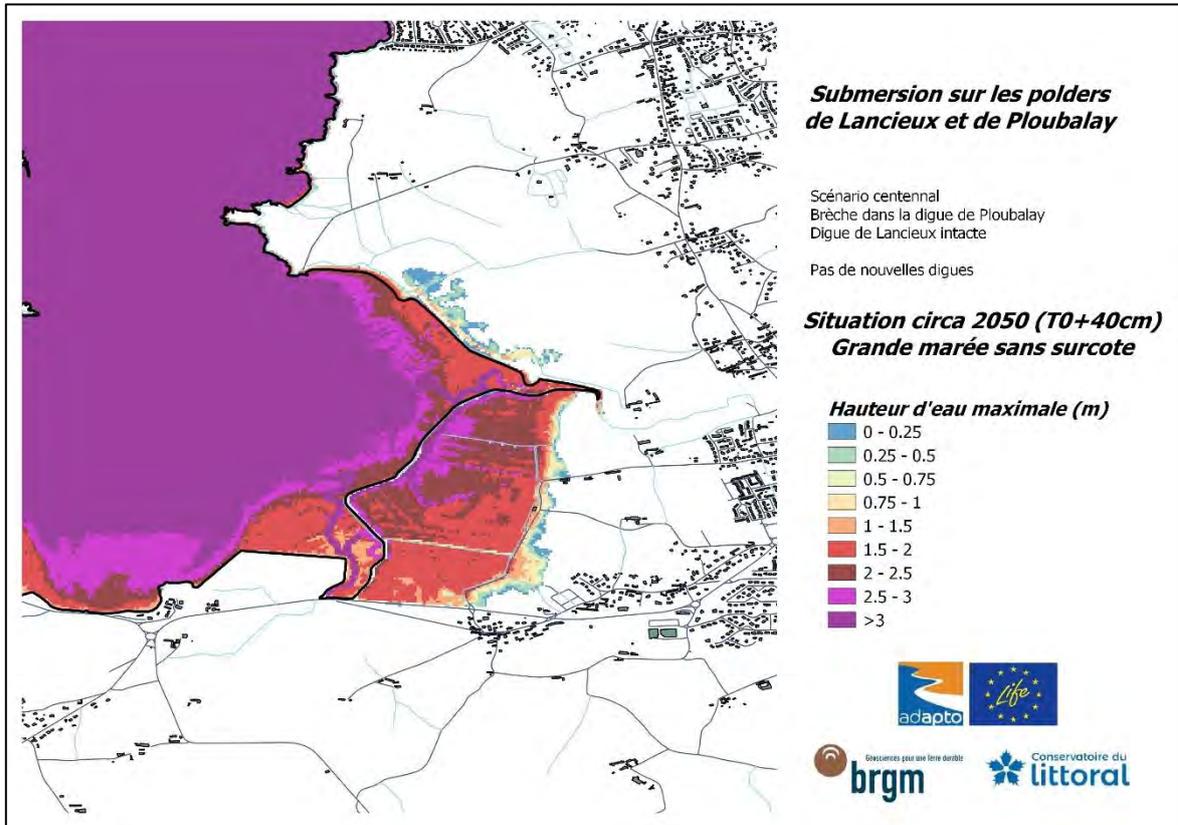
Annexe 4

Résultats obtenus pour le scénario B_2050

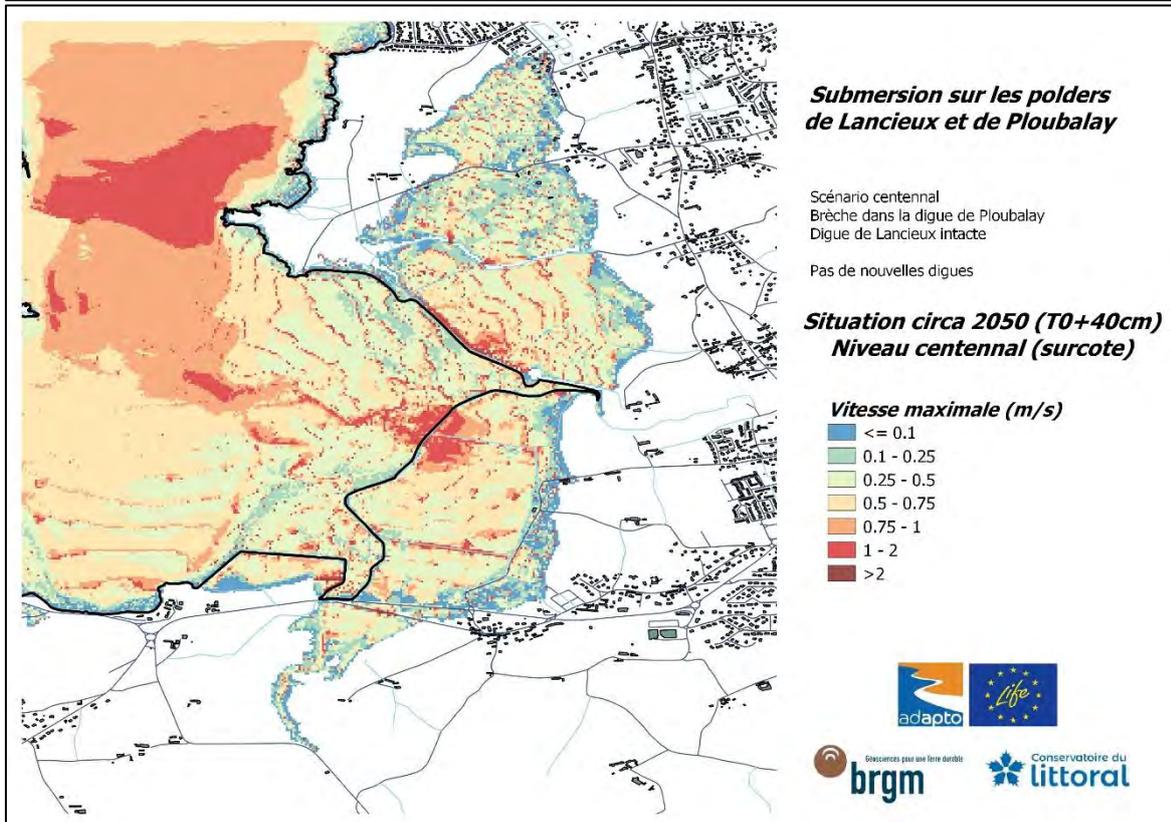
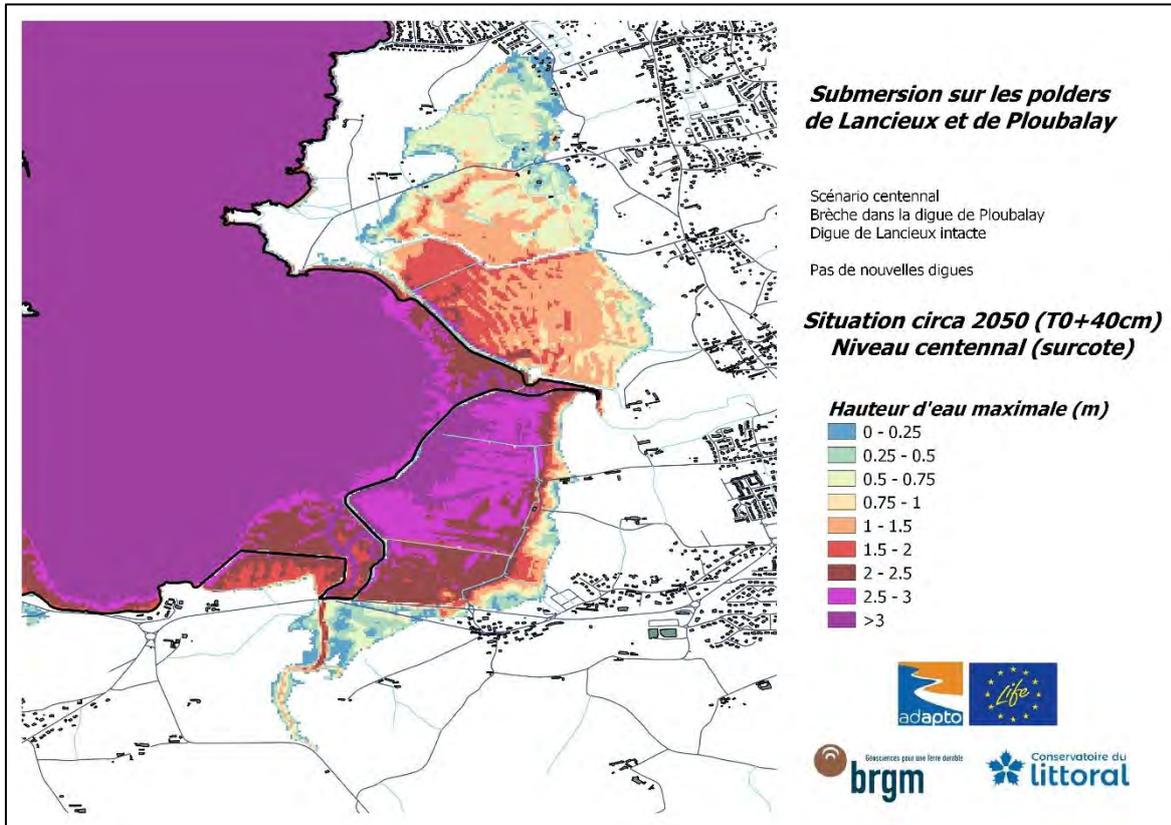
Digue de la Roche intacte Brèche dans la Digue des Marais-Neufs Echéance circa 2050 (T0 +40 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



**Niveau centennal (grande marée + surcote)
(l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)**



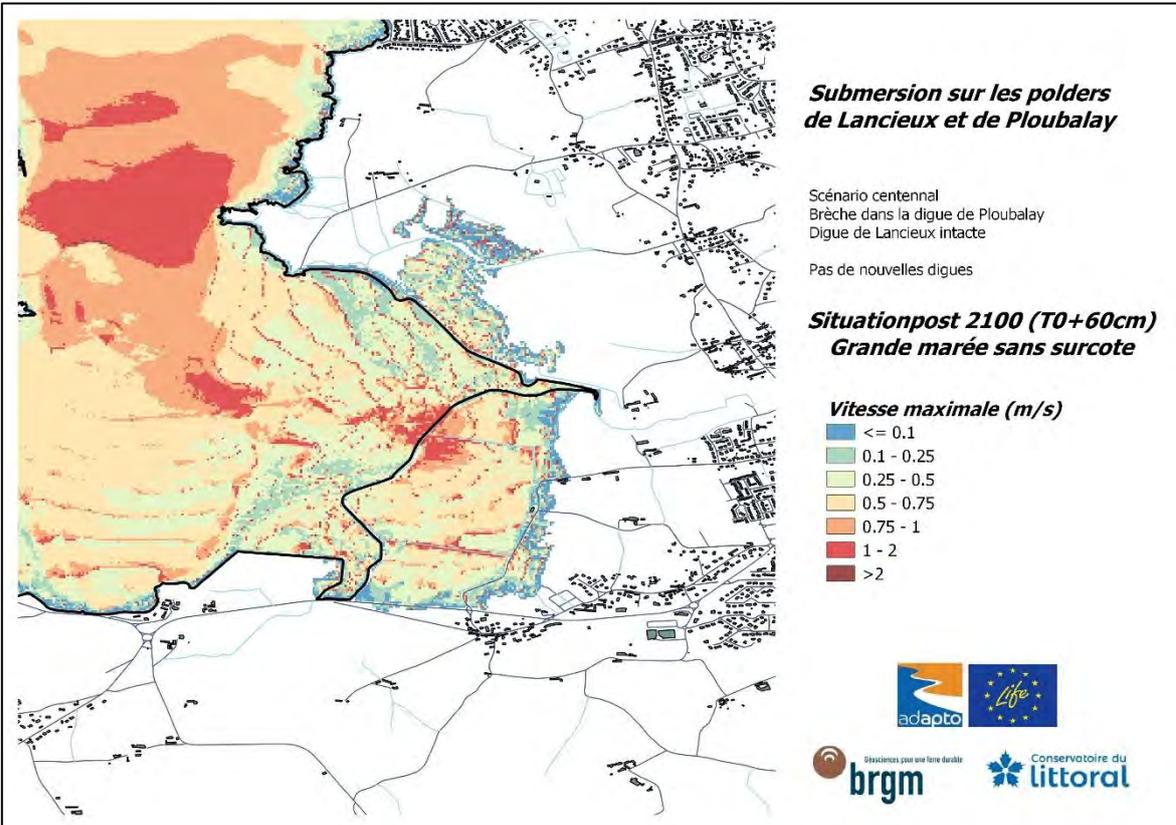
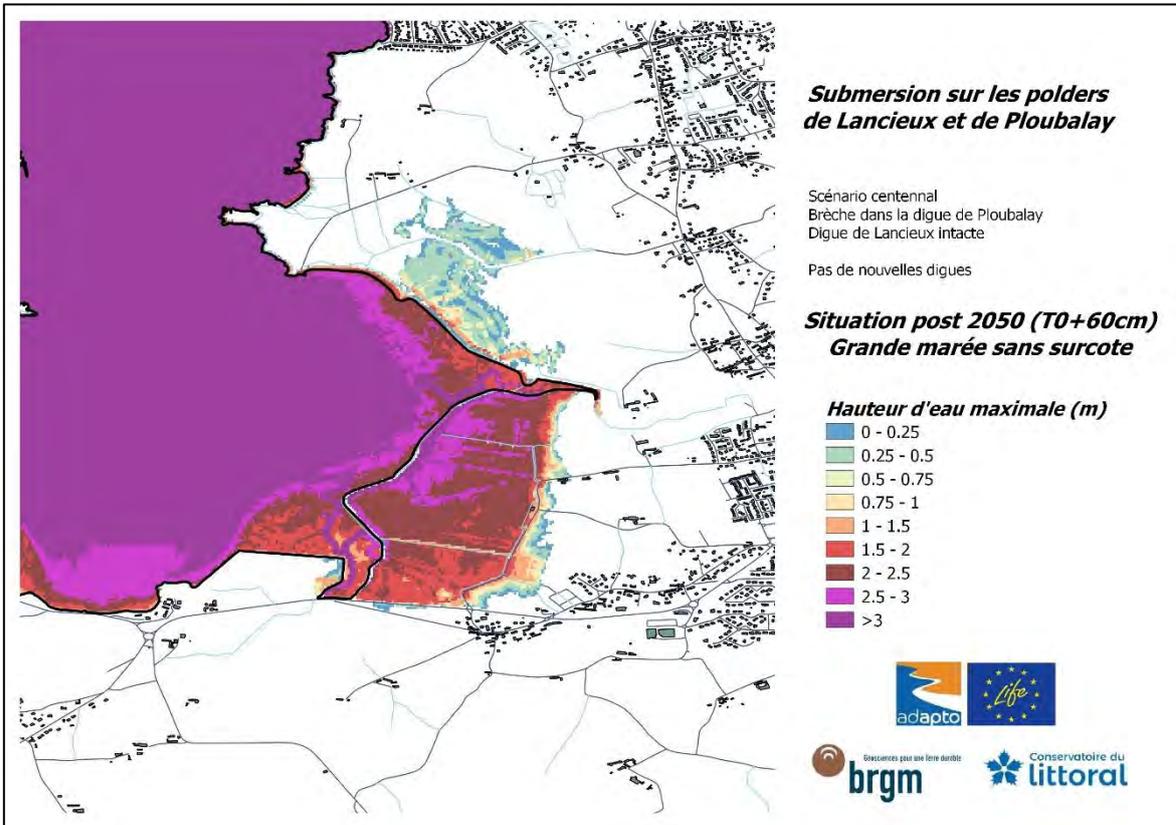
Annexe 5

Résultats obtenus pour le scénario B_2100

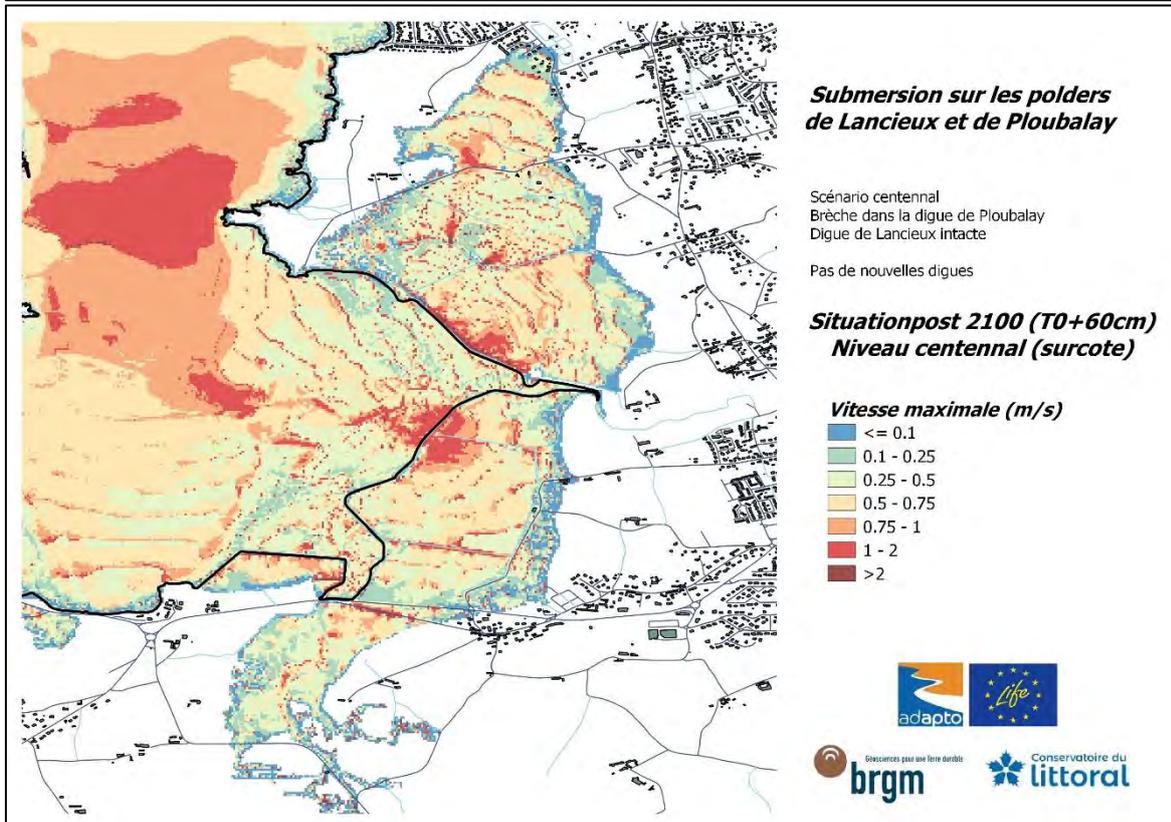
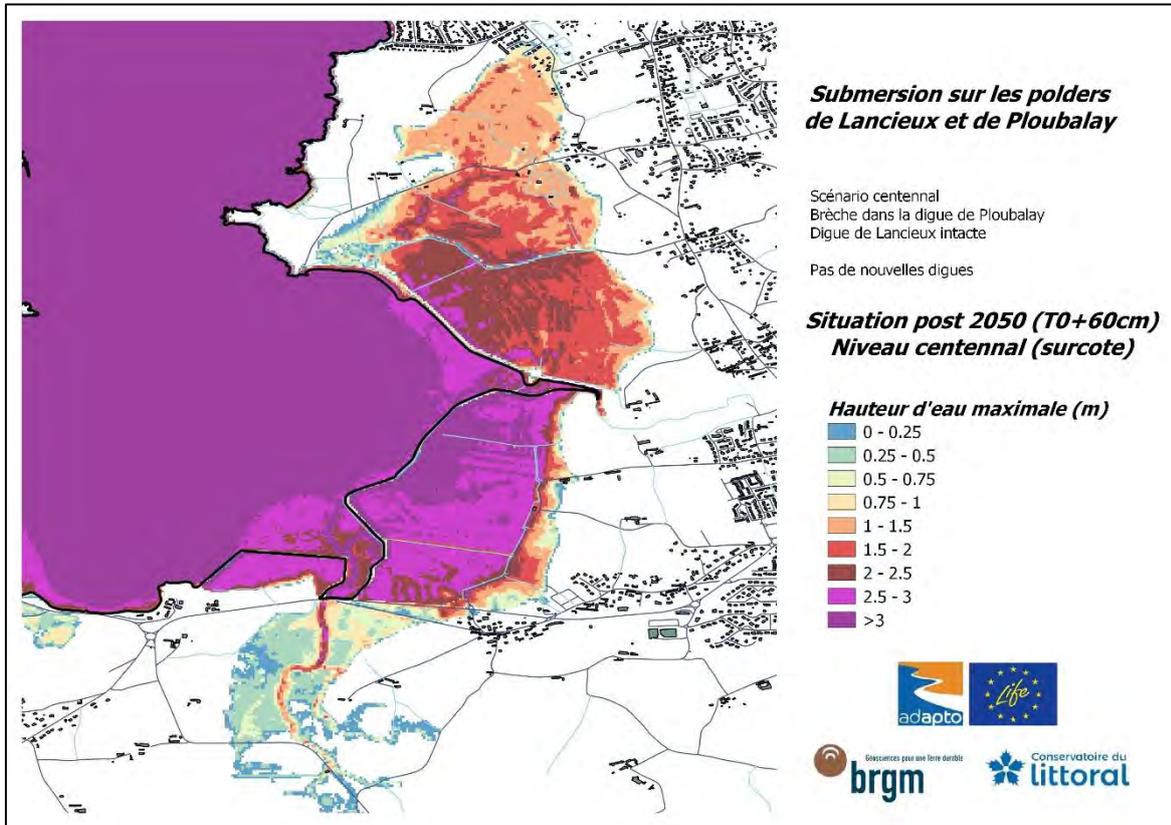
Digue de la Roche intacte Brèche dans la Digue des Marais-Neufs Echéance post 2050 (T0 +60 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



**Niveau centennal (grande marée + surcote)
(l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)**



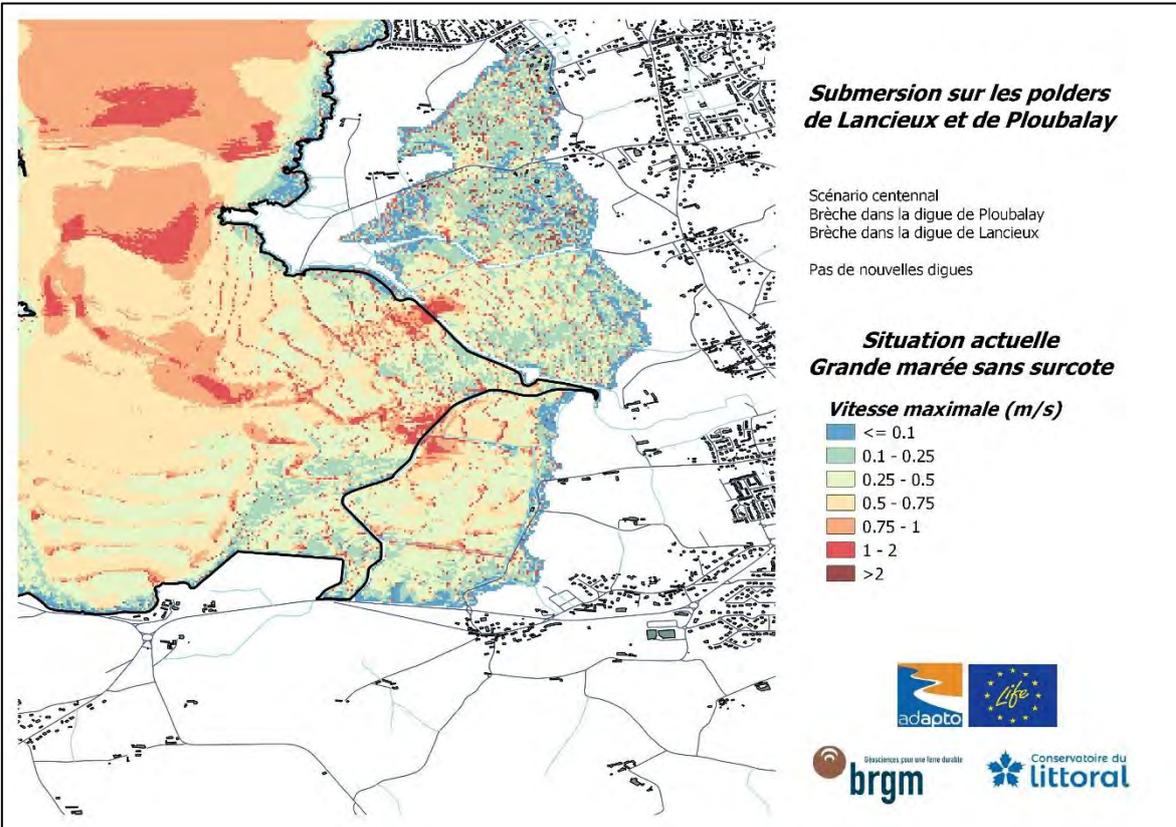
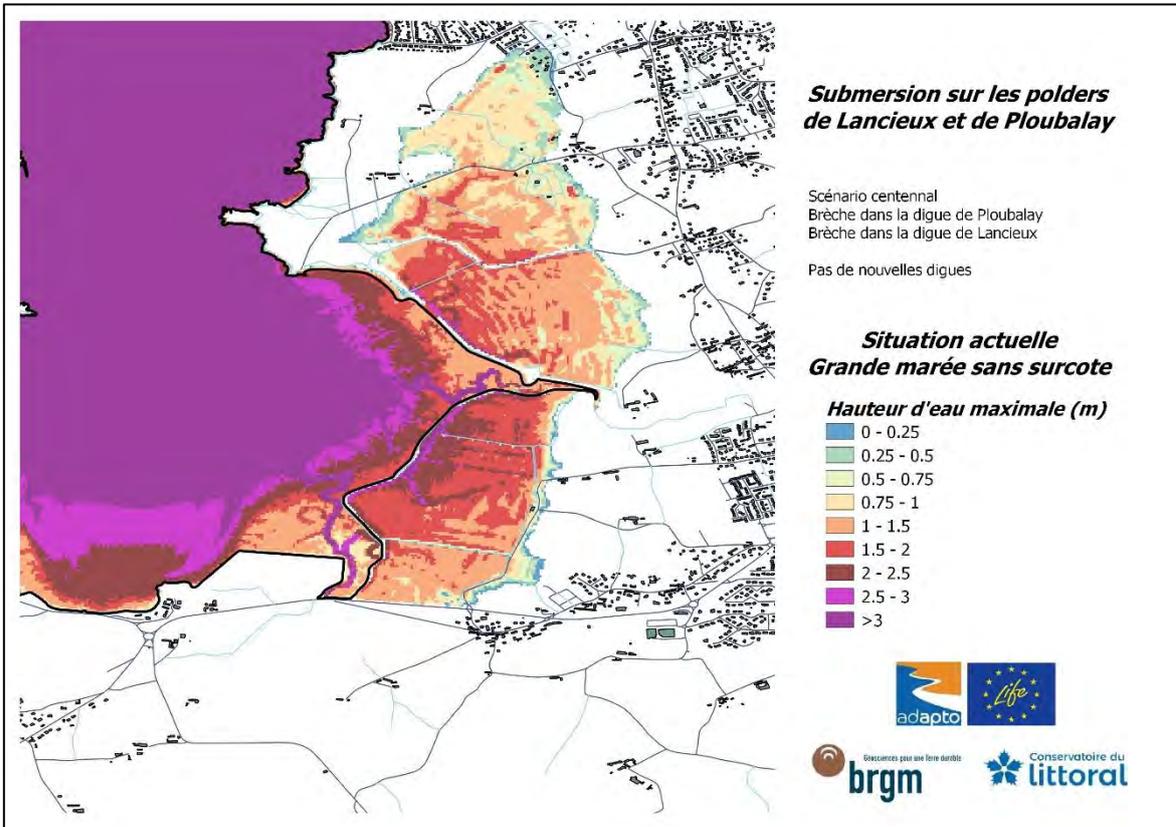
Annexe 6

Résultats obtenus pour le scénario C_2020

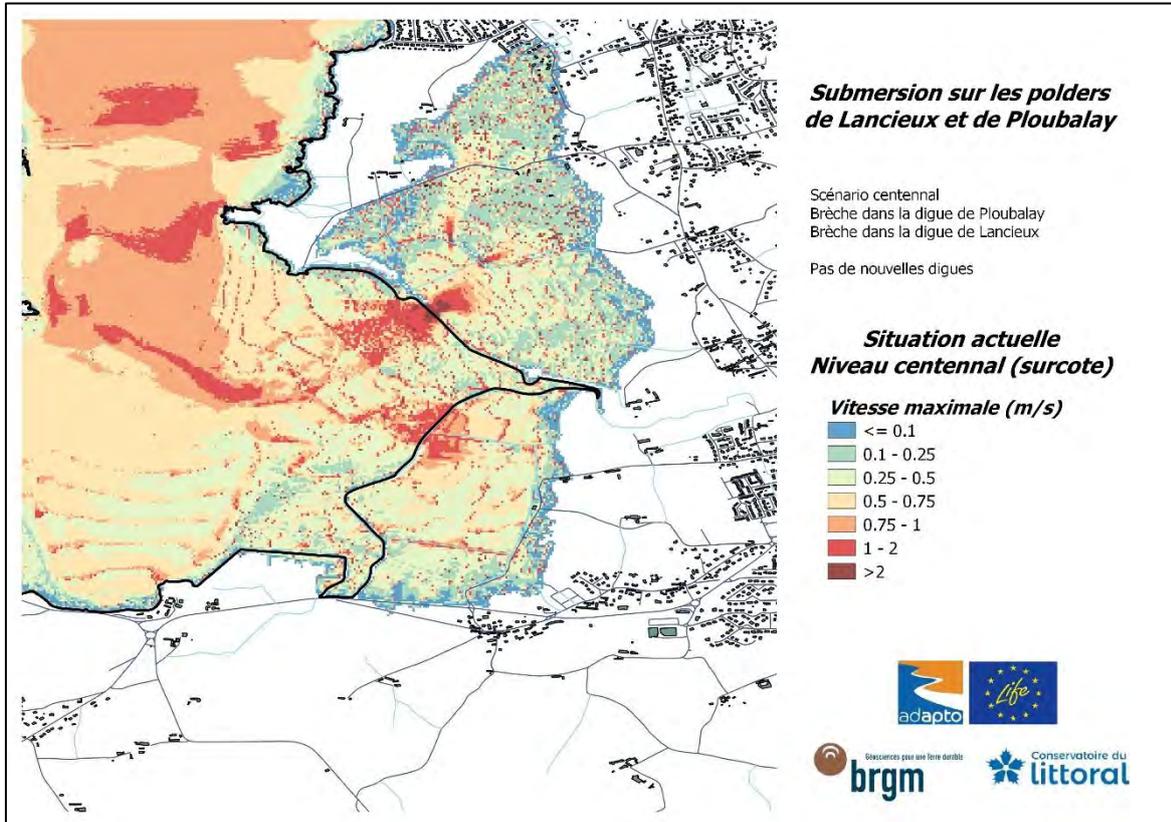
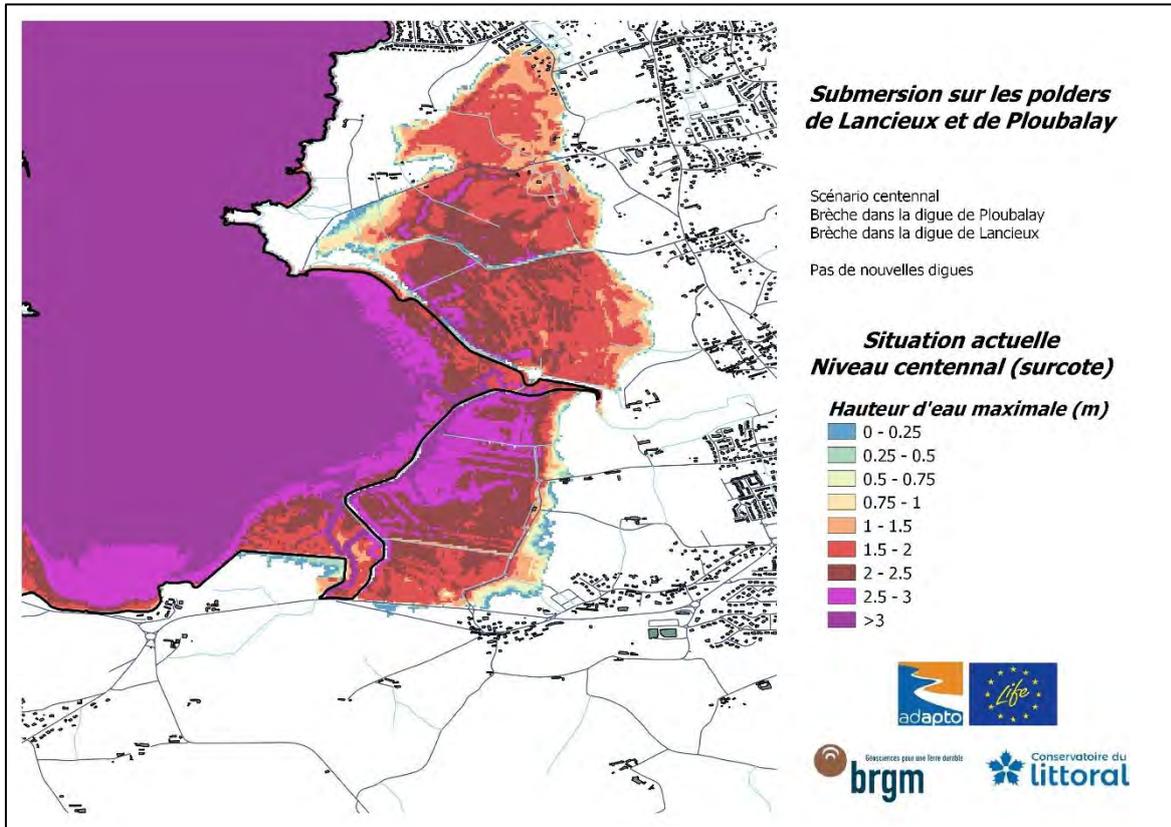
Brèche dans la Digue de la Roche Brèche dans la Digue des Marais-Neufs Echéance actuelle

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



Niveau centennal (grande marée + surcote)
 (l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)



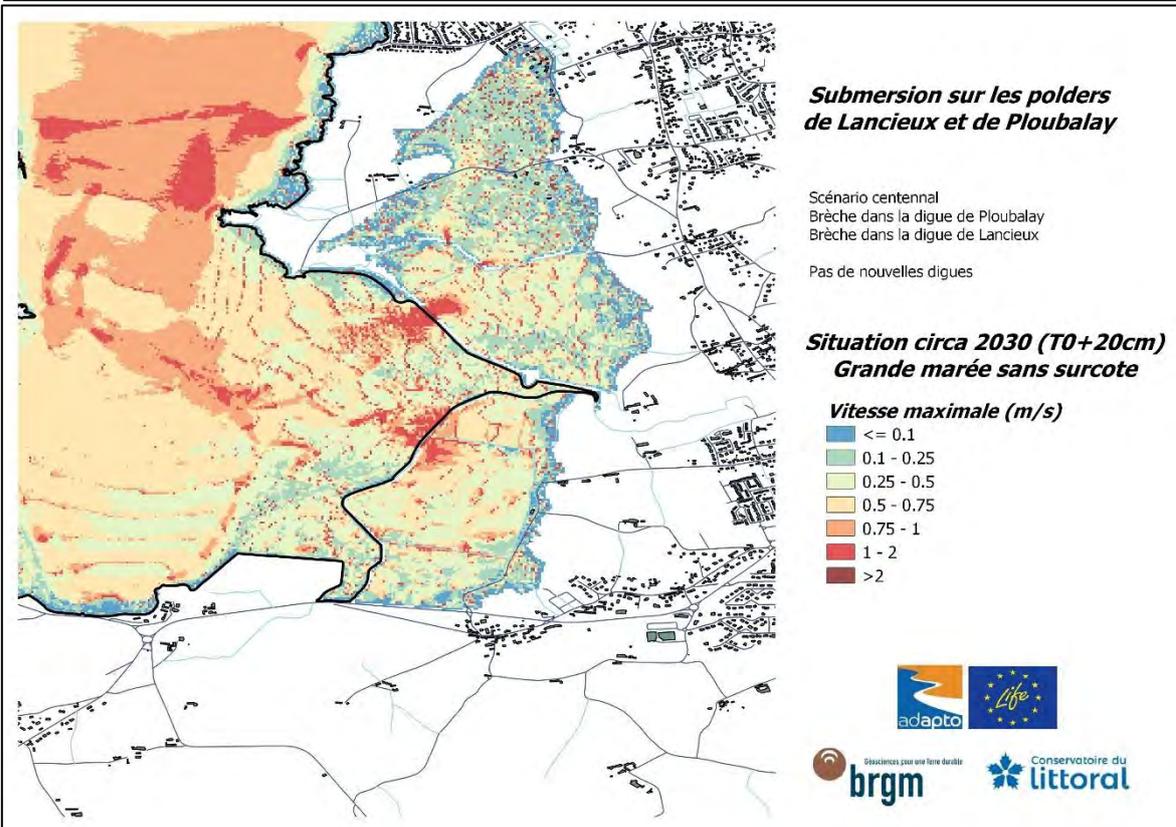
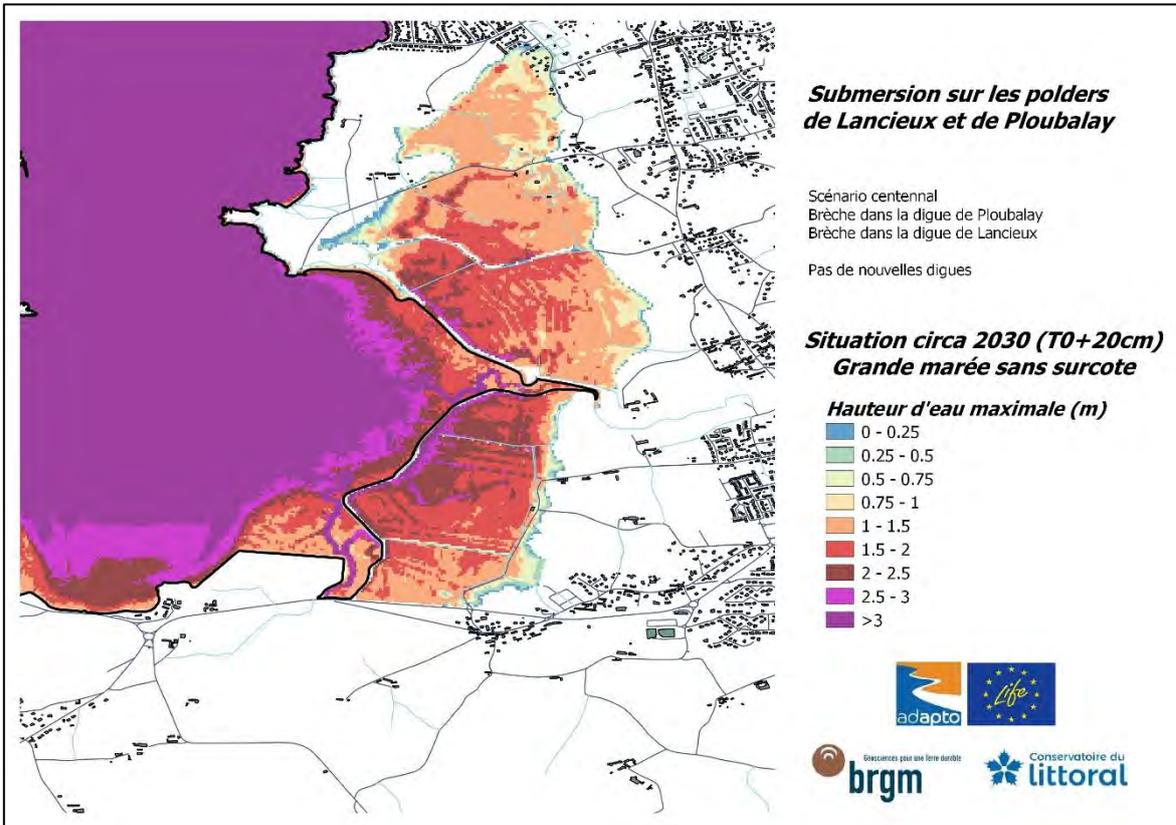
Annexe 7

