

RAPPORT

DREAL 59/62
SR / DRNHM

09 2013

Détermination de l'alea de submersion marine intégrant les conséquences du changement climatique en région Nord – Pas-de-Calais

**Etape 2-2 : Modélisation des aléas littoraux actuels et
à l'horizon 2100**

Septembre 2013

Ressources, territoires et habitats
Énergie et climat
Prévention des risques
Développement durable
Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**



DREAL Nord – Pas de Calais

Détermination de l'aléa de submersion marine intégrant les conséquences du changement climatique en région Nord – Pas-de-Calais

Etape 2-2 : Modélisation des aléas littoraux actuels et à l'horizon 2100





2/4 rue Edouard Nignon
CS 47202
F-44372 Nantes Cedex 3
France

Tel: +33 2 4048 4040
Fax: +33 2 4048 1313
dhi@dhigroup.com
www.dhigroup.com

Détermination de l'aléa de submersion marine intégrant les conséquences du changement climatique en région Nord – Pas-de-Calais

<u>Client</u> DREAL NORD-PAS-DE-CALAIS	<u>Représentants du Client</u> M. Gregory BRASSART Mme Marie-Alexandrine BERTAUX-VALERE
---	---

<u>Projet</u> Détermination de l'aléa de submersion marine intégrant les conséquences du changement climatique en région Nord-Pas de Calais	<u>Projet N°</u> 2170006
--	---------------------------------

<u>Auteurs</u> Etienne JAOUEN (ETJA) Guillaume KERAMBRUN (GKE) Sophie MERGENTHALER (SME) Laurie SABOURAUD (LASA)	<u>Date</u> Septembre 2013
	<u>Approuvé par</u> Samia MEJDI (SAM)

2.3	Version provisoire	ETJA	JPD	SAM	18/09/13
-----	--------------------	------	-----	-----	----------

2.2	Version provisoire	ETJA	JPD	SAM	24/07/13
-----	--------------------	------	-----	-----	----------

2.1	Version provisoire	ETJA	MJH	JPD	03/12/12
-----	--------------------	------	-----	-----	----------

Révision	Description	Par	Vérfié	Approuvé	Date
----------	-------------	-----	--------	----------	------

<u>Mots clés</u> Submersion marine, changement climatique, modélisation, tempêtes, Nord-Pas de Calais	<u>Classification</u> <input type="checkbox"/> Ouvert <input type="checkbox"/> Interne <input checked="" type="checkbox"/> Client
--	--

Distribution	Nb de copies
DREAL	1 (numérique)
DHI	1 (numérique)

SOMMAIRE

GLOSSAIRE	XXI
1 PREAMBULE.....	1-24
2 ELEMENTS DE CONTEXTE – EVOLUTION DU DOSSIER.....	2-25
3 PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE	3-26
4 DETERMINATION DES FORÇAGES METEO-MARINS A LA COTE.....	4-30
4.1 Principe et méthode.....	4-30
4.2 Détermination de la houle à la côte	4-31
4.2.1 Présentation du modèle.....	4-31
4.2.2 Emprise et bathymétrie.....	4-31
4.2.3 Conditions limites et paramètres d'entrée	4-32
4.2.4 Calage	4-33
4.2.5 Résultats obtenus	4-35
4.3 Définition des niveaux extrêmes.....	4-37
4.3.1 Statistiques des niveaux marins extrêmes de pleine mer.....	4-37
4.3.2 Estimation de la surcote de déferlement	4-41
4.3.3 Prise en compte des incertitudes.....	4-42
4.4 Statistique croisées Houle / Niveau marin	4-42
4.5 Application aux sites à rupture et aux sites à débordement	4-45
4.6 Application aux sites soumis au franchissement d'ouvrages.....	4-47
5 IDENTIFICATION DES ZONES EXPOSEES A UN ALEA SUBMERSION	5-49
6 MODELISATION DU PHENOMENE DE SUBMERSION	6-68
6.1 Principe généraux.....	6-68
6.1.1 Présentation du logiciel de modélisation	6-68
6.1.2 Description de la topographie	6-68
6.1.3 Zones blanches de la topographie.....	6-69
6.1.4 Conditions aux limites.....	6-70
6.1.5 Calage du modèle.....	6-70
6.1.6 Limites du modèle.....	6-72
6.2 Hypothèses particulières appliquées aux sites à rupture et aux sites à débordement.....	6-73
6.2.1 Les conditions aux limites.....	6-73
6.2.2 Représentation des brèches.....	6-74
6.2.3 Tests de sensibilité	6-75
6.2.4 Hypothèses retenues.....	6-76
6.3 Hypothèses particulières appliquées aux sites à franchissements.....	6-77
7 CARTOGRAPHIES DES ALEAS.....	7-80
7.1 Définition de l'aléa	7-80
7.2 Surclassement en arrière des ouvrages	7-81