Résultats obtenus pour le scénario C_2030

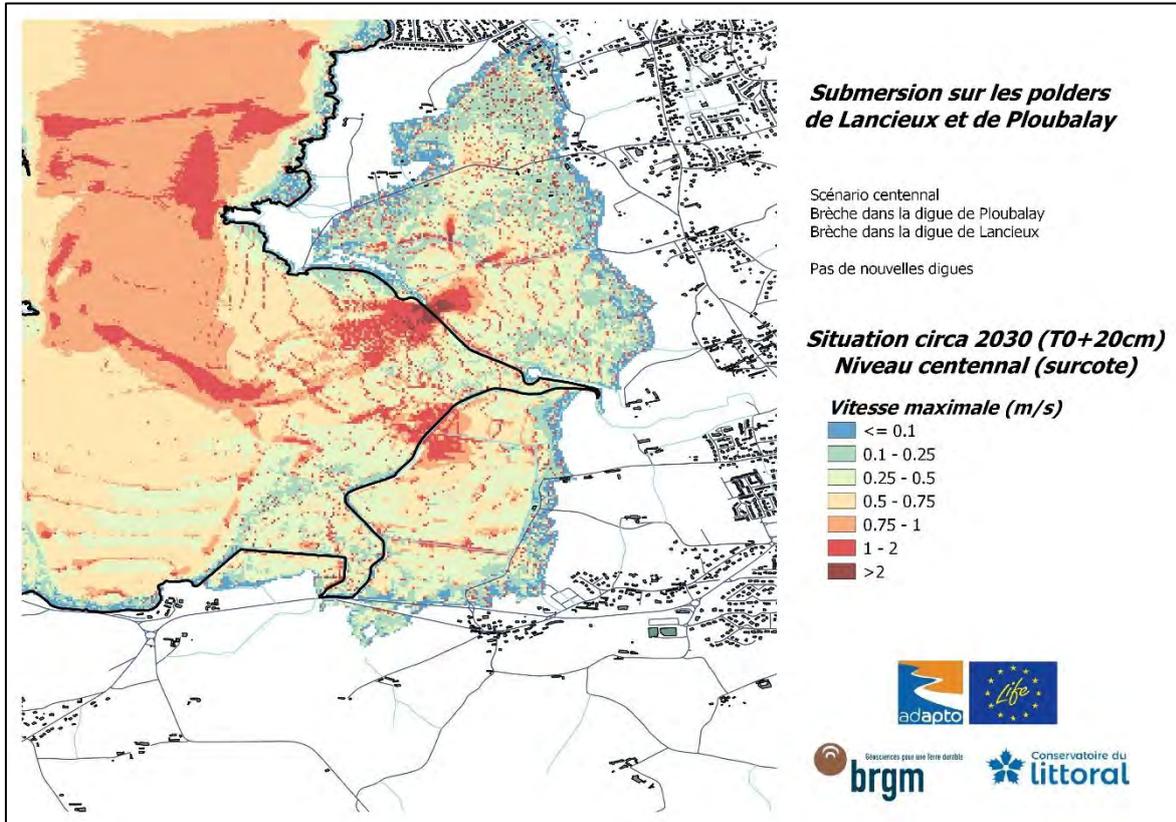
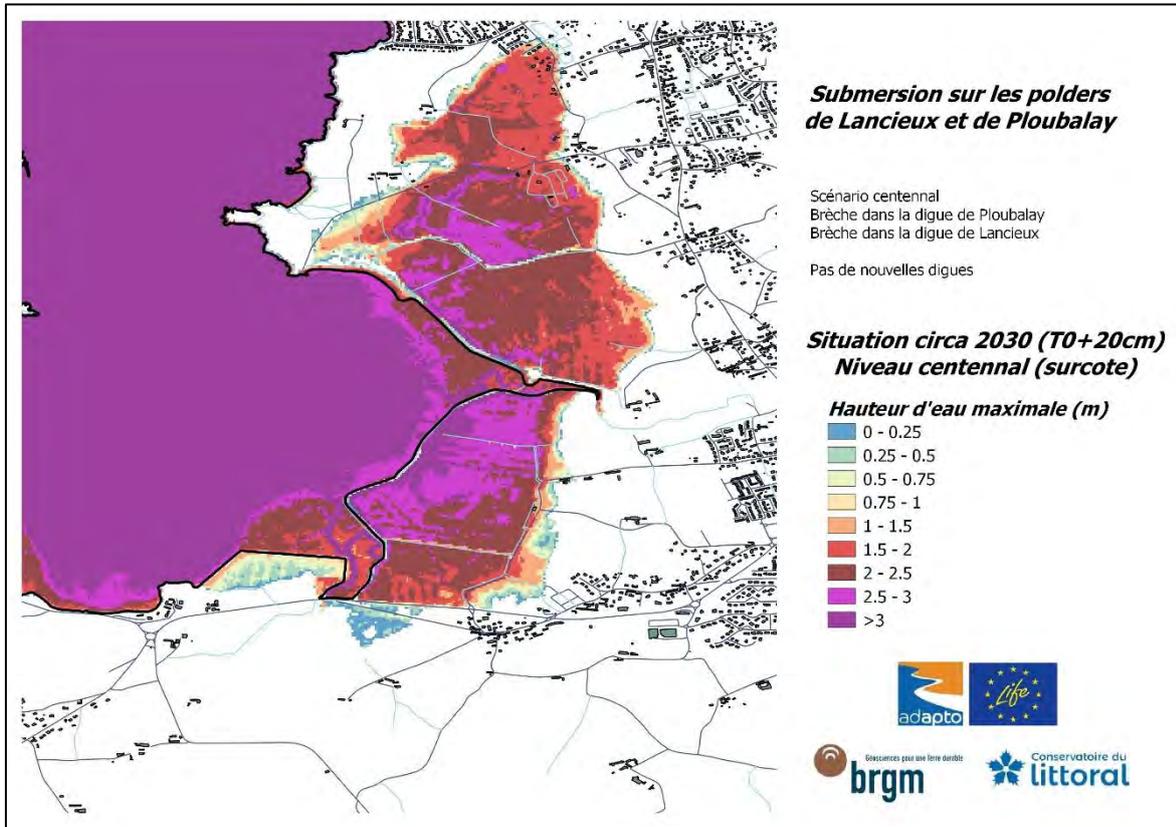
Brèche dans la Digue de la Roche Brèche dans la Digue des Marais-Neufs Echéance circa 2030 (T0 +20 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



**Niveau centennal (grande marée + surcote)
(l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)**



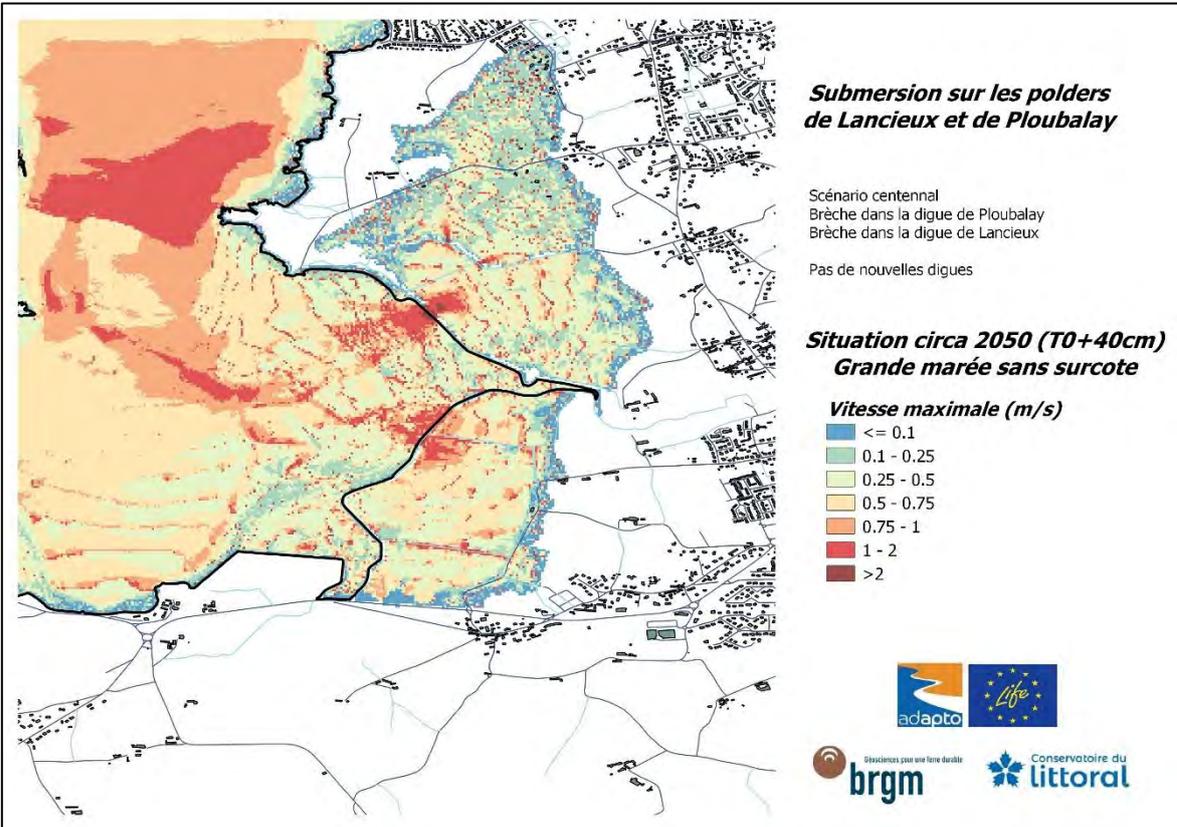
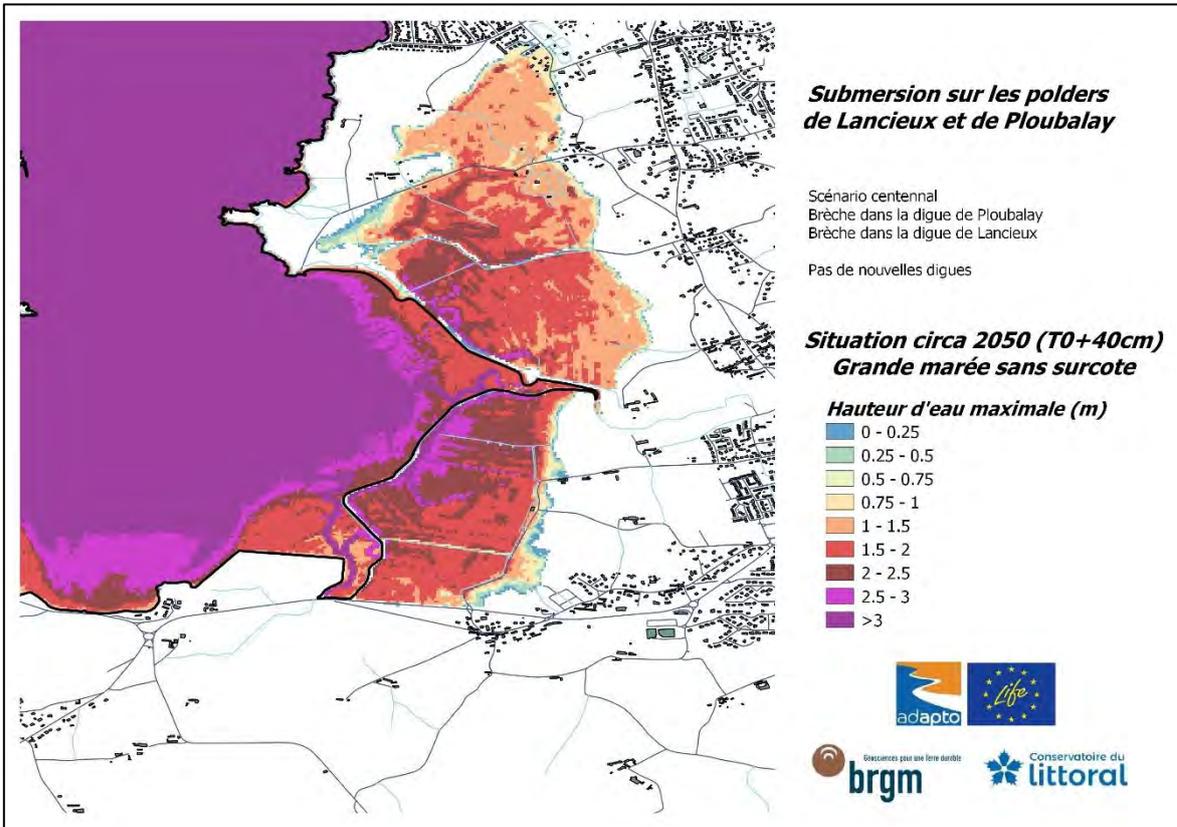
Annexe 8

Résultats obtenus pour le scénario C_2050

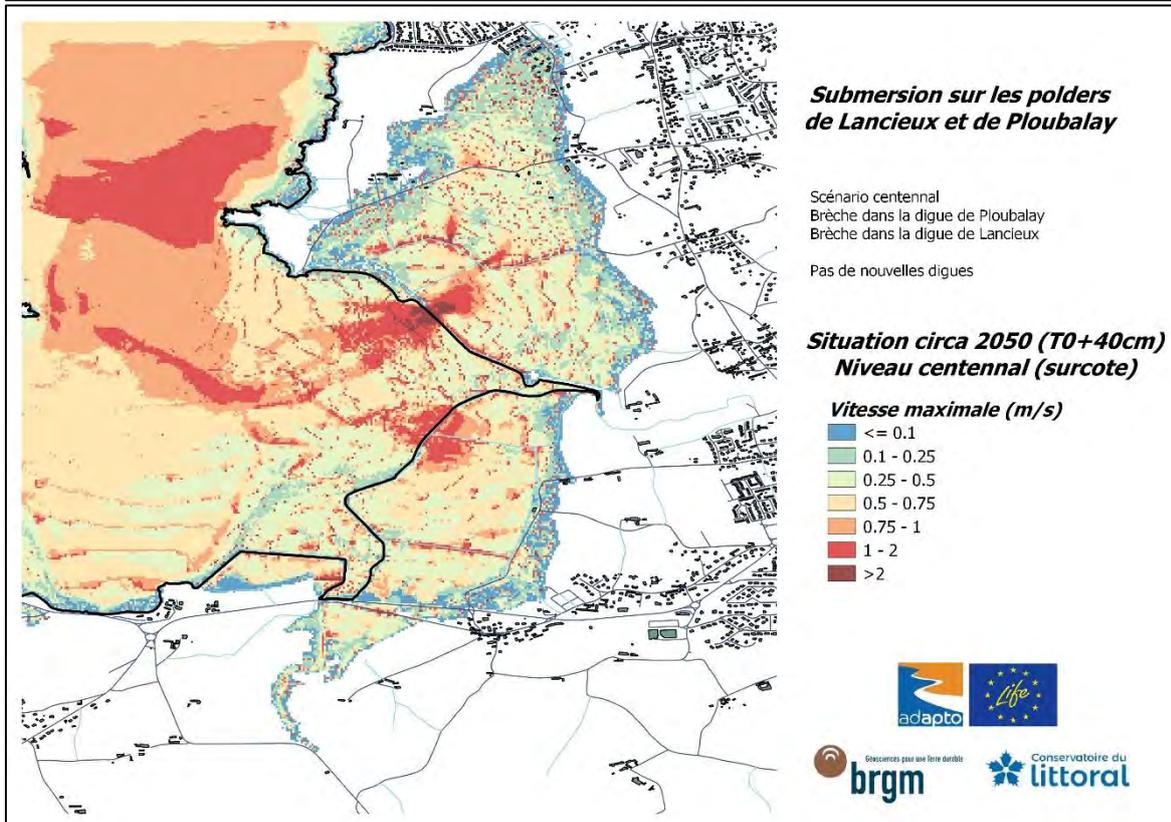
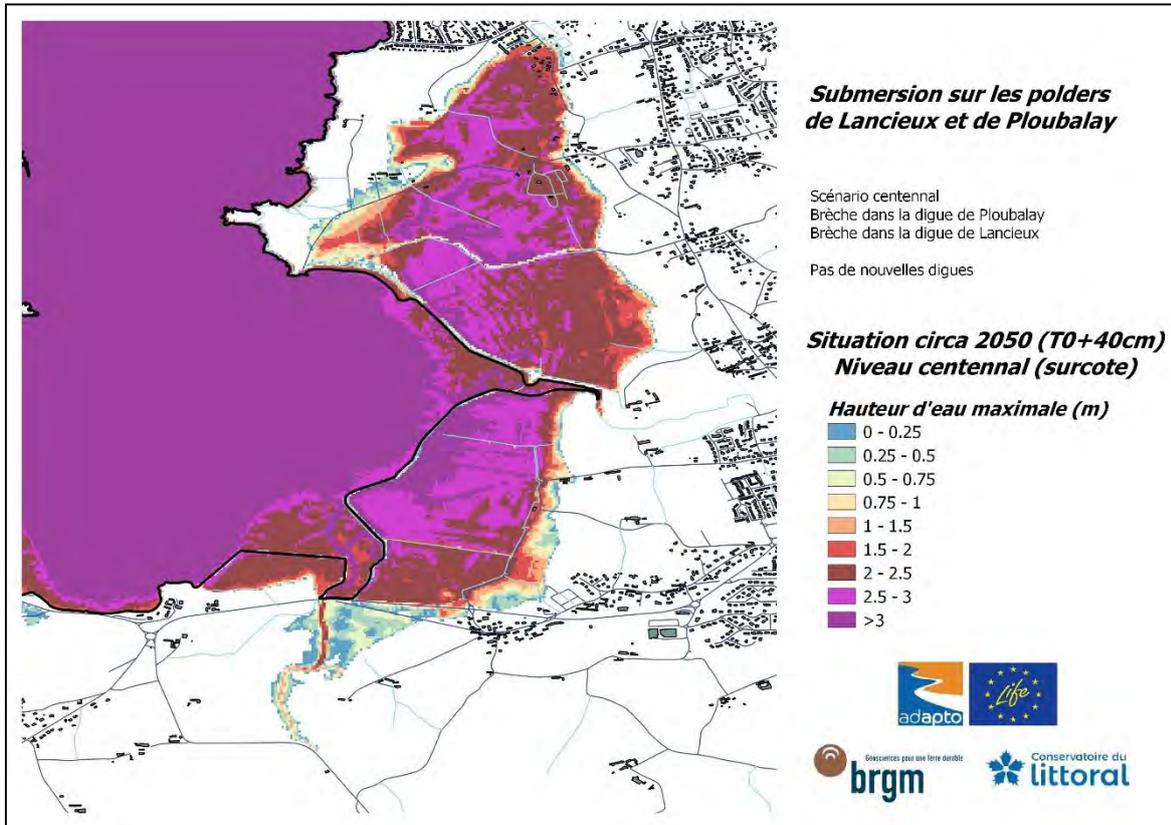
Brèche dans la Digue de la Roche Brèche dans la Digue des Marais-Neufs Echéance circa 2050 (T0 +40 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



**Niveau centennal (grande marée + surcote)
(l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)**



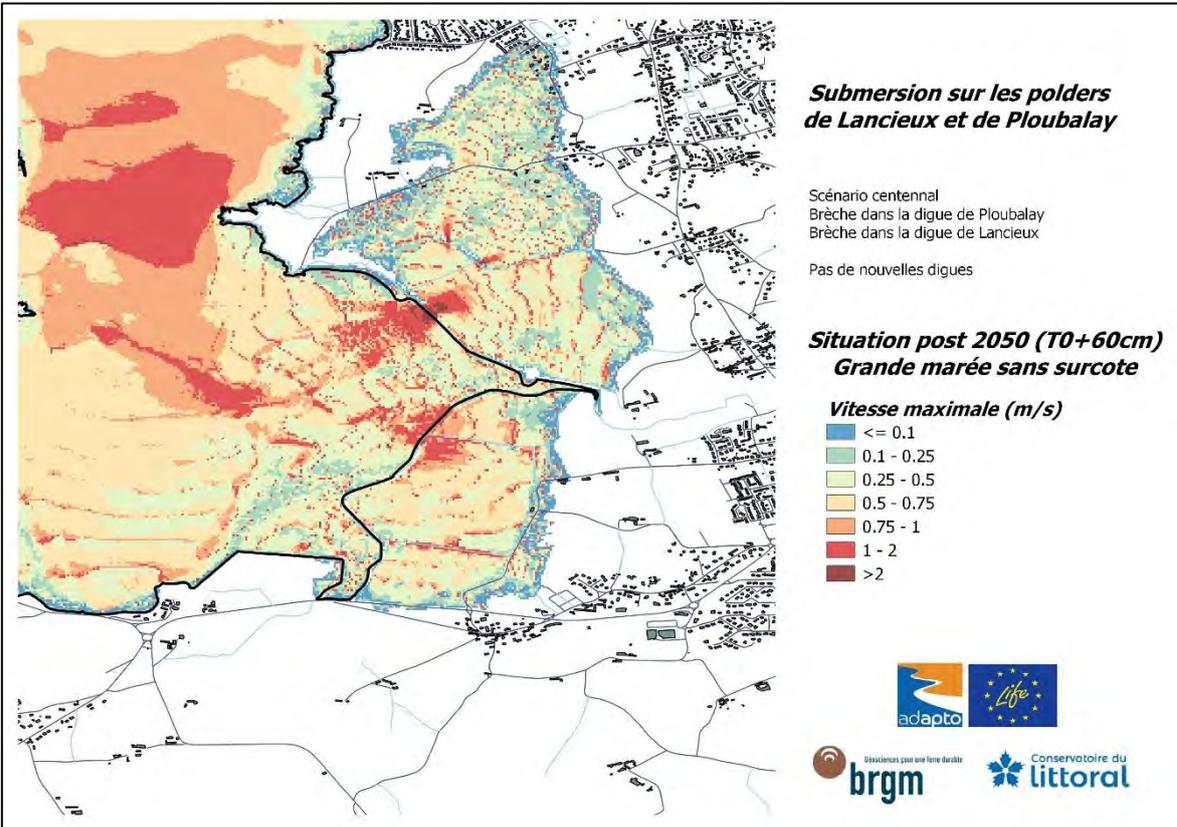
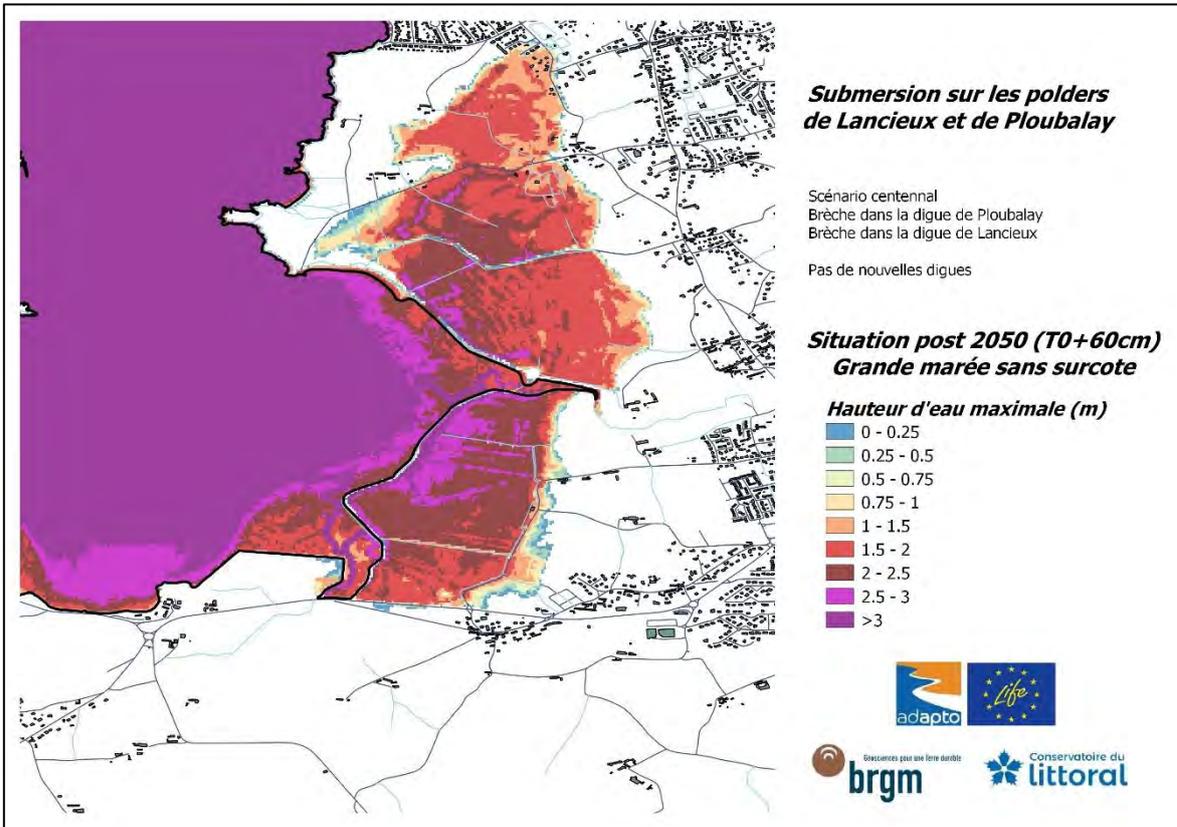
Annexe 9

Résultats obtenus pour le scénario C_2100

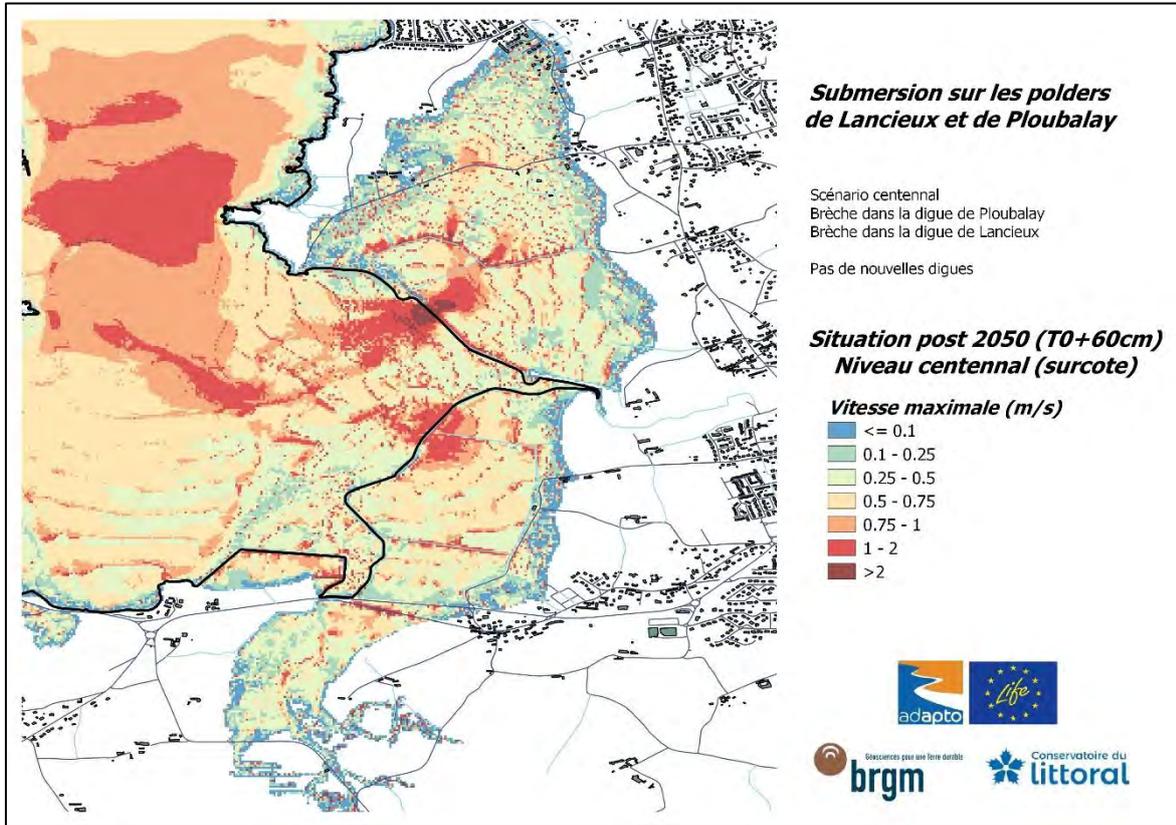
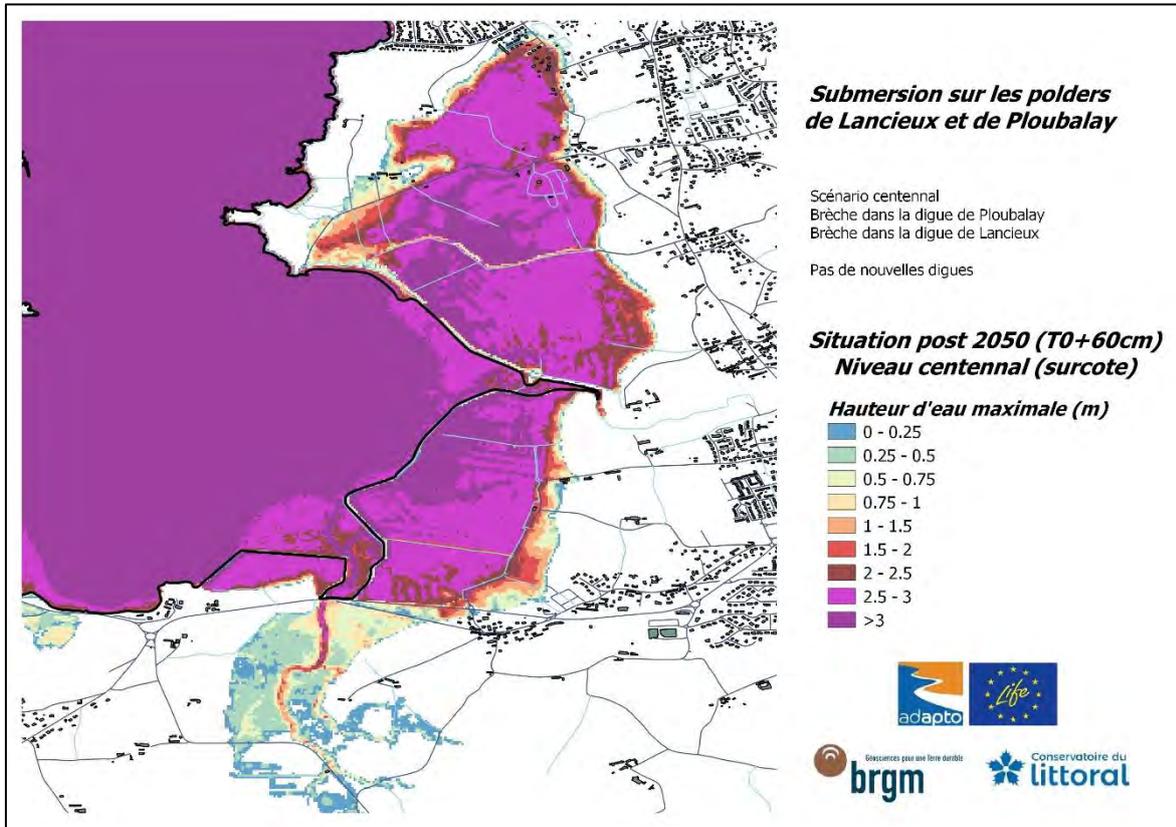
Brèche dans la Digue de la Roche Brèche dans la Digue des Marais-Neufs Echéance post 2050 (T0 +60 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



**Niveau centennal (grande marée + surcote)
(l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)**



Annexe 10

Résultats obtenus pour le scénario CA1_2020

Brèche dans la Digue de la Roche

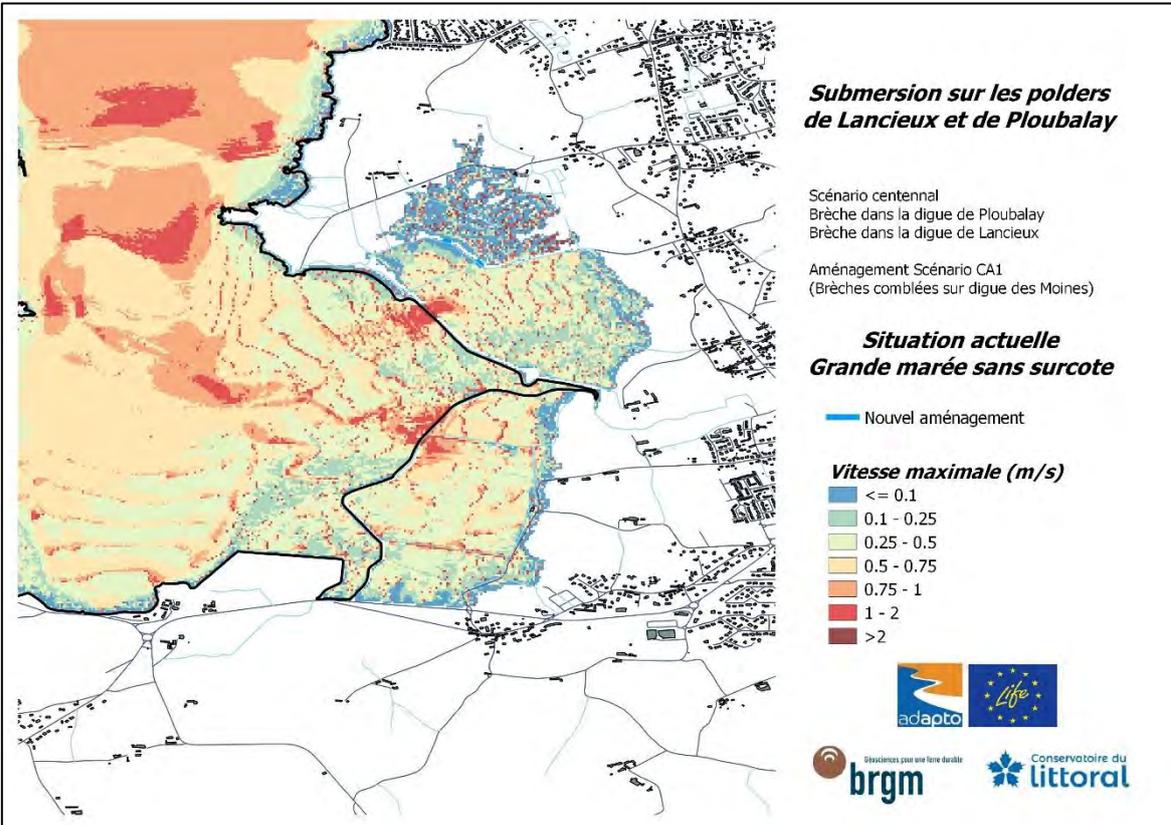
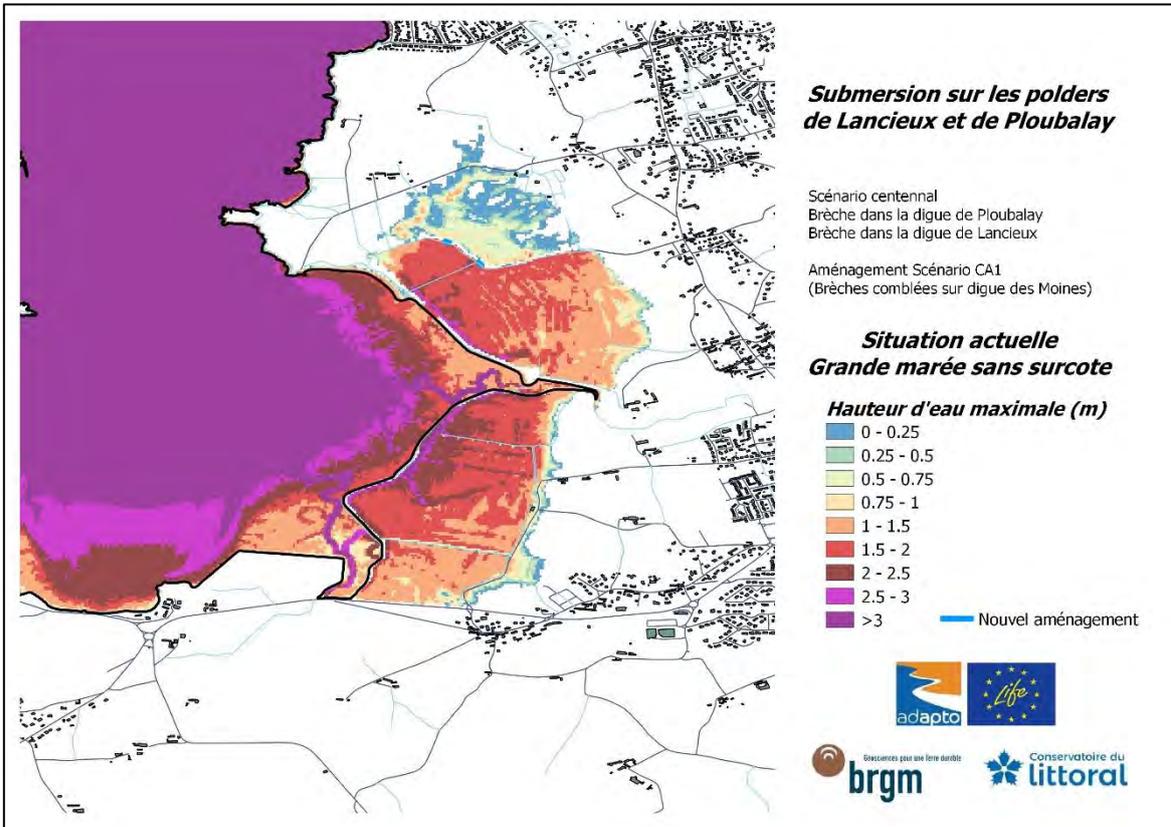
Brèche dans la Digue des Marais-Neufs