7.3	Temps d'arrivée de l'inondation	7-82
7.4	Analyse générale des cartographies	7-85
8	MONOGRAPHIES PAR SITES	8-87
8.1	Bray-Dunes - rupture du cordon dunaire	8-87
8.1.1	Hypothèses	8-87
8.1.2	Dynamique de submersion	8-90
8.1.3	Cartographie des aléas	8-91
8.2	Bray-Dunes - franchissement de perré	8-94
8.2.1	Hypothèses	8-94
8.2.2	Dynamique de submersion	8-100
8.2.3	Cartographie	8-101
8.3	Malo-les-Bains- franchissement de perré	8-106
8.3.1	Hypothèses	8-106
8.3.2	Dynamique de submersion	8-117
8.3.3	Cartographie	8-117
8.4	Dunkerque - rupture de la digue des Alliés	8-123
8.4.1	Hypothèses	8-123
8.4.2	Dynamique de submersion	8-134
8.4.3	Cartographie	8-147
8.5	Oye-Plage et Rives de l'Aa - ruptures et débordement	8-152
8.5.1	Hypothèses	8-152
8.5.2	Dynamique de submersion	8-164
8.5.3	Cartographie	8-168
8.6	Marck - débordement	8-174
8.6.1	Hypothèses	8-174
8.6.2	Dynamique de submersion	8-177
8.6.3	Cartographie	8-178
8.7	Calais - débordement de quais portuaires et rupture d'ouvrage	8-183
8.7.1	Hypothèses	8-183
8.7.2	Dynamique de submersion	8-187
8.7.3	Cartographie	8-188
8.8	Blériot-Plage - rupture du cordon dunaire	8-196
8.8.1	Hypothèses	8-196
8.8.2	Dynamique de submersion	8-200
8.8.3	Cartographie	8-200
8.9	Sangatte – ruptures d'ouvrages	8-204
8.9.1	Hypothèses	8-204
8.9.2	Dynamique de submersion	8-211
8.9.3	Cartographie	8-215
8.10	Wissant - franchissement de perré	8-225
8.10.1	Hypothèses	8-225
8.10.2	Dynamique de submersion	8-232
8.10.3	Cartographie	8-233
8.11	Tardinghen - rupture du cordon dunaire et débordement	8-239
8.11.1	Hypothèses	8-239
8.11.2	Dynamique de submersion	8-243
8.11.3	Cartographie	8-244
8.12	Audresselles - franchissement de perré	8-249
8.12.1	Hypothèses	8-249
8.12.2	Dynamique de submersion	8-260
8.12.3	Cartographie	8-261
8.13	Ambleteuse - franchissement de perré	8-267

8.13.1	Hypothèses	8-267
8.13.2	Dynamique de submersion	8-277
8.13.3	Cartographie	8-277
8.14	Wimereux - franchissement de perré.....	8-283
8.14.1	Hypothèses.....	8-283
8.14.2	Dynamique de submersion	8-289
8.14.3	Cartographie	8-290
8.15	Etaples - débordement de berges	8-295
8.15.1	Hypothèses.....	8-295
8.15.2	Dynamique de submersion	8-298
8.15.3	Cartographie	8-299
8.16	Le Touquet - Paris-Plage – Saint-Josse - rupture et surverse de digue.....	8-304
8.16.1	Hypothèses.....	8-304
8.16.2	Dynamique de submersion	8-309
8.16.3	Cartographie	8-309
8.17	Groffliers – ruptures d’ouvrage et surverse	8-315
8.17.1	Hypothèses.....	8-315
8.17.2	Dynamique de submersion	8-320
8.17.3	Cartographie	8-321
9	REFERENCES	9-327

TABLE DES FIGURES :

Figure 3-1 : Exemple de débordement de la mer	3-26
Figure 3-2: Exemple de rupture du cordon dunaire	3-26
Figure 3-3: Exemple de franchissement de perré.....	3-27
Figure 3-4 : Zones basses < 4,5 m NGF sur la région Nord – Pas de Calais.....	3-28
Figure 4-1 : Description des relations entre les différents processus.....	4-30
Figure 4-2: Maillage du modèle MIKE 21 SW (Zéro de référence : niveau moyen de la mer)	4-32
Figure 4-3 : Illustration des limites marines du modèle en fonction des données ANEMOC disponibles.....	4-33
Figure 4-4 : Localisation du houlographe n°05901 du réseau CANDHIS.....	4-34
Figure 4-5 : Comparaison des résultats de hauteurs significatives du modèle de propagation avec les données CANDHIS.....	4-34
Figure 4-6 : Comparaison des résultats en période du modèle de propagation avec les données CANDHIS.....	4-35
Figure 4-7 : Calcul de propagation des houles sur le Nord Pas-de-Calais, à titre indicatif, pour le 27 février 1990 à 01h00 (heure locale).....	4-35
Figure 4-8 Calcul de propagation des houles sur le Nord Pas-de-Calais, à titre indicatif, pour le 8 novembre 2001 à 18h00 (heure locale).....	4-36
Figure 4-9 : Cartographie des niveaux extrêmes de période de retour 100 ans sur la Manche Est et Mer du Nord par rapport à l'IGN 69 (© CETMEF/SHOM 2008)	4-37
Figure 4-10 : Cartographie des niveaux extrêmes de période de retour 100 ans sur la Manche Est et Mer du Nord par rapport à l'IGN 69 (© CETMEF/SHOM 2012)	4-38
Figure 4-11 : Comparaison des niveaux marins de pleine mer issus des données du SHOM (niveaux décennaux)	4-39
Figure 4-12 : Comparaison des niveaux marins de pleine mer issus des données du SHOM (niveaux centennaux)	4-40
Figure 4-13 : Effet de la surcote de déferlement de la houle sur le niveau de la mer à l'approche de la côte	4-41
Figure 4-14 : Effet d'une surcote météorologique et d'une surcote de déferlement sur le niveau de pleine mer.....	4-42
Figure 4-15 : Période de retour des combinaisons de niveaux extrêmes / houle au large à Dunkerque.....	4-44
Figure 4-16 : Période de retour des combinaisons de niveaux extrêmes / houle au large à Calais.....	4-44
Figure 4-17 : Période de retour des combinaisons de niveaux extrêmes / houle au large à Boulogne-sur-Mer.....	4-45
Figure 4-18 : Méthodologie pour la modélisation de débordements et ruptures d'ouvrages... ..	4-46
Figure 4-19 : Surcotes de déferlement calculées sur le site de Tardinghen depuis 2010	4-46
Figure 4-20 : Graphe des surcotes de déferlement calculées sur le site de Tardinghen depuis 2010.....	4-47
Figure 4-21 : Méthodologie pour la modélisation de franchissements	4-48
Figure 5-1 : Paramètres retenus pour l'étude morphologique	5-50
Figure 5-2 : Relation entre les paramètres L et le rapport R/H pour les sites présentant une rupture d'ouvrage.....	5-50
Figure 5-3 : Arbre des décisions.....	5-52
Figure 5-4 : trait de côte de 1949 (source : université du littoral) et de 2006	5-54
Figure 5-5 : site du camping de Grand Fort Philippe	5-55
Figure 5-6 : trait de côte de 1930 et de 2006.....	5-58
Figure 5-7 : trait de côte de 1947(source: CETE) et de 2006.....	5-60
Figure 5-8 : Légende des cartes informatives	5-64
Figure 5-9 : Sites étudiés sur le secteur 1, côté Est	5-65
Figure 5-10 : Sites étudiés sur le secteur 1, côté Ouest.....	5-65

Figure 5-11 : Sites étudiés sur le secteur 2, partie Nord	5-66
Figure 5-12 : Sites étudiés sur le secteur 2, partie Sud.....	5-67
Figure 6-1 : Exemple de MNT utilisé pour la modélisation (Site de Groffliers).....	6-69
Figure 6-2 : Résultat de la simulation de la rupture de digue de 1953 à Dunkerque.....	6-71
Figure 6-3 : Exemple de condition de marée simulée	6-74
Figure 6-4 : Exemple de représentation de brèche	6-74
Figure 6-5 : Niveau marin et hauteur de houle, au large et au pied de l'ouvrage	6-77
Figure 6-6 : Chaîne de calcul des débits de franchissement par paquets de mer au pied de l'ouvrage	6-78
Figure 7-1 : Possibilités de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement (Source : DDE 84).....	7-81
Figure 7-2 : Temps d'arrivée de l'inondation à Sangatte, pour l'événement centennal et une brèche de la digue de 15 m (Phase 2).....	7-83
Figure 7-3 : Temps d'arrivée de l'inondation à Sangatte, pour l'événement centennal et une brèche de la digue de 100 m (Phase 2).....	7-84
Figure 7-4 : Effet de la largeur de brèche sur l'inondation	7-85
Figure 7-5 : Limitation de l'extension de l'inondation par la topographie	7-85
Figure 7-6 : Etalement de l'inondation par une topographie basse	7-86
Figure 7-7 : Limitation de l'extension de l'inondation par un relief accentué	7-86
Figure 8-1 : niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-87
Figure 8-2 : niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-88
Figure 8-3 : Bray-Dunes, rupture cordon dunaire - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal.....	8-91
Figure 8-4 : Bray-Dunes, rupture cordon dunaire - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal	8-91
Figure 8-5 : Bray-Dunes, rupture cordon dunaire - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal.....	8-92
Figure 8-6 : Bray-Dunes, rupture cordon dunaire - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal	8-92
Figure 8-7 : Bray-Dunes, rupture du cordon dunaire - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-93
Figure 8-8 : Bray-Dunes, rupture du cordon dunaire - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-93
Figure 8-9 : Position des deux profils retenus à Bray-Dunes	8-94
Figure 8-10 : Profil 1	8-94
Figure 8-11 : Profil 2	8-95
Figure 8-12 : Marégramme utilisé au large pour T10	8-98
Figure 8-13 : Marégrammes utilisés au large pour T100 et T100 à l'horizon 2100	8-99
Figure 8-14 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 1 (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))	8-100
Figure 8-15 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 2 (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))	8-100
Figure 8-16 : Bray-Dunes - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal	8-101
Figure 8-17 : Bray-Dunes - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement décennal	8-102
Figure 8-18 : Bray-Dunes - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal	8-102
Figure 8-19 : Bray-Dunes - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal	8-103
Figure 8-20 : Bray-Dunes - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal	8-103
Figure 8-21 : Bray-Dunes - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal	8-104