Nouvel aménagement : Comblement des brèches dans la digue des Moines

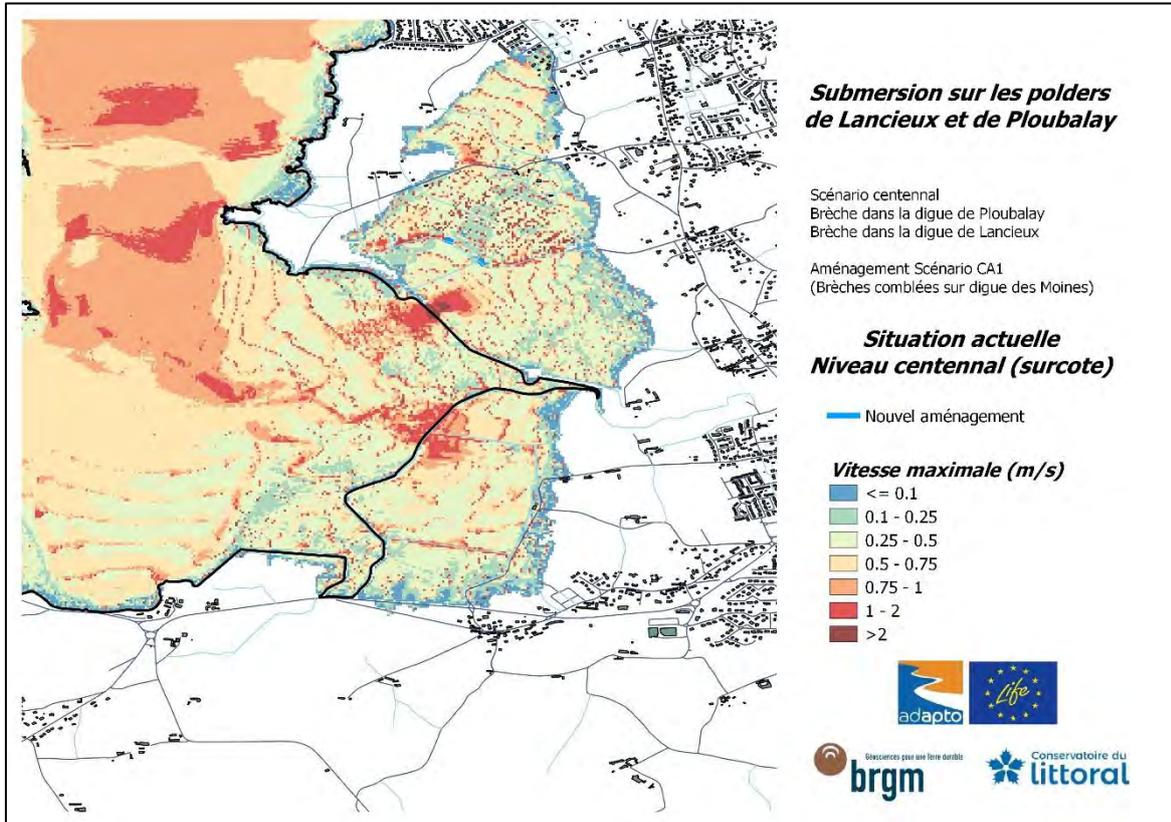
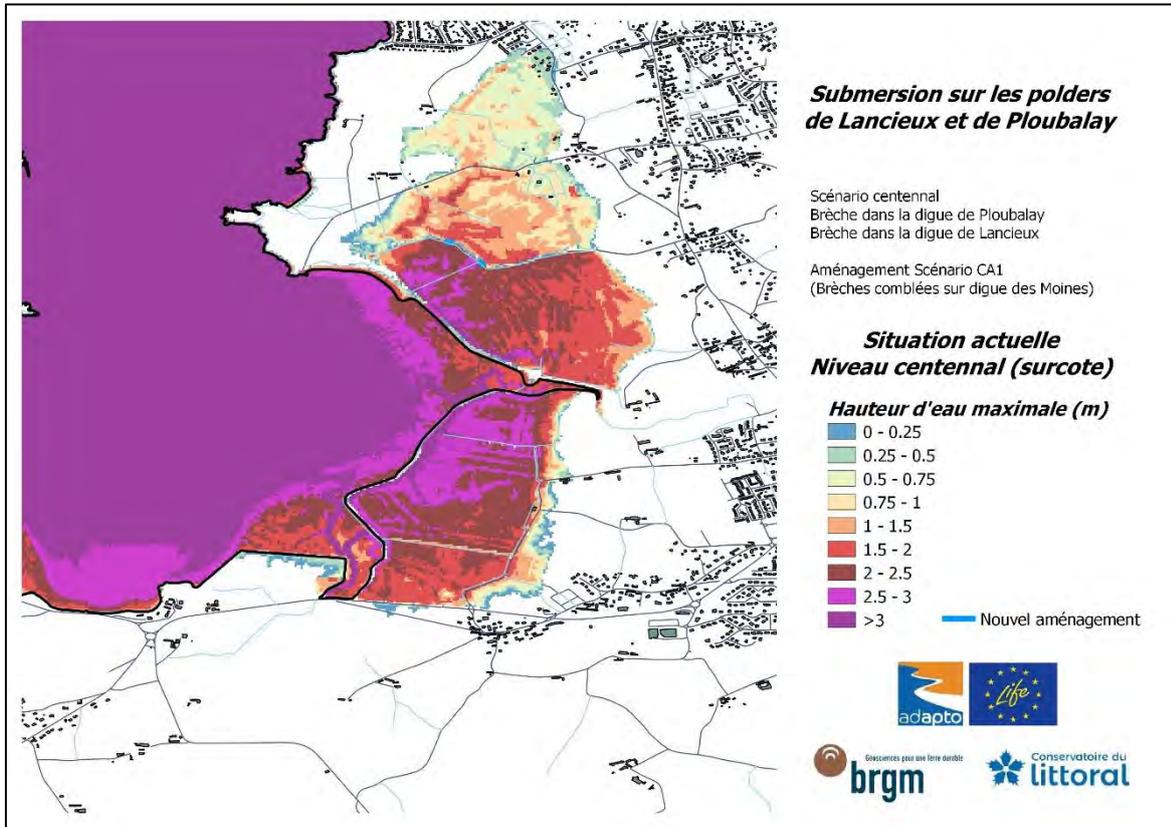
Echéance actuelle

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



Niveau centennal (grande marée + surcote)
 (l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)



Annexe 11

Résultats obtenus pour le scénario CA1_2030

Brèche dans la Digue de la Roche

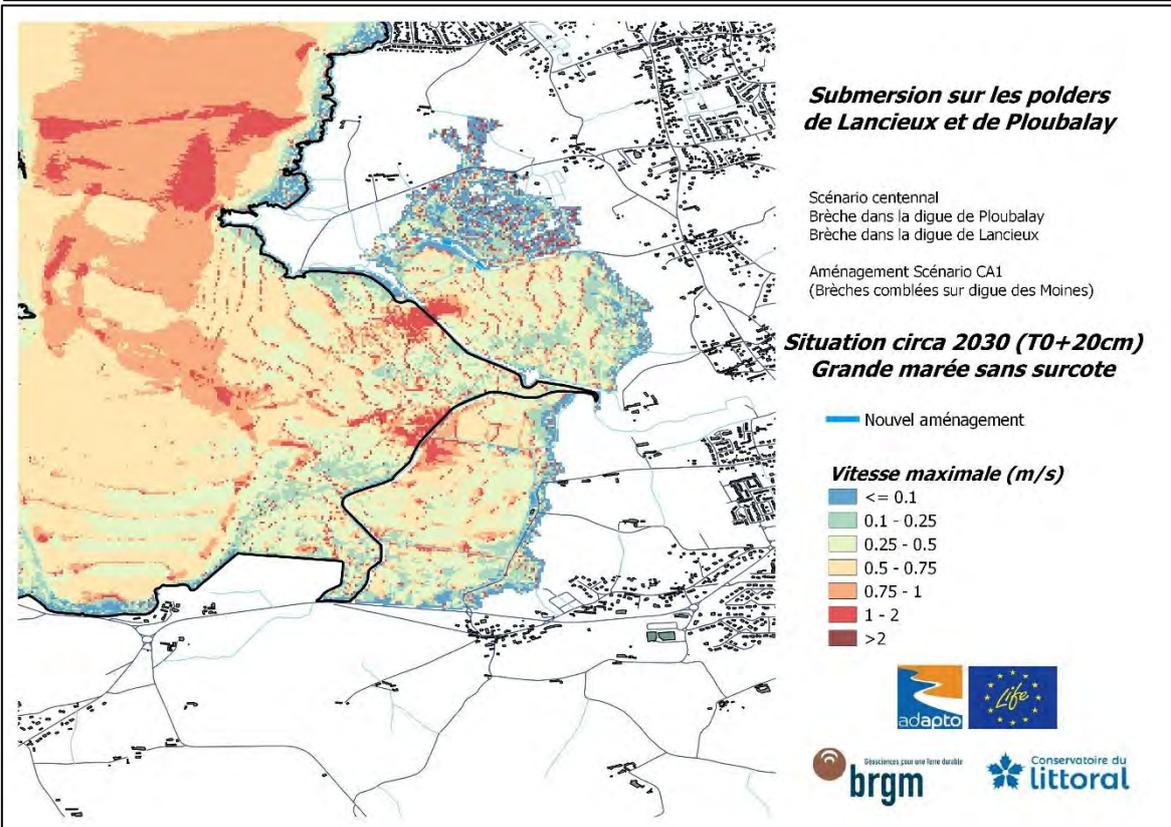
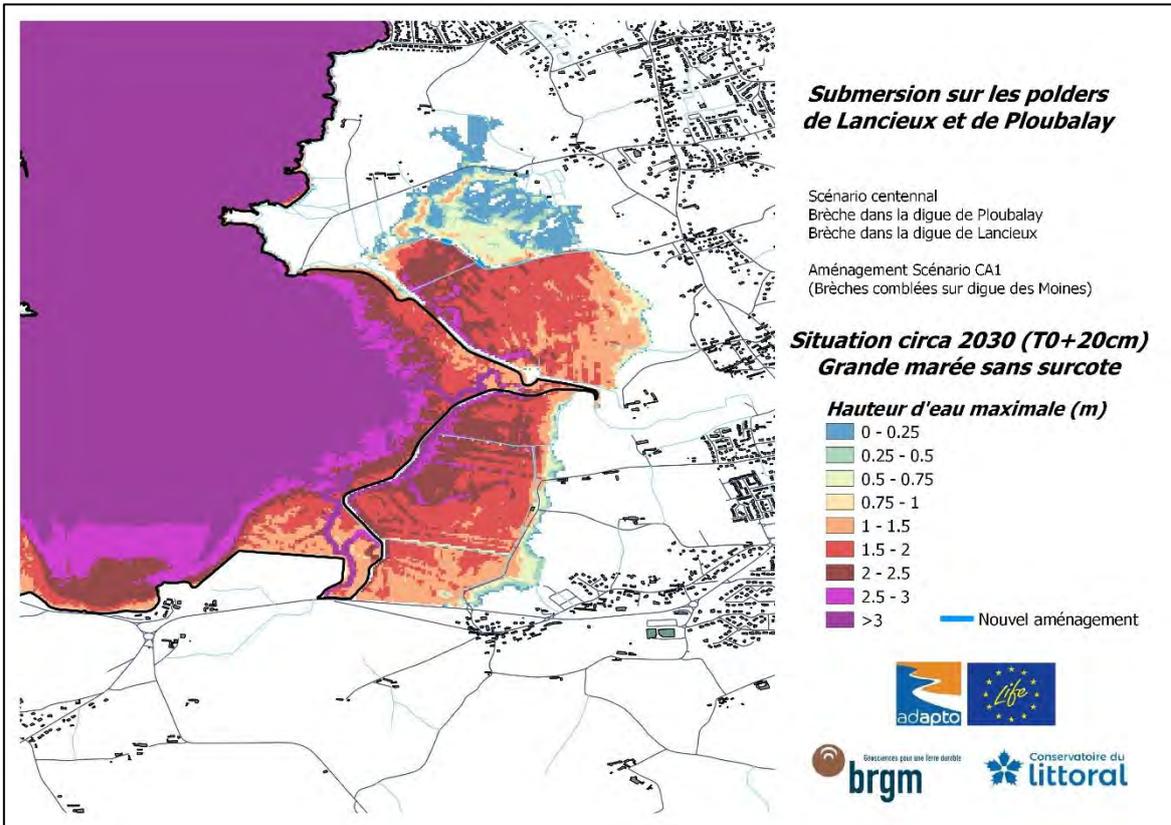
Brèche dans la Digue des Marais-Neufs

Nouvel aménagement : Comblement des brèches dans la digue des Moines

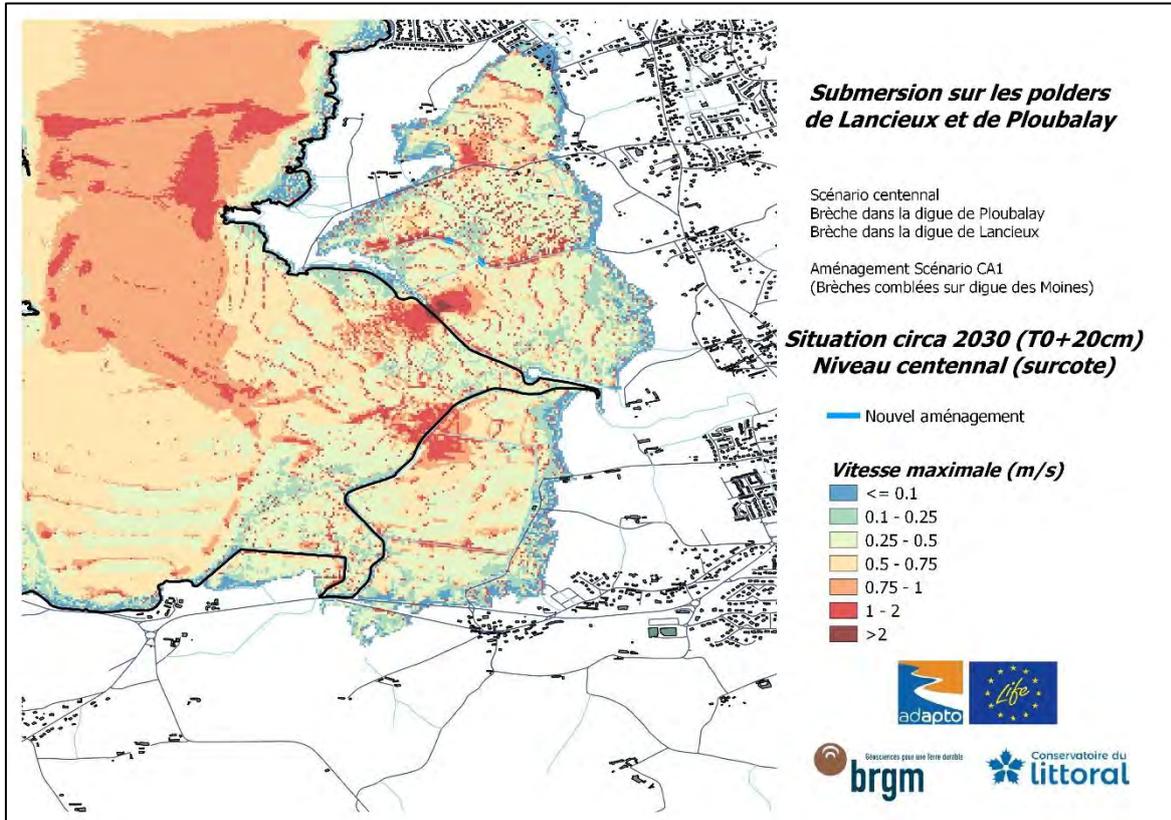
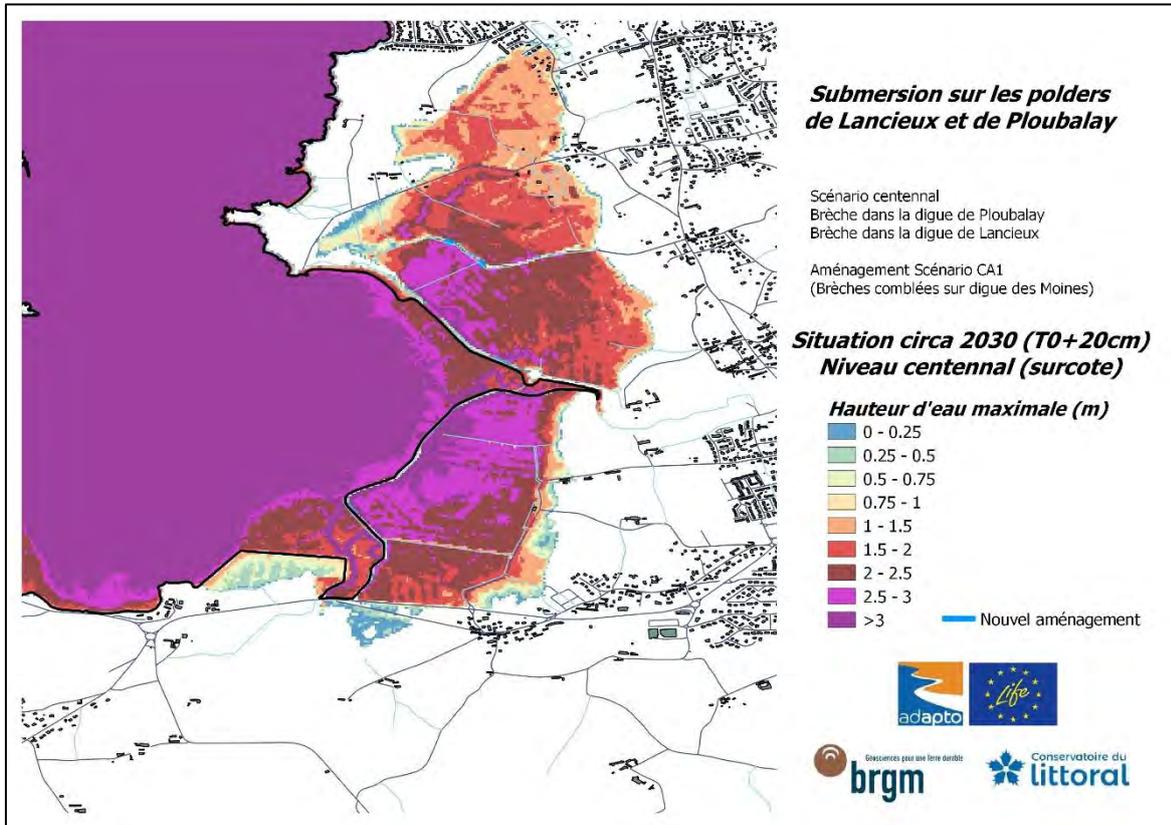
Echéance circa 2030 (T0 +20 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



Niveau centennal (grande marée + surcote)
 (l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)



Annexe 12

Résultats obtenus pour le scénario CA1_2050

Brèche dans la Digue de la Roche

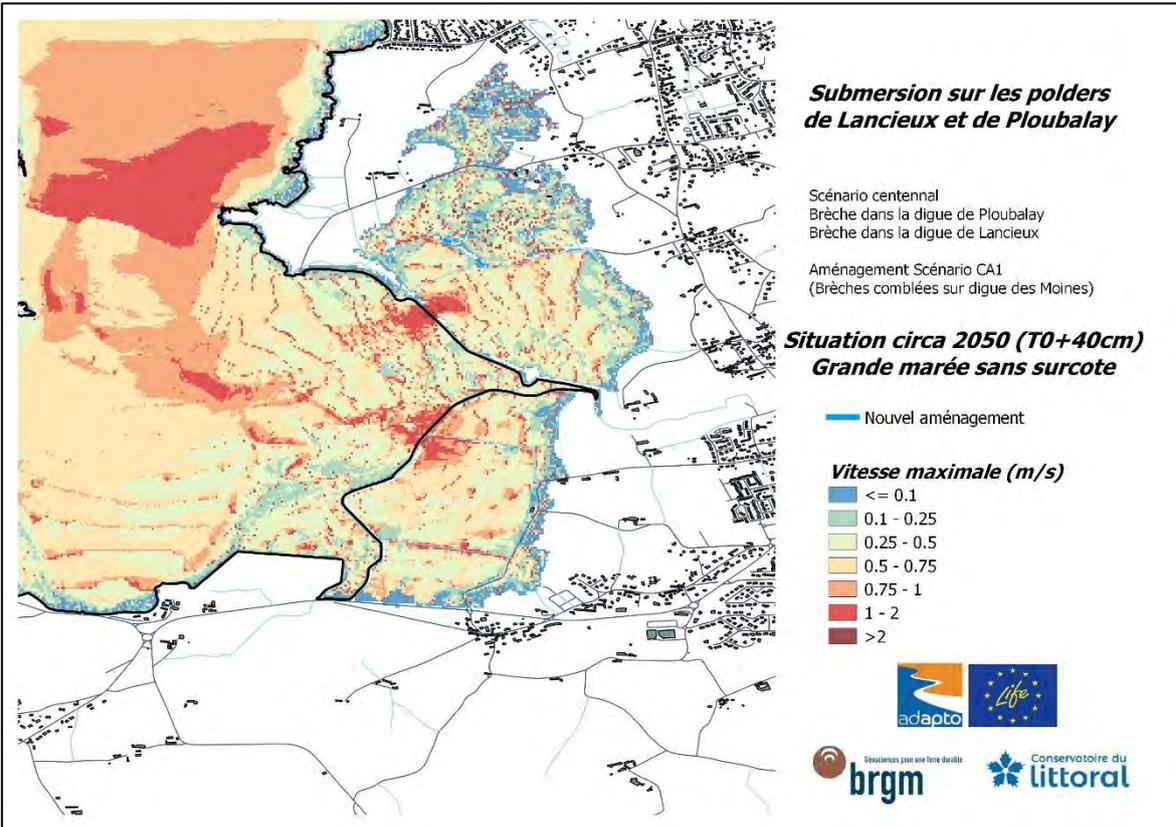
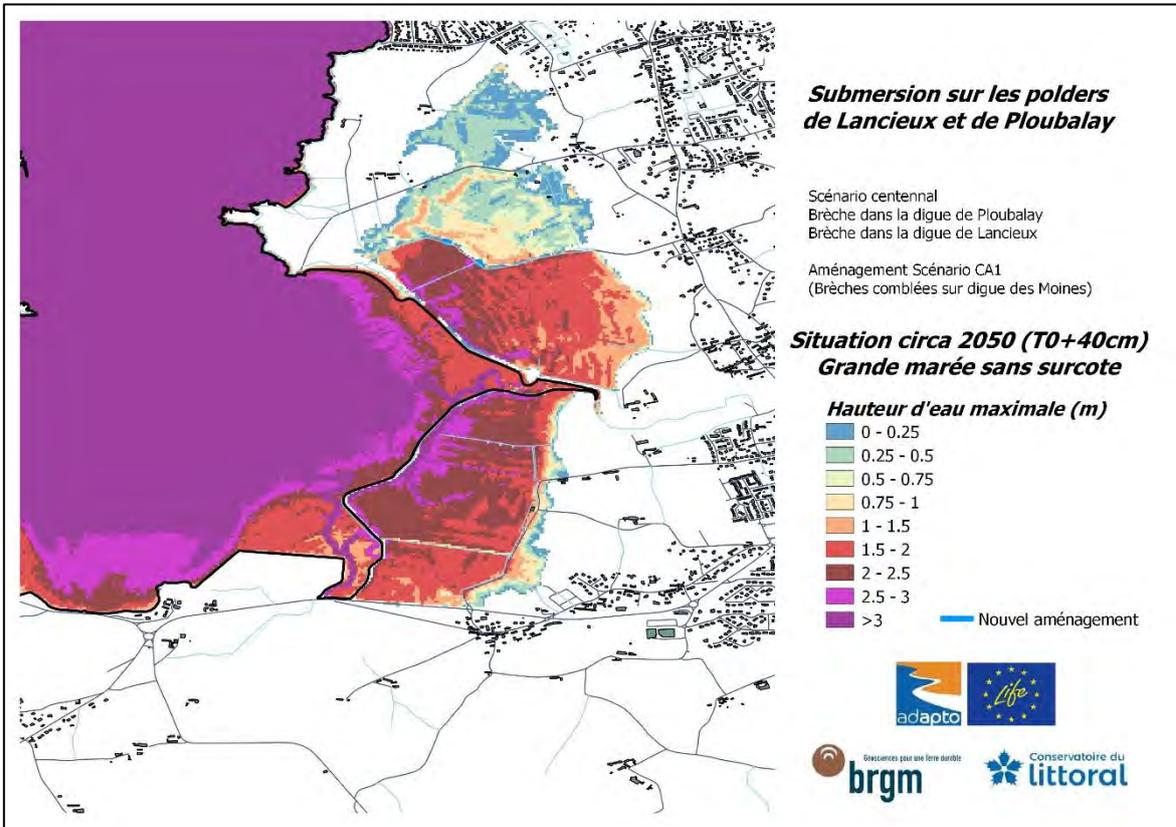
Brèche dans la Digue des Marais-Neufs

Nouvel aménagement : Comblement des brèches dans la digue des Moines

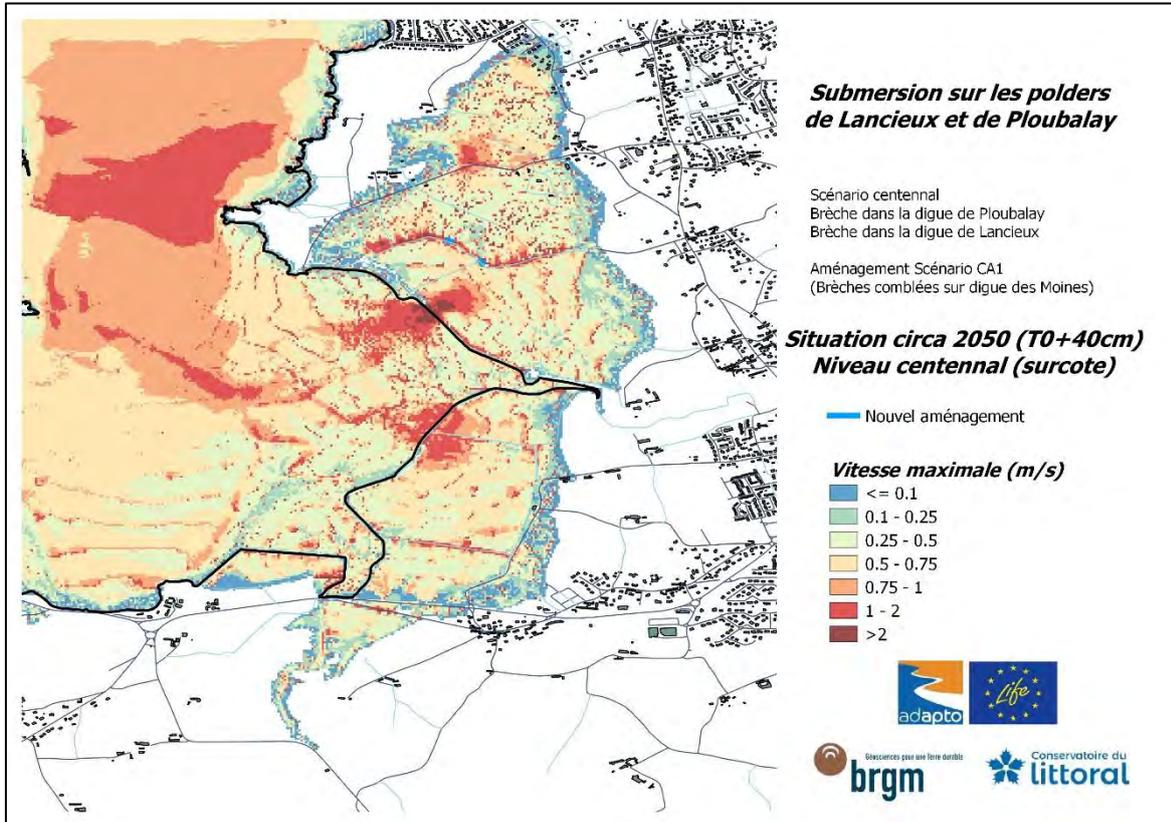
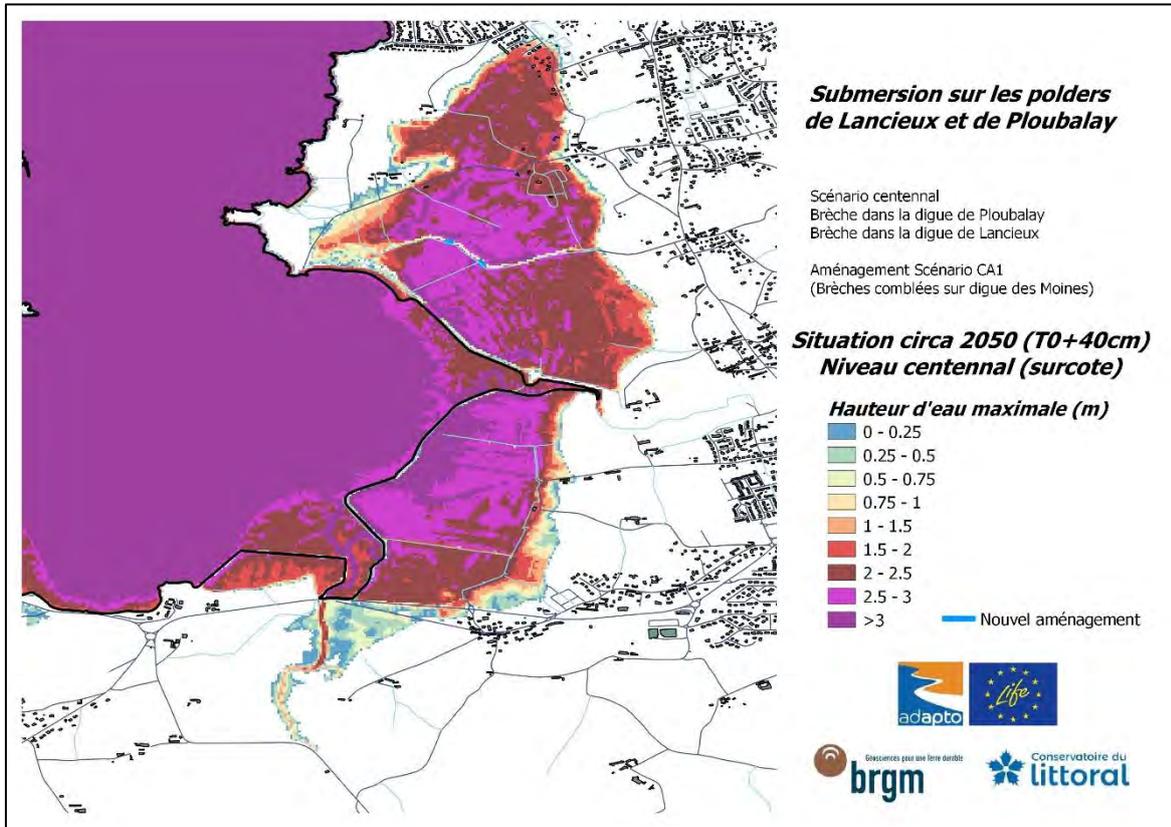
Echéance circa 2050 (T0 +40 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



Niveau centennal (grande marée + surcote)
 (l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)



Annexe 13

Résultats obtenus pour le scénario CA1_2100

Brèche dans la Digue de la Roche

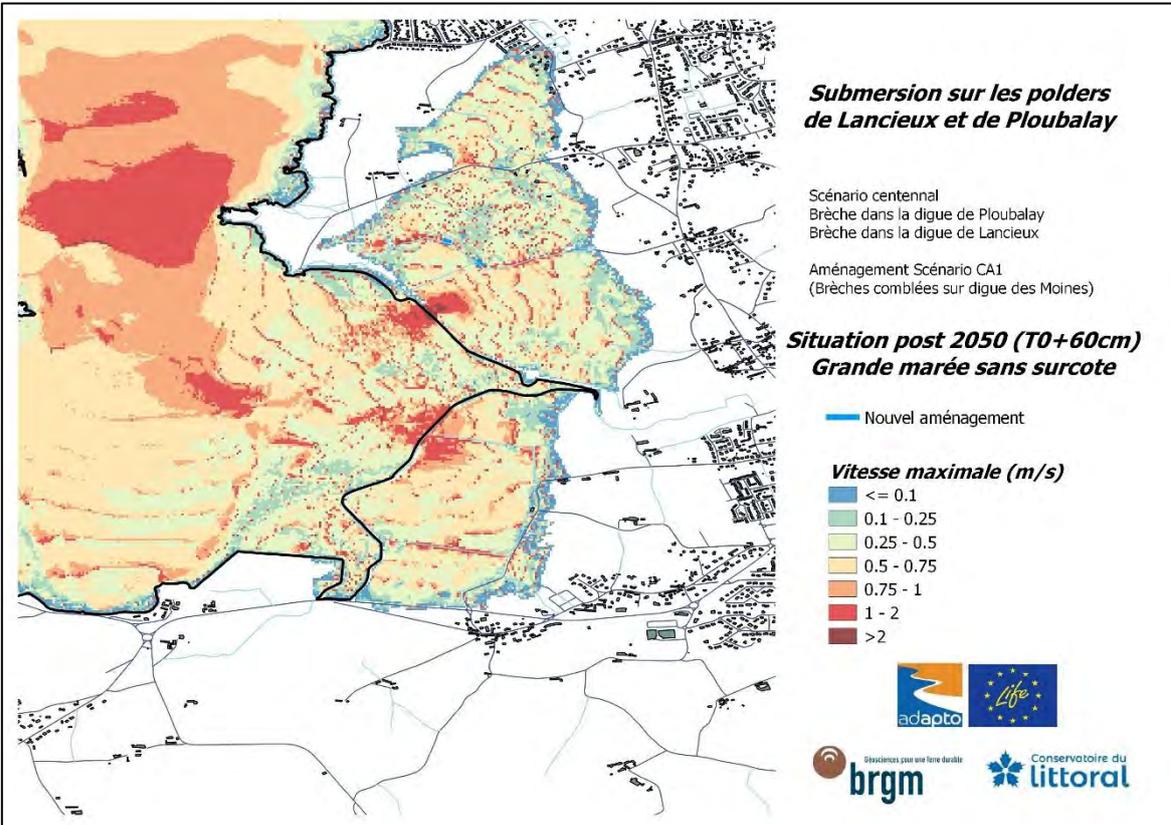
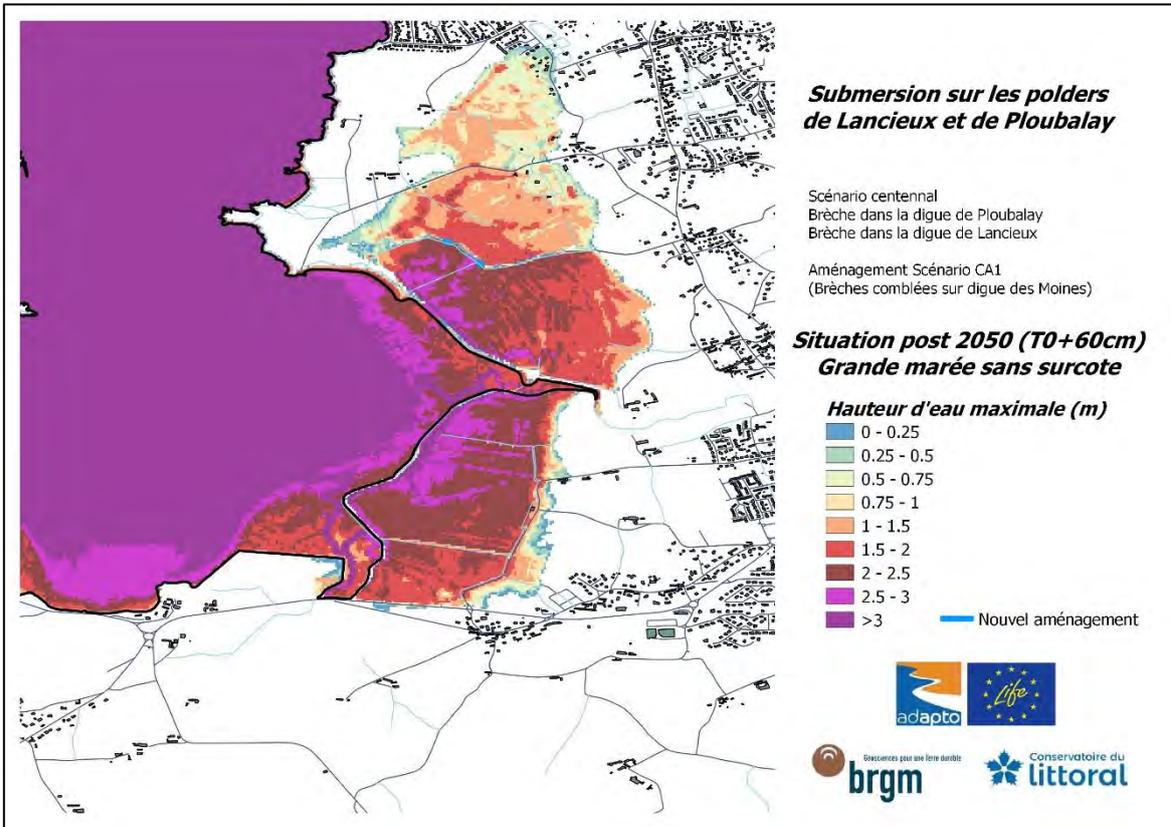
Brèche dans la Digue des Marais-Neufs

Nouvel aménagement : Comblement des brèches dans la digue des Moines

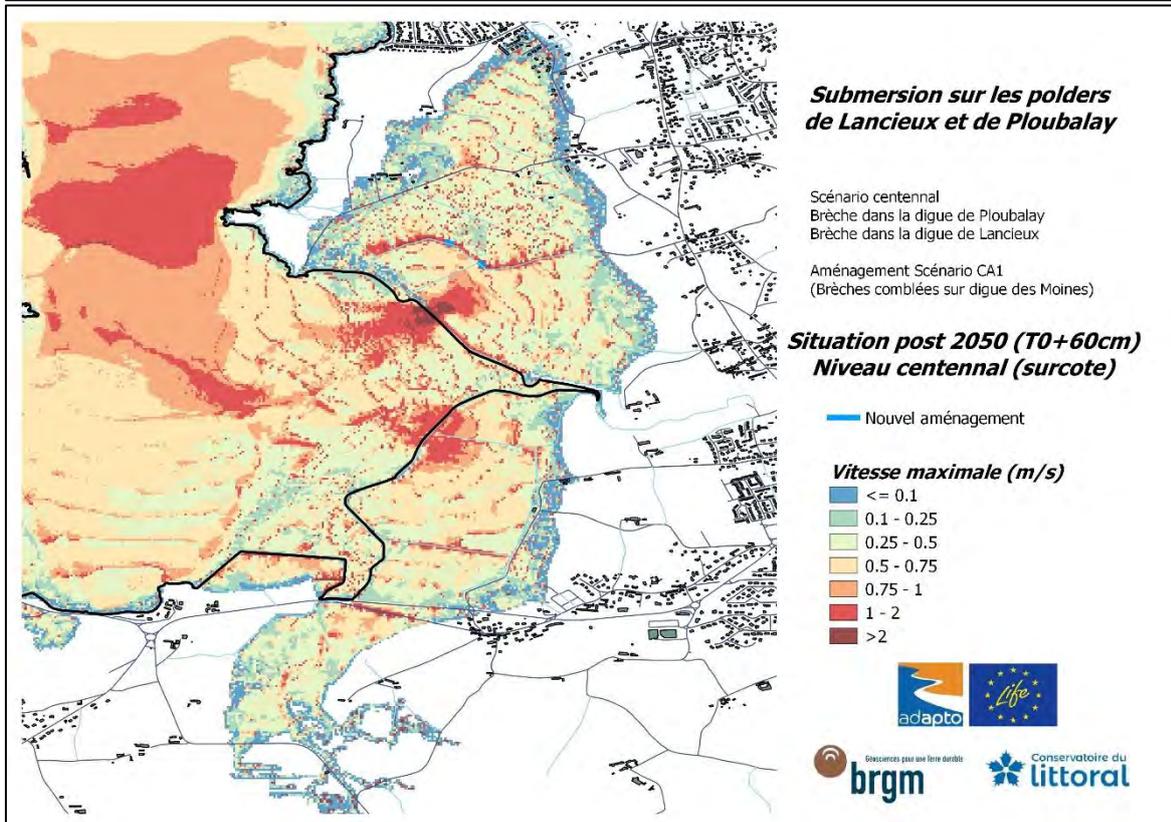
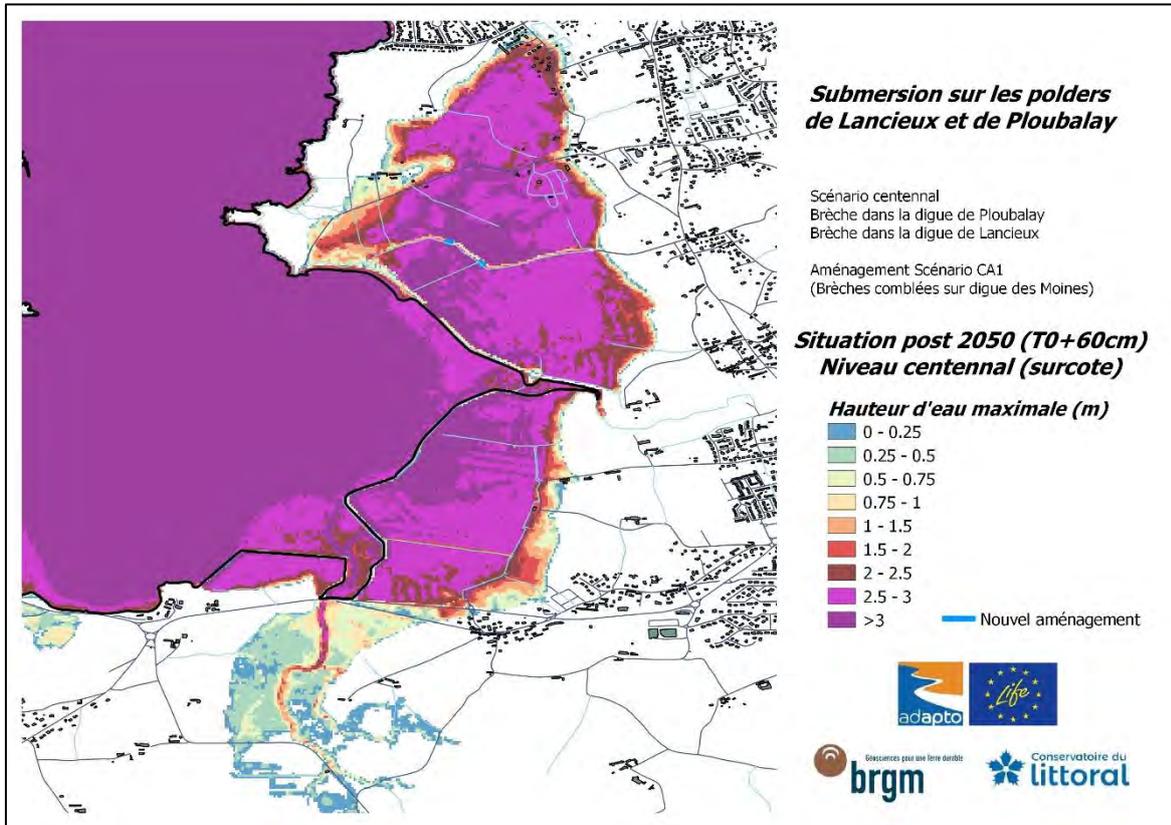
Echéance post 2050 (T0 +60 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