Figure 8-22 : Bray-Dunes - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-104
Figure 8-23 : Bray-Dunes – Cartographie de la vitesse d’écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-105
Figure 8-24 : Bray-Dunes - Cartographie de l’aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100.....	8-105
Figure 8-25 : Position des trois profils retenus à Malo-les-Bains.....	8-106
Figure 8-26 : Profil 1	8-106
Figure 8-27 : Profil 2	8-107
Figure 8-28 : Profil 3	8-107
Figure 8-29 : niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet.....	8-108
Figure 8-30 : niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet.....	8-109
Figure 8-31 : Marégramme utilisé au large pour T10	8-113
Figure 8-32 : Marégrammes utilisés au large pour T100 et T100 à l'horizon 2100	8-113
Figure 8-33 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 2 (10 ans).....	8-115
Figure 8-34 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 3 (10 ans).....	8-115
Figure 8-35 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 1 (100 ans).....	8-116
Figure 8-36 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 2 (100 ans).....	8-116
Figure 8-37 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 3 (100 ans).....	8-117
Figure 8-38 : Malo les Bains - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal	8-118
Figure 8-39 : Malo les Bains - Cartographie de la vitesse de submersion modélisée pour un événement décennal	8-118
Figure 8-40 : Malo les Bains - Cartographie de l’aléa submersion modélisé pour un événement décennal	8-119
Figure 8-41 : Malo les Bains - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal	8-120
Figure 8-42 : Malo les Bains - Cartographie de la vitesse d’écoulement modélisée pour un événement centennal	8-120
Figure 8-43 : Malo les Bains - Cartographie de l’aléa submersion modélisé pour un événement centennal	8-121
Figure 8-44 : Malo les Bains - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-121
Figure 8-45 : Malo les Bains - Cartographie de la vitesse d’écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-122
Figure 8-46 : Malo les Bains - Cartographie de l’aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100.....	8-122
Figure 8-47 : Profils avant et après rechargement de la digue des Alliés à Dunkerque (en rouge profil après rechargement, en noir profil avant rechargement).....	8-123
Figure 8-48 : Marégramme utilisé pour T10	8-125
Figure 8-49 : Marégrammes utilisés pour T100 et T100 à l'horizon 2100	8-126
Figure 8-50 : Densité de probabilité (en rouge) et fonction de répartition (en bleu) des niveaux d’eau dans le canal exutoire.....	8-127
Figure 8-51 : Réseau des canaux modélisés en 1D.....	8-128
Figure 8-52 : Schéma de la connexion entre le canal de Furnes et le lac de Tétéghem.....	8-129
Figure 8-53 : Watergang du lac de Tétéghem – vue aval et rétablissement hydraulique sous RD	8-129
Figure 8-54 : Watergang de la station de pompage de Ghyvelde – vue amont et rétablissement hydraulique sous RD	8-129

Figure 8-55 : Modalité de couplage 1D / 2D au niveau de l'écluse carrée	8-130
Figure 8-56 : Illustration de la représentation des canaux de Furnes et des Moeres aux abords de l'écluse carrée et de leurs couplages latéraux.....	8-131
Figure 8-57 : Débits passant par l'ouvrage Tixier (noir) et niveaux d'eau dans le port (bleu marine) et le canal exutoire (turquoise)	8-132
Figure 8-58 : Carte différentielle de hauteur d'eau maximale entre la simulation avec ouvrage de Tixier fermé et celle avec ouvrage de Tixier ouvert à marée descendante pour l'événement centennal	8-133
Figure 8-59 : Position de la brèche dans la digue des Alliés	8-134
Figure 8-60 : Position des sections de mesures du débit dans le canal exutoire	8-135
Figure 8-61 : Niveaux d'eau et débits mesurés dans le canal exutoire (au Sud de la brèche et en milieu de canal au Nord de la zone de débordement) pour l'aléa T100.	8-136
Figure 8-62 : Position des sections de mesures du débit et des hauteurs d'eau sur l'ouvrage de jonction et l'écluse de Furnes	8-137
Figure 8-63 : Hauteurs d'eau et débits mesurés au-dessus de l'ouvrage de jonction et de l'écluse de Furnes pour l'aléa T100.	8-137
Figure 8-64 : Evolution du niveau d'eau et du débit dans le canal de Bourbourg et de dérivation du canal de Bergues en amont de l'ouvrage de jonction pour l'aléa T100	8-138
Figure 8-65 : Schéma de répartition du débordement au-dessus de l'écluse de Furnes	8-138
Figure 8-66 : points d'entrée en rive gauche et point de sortie en rive droite du canal de Furnes.	8-139
Figure 8-67 : profil en long du canal de Furnes entre pk 0 et pk 1600 1h50 après l'ouverture de la brèche (ligne d'eau maximale) pour l'aléa T100. En rose berge RG, en bleu berge RD... ..	8-139
Figure 8-68 : point de sortie en rive gauche du canal de Furnes	8-140
Figure 8-69 : profil en long du canal de Furnes entre pk 4200 et pk 10200 2h05 après l'ouverture de la brèche pour l'aléa T100. En rose berge RG, en bleu berge RD. Niveau d'eau initial en pointillés, ligne d'eau maximale en rouge.....	8-140
Figure 8-70 : hydrogramme dans le canal de Furnes au pk 1700 (en rouge) et au pk 4900 (en bleu) pour l'aléa T100.	8-141
Figure 8-71 : Position des débits mesurés sur le canal de Furnes	8-141
Figure 8-72 : Débits mesurés sur le canal de Furnes pour l'aléa T100 (en noir, bleu et vert par éloignement croissant par rapport à l'écluse de Furnes).....	8-142
Figure 8-73 : Profil en long du canal de Furnes pour l'aléa T100 – en rouge ligne d'eau maximum, en rose berges RG, en bleu berges RD, en vert condition initiale.	8-143
Figure 8-74 : Hydrogramme canal des Moeres T100 à 2100	8-144
Figure 8-75 : Profil en long de la ligne d'eau T100 à 2100 de l'ouvrage de jonction à Tétéghem – en rouge ligne d'eau maximum, en noir trait plein et pointillés berges RD et RG, fond bleu clair, ligne d'eau au moment de l'extraction.....	8-144
Figure 8-76 : Schéma explicatif de la restitution d'eau dans le canal des Moeres entraînant une modification du débit dans le canal de Coudekerque (affluent du canal des Moeres, au Sud) ...	8-145
Figure 8-77 : Débits mesurés dans le canal de Coudekerque, T100 à 2100	8-145
Figure 8-78 : Débit transitant dans le watergang du lac de Tétéghem (m ³ /s).....	8-146
Figure 8-79 : Dunkerque –Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal	8-147
Figure 8-80 : Dunkerque – Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement décennal	8-148
Figure 8-81 : Dunkerque - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal	8-148
Figure 8-82 : Dunkerque - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal	8-149
Figure 8-83 : Dunkerque – Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal	8-149