**Niveau centennal (grande marée + surcote)
(l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)**



Annexe 14

Résultats obtenus pour le scénario CA2_2020

Brèche dans la Digue de la Roche

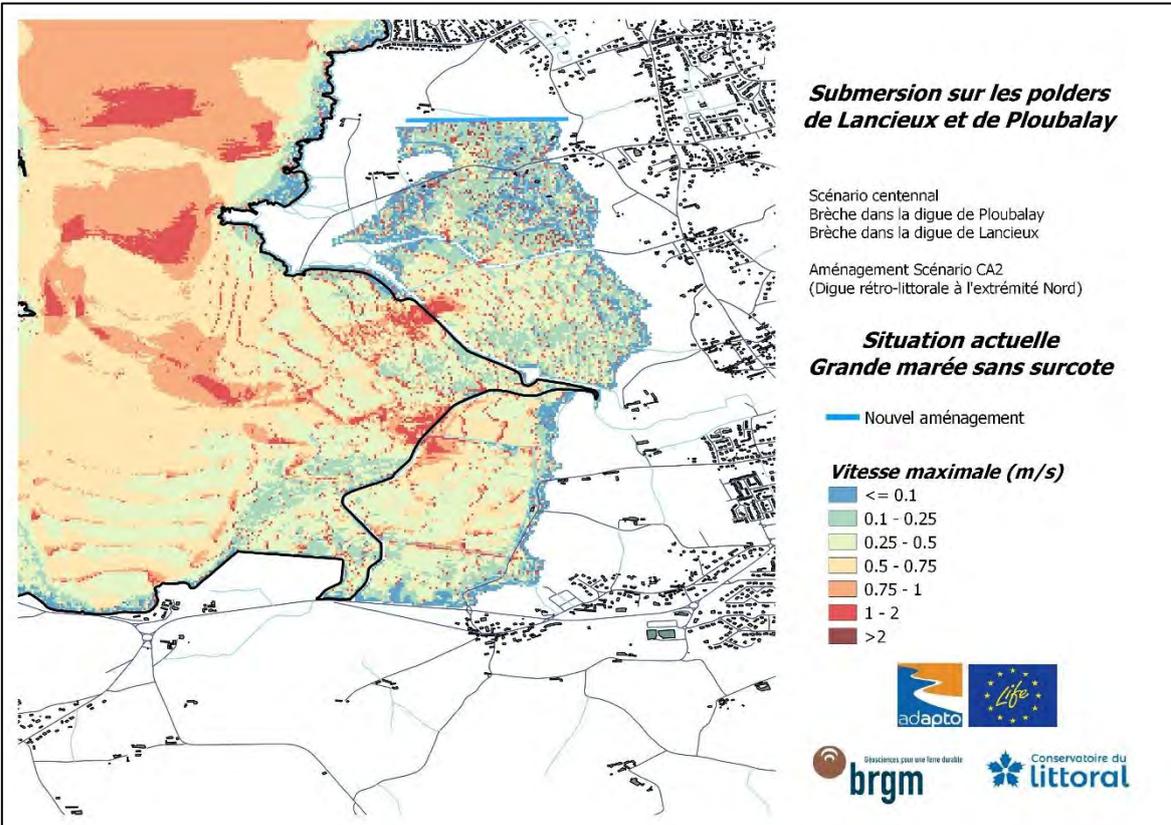
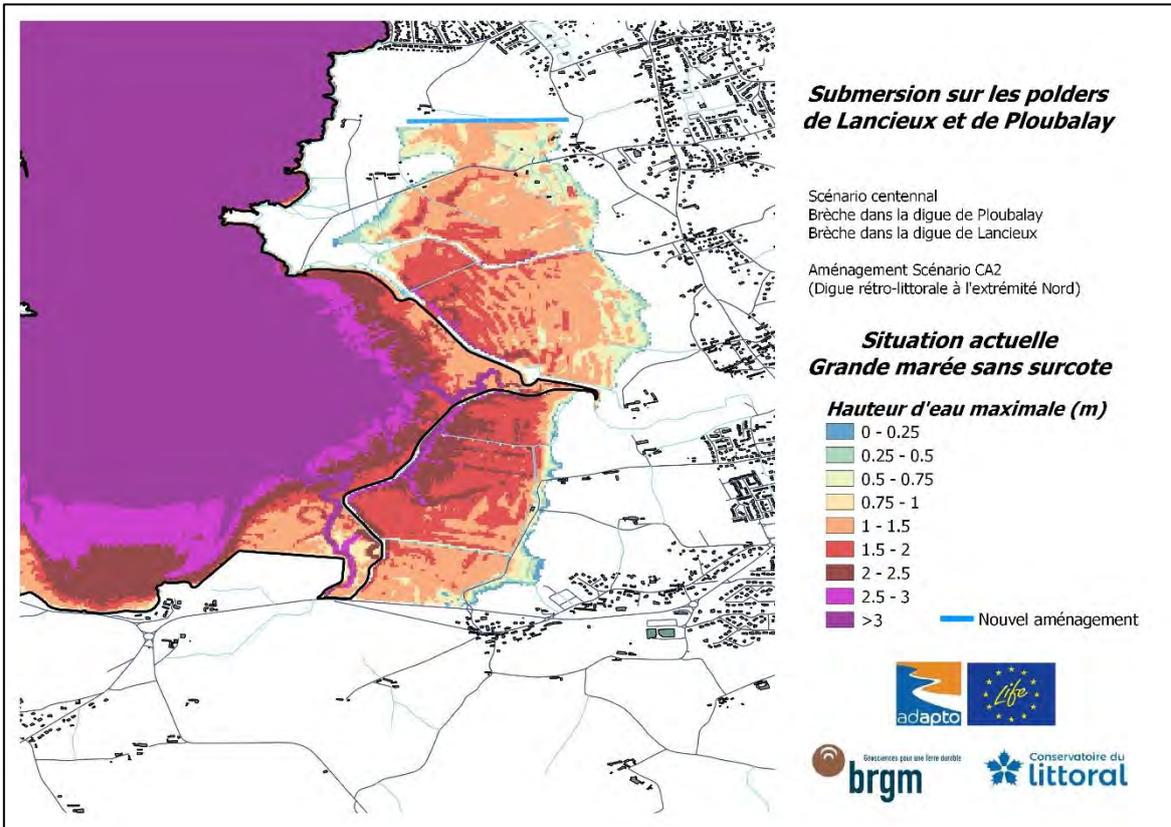
Brèche dans la Digue des Marais-Neufs

**Nouvel aménagement : Digue rétro-littorale à l'extrémité Nord
du polder de Lancieux**

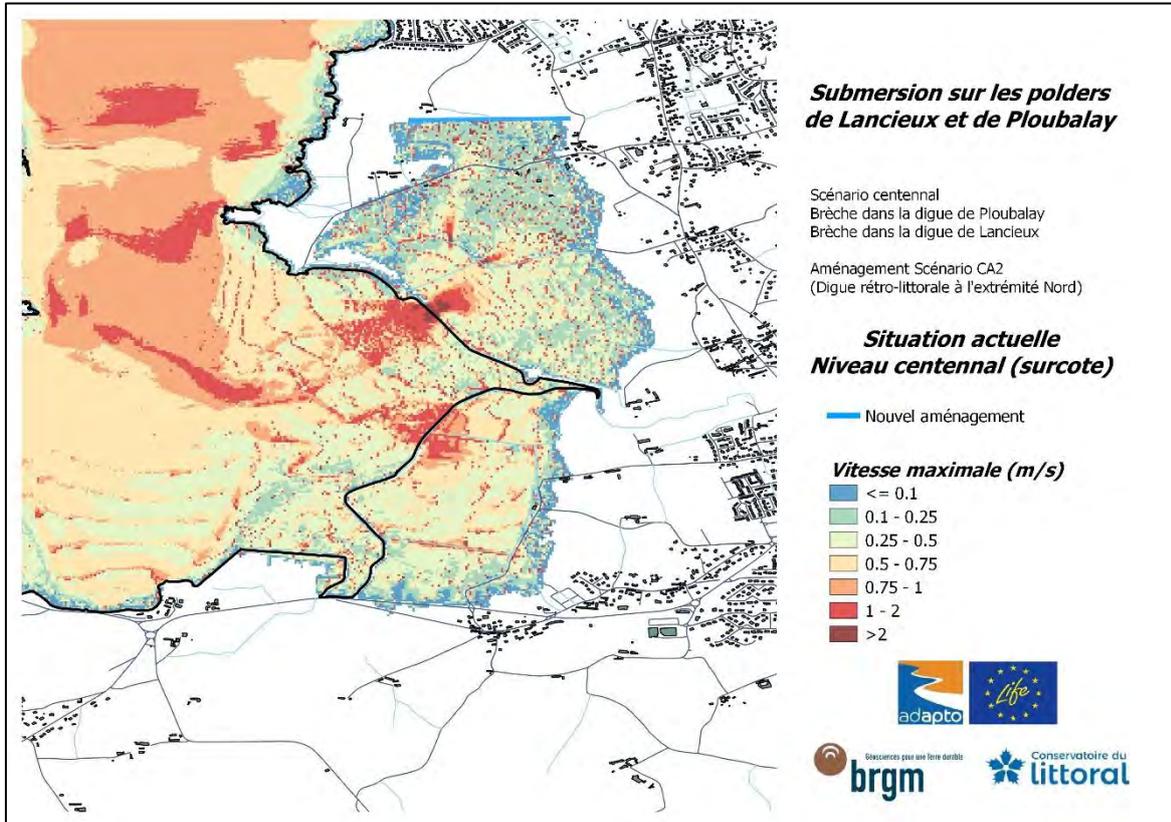
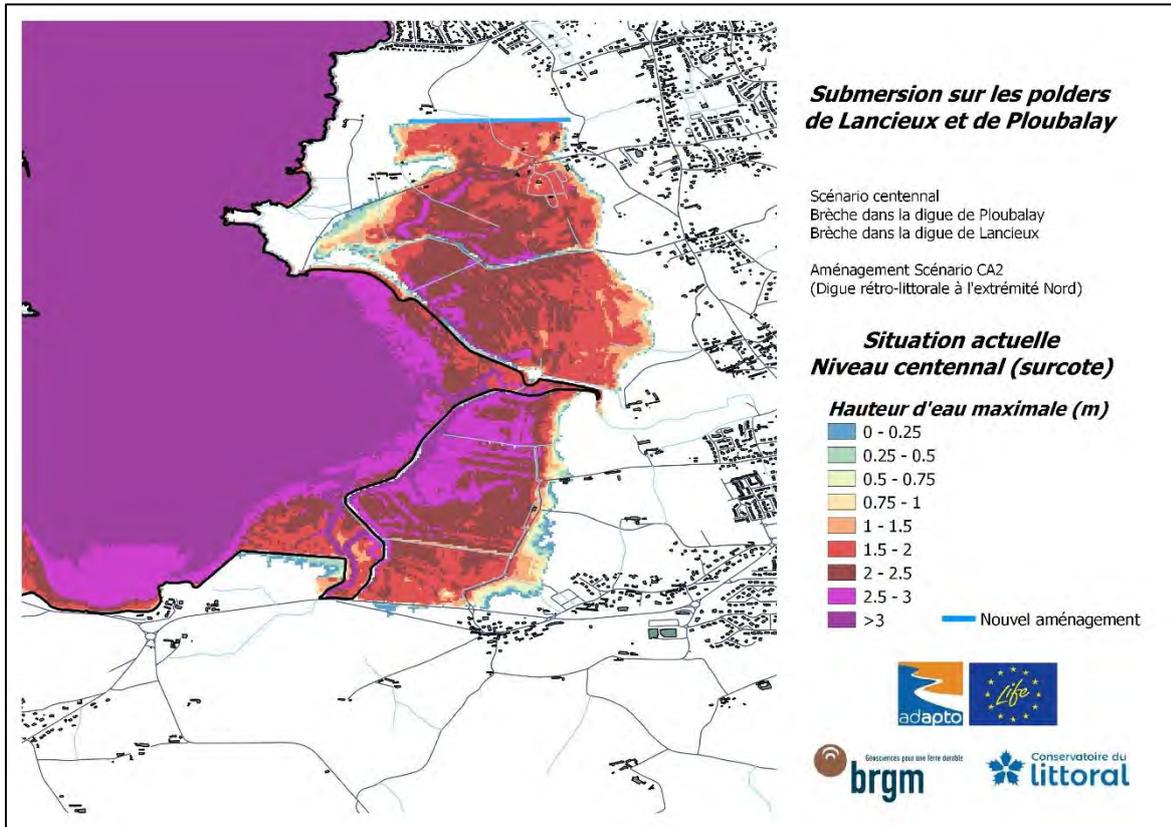
Echéance actuelle

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



**Niveau centennal (grande marée + surcote)
(l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)**



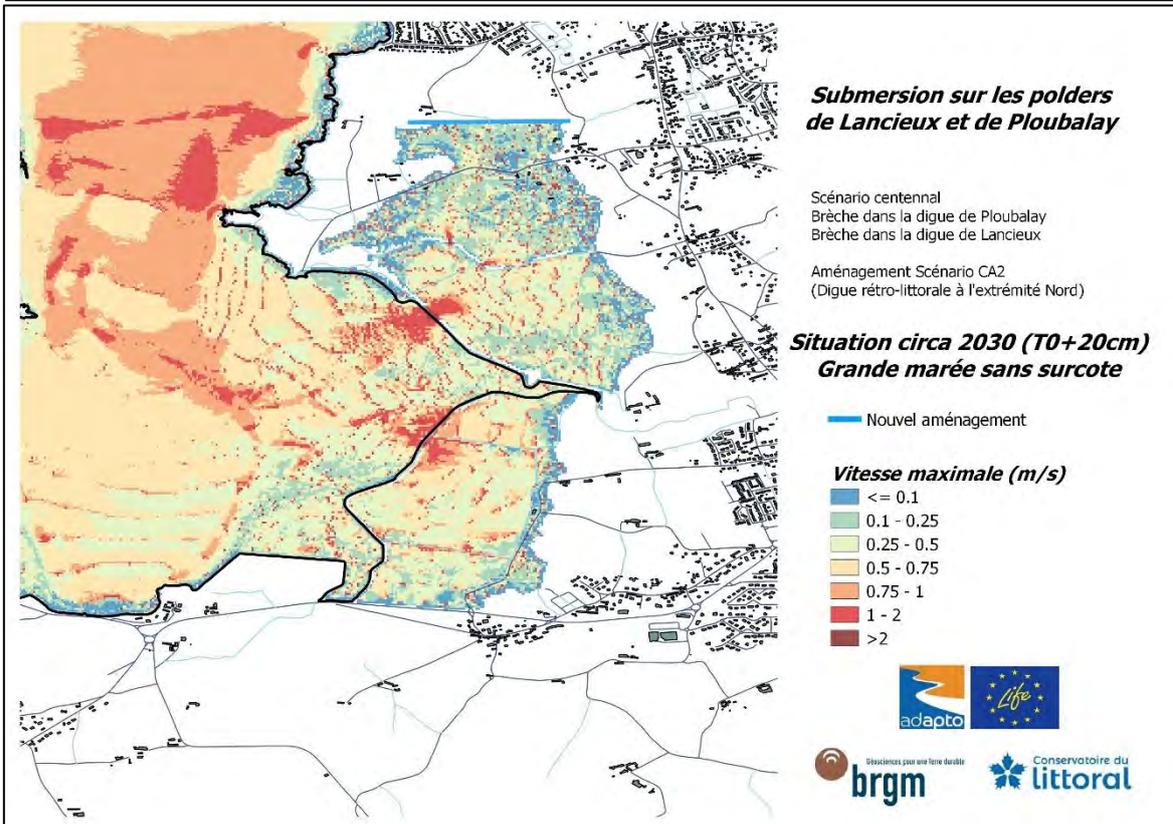
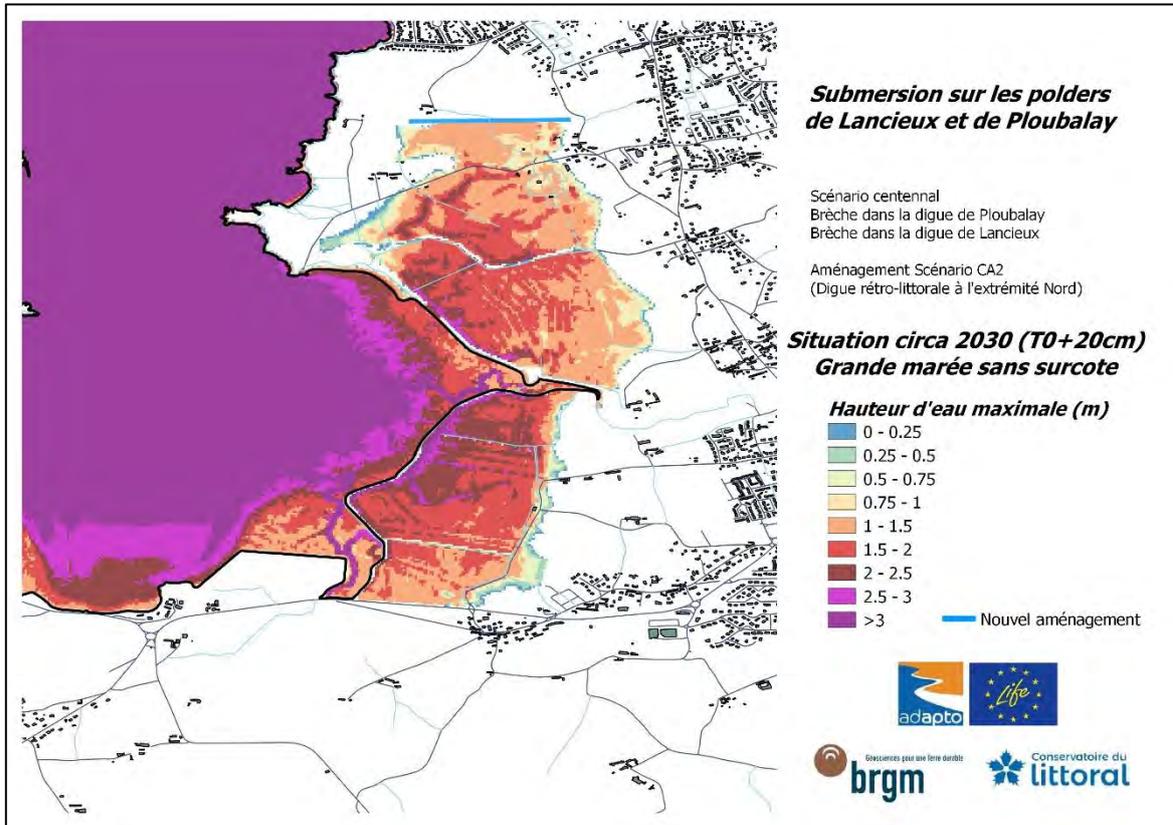
Annexe 15

Résultats obtenus pour le scénario CA2_2030

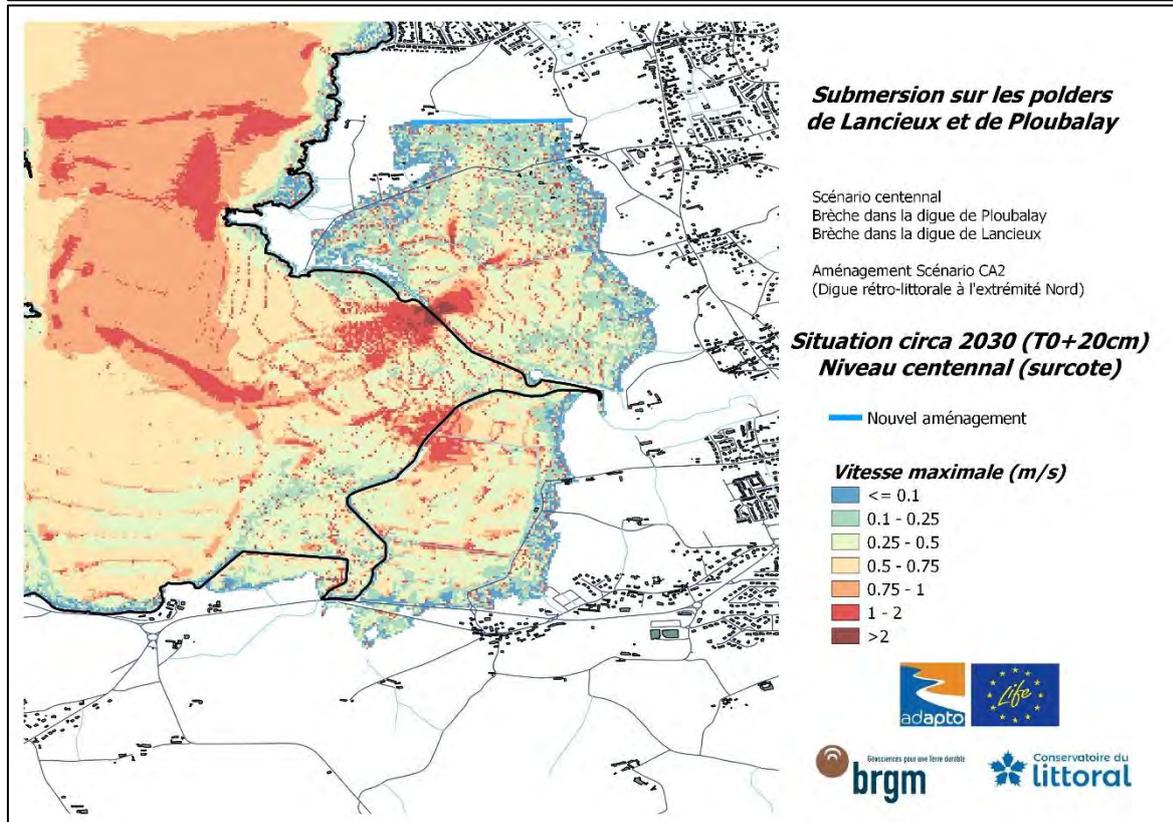
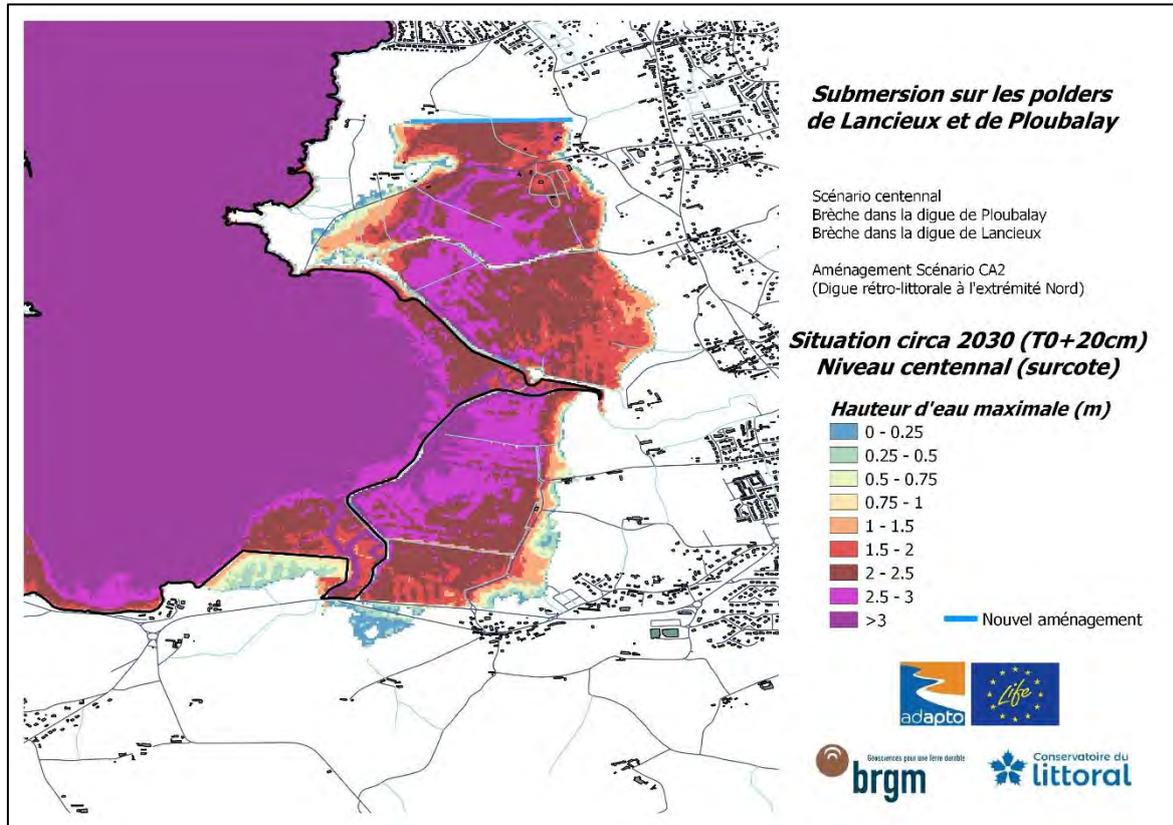
Brèche dans la Digue de la Roche
Brèche dans la Digue des Marais-Neufs
Nouvel aménagement : Digue rétro-littorale à l'extrémité Nord
du polder de Lancieux
Echéance circa 2030 (T0 +20 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



**Niveau centennal (grande marée + surcote)
(l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)**



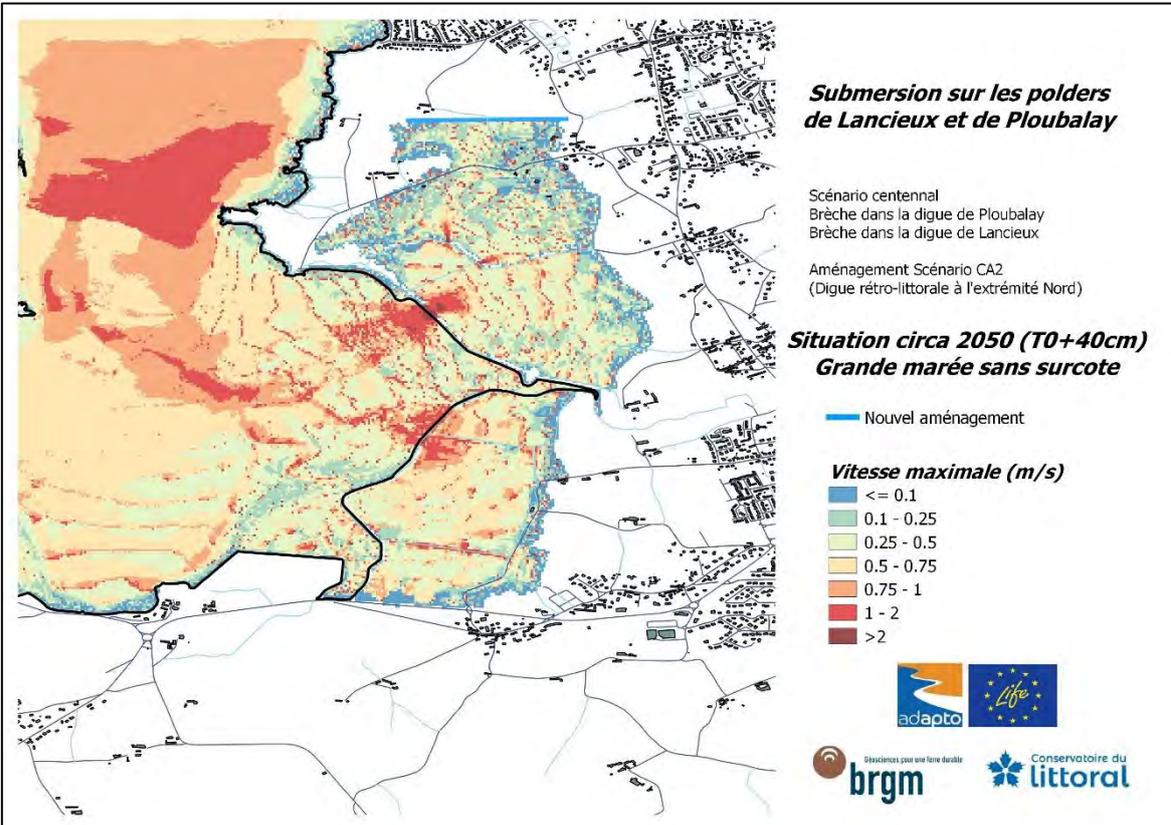
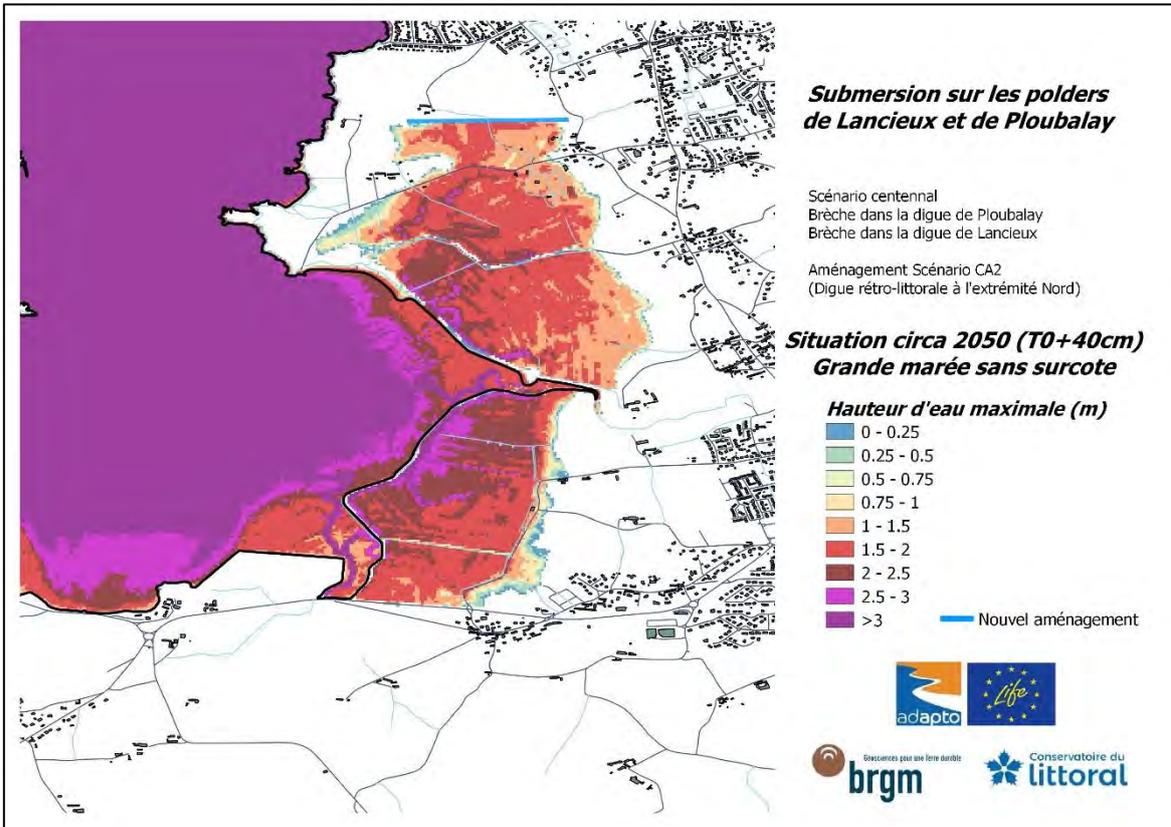
Annexe 16

Résultats obtenus pour le scénario CA2_2050

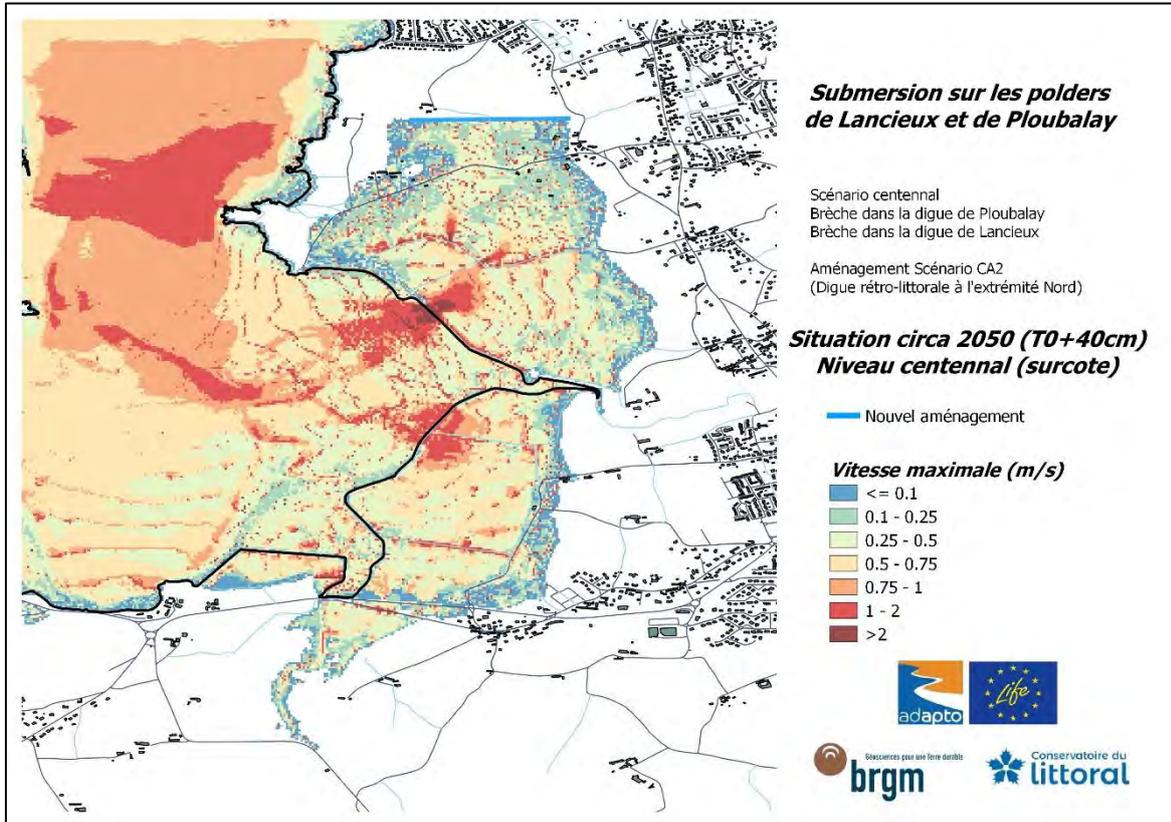
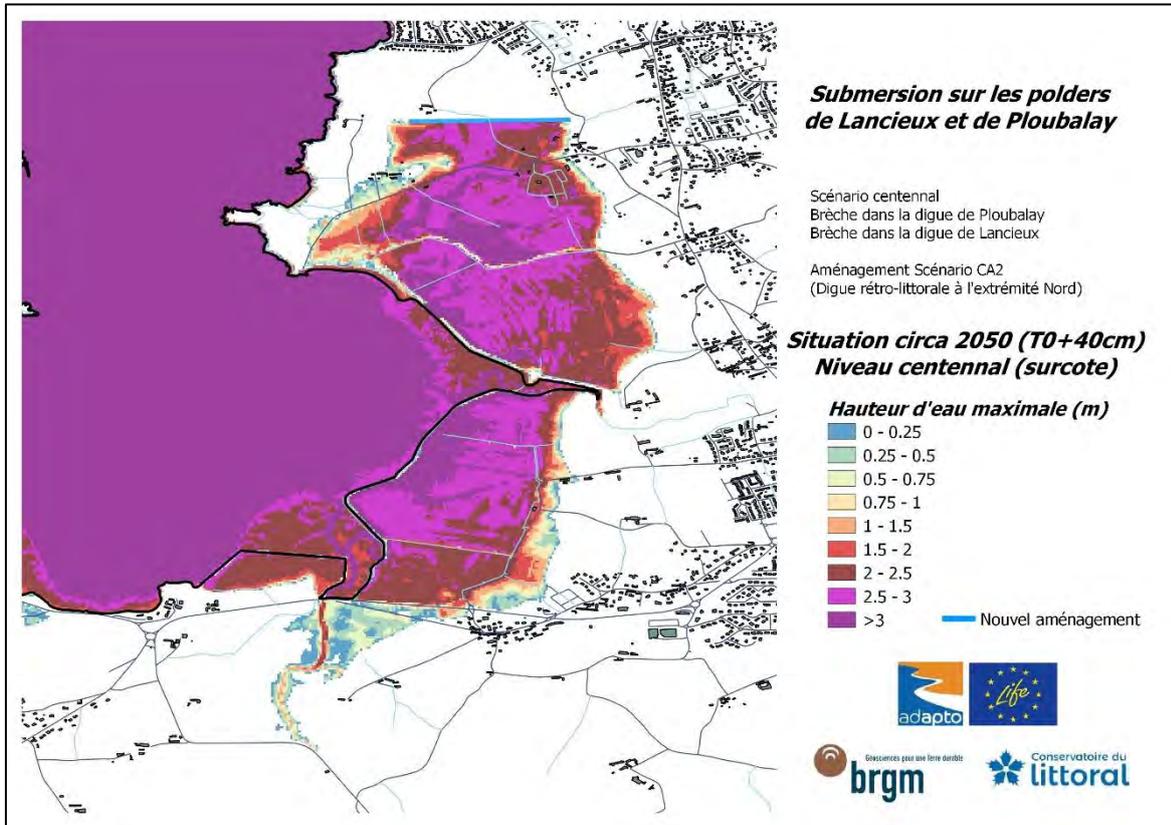
Brèche dans la Digue de la Roche
Brèche dans la Digue des Marais-Neufs
Nouvel aménagement : Digue rétro-littorale à l'extrémité Nord
du polder de Lancieux
Echéance circa 2050 (T0 +40 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



Niveau centennal (grande marée + surcote)
 (l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)



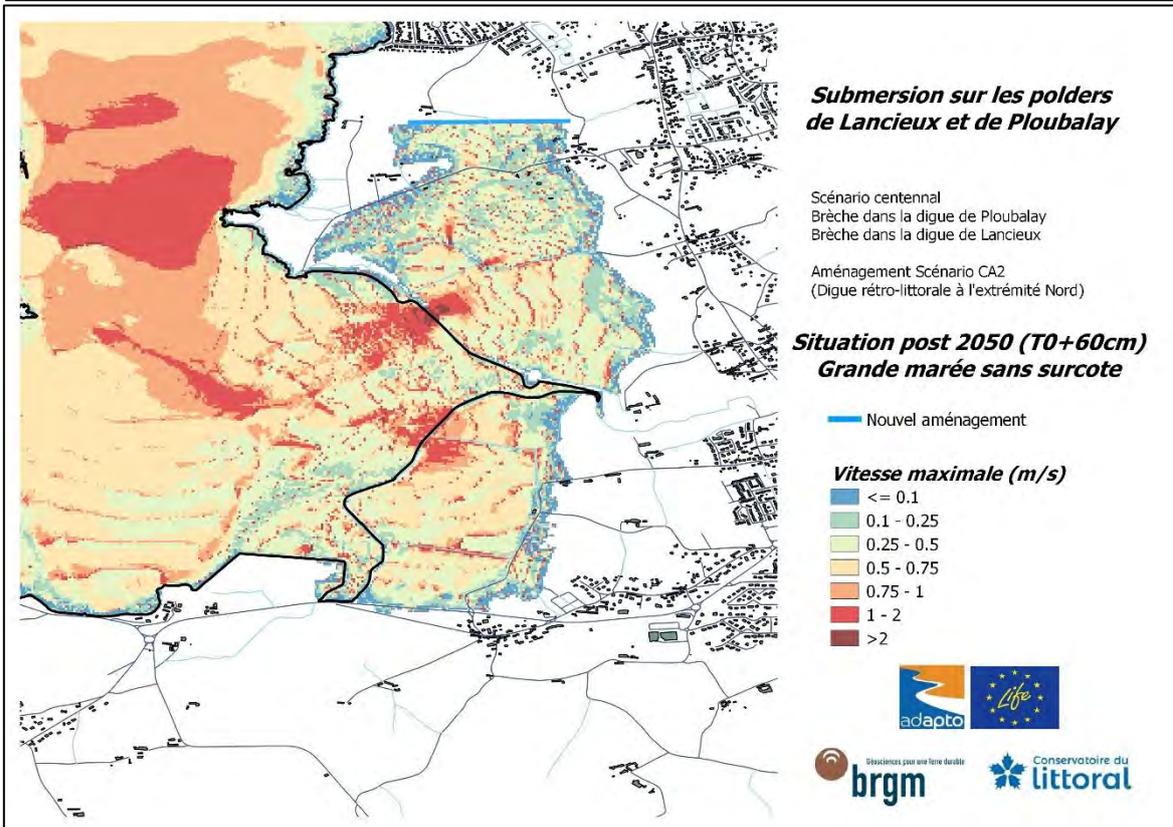
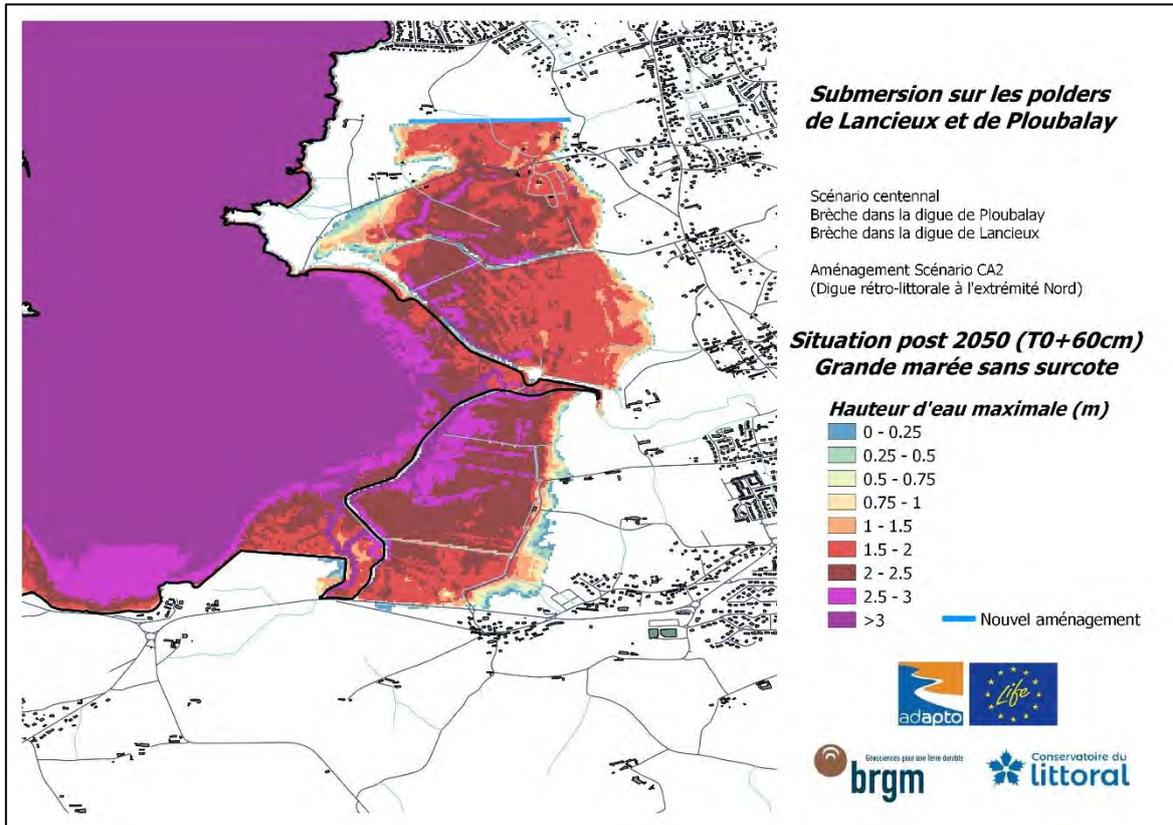
Annexe 17

Résultats obtenus pour le scénario CA2_2100

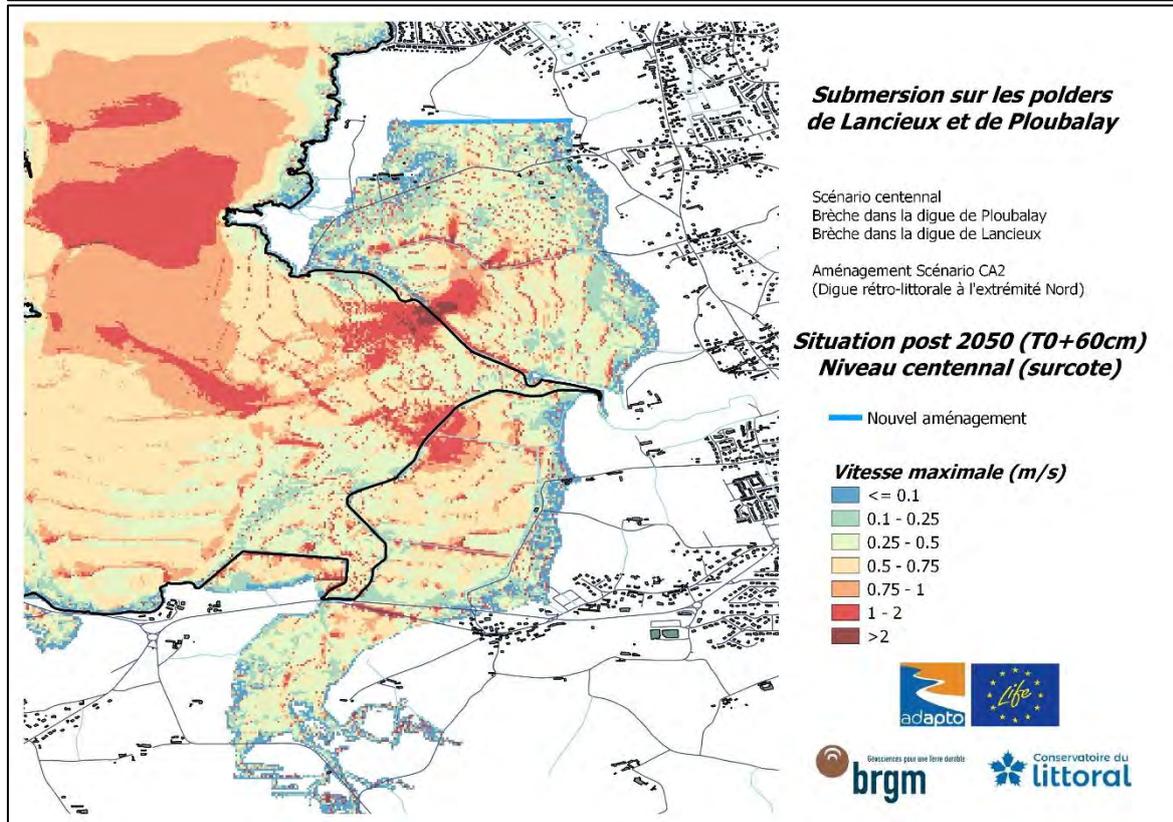
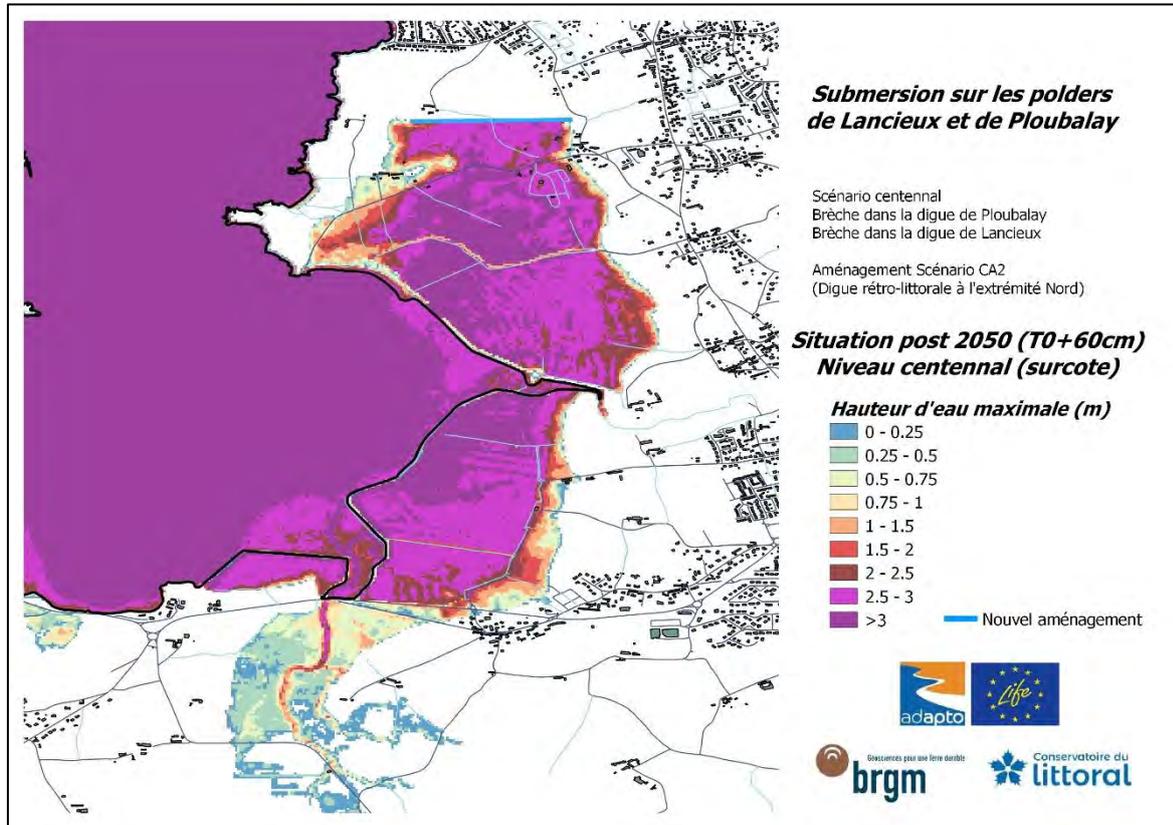
Brèche dans la Digue de la Roche
Brèche dans la Digue des Marais-Neufs
Nouvel aménagement : Digue rétro-littorale à l'extrémité Nord
du polder de Lancieux
Echéance post 2050 (T0 +60 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



**Niveau centennal (grande marée + surcote)
(l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)**



Annexe 18

Résultats obtenus pour le scénario CA3_2020

Brèche dans la Digue de la Roche

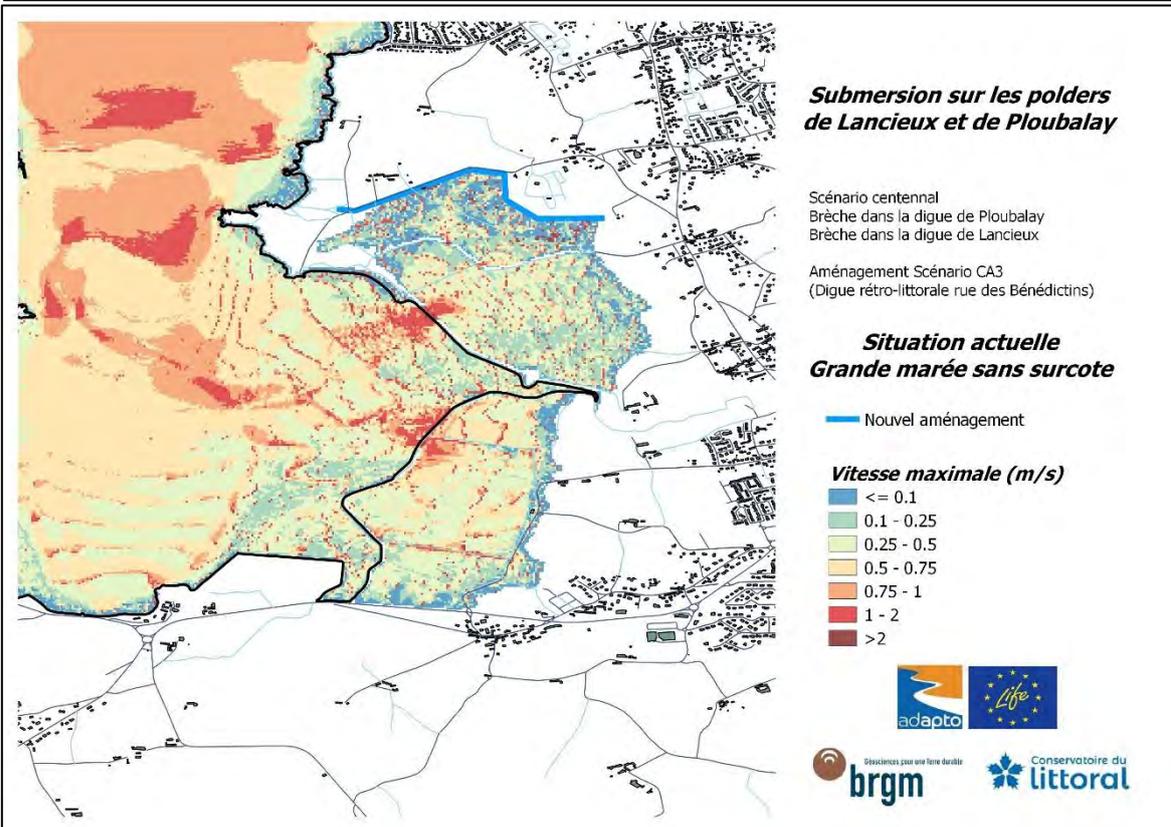
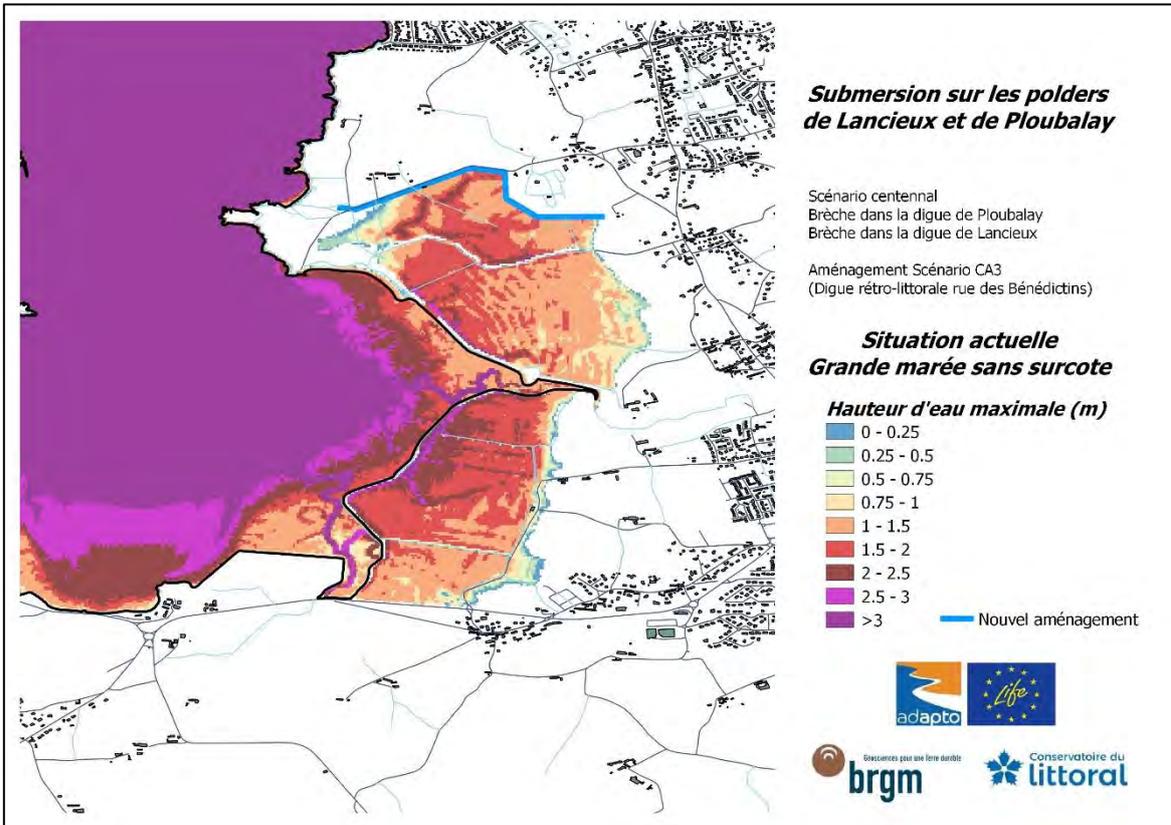
Brèche dans la Digue des Marais-Neufs

Nouvel aménagement : Digue le long de la rue des Bénédictins

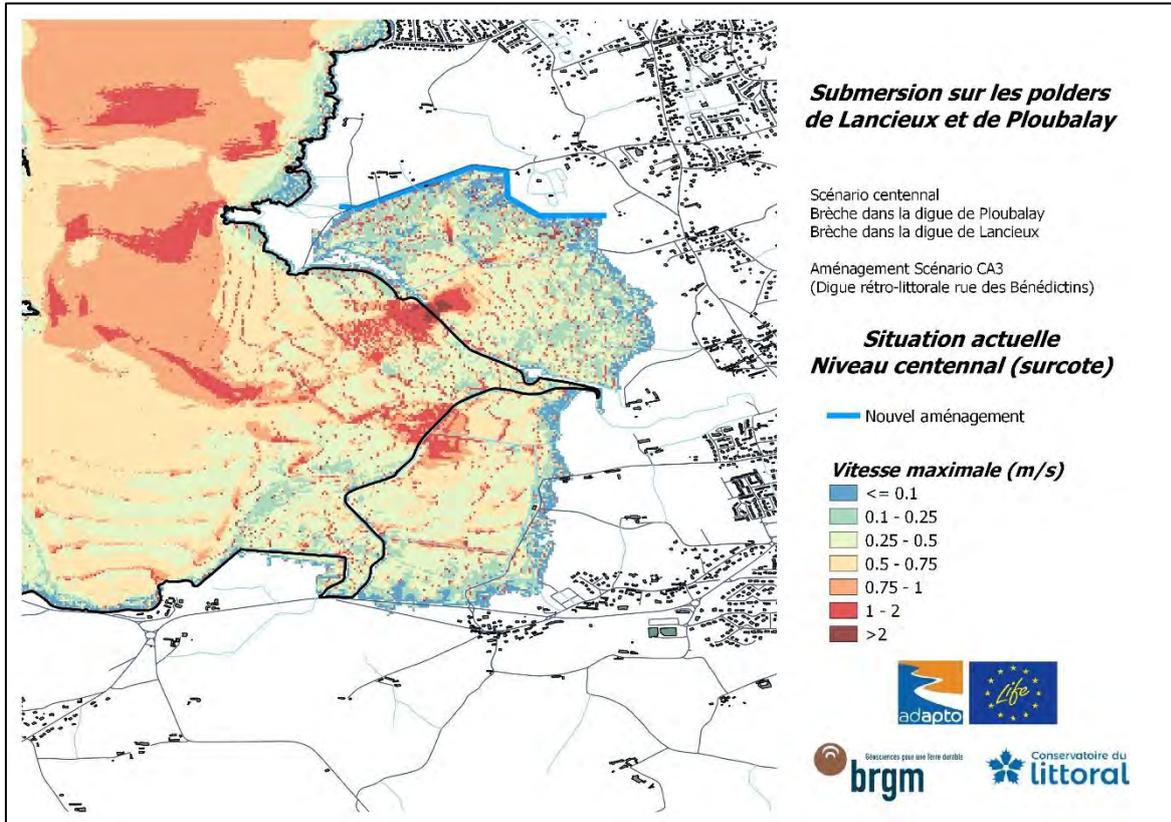
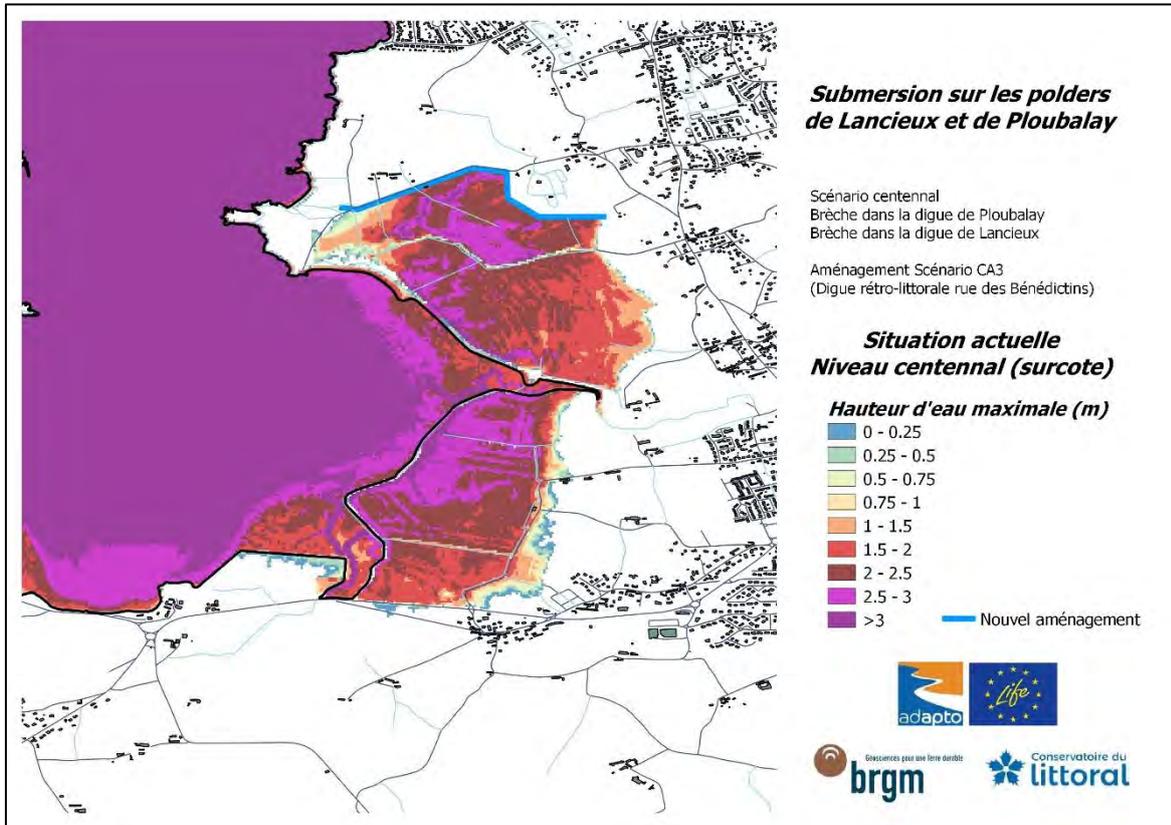
Echéance actuelle

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



Niveau centennal (grande marée + surcote)
 (l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)



Annexe 19

Résultats obtenus pour le scénario CA3_2030

Brèche dans la Digue de la Roche

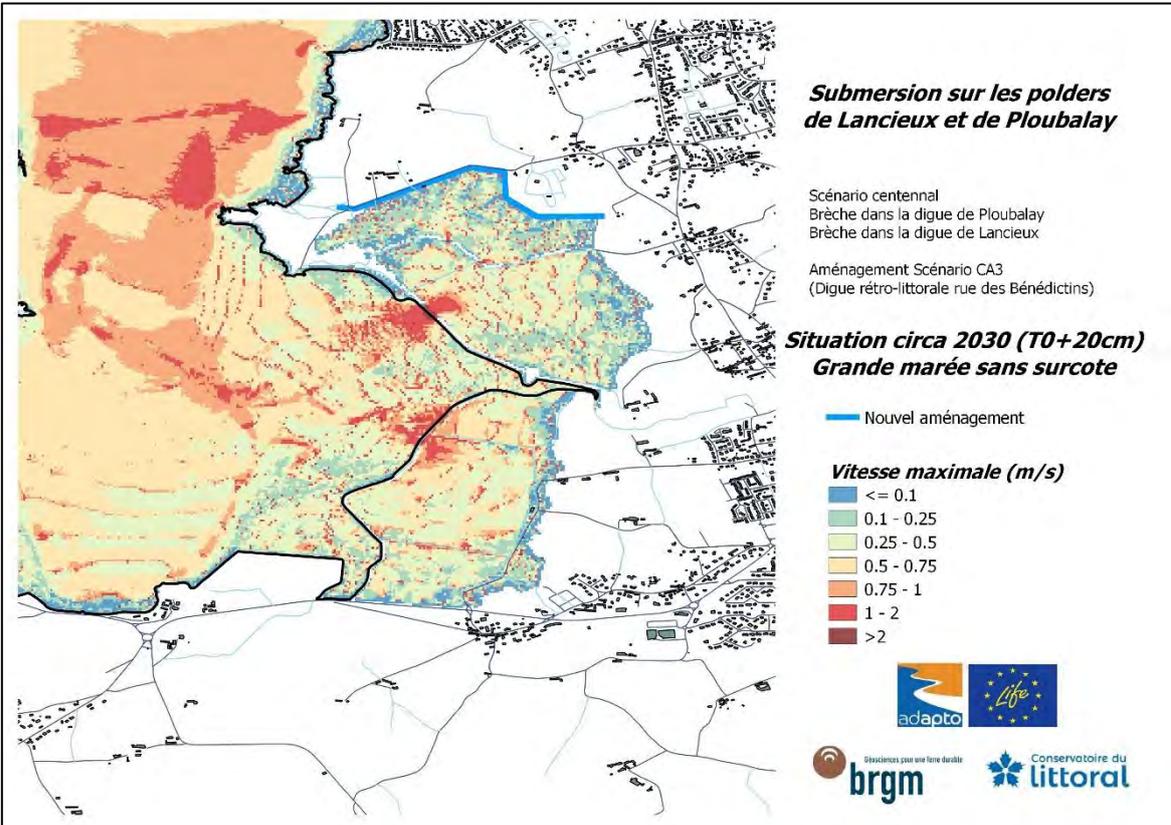
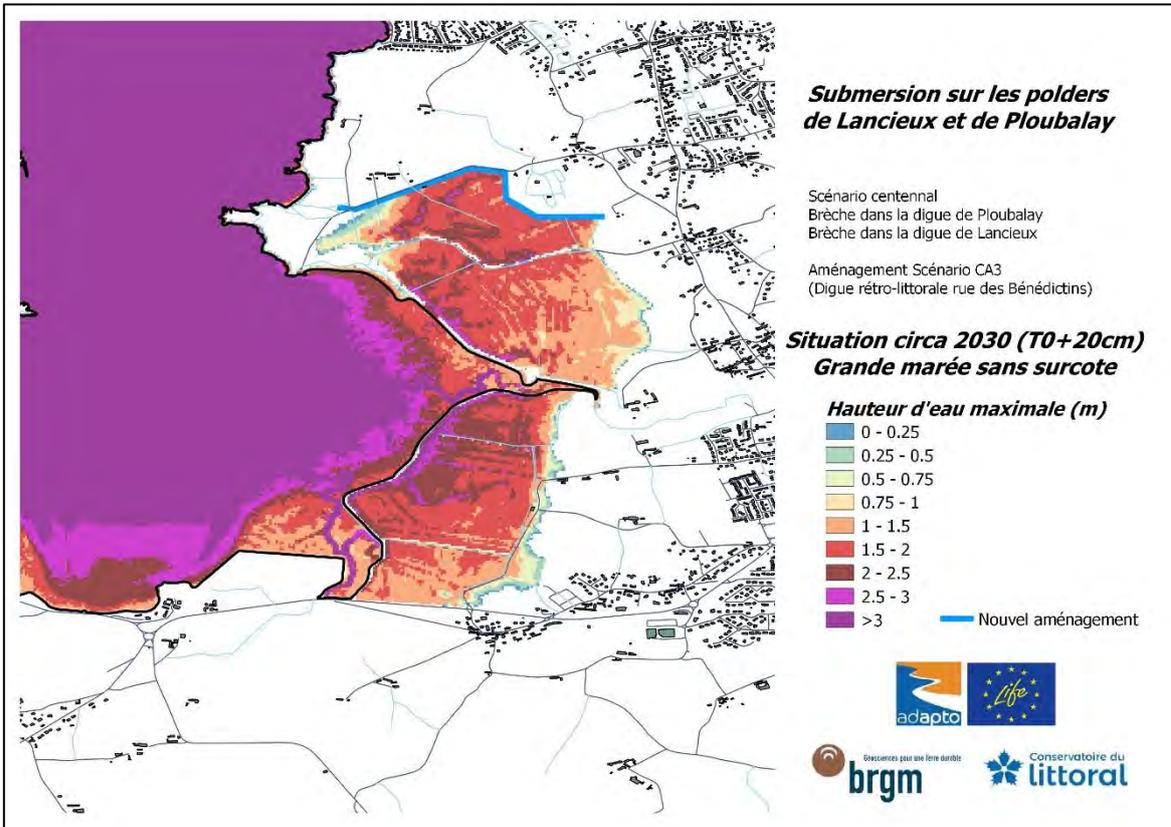
Brèche dans la Digue des Marais-Neufs

Nouvel aménagement : Digue le long de la rue des Bénédictins

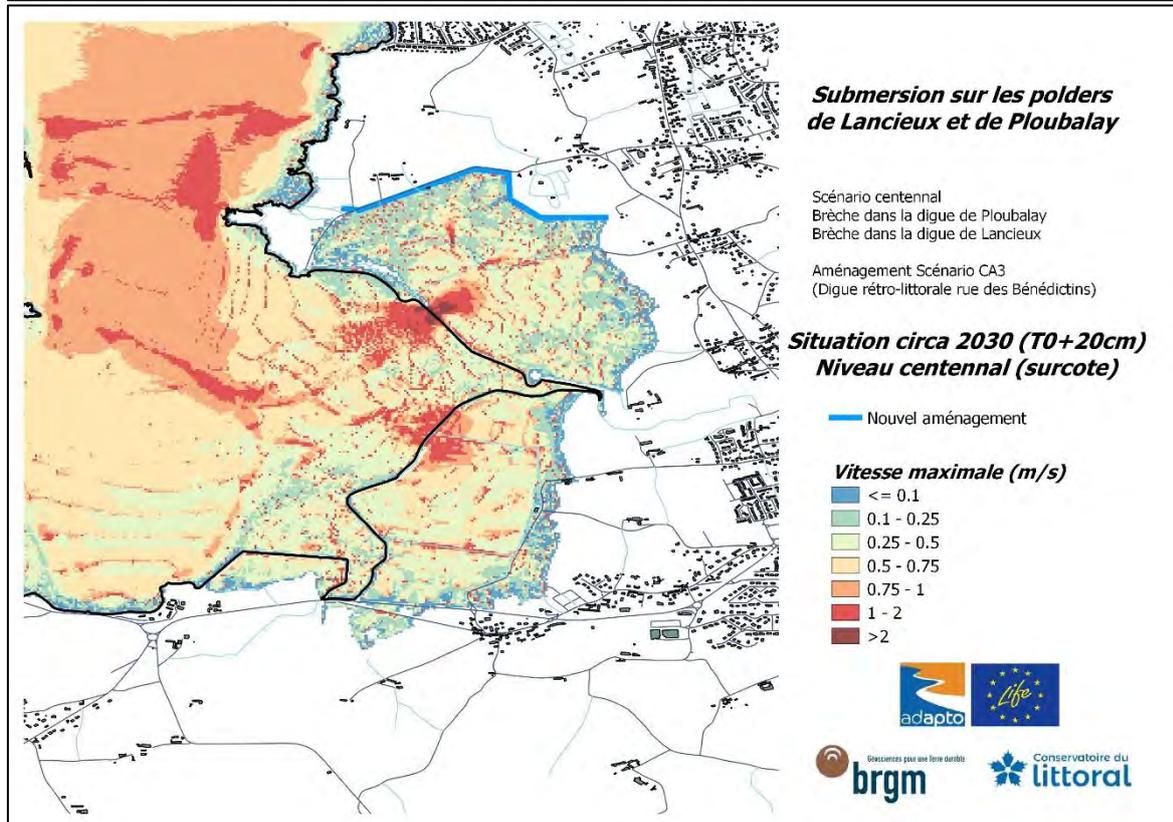
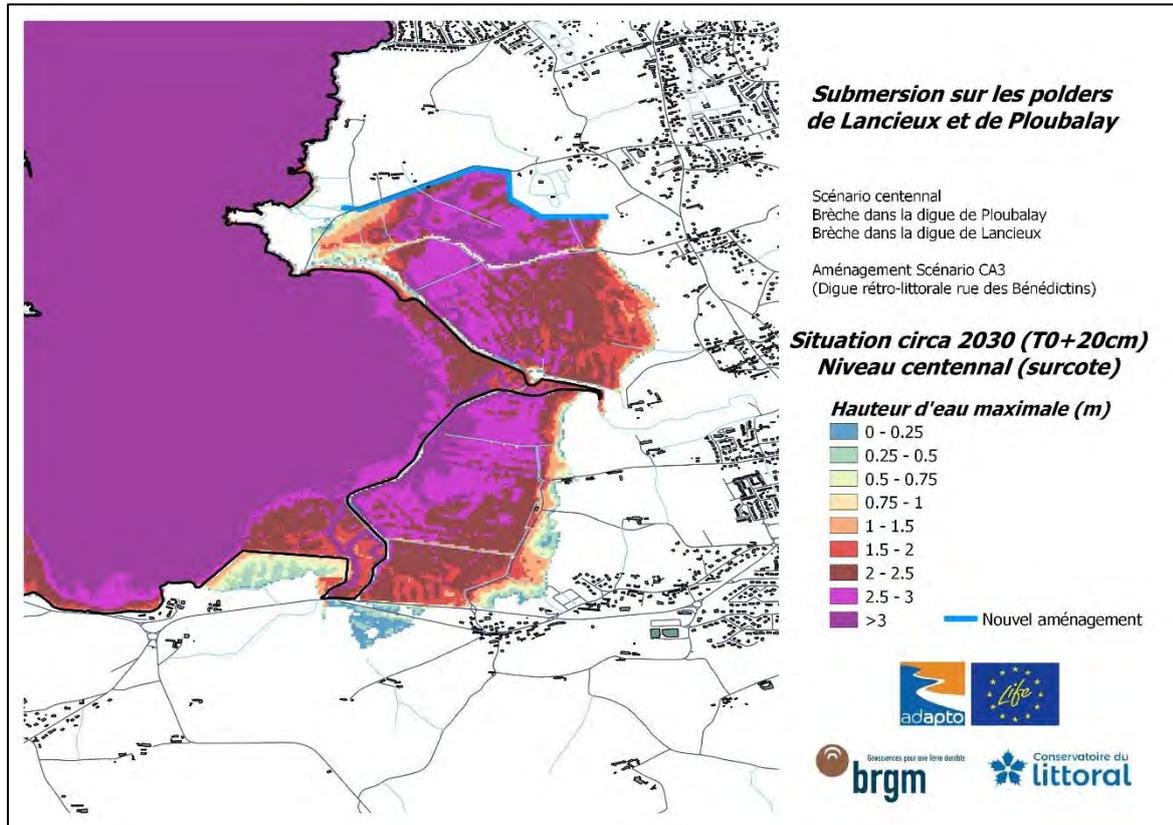
Echéance circa 2030 (T0 +20 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



**Niveau centennal (grande marée + surcote)
(l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)**



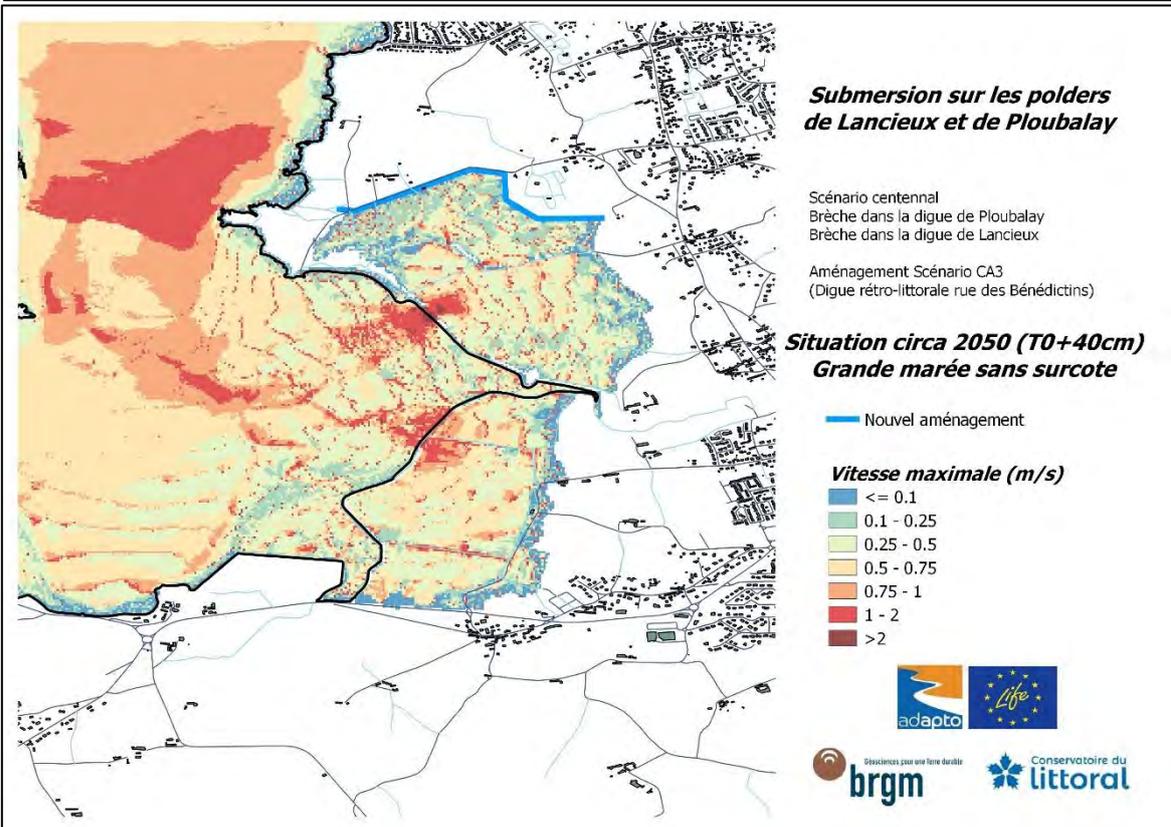
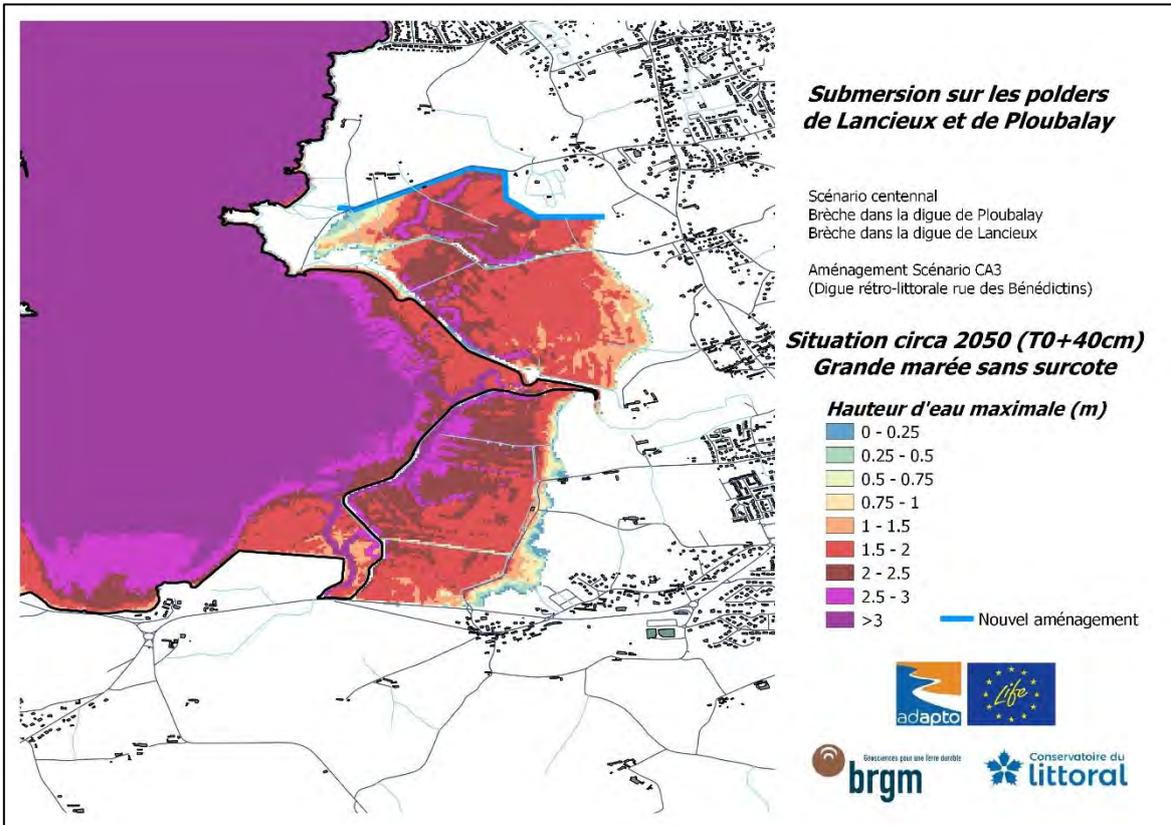
Annexe 20