Figure 8-84 : Dunkerque - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal	8-150
Figure 8-85 : Dunkerque - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-150
Figure 8-86 : Dunkerque - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-151
Figure 8-87 : Dunkerque - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100.....	8-151
Figure 8-88 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-152
Figure 8-89 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-153
Figure 8-90 : Bathymétrie du modèle créé pour l'estuaire de l'Aa (en m IGN 69).....	8-154
Figure 8-91 : Marégramme imposé en condition limite du modèle couplé 2D sur l'estuaire de l'Aa pour T10	8-154
Figure 8-92 : Marégramme imposé en condition limite du modèle couplé 2D sur l'estuaire de l'Aa pour T100	8-155
Figure 8-93 : Points d'extraction des niveaux d'eau sur le site de l'estuaire de l'Aa	8-156
Figure 8-94 : Prise en compte des levés topographiques sur les rives de l'Aa	8-161
Figure 8-95 : Marégramme injecté dans les deux brèches rive gauche de l'Aa (10 ans).....	8-162
Figure 8-96 : Marégrammes injectés dans les deux brèches rive gauche de l'Aa (100 ans (en noir) et 100 ans à l'horizon 2100 (en rouge)).....	8-163
Figure 8-97 : Vue 3D du cordon dunaire et de la brèche de Petit-Fort-Philippe.....	8-163
Figure 8-98 : Marégramme injecté dans la brèche à Petit-Fort-Philippe (10 ans).....	8-163
Figure 8-99 : Marégrammes injectés dans la brèche à Petit-Fort-Philippe (100 ans (en noir) et 100 ans à l'horizon 2100 (en rouge)).....	8-164
Figure 8-100 : Position des brèches simulées sur le secteur des rives de l'Aa.....	8-164
Figure 8-101 : Zone inondée 15 minutes après la pleine-mer sur Oye-Plage – en rouge rupture d'ouvrage en orange débordements (T100)	8-165
Figure 8-102 : Zone inondée 15 minutes après la pleine-mer sur les rives de l'Aa– en rouge rupture d'ouvrage en orange débordements (T100).....	8-166
Figure 8-103 : Zone inondée 4 heures après la pleine-mer sur les rives de l'Aa et Petit-Fort-Philippe– en rouge rupture d'ouvrage en orange débordements (T100).....	8-166
Figure 8-104 : Zone inondée 4 heures après la pleine-mer sur Oye-Plage– en rouge rupture d'ouvrage en orange débordements (T100)	8-167
Figure 8-105 : Zone inondée 16 heures après la pleine-mer sur Oye-Plage– en rouge rupture d'ouvrage en orange débordements (T100)	8-167
Figure 8-106 : Zone inondée 15 minutes après la pleine-mer sur Petit-Fort-Philippe (T100)	8-168
Figure 8-107 : Rives de l'Aa - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal	8-169
Figure 8-108 : Rives de l'Aa - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal	8-169
Figure 8-109 : Rives de l'Aa - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal	8-170
Figure 8-110 : Rives de l'Aa -Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal	8-171
Figure 8-111 : Rives de l'Aa - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal	8-171
Figure 8-112 : Rives de l'Aa - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal	8-172
Figure 8-113 : Rives de l'Aa - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-172
Figure 8-114 : Rives de l'Aa - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-173
Figure 8-115 : Rives de l'Aa - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100.....	8-173

Figure 8-116 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-174
Figure 8-117 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-175
Figure 8-118 : Marégramme utilisé pour T10	8-177
Figure 8-119 : Marégrammes utilisés pour T100 et T100 à l'horizon 2100	8-177
Figure 8-120 : Marck - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal	8-178
Figure 8-121 : Marck - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement décennal	8-178
Figure 8-122 : Marck - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal	8-179
Figure 8-123 : Marck - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal	8-180
Figure 8-124 : Marck - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal	8-180
Figure 8-125 : Marck - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal	8-181
Figure 8-126 : Marck - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-181
Figure 8-127 : Marck - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-182
Figure 8-128 : Marck - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-182
Figure 8-129 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus à Calais 8-183	
Figure 8-130 : Marégramme utilisé pour T10	8-184
Figure 8-131 : Marégrammes utilisés pour T100 et T100 à l'horizon 2100	8-184
Figure 8-132 : Schéma des délimitations des casiers et leur surface (en m ²)	8-186
Figure 8-133 : Profil en long des 100 premiers mètres du canal des Pierrettes, aléa T100. RG en trait plein, RD en pointillés, en vert débits du 1D vers le 2D et en rouge débit du 2D vers le 1D	8-187
Figure 8-134 : Calais - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal	8-188
Figure 8-135 : Calais - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement décennal	8-189
Figure 8-136 : Calais - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal	8-189
Figure 8-137 : Calais - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal	8-190
Figure 8-138 : Calais - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal	8-190
Figure 8-139 : Calais - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal	8-191
Figure 8-140 : Calais - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal	8-191
Figure 8-141 : Calais - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal	8-192
Figure 8-142 : Calais - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal	8-192
Figure 8-143 : Calais - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-193
Figure 8-144 : Calais - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-193
Figure 8-145 : Calais – Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-194