Résultats obtenus pour le scénario CA3_2050

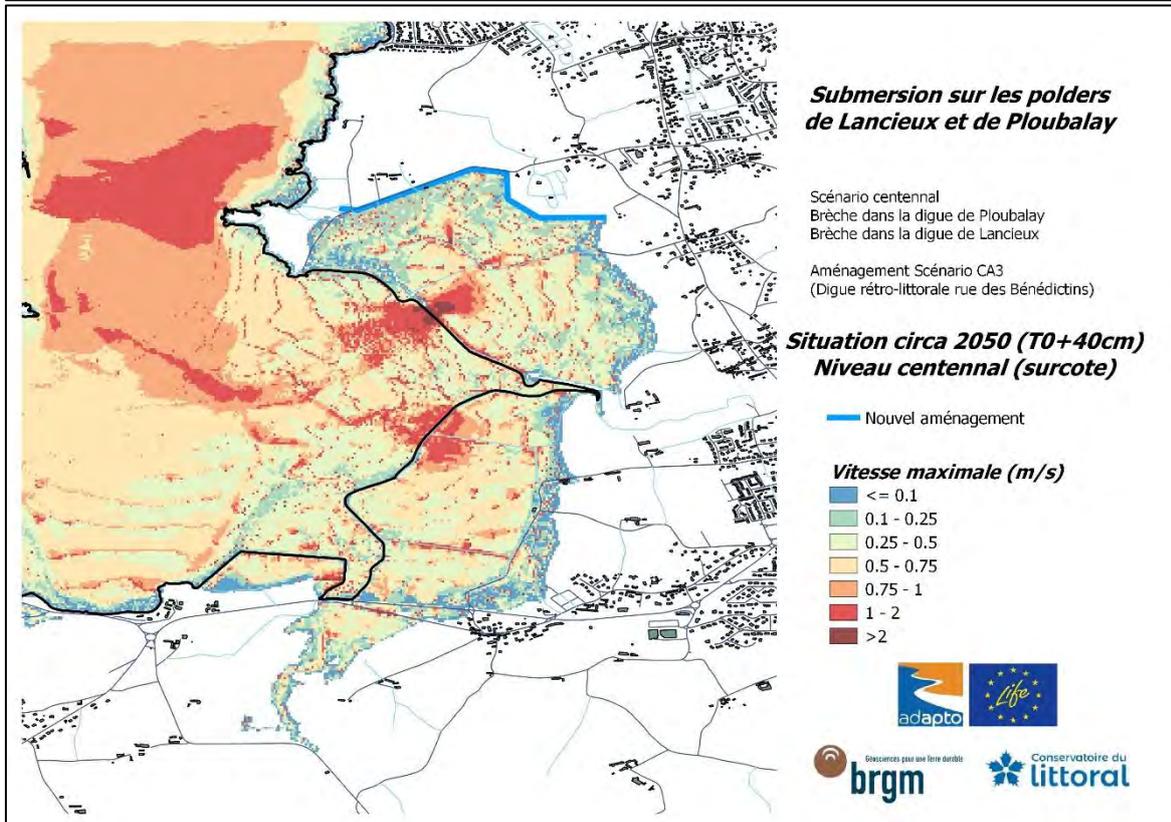
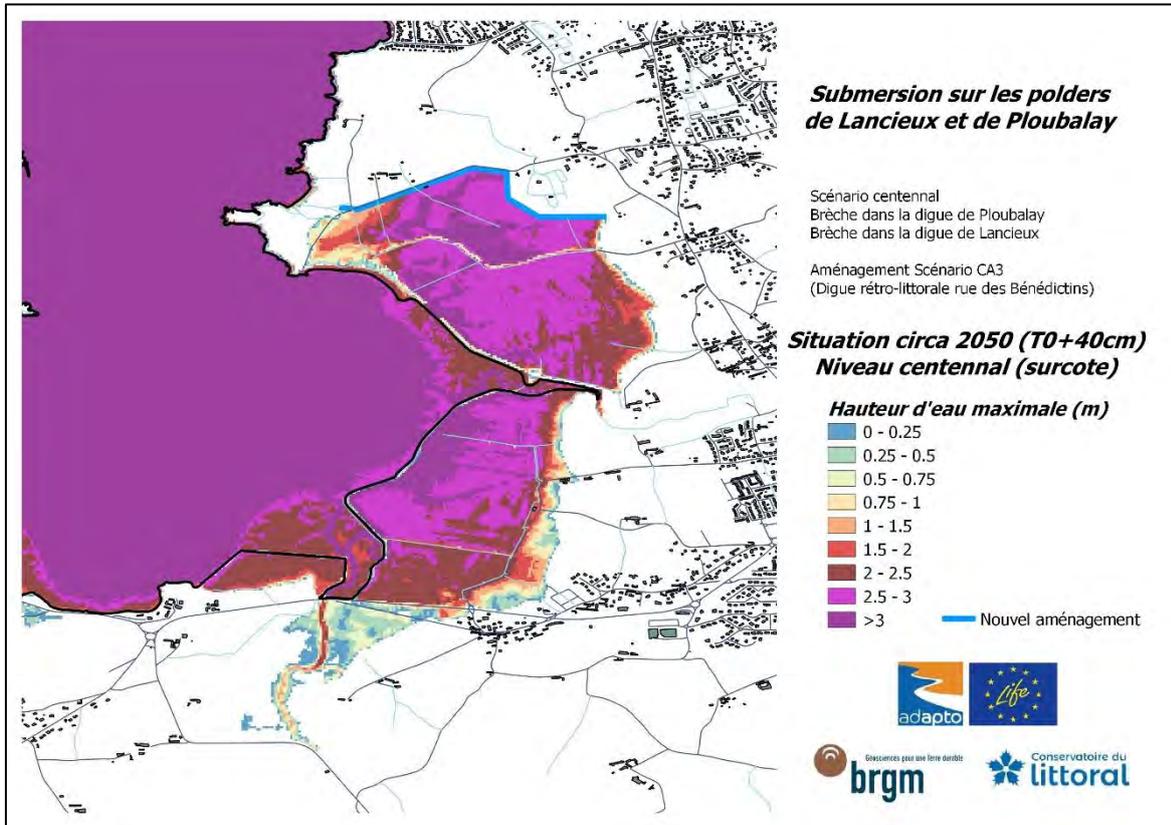
Brèche dans la Digue de la Roche
Brèche dans la Digue des Marais-Neufs
Nouvel aménagement : Digue le long de la rue des Bénédictins
Echéance circa 2050 (T0 +40 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



Niveau centennal (grande marée + surcote)
 (l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)



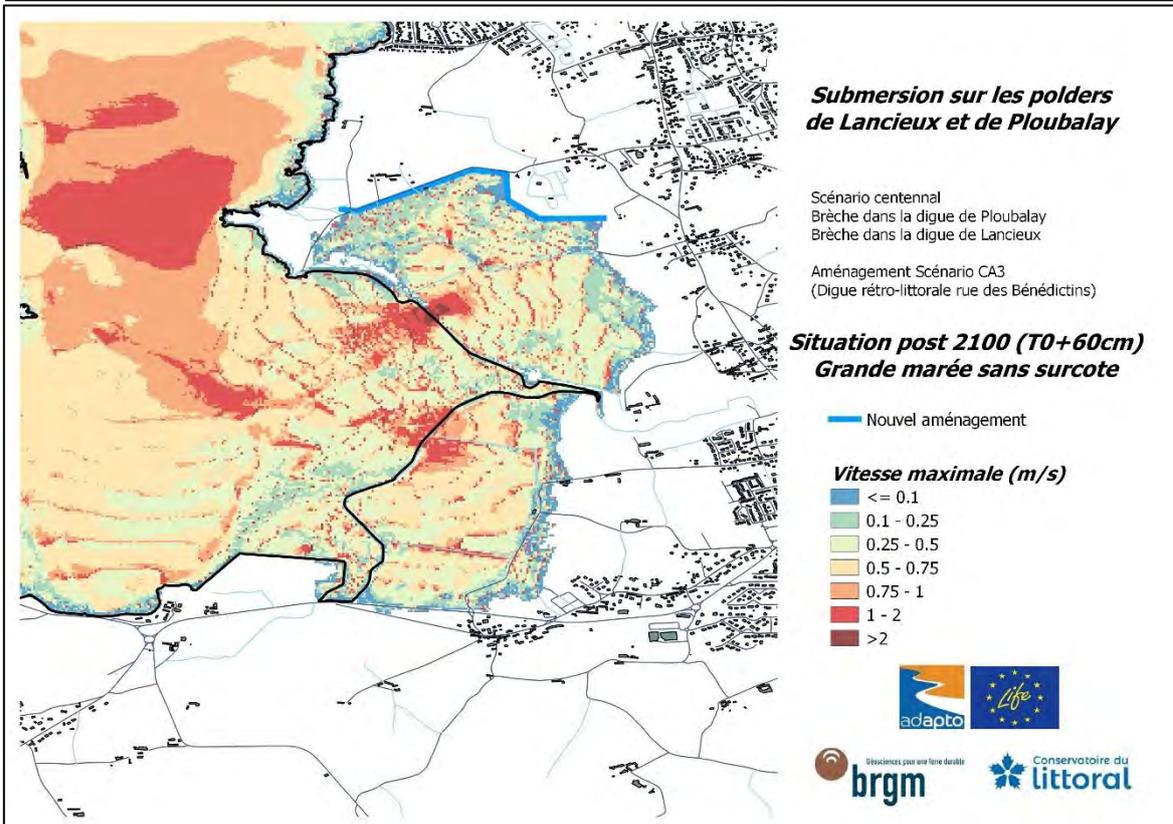
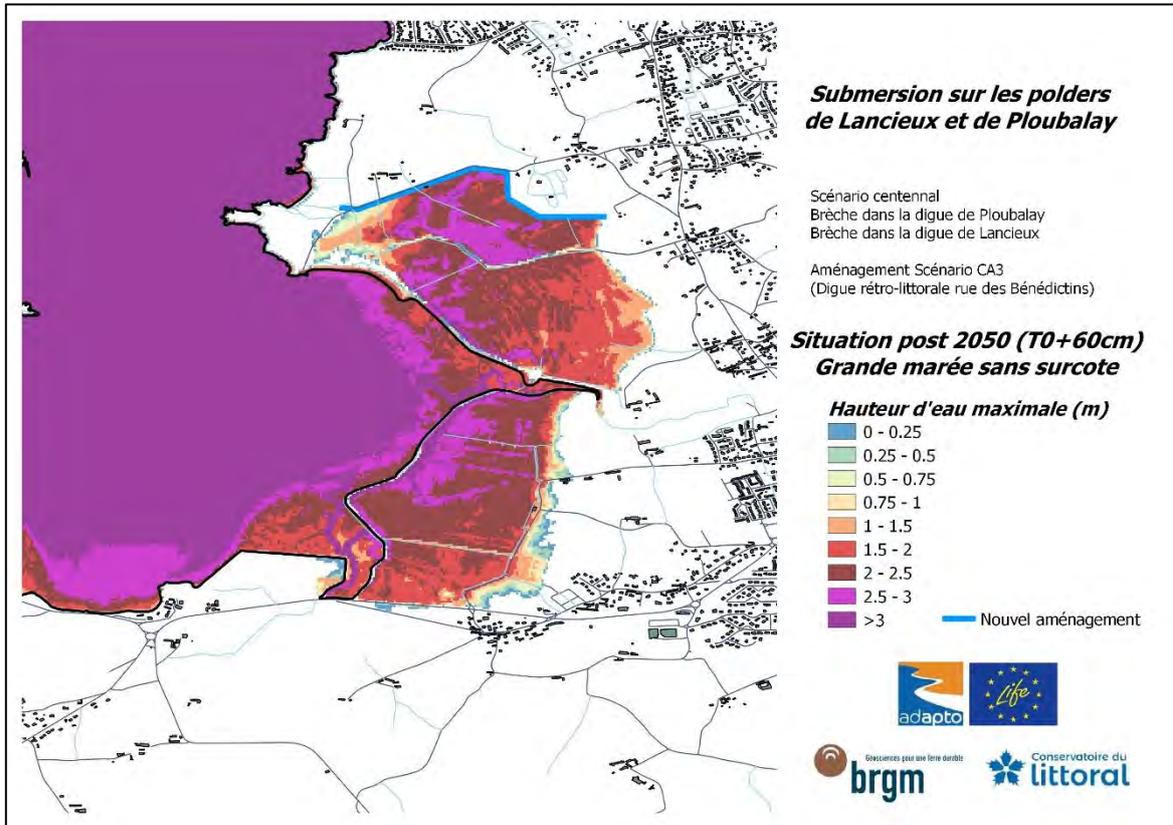
Annexe 21

Résultats obtenus pour le scénario CA3_2100

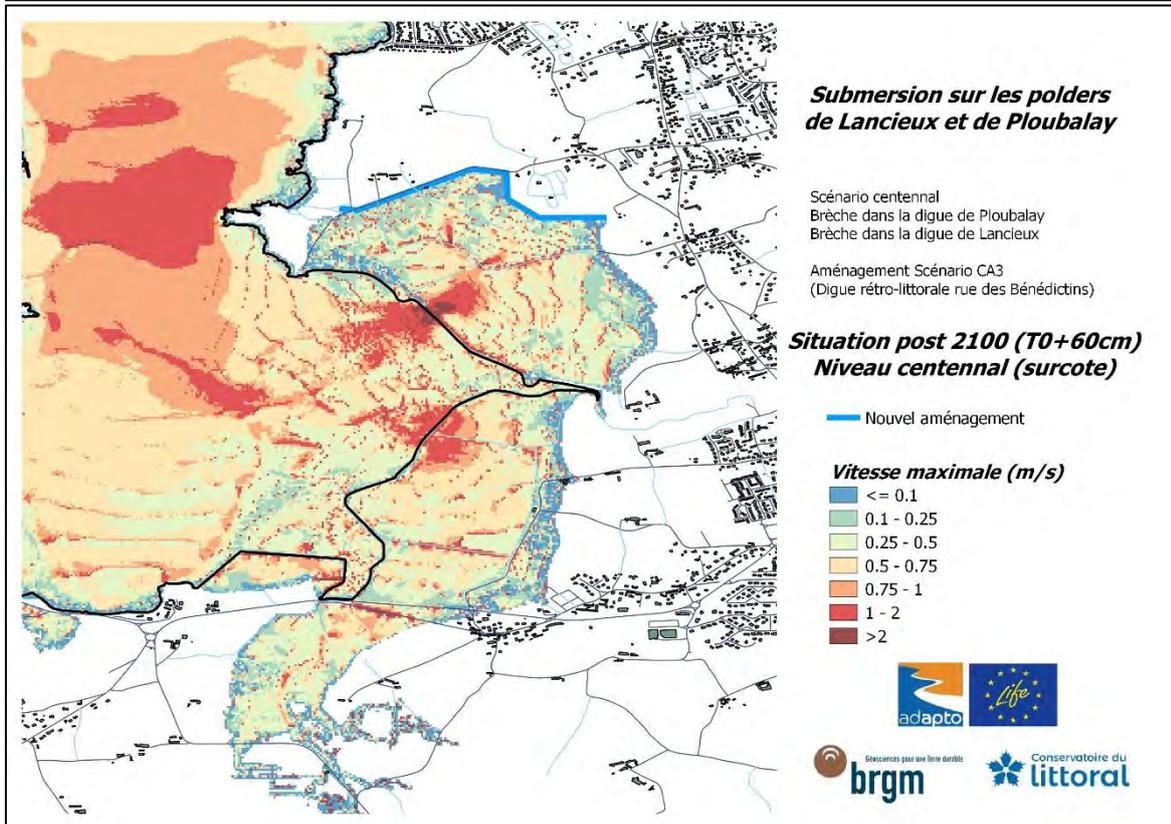
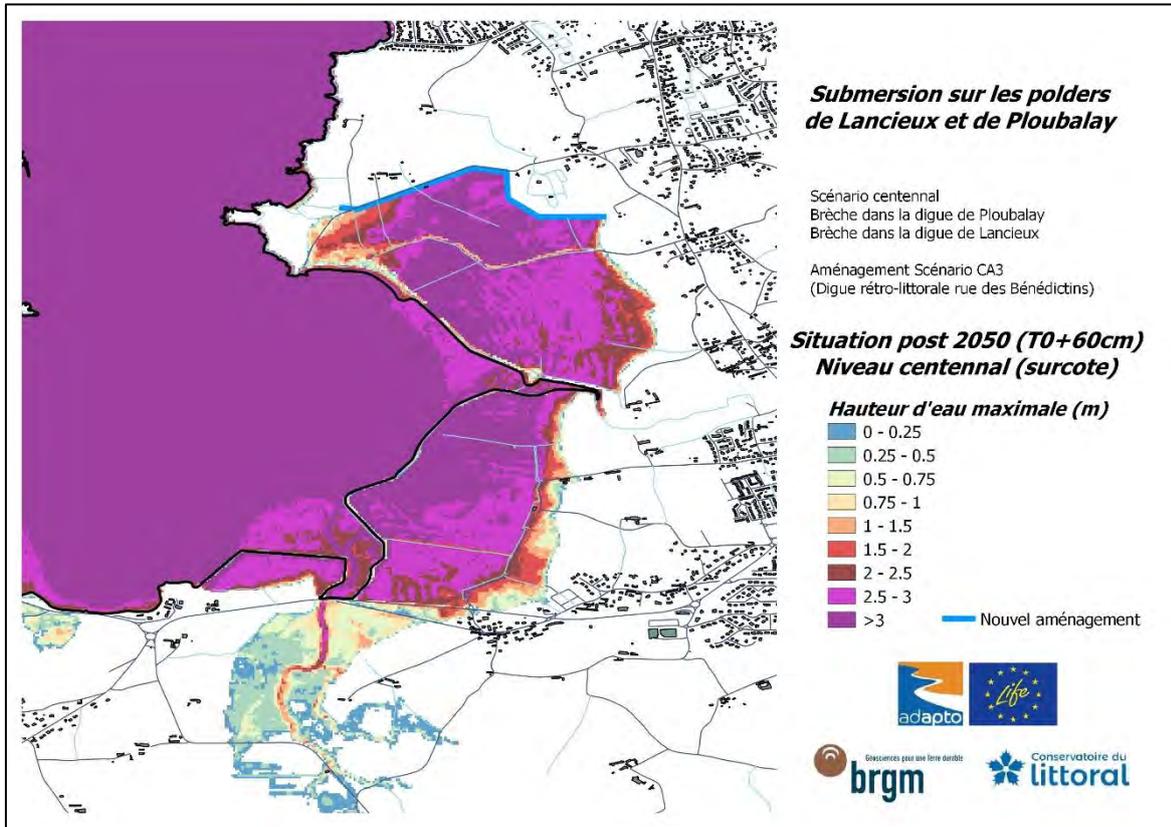
Brèche dans la Digue de la Roche
Brèche dans la Digue des Marais-Neufs
Nouvel aménagement : Digue le long de la rue des Bénédictins
Echéance post 2050 (T0 +60 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



**Niveau centennal (grande marée + surcote)
(l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)**



Annexe 22

Résultats obtenus pour le scénario CA4_2020

Brèche dans la Digue de la Roche

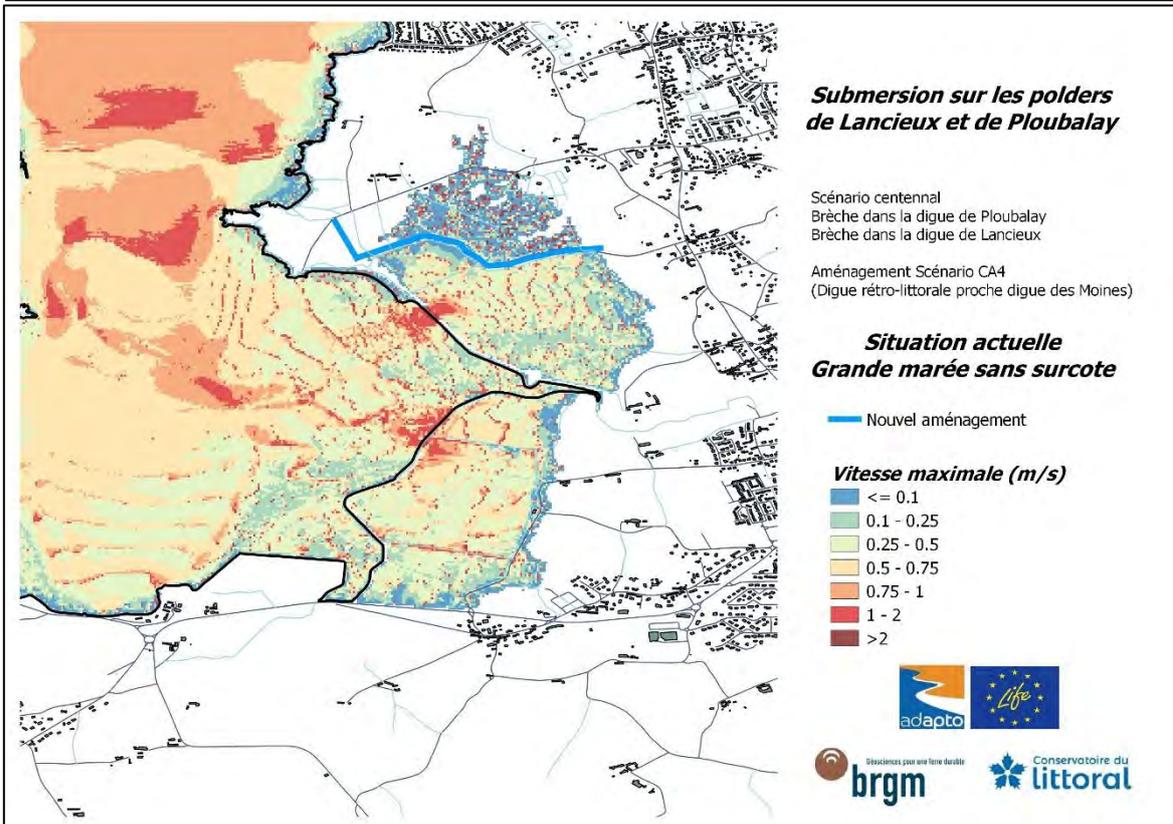
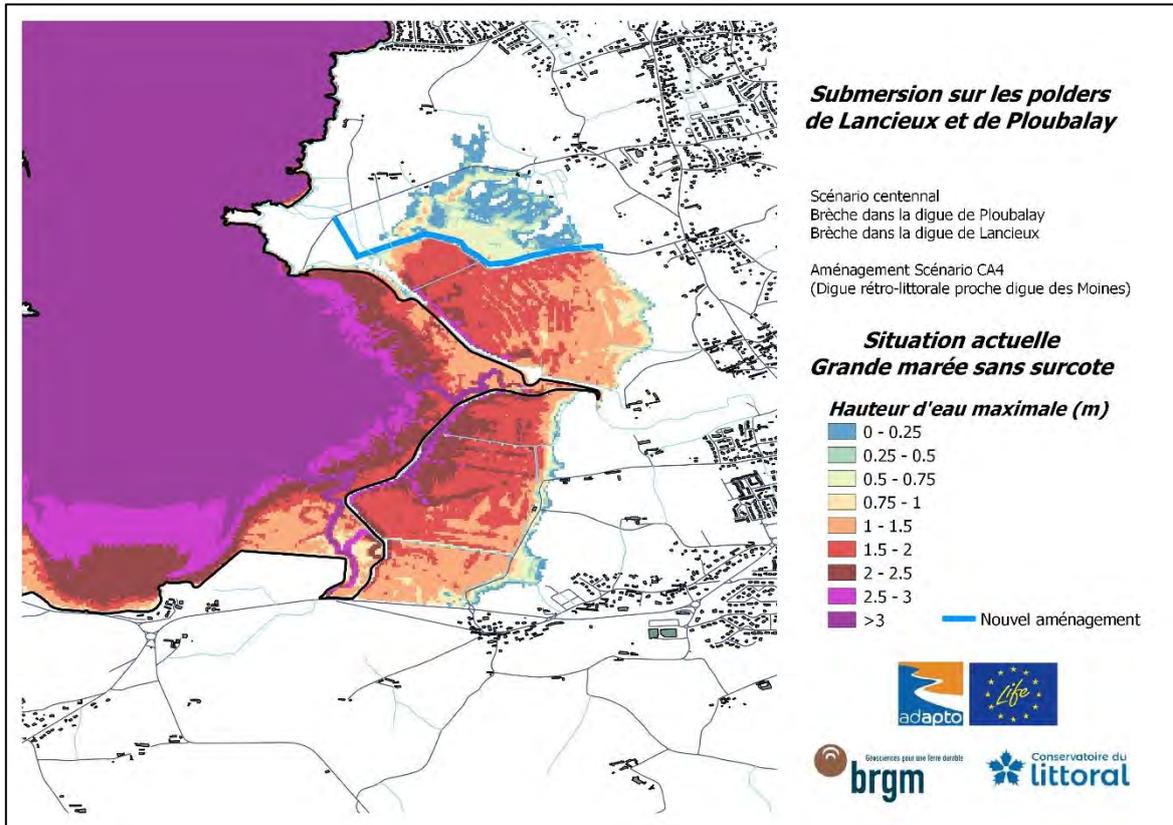
Brèche dans la Digue des Marais-Neufs

Nouvel aménagement : Digue le long de la digue des Moines

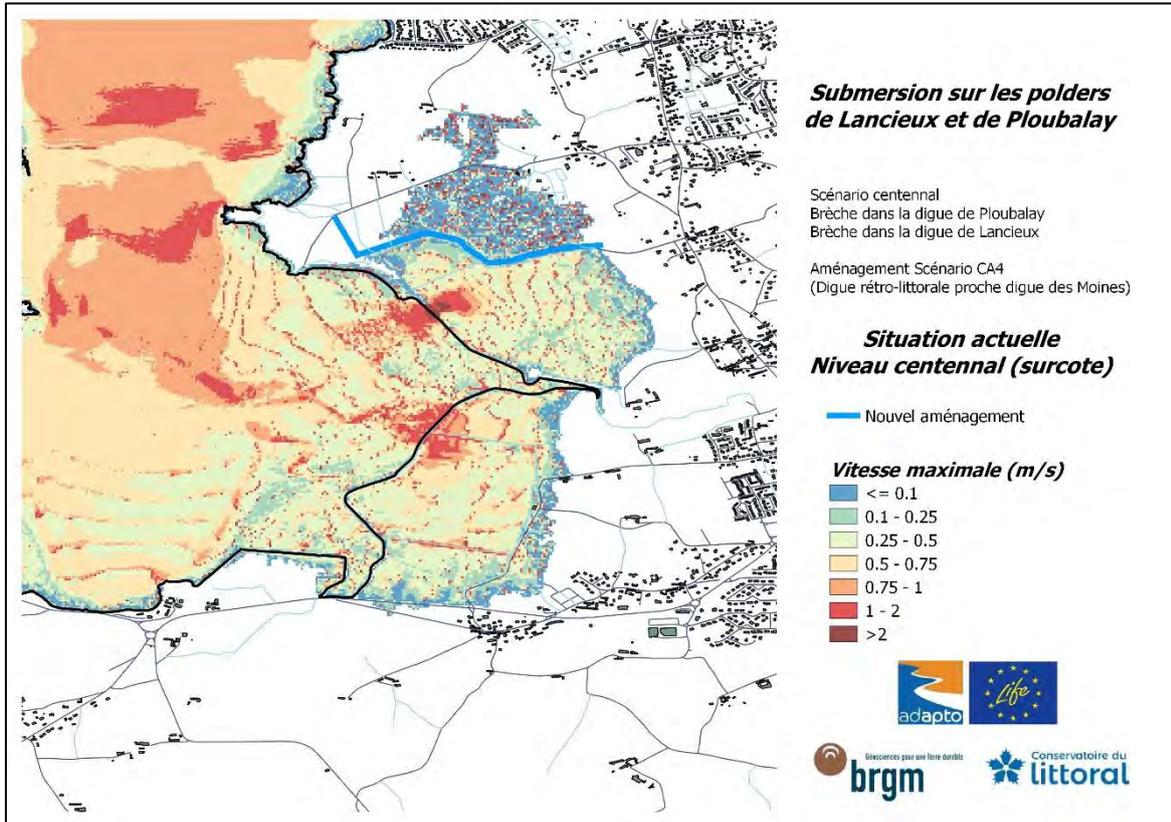
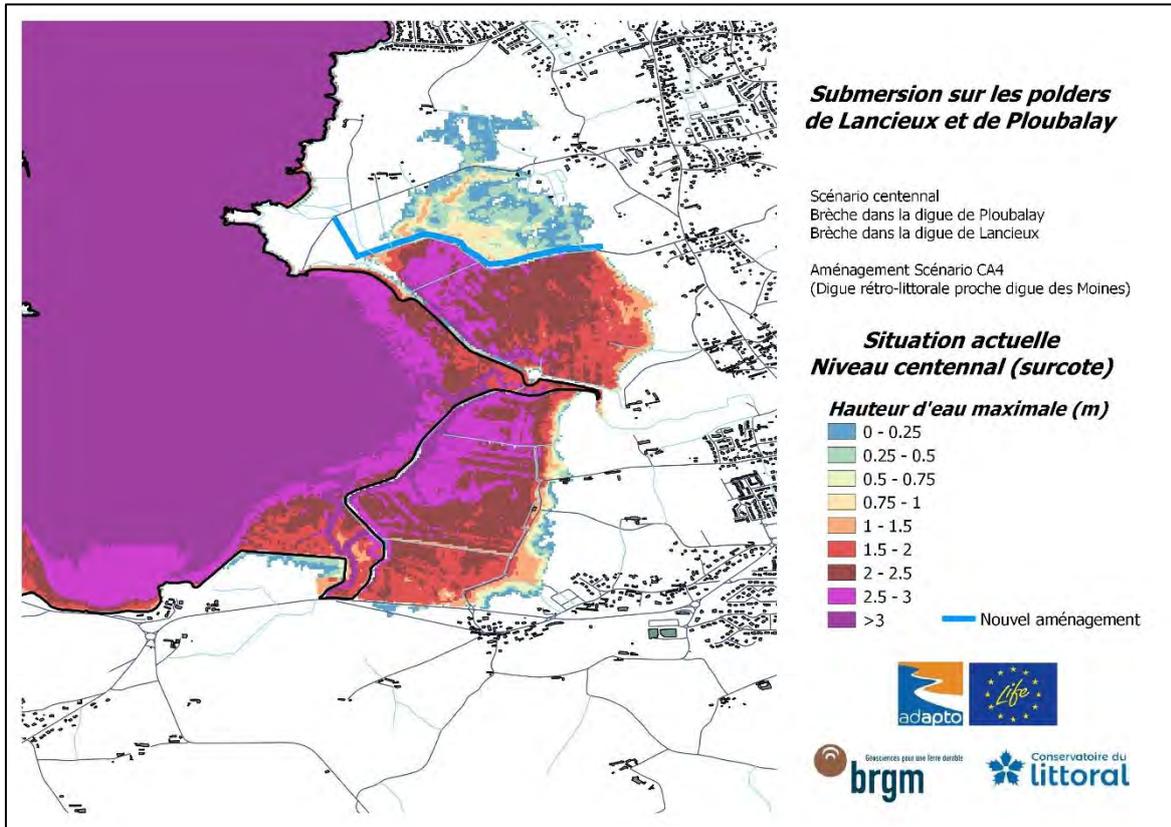
Echéance actuelle

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



Niveau centennal (grande marée + surcote)
 (l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)



Annexe 23

Résultats obtenus pour le scénario CA4_2030

Brèche dans la Digue de la Roche

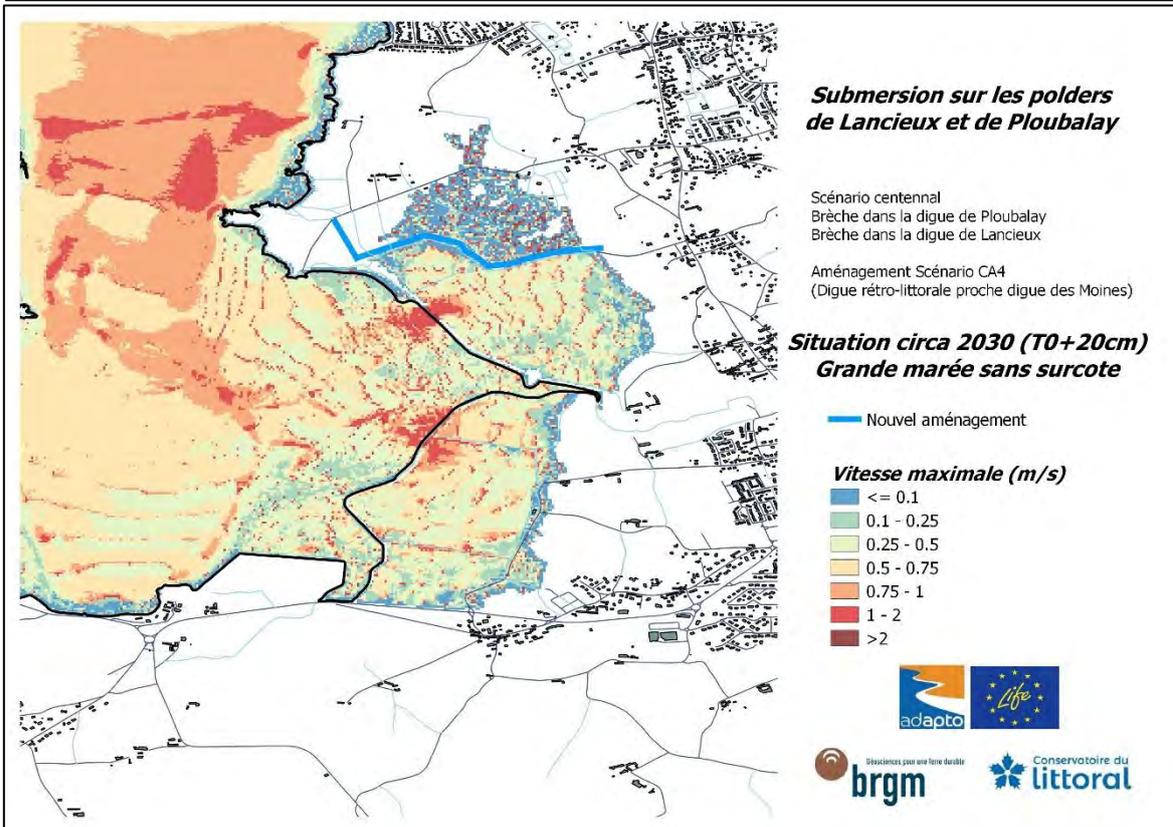
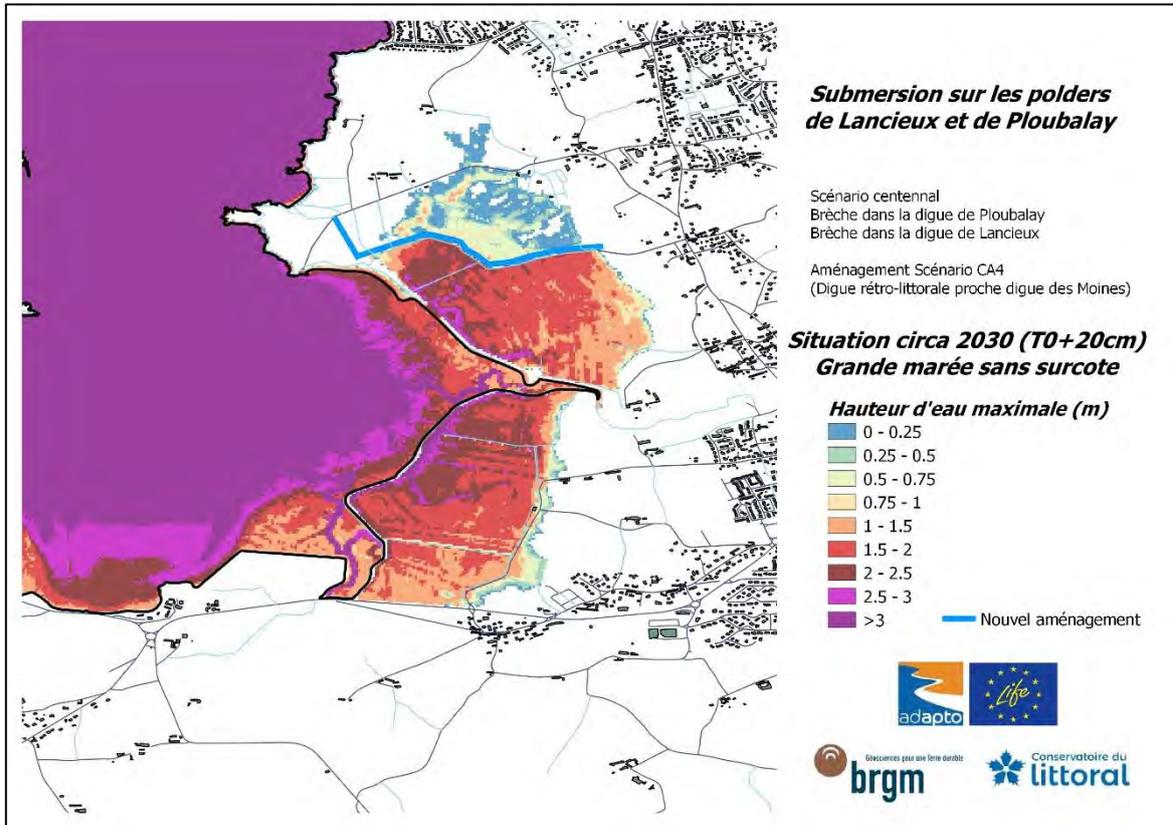
Brèche dans la Digue des Marais-Neufs