Figure 8-146 : Calais - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-194
Figure 8-147 : Calais - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-195
Figure 8-148 : Calais – Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-195
Figure 8-149 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-196
Figure 8-150 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-196
Figure 8-151 : Marégramme utilisé pour T10	8-199
Figure 8-152 : Marégrammes utilisés pour T100 et T100 à l'horizon 2100	8-199
Figure 8-153 : Position de la brèche simulée à Blériot-Plage	8-200
Figure 8-154 : Blériot Plage - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal	8-201
Figure 8-155 : Blériot Plage - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal	8-201
Figure 8-156 : Blériot Plage - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal	8-202
Figure 8-157 : Blériot Plage - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-202
Figure 8-158 : Blériot Plage - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-203
Figure 8-159 : Blériot Plage - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-203
Figure 8-160 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-204
Figure 8-161 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-204
Figure 8-162 : Marégramme utilisé pour T10 sur la partie Digue	8-208
Figure 8-163 : Marégramme utilisé pour T10 sur la partie Dune	8-208
Figure 8-164 : Marégrammes utilisés pour T100 et T100 à l'horizon 2100 sur la partie Digue ...	8-209
Figure 8-165 : Marégrammes utilisés pour T100 et T100 à l'horizon 2100 sur la partie Dune	8-209
Figure 8-166 : Position des trois brèches simulées sur la partie Digue de Sangatte	8-210
Figure 8-167 : Position de la brèche simulée sur la partie Dune de Sangatte	8-210
Figure 8-168: Etat des inondations 45min après l'apparition de la brèche côté Est, aléa T100 ..	8-212
Figure 8-169: Etat des inondations 1h15min après l'apparition de la brèche côté Est, aléa T100	8-212
Figure 8-170: Hauteurs maximales de submersion issues d'une brèche située dans la partie Est de la digue, aléa T100	8-213
Figure 8-171: Hauteurs maximales de submersion issues d'une brèche située dans la partie centrale de la digue, aléa T100	8-213
Figure 8-172 : Hauteurs maximales de submersion issues d'une brèche située dans la partie Ouest de la digue, aléa T100	8-214
Figure 8-173 : Profil en long du canal des Pierrettes, du bassin des Chasses au passage sous la voie ferrée, brèche à l'Est de la digue, aléa T100 à l'horizon 2100. RG en trait plein, RD en pointillés, en rouge débits introduits dans le canal via les terrains 2D en RG	8-214
Figure 8-174 : Profil en long du canal des Pierrettes, du bassin des Chasses au passage sous la voie ferrée, brèche à l'Est de la digue, aléa T100 à l'horizon 2100. RG en trait plein, RD en pointillés, en bleu niveau d'eau initial et en rouge niveau d'eau maximal	8-215
Figure 8-175 : Sangatte - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal	8-215
Figure 8-176 : Sangatte - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement décennal	8-216

Figure 8-177 : Sangatte - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal	8-216
Figure 8-178 : Sangatte - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal	8-217
Figure 8-179 : Sangatte - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement décennal	8-217
Figure 8-180 : Sangatte - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal	8-218
Figure 8-181 : Sangatte - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal	8-219
Figure 8-182 : Sangatte - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal	8-219
Figure 8-183 : Sangatte - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal	8-220
Figure 8-184 : Sangatte - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal	8-220
Figure 8-185 : Sangatte - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal	8-221
Figure 8-186 : Sangatte - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal	8-221
Figure 8-187 : Sangatte - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-222
Figure 8-188 : Sangatte - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-222
Figure 8-189 : Sangatte - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-223
Figure 8-190 : Sangatte - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-223
Figure 8-191 : Sangatte - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-224
Figure 8-192 : Sangatte - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-224
Figure 8-193 : Position du profil retenu à Wissant	8-225
Figure 8-194 : Profil utilisé pour calculer le franchissement d'eau à Wissant	8-225
Figure 8-195 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-226
Figure 8-196 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-227
Figure 8-197 : Marégramme utilisé au large pour T10	8-230
Figure 8-198 : Marégrammes utilisés au large pour T100 et T100 à l'horizon 2100	8-230
Figure 8-199 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))	8-232
Figure 8-200 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))	8-232
Figure 8-201: Propagation de l'inondation 1h avant la pleine mer, vers l'étang au Sud, et écoulement vers la mer sur le perré, aléa T100	8-233
Figure 8-202 : Propagation de l'inondation 1h après la pleine mer, stockage de l'eau dans l'étang, aléa T100	8-233
Figure 8-203 : Wissant - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal	8-234
Figure 8-204 : Wissant - Cartographie de la vitesse de submersion modélisée pour un événement décennal	8-235
Figure 8-205 : Wissant - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal	8-235
Figure 8-206 : Wissant - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal	8-236