Nouvel aménagement : Digue le long de la digue des Moines

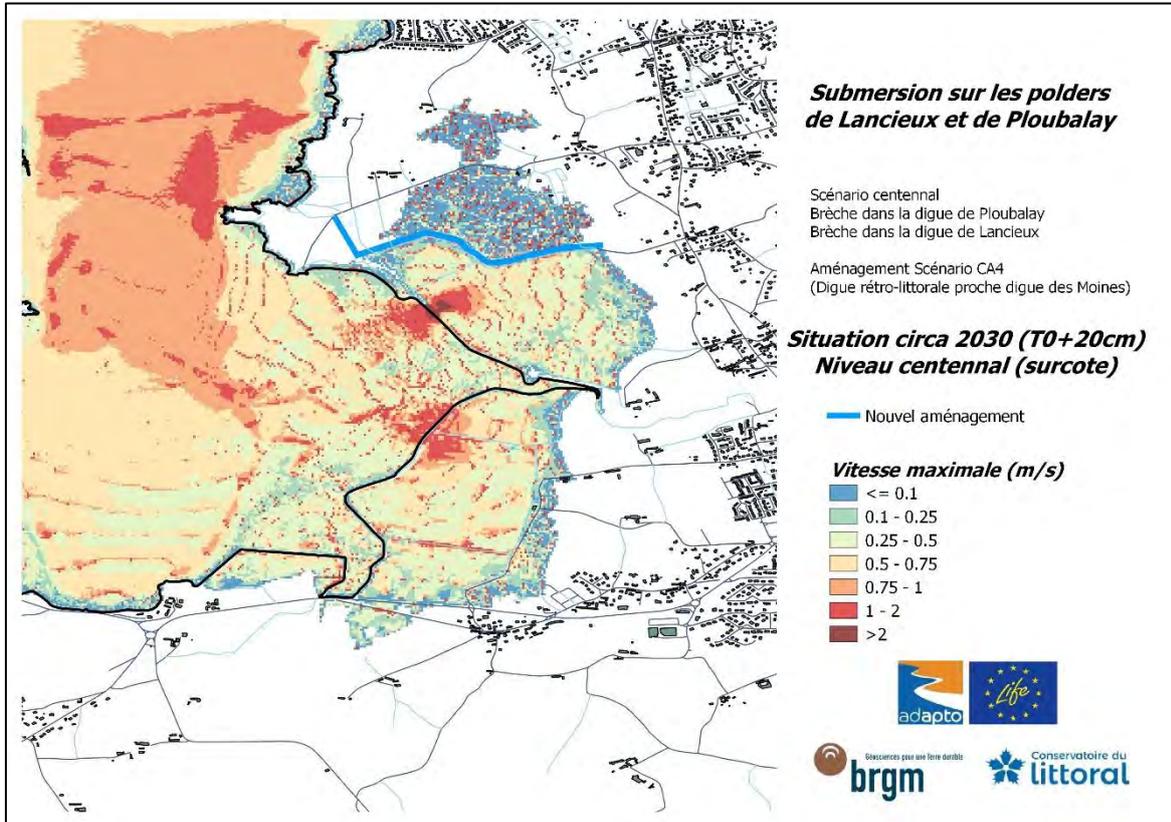
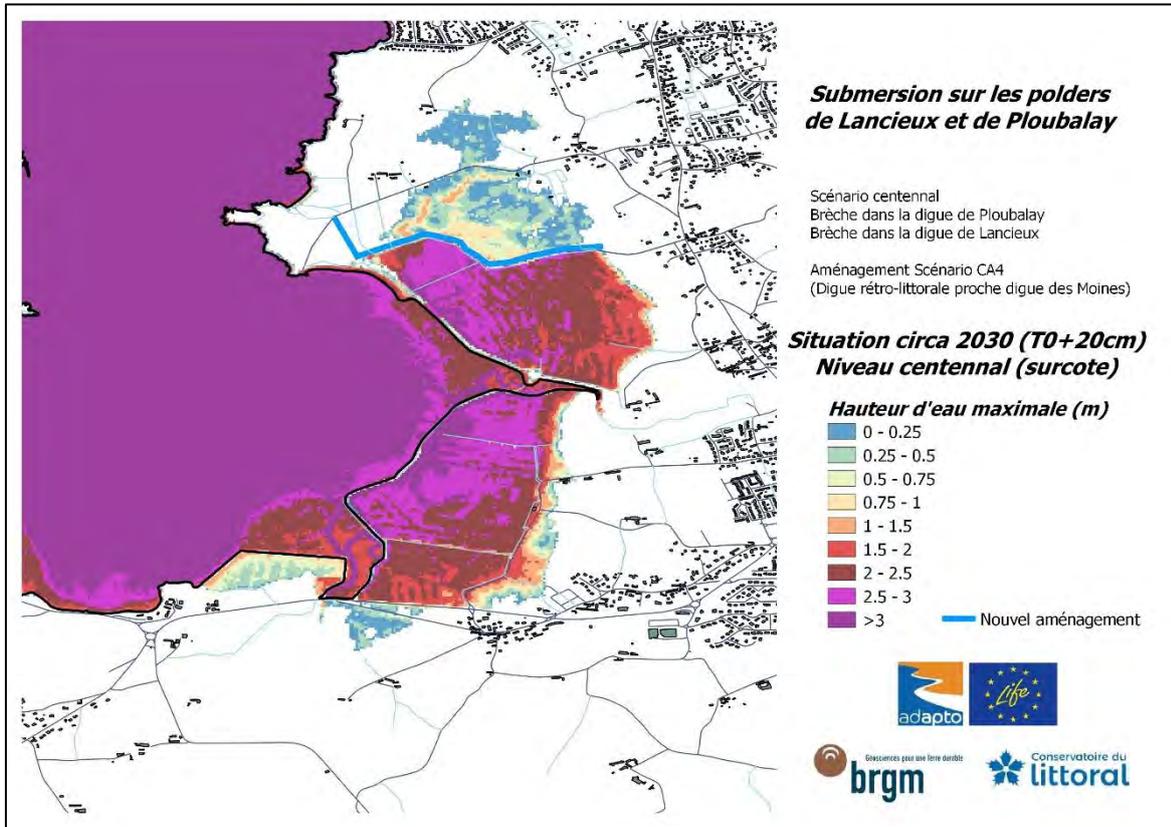
Echéance circa 2030 (T0 +20 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



**Niveau centennal (grande marée + surcote)
(l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)**



Annexe 24

Résultats obtenus pour le scénario CA4_2050

Brèche dans la Digue de la Roche

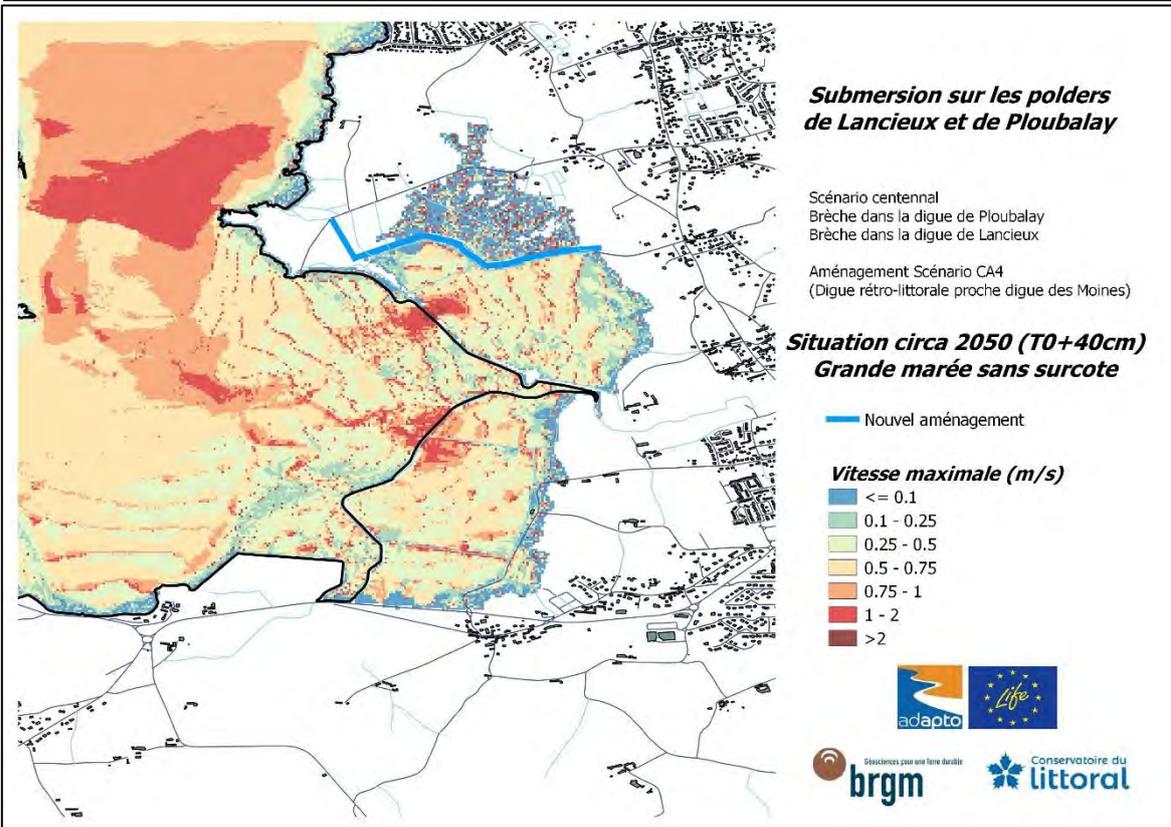
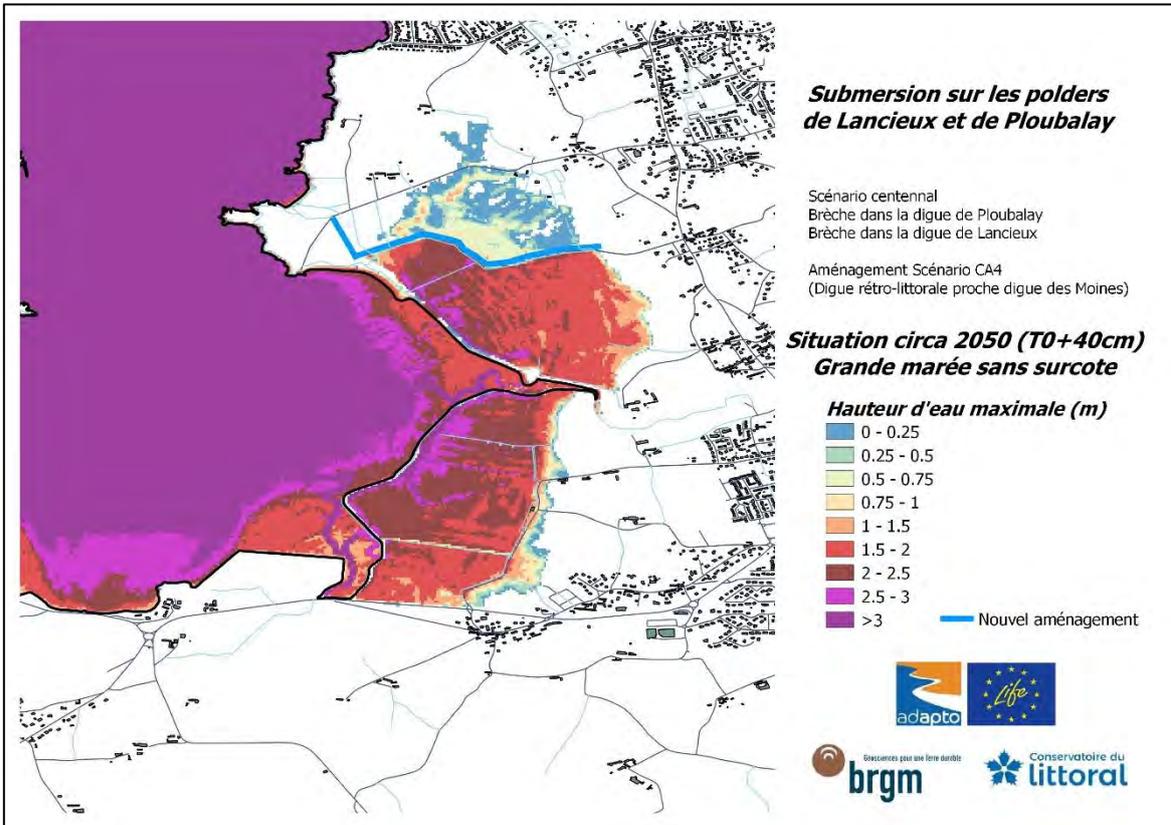
Brèche dans la Digue des Marais-Neufs

Nouvel aménagement : Digue le long de la digue des Moines

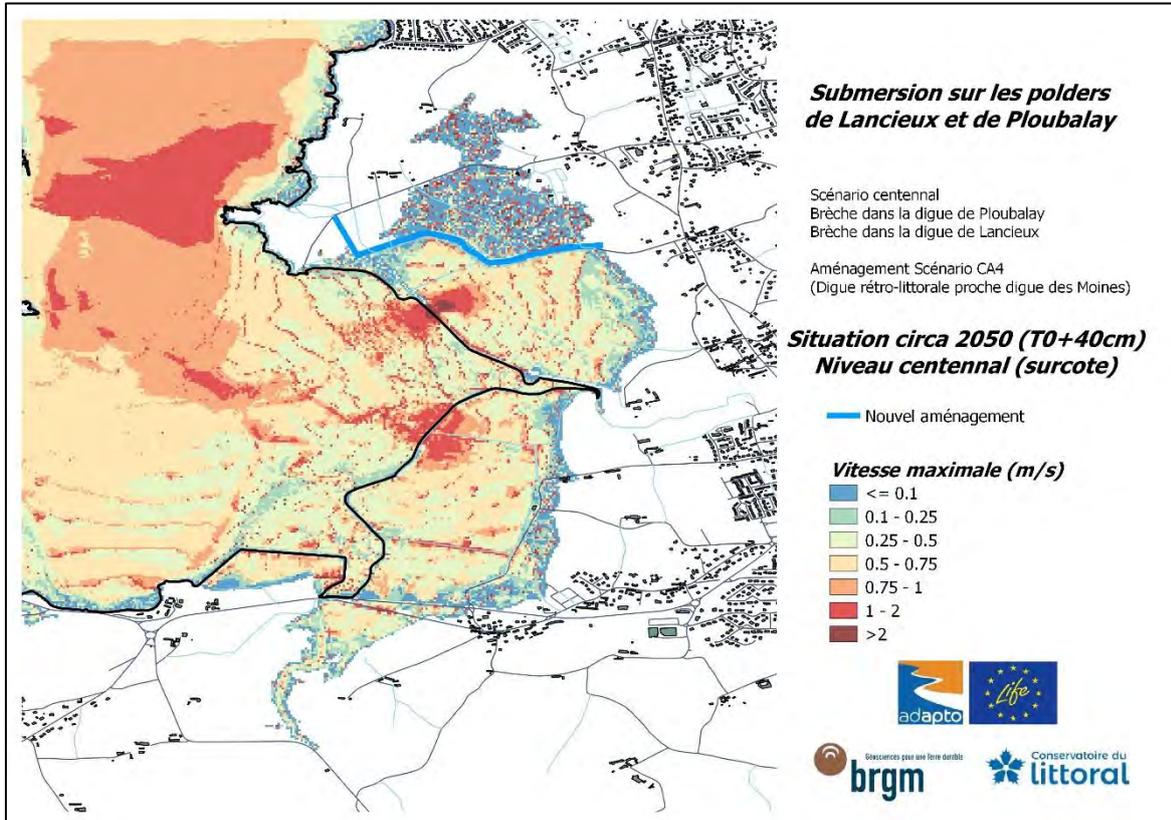
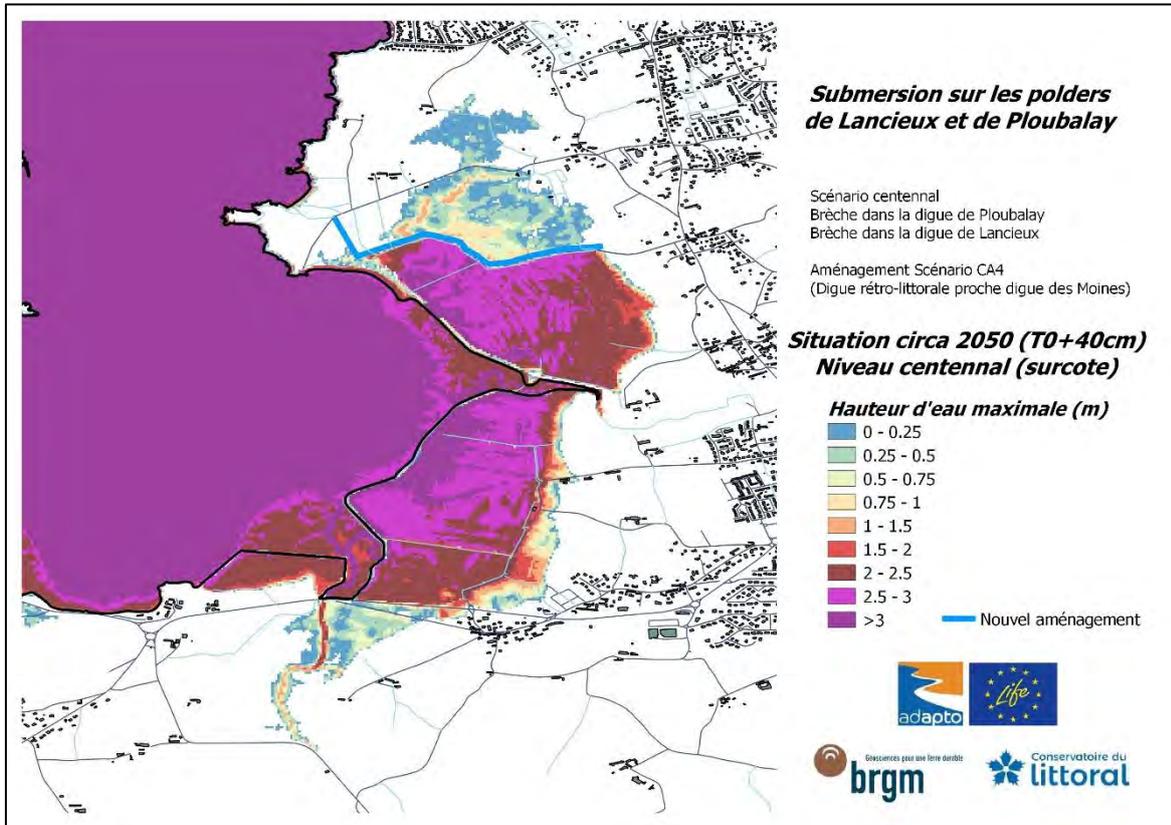
Echéance circa 2050 (T0 +40 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



**Niveau centennal (grande marée + surcote)
(l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)**



Annexe 25

Résultats obtenus pour le scénario CA4_2100

Brèche dans la Digue de la Roche

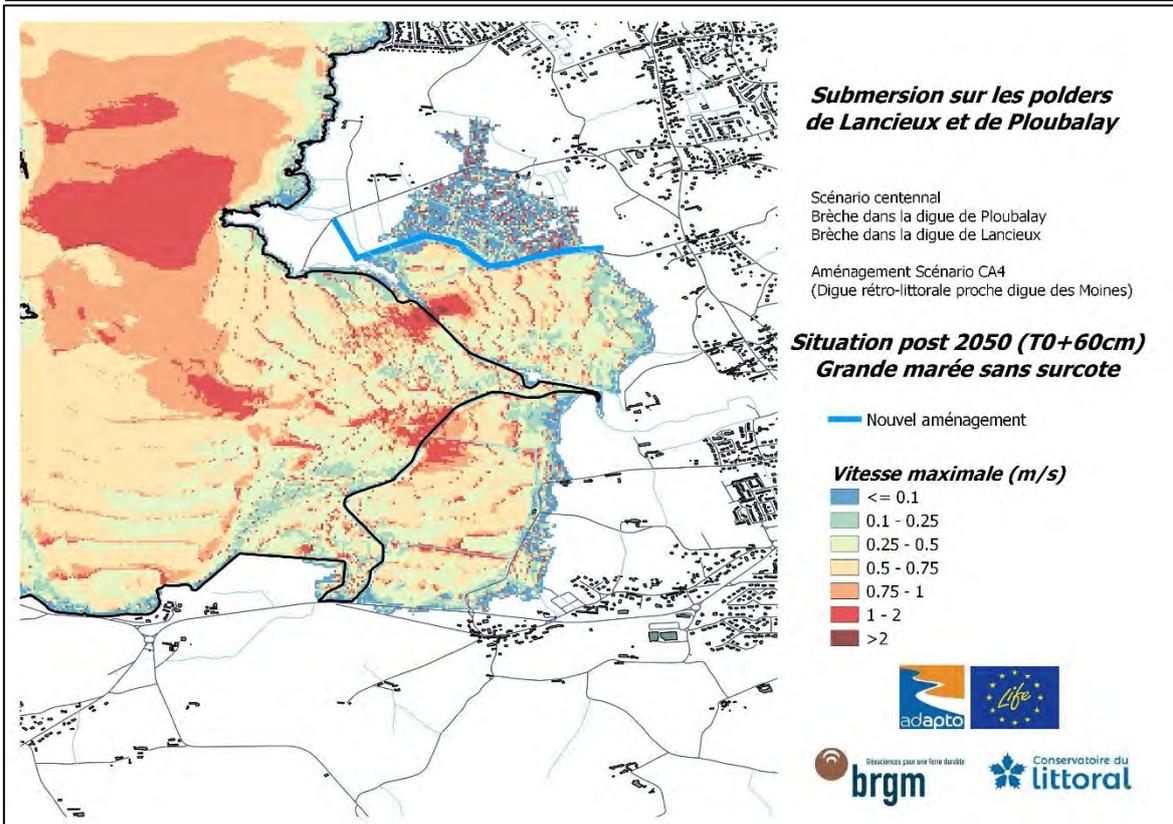
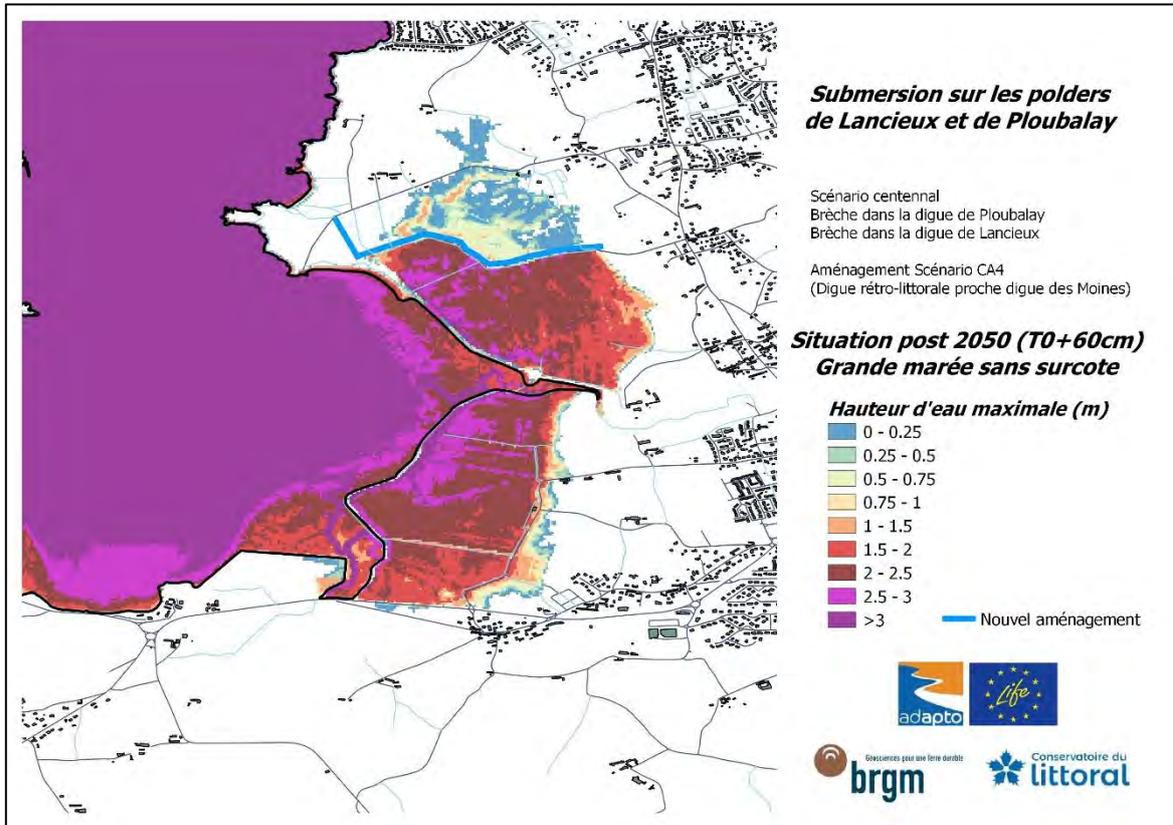
Brèche dans la Digue des Marais-Neufs

Nouvel aménagement : Digue le long de la digue des Moines

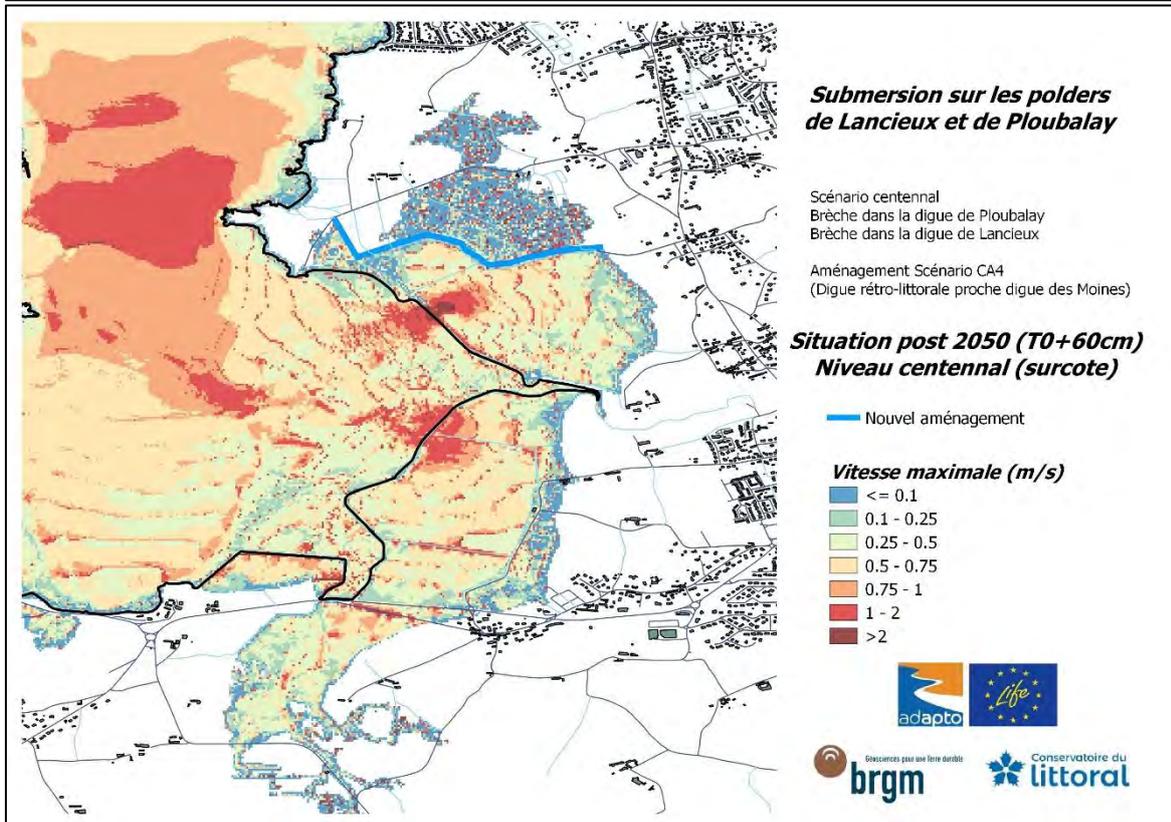
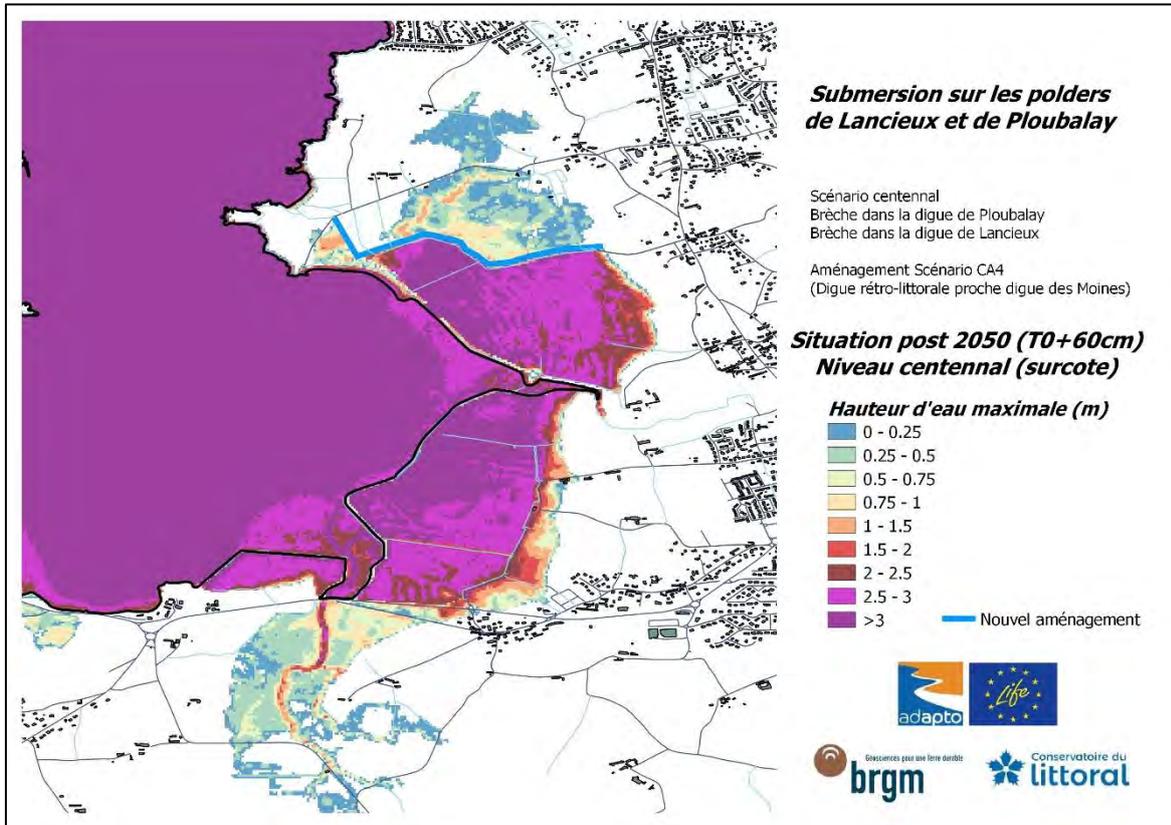
Echéance post 2050 (T0 +60 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



**Niveau centennal (grande marée + surcote)
(l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)**



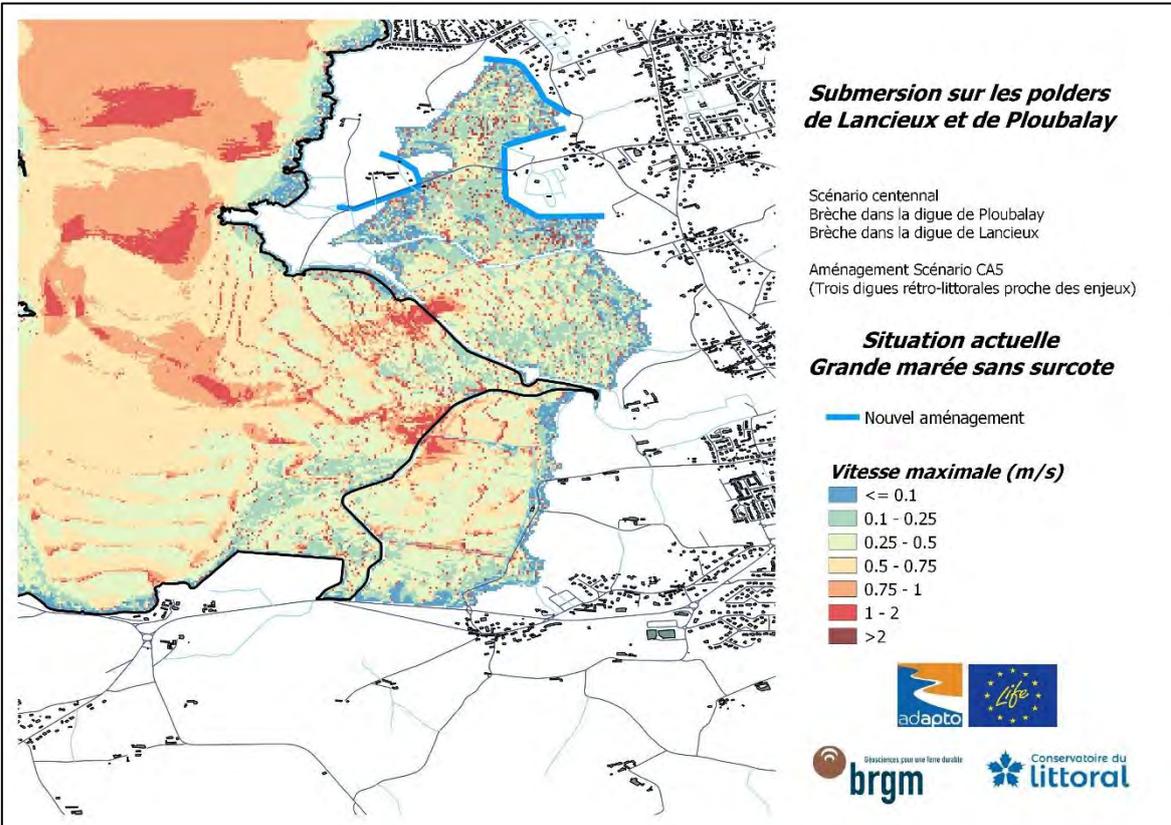
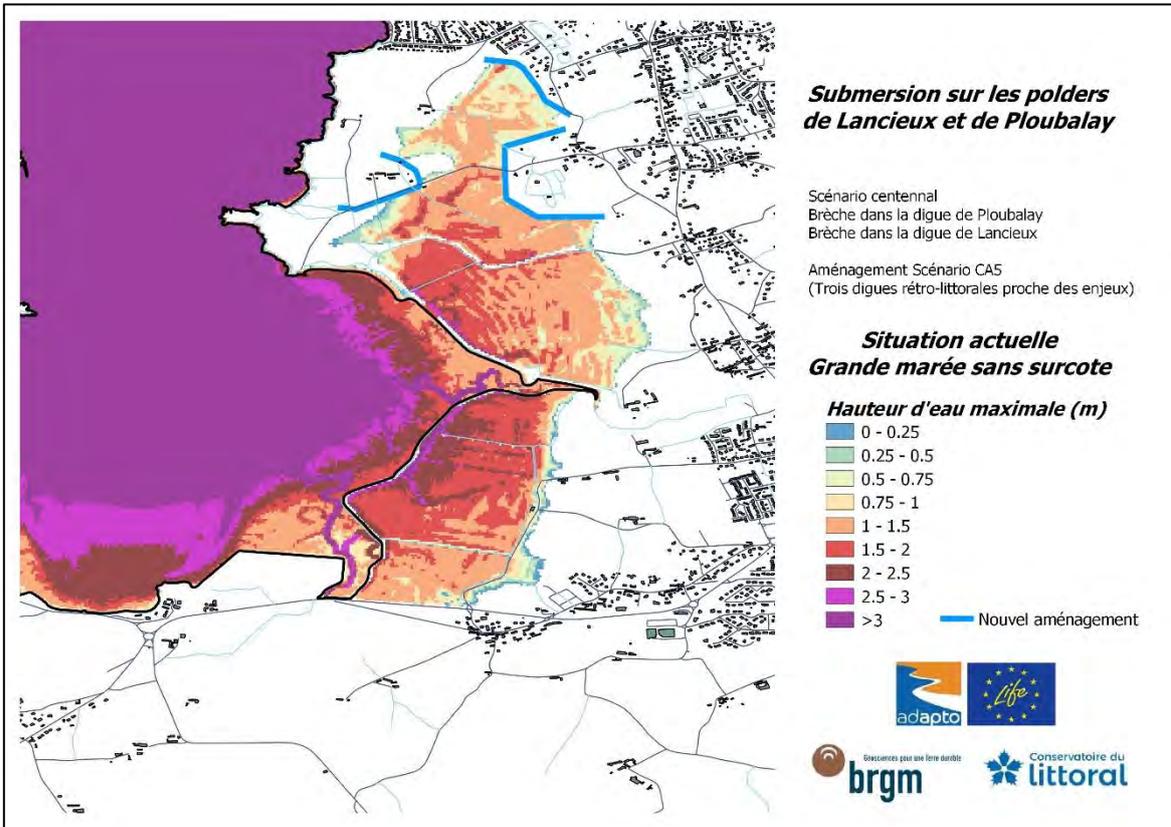
Annexe 26

Résultats obtenus pour le scénario CA5_2020

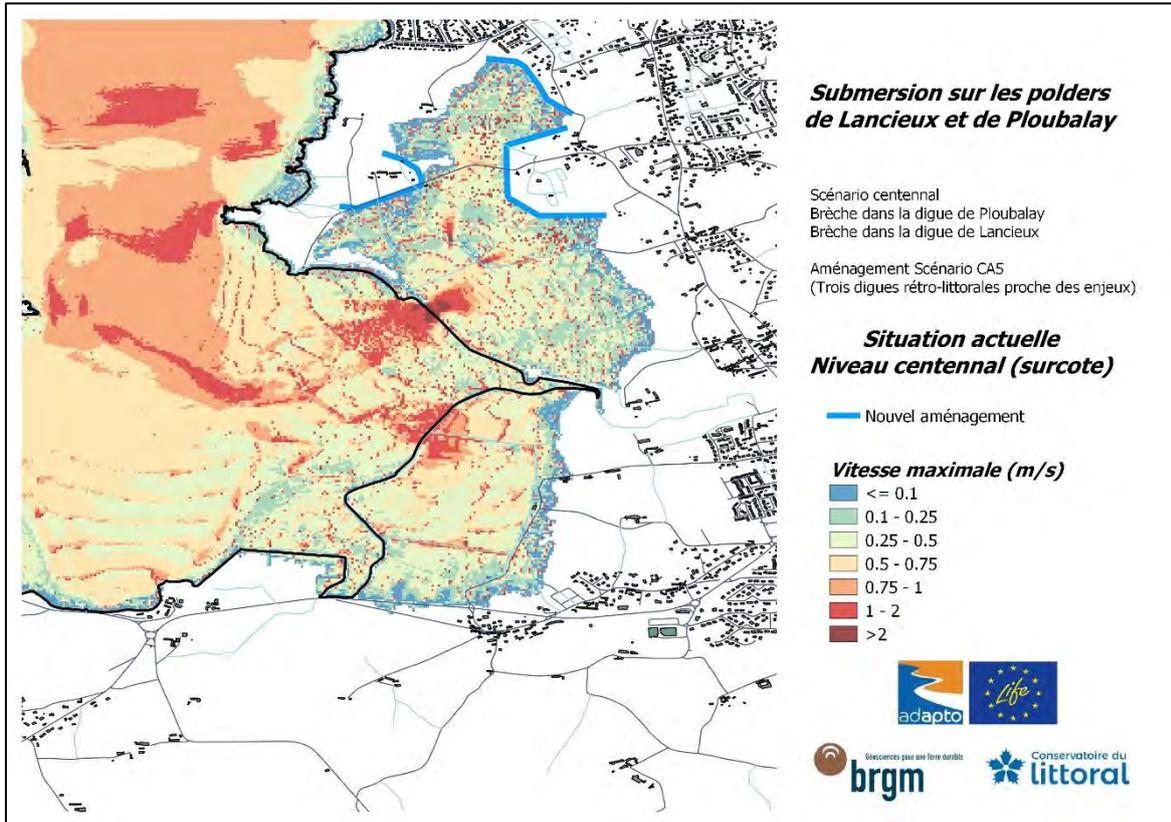
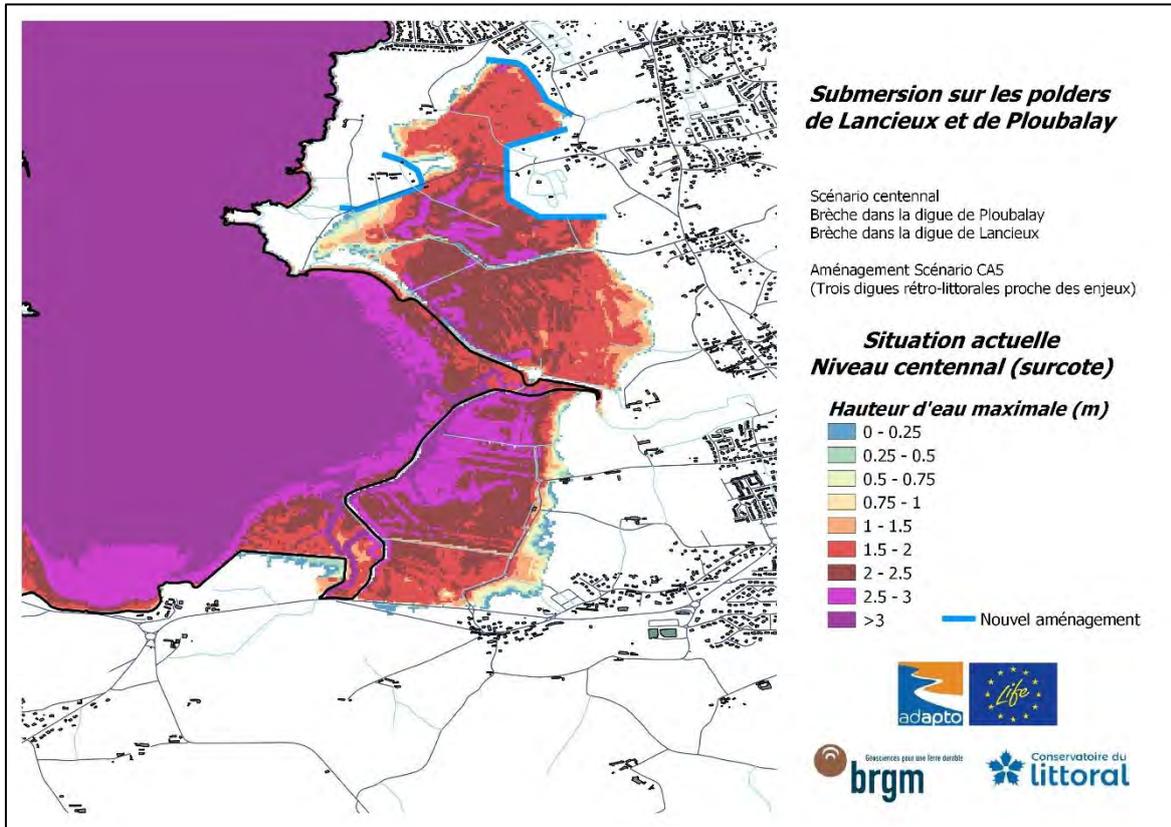
Brèche dans la Digue de la Roche
Brèche dans la Digue des Marais-Neufs
Nouvel aménagement : 3 digues au plus près des enjeux
Echéance actuelle

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



Niveau centennal (grande marée + surcote)
 (l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)



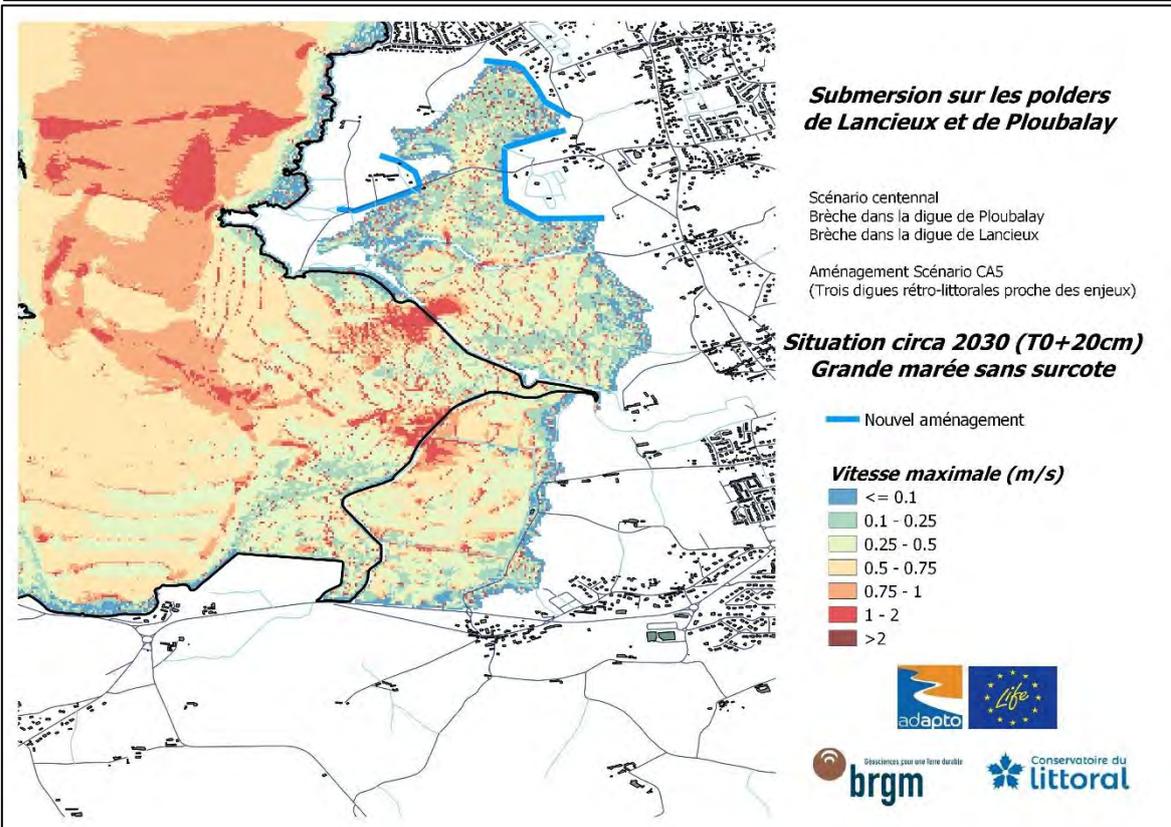
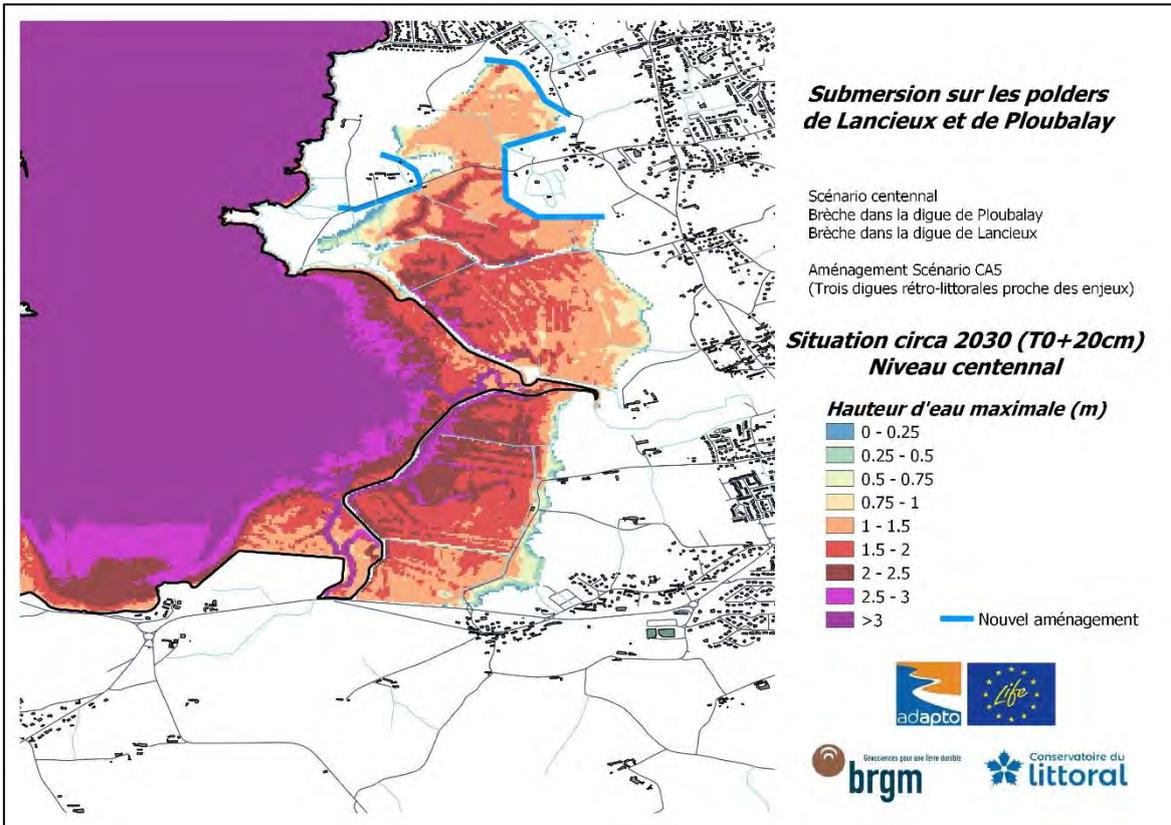
Annexe 27

Résultats obtenus pour le scénario CA5_2030

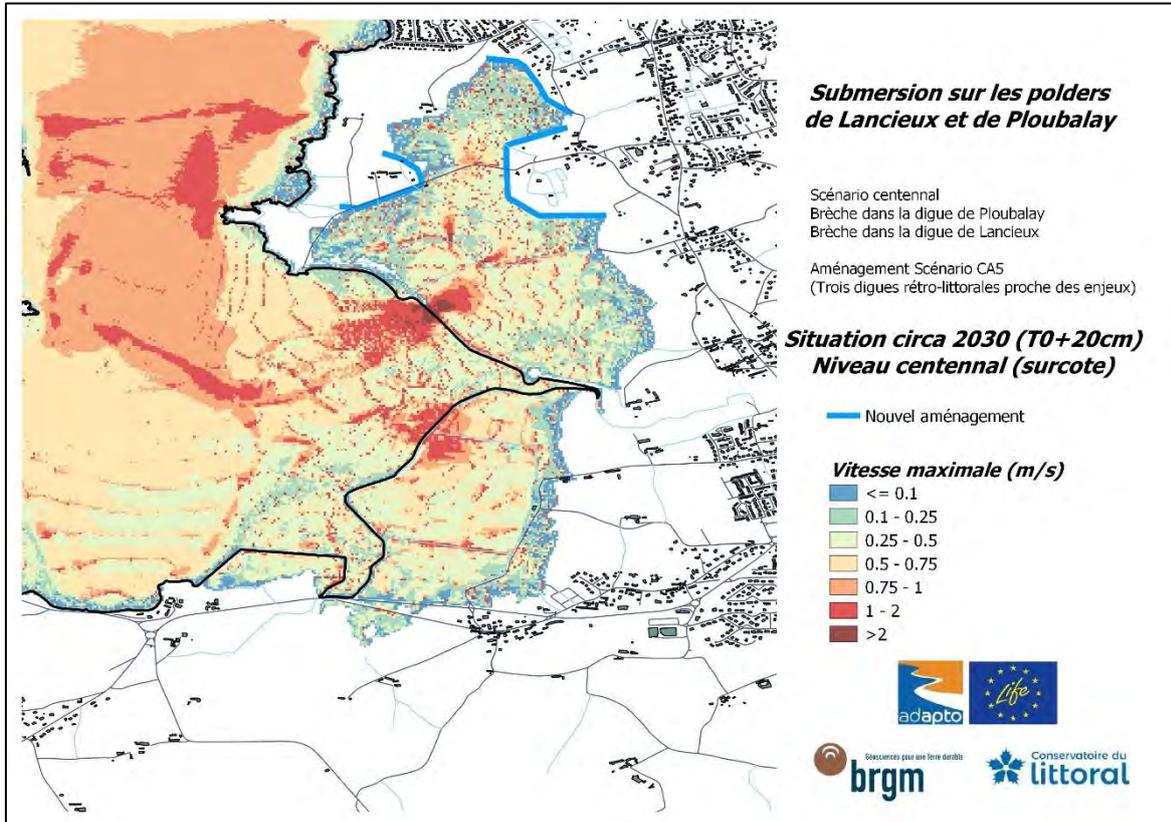
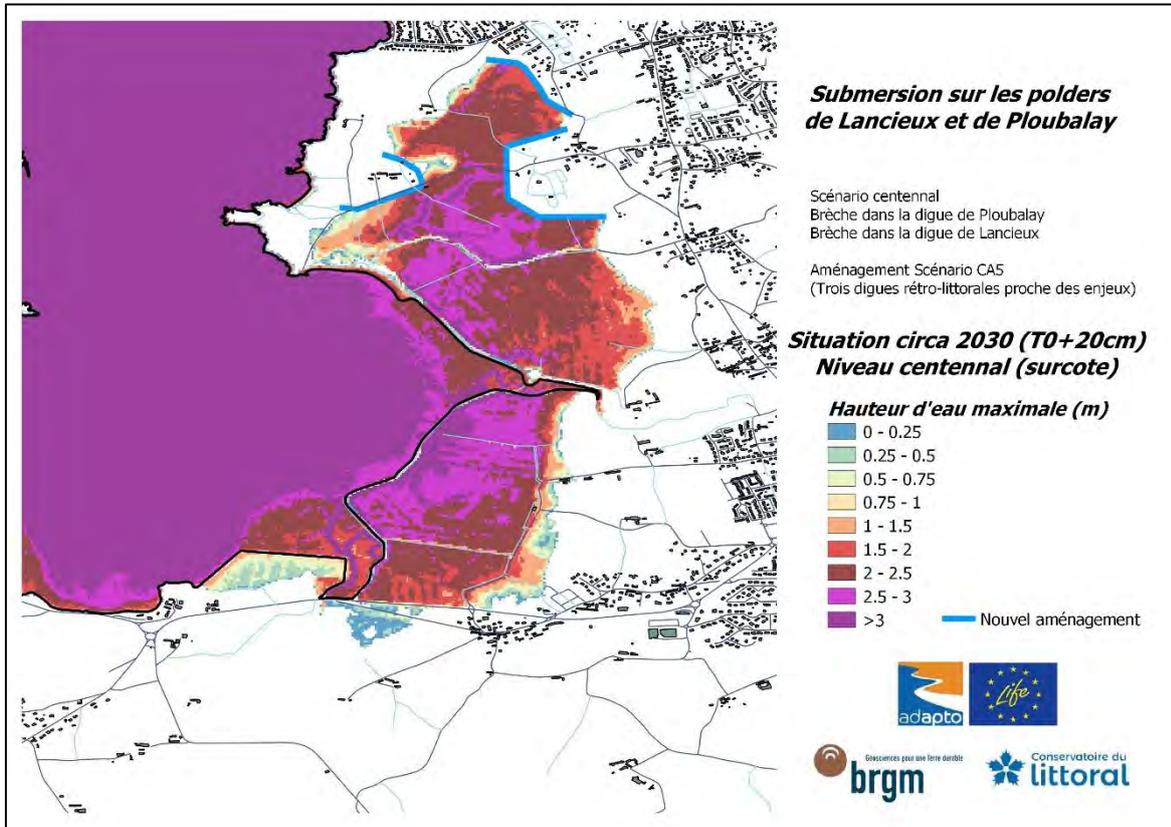
Brèche dans la Digue de la Roche
Brèche dans la Digue des Marais-Neufs
Nouvel aménagement : 3 digues au plus près des enjeux
Echéance circa 2030 (T0 +20 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



**Niveau centennal (grande marée + surcote)
(l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)**



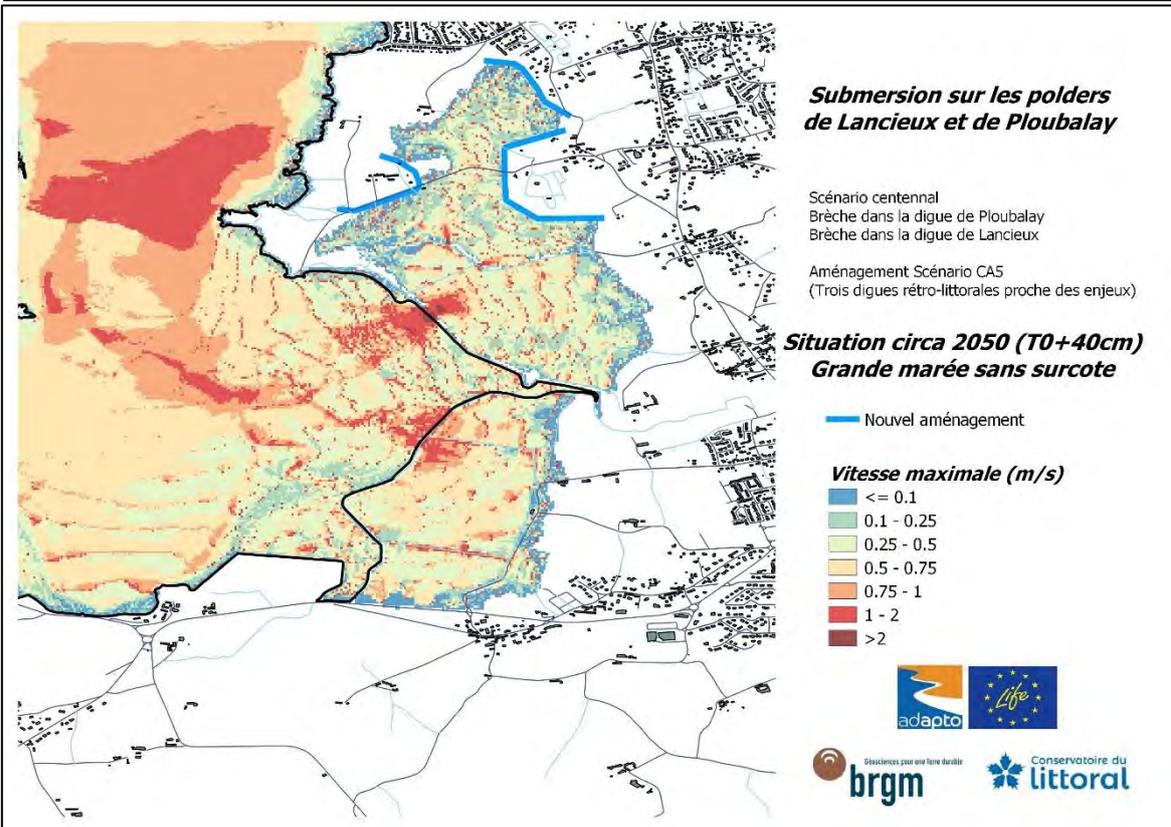
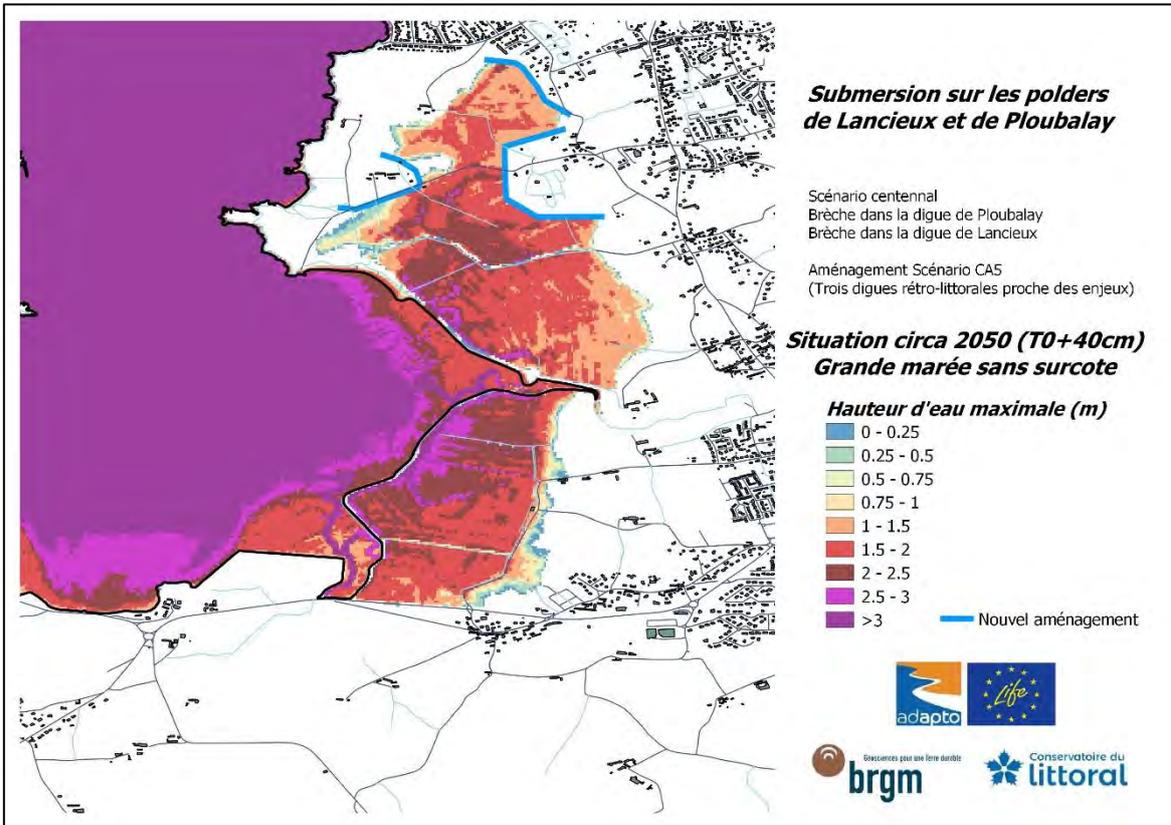
Annexe 28

Résultats obtenus pour le scénario CA5_2050

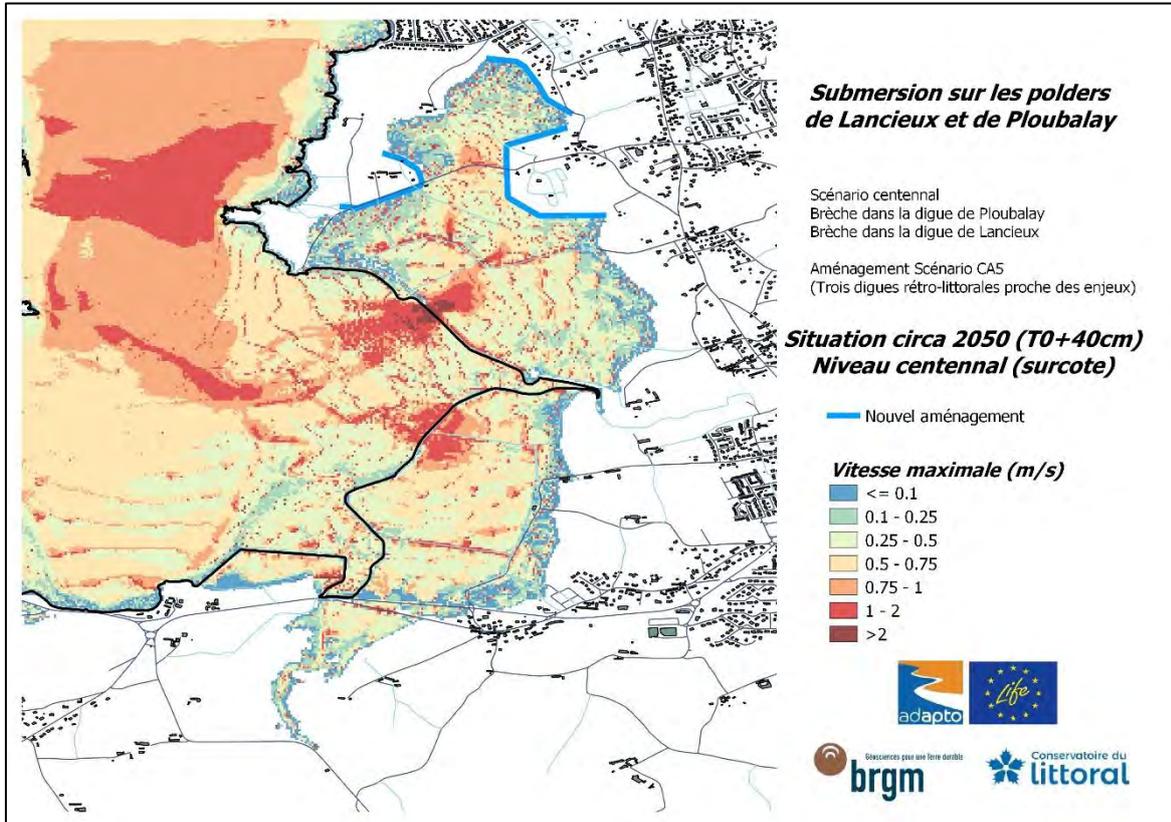
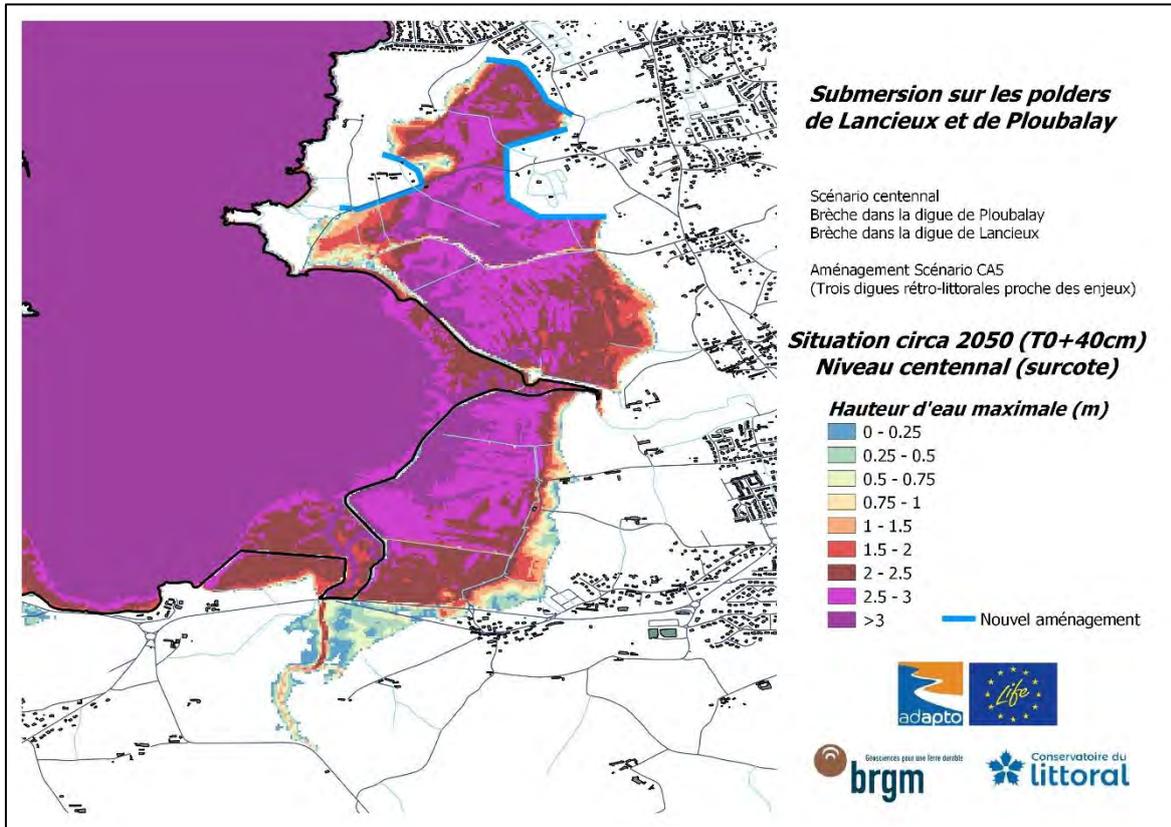
Brèche dans la Digue de la Roche
Brèche dans la Digue des Marais-Neufs
Nouvel aménagement : 3 digues au plus près des enjeux
Echéance circa 2050 (T0 +40 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



**Niveau centennal (grande marée + surcote)
(l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)**



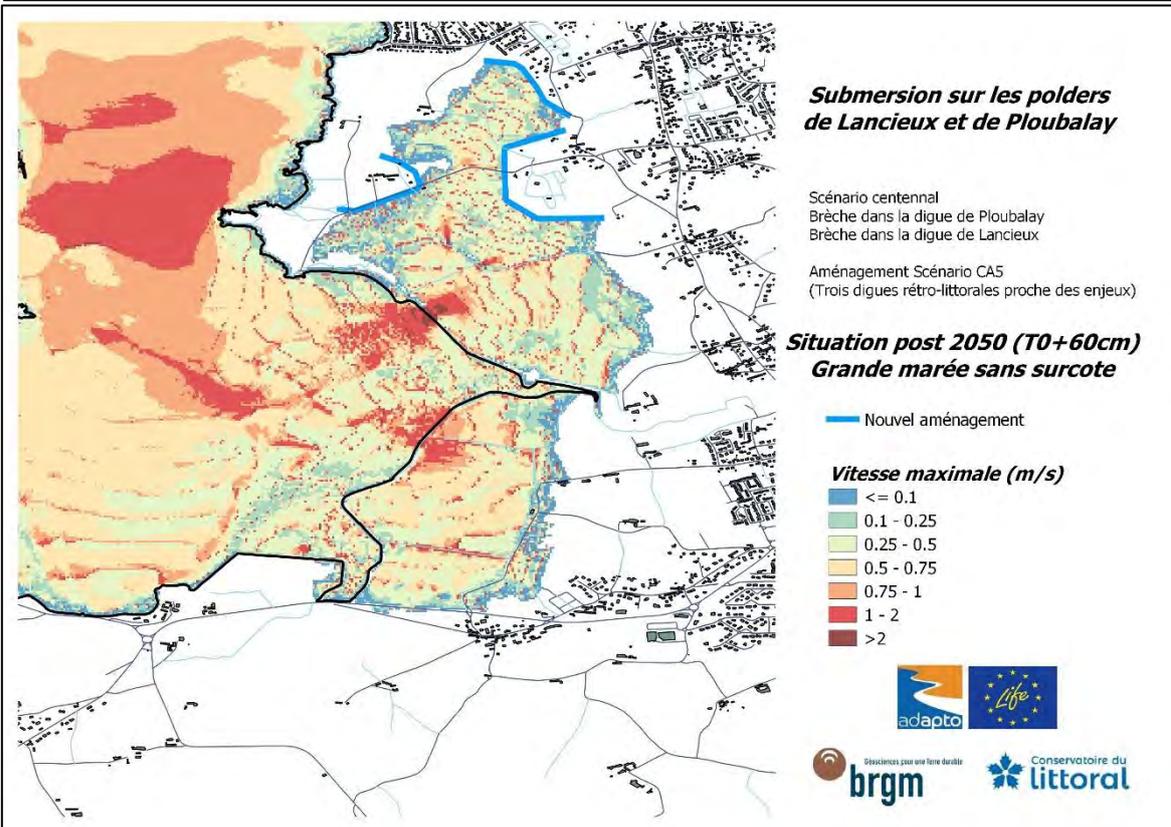
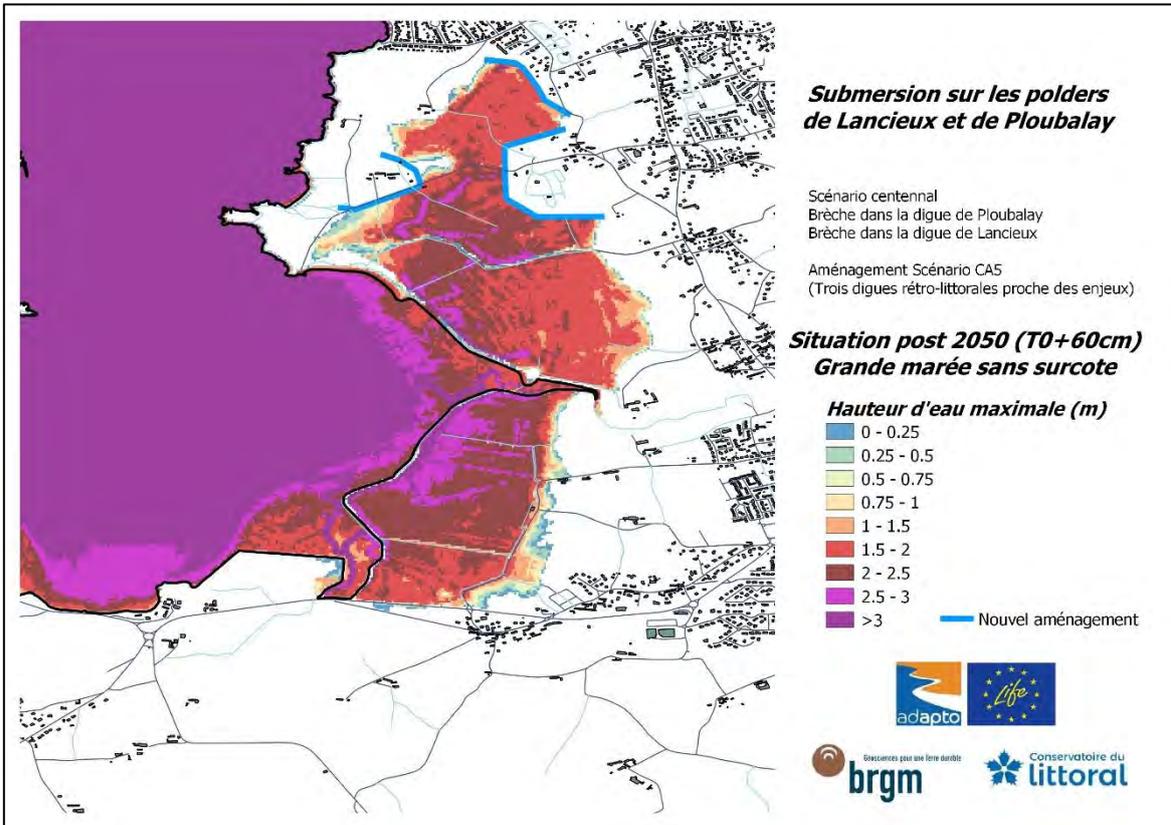
Annexe 29

Résultats obtenus pour le scénario CA5_2100

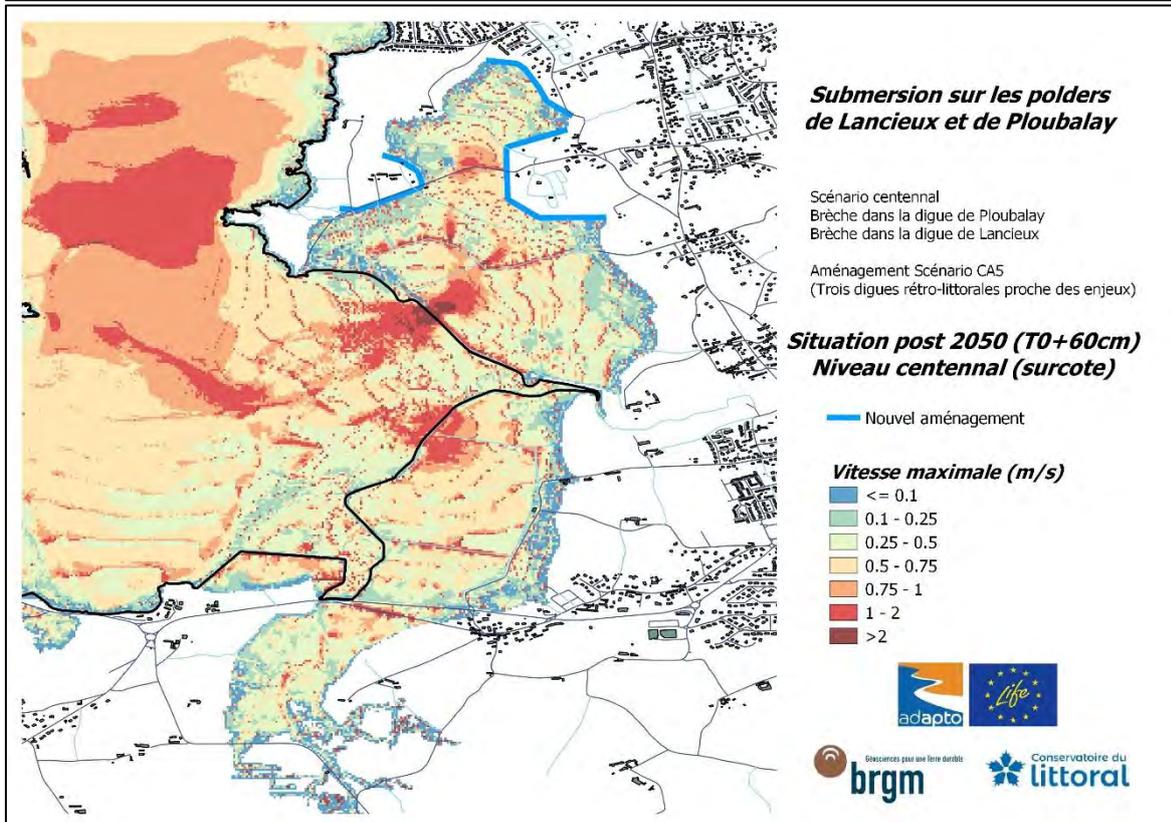
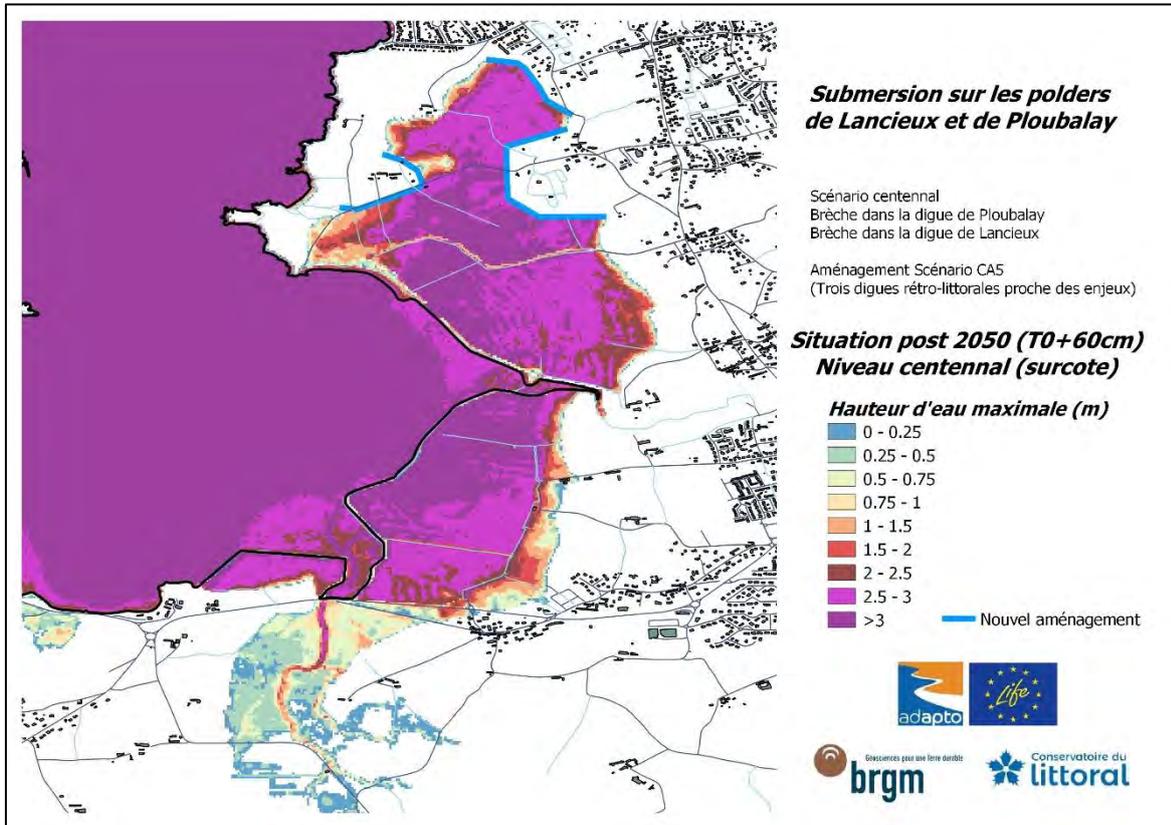
Brèche dans la Digue de la Roche
Brèche dans la Digue des Marais-Neufs
Nouvel aménagement : 3 digues au plus près des enjeux
Echéance post 2050 (T0 +60 cm)

- Grande marée sans surcote (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)
- Niveau centennal (Hauteur d'eau maximale & Vitesse maximale des courants)

**Grande marée sans surcote
(seuls les 4 premiers cycles de marée sont pris en compte)**



Niveau centennal (grande marée + surcote)
 (l'intégralité des 6 cycles de marée sont pris en compte)





Géosciences pour une Terre durable

brgm

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 Bretagne

2, rue de Jouanet

35700 – Rennes – France

Tél. : 02 99 84 26 70