Figure 8-207 : Wissant - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal	8-236
Figure 8-208 : Wissant - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal	8-237
Figure 8-209 : Wissant - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-237
Figure 8-210 : Wissant - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-238
Figure 8-211 : Wissant - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-238
Figure 8-212 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-239
Figure 8-213 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-240
Figure 8-214 : Marégramme utilisé pour T10	8-242
Figure 8-215 : Marégrammes utilisés pour T100 et T100 à l'horizon 2100	8-242
Figure 8-216 : Position de la brèche simulée à Tardinghen	8-243
Figure 8-217: Etat des inondations 1h après l'apparition de la brèche, aléa T100	8-243
Figure 8-218 : Etat des inondations 2h après l'apparition de la brèche, aléa T100	8-244
Figure 8-219 : Tardinghen - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal	8-244
Figure 8-220 : Tardinghen - Cartographie de la vitesse de submersion modélisée pour un événement décennal	8-245
Figure 8-221 : Tardinghen - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal	8-245
Figure 8-222 : Tardinghen - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal	8-246
Figure 8-223 : Tardinghen - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal	8-246
Figure 8-224 : Tardinghen - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal	8-247
Figure 8-225 : Tardinghen - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-247
Figure 8-226 : Tardinghen - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-248
Figure 8-227 : Tardinghen - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-248
Figure 8-228 : Position des quatre profils retenus à Audresselles	8-249
Figure 8-229 : Profil 1	8-250
Figure 8-230 : Profil 2	8-250
Figure 8-231 : Profil 3	8-250
Figure 8-232 : Profil 4	8-251
Figure 8-233 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-252
Figure 8-234 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-252
Figure 8-235 : Marégramme utilisé au large d'Audresselles pour T10	8-256
Figure 8-236 : Marégrammes utilisés au large d'Audresselles pour T100 et T100 à l'horizon 2100	8-257
Figure 8-237 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 4 (10 ans)	8-258
Figure 8-238 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 1 (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))	8-258
Figure 8-239 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 2 (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))	8-259
Figure 8-240 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 3 (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))	8-259

Figure 8-241 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 4 (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))	8-260
Figure 8-242: Propagation de l'inondation vers le lit du cours d'eau, aléa T100	8-260
Figure 8-243 : Audresselles - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal	8-261
Figure 8-244 : Audresselles - Cartographie de la vitesse de submersion modélisée pour un événement décennal	8-262
Figure 8-245 : Audresselles - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal	8-262
Figure 8-246 : Audresselles - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal	8-263
Figure 8-247 : Audresselles - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal	8-263
Figure 8-248 : Audresselles - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal	8-264
Figure 8-249 : Audresselles - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-264
Figure 8-250 : Audresselles - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-265
Figure 8-251 : Audresselles - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-265
Figure 8-252 : Position des quatre profils retenus à Ambleteuse	8-267
Figure 8-253 : Profil 1 (en rouge données incertaines sur le profil)	8-268
Figure 8-254 : Profil 2	8-268
Figure 8-255 : Profil 3	8-268
Figure 8-256 : Profil 4	8-269
Figure 8-257 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-270
Figure 8-258 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-270
Figure 8-259 : Marégramme utilisé au large d'Ambleteuse pour T10	8-273
Figure 8-260 : Marégrammes utilisés au large d'Ambleteuse pour T100 et T100 à l'horizon 2100	8-273
Figure 8-261 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 1 (10 ans)	8-274
Figure 8-262 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 2 (10 ans)	8-275
Figure 8-263 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 1 (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))	8-275
Figure 8-264 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 2 (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))	8-276
Figure 8-265 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 3 (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))	8-276
Figure 8-266 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 4 (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))	8-277
Figure 8-267 : Ambleteuse - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal	8-278
Figure 8-268 : Ambleteuse - Cartographie de la vitesse de submersion modélisée pour un événement décennal	8-278
Figure 8-269 : Ambleteuse - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal	8-279
Figure 8-270 : Ambleteuse - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal	8-280
Figure 8-271 : Ambleteuse - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal	8-280

Figure 8-272 : Ambleteuse - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal	8-281
Figure 8-273 : Ambleteuse - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-281
Figure 8-274 : Ambleteuse - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-282
Figure 8-275 : Ambleteuse - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-282
Figure 8-276 : Position du profil retenu à Wimereux	8-283
Figure 8-277 : Profil retenu à Wimereux	8-283
Figure 8-278 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-284
Figure 8-279 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-285
Figure 8-280 : Marégramme utilisé au large de Wimereux pour T10	8-287
Figure 8-281 : Marégrammes utilisés au large de Wimereux pour T100 et T100 à l'horizon 2100	8-287
Figure 8-282 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre (10 ans).....	8-288
Figure 8-283 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))	8-289
Figure 8-284 : Propagation de l'inondation pour l'aléa T100 à l'horizon 2100.....	8-290
Figure 8-285 : Wimereux - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal	8-290
Figure 8-286 : Wimereux - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal	8-291
Figure 8-287 : Wimereux - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal	8-291
Figure 8-288 : Wimereux - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal	8-292
Figure 8-289 : Wimereux - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal	8-292
Figure 8-290 : Wimereux - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal	8-293
Figure 8-291 : Wimereux - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-293
Figure 8-292 : Wimereux - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-294
Figure 8-293 : Wimereux - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100.....	8-294
Figure 8-294 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-295
Figure 8-295 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-296
Figure 8-296 : Marégramme utilisé pour T10	8-297
Figure 8-297 : Marégrammes utilisés pour T100 et T100 à l'horizon 2100	8-298
Figure 8-298 : Etaples - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal	8-299
Figure 8-299 : Etaples - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement décennal	8-299
Figure 8-300 : Etaples - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal	8-300
Figure 8-301 : Etaples - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal	8-301
Figure 8-302 : Etaples - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal	8-301
Figure 8-303 : Etaples - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal	8-302

Figure 8-304 : Etaples - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-302
Figure 8-305 : Etaples - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-303
Figure 8-306 : Etaples - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100.....	8-303
Figure 8-307 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-304
Figure 8-308 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-305
Figure 8-309 : Marégramme utilisé pour T10	8-306
Figure 8-310 : Marégrammes utilisés pour T100 et T100 à l'horizon 2100	8-307
Figure 8-311 : Position des deux brèches simulées sur Le Touquet-Paris-Plage	8-308
Figure 8-312 : Position de l'ouvrage sur la Grande Tringue	8-308
Figure 8-313 : Position de la brèche simulée à Saint-Josse.....	8-309
Figure 8-314 : Vue de l'aléa T100 à 2100 en jaune, secteurs couvert par la donnée PPIGE8-310	
Figure 8-315 : Le Touquet/St Josse - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal	8-310
Figure 8-316 : Le Touquet/St Josse - Cartographie de la vitesse de submersion modélisée pour un événement décennal	8-311
Figure 8-317 : Le Touquet/St Josse - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal	8-311
Figure 8-318. Le Touquet/St Josse - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal	8-312
Figure 8-319. Le Touquet/St Josse - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal	8-312
Figure 8-320. Le Touquet/St Josse - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal	8-313
Figure 8-321. Le Touquet/St Josse - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-313
Figure 8-322. Le Touquet/St Josse - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-314
Figure 8-323. Le Touquet/St Josse - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-314
Figure 8-324 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-315
Figure 8-325 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet	8-316
Figure 8-326 : Marégramme utilisé pour T10	8-318
Figure 8-327 : Marégrammes utilisés pour T100 et T100 à l'horizon 2100	8-318
Figure 8-328: Localisation de l'ouvrage défaillant de la Madelon à Groffliers	8-319
Figure 8-329: Position des deux brèches simulées sur la partie Dune et sur le chemin Delesalle à Groffliers	8-319
Figure 8-330: Apparition des premiers débordements (30 minutes avant la pleine-mer), aléa T100.....	8-320
Figure 8-331: Propagation des inondations vers le Nord (1h30 après la pleine mer), aléa T1008-321	
Figure 8-332 : Groffliers - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal	8-322
Figure 8-333 : Groffliers - Cartographie de la vitesse de submersion modélisée pour un événement décennal	8-322
Figure 8-334 : Groffliers - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal	8-323
Figure 8-335. Groffliers - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal	8-324
Figure 8-336. Groffliers - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal	8-324

Figure 8-337. Groffliers - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal	8-325
Figure 8-338. Groffliers - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-325
Figure 8-339. Groffliers - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100	8-326
Figure 8-340. Groffliers - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100.....	8-326

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 4-1 : Niveaux extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) pour différentes périodes de retour	4-39
Tableau 4-2 : Périodes de retour conjointes niveau / houle – facteur de dépendance 25.....	4-43
Tableau 5-1 : Principales caractéristiques retenues pour la modélisation.....	5-62
Tableau 5-2 : Sites étudiés mais non soumis à la submersion.....	5-63
Tableau 7-1 : Définition de l'aléa en fonction des hauteurs et vitesses	7-80
Tableau 8-1 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Bray-Dunes	8-89
Tableau 8-2 : Calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement – profil 2	8-89
Tableau 8-3: Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus à Bray-Dunes	8-90
Tableau 8-4 : Paramètres des deux profils utilisés à Bray-Dunes	8-95
Tableau 8-5 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Bray-Dunes	8-95
Tableau 8-6 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement – profil 1	8-96
Tableau 8-7 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement – profil 2	8-96
Tableau 8-8 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) à Bray-Dunes	8-97
Tableau 8-9 : Houles (en m) à Bray-Dunes	8-98
Tableau 8-10 : Calculs des débits linéiques injectés dans le modèle	8-99
Tableau 8-11 : Paramètres des profils utilisés à Malo-les-Bains	8-107
Tableau 8-12 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Malo les Bains	8-109
Tableau 8-13 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement – profil 1	8-110
Tableau 8-14 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement – profil 2	8-110
Tableau 8-15 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement – profil 3	8-111
Tableau 8-16 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) à Malo-les-Bains ...	8-111
Tableau 8-17 : Houles (en m) à Malo-les-Bains	8-112
Tableau 8-18 : Calculs des débits linéiques injectés dans le modèle	8-114
Tableau 8-19 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Dunkerque...8-123	
Tableau 8-20 : Calcul de la surcote de déferlement liée au profil de l'estran à Dunkerque ..	8-124
Tableau 8-21 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement.....	8-124
Tableau 8-22 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus à Dunkerque	8-125
Tableau 8-23 : Niveaux d'eau initiaux dans les canaux.....	8-131
Tableau 8-24 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus dans l'estuaire de l'Aa.....	8-153
Tableau 8-25 : Coordonnées des points d'extraction (Lambert 2 étendu).....	8-155
Tableau 8-26 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement pour un événement de période de retour 10 ans.....	8-157
Tableau 8-27 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement pour un événement de période de retour 100 ans actuel et à l'horizon 2100....	8-158
Tableau 8-28 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus dans l'estuaire de l'Aa	8-160
Tableau 8-29 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Marck	8-175

Tableau 8-30 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement.....	8-176
Tableau 8-31 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus à Marck 8-176	
Tableau 8-32 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Calais	8-183
Tableau 8-33 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Blériot-Plage 8-197	
Tableau 8-34 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement.....	8-198
Tableau 8-35 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus à Blériot-Plage.....	8-198
Tableau 8-36 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Sangatte	8-205
Tableau 8-37 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement.....	8-205
Tableau 8-38 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement.....	8-206
Tableau 8-39 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus à Sangatte	8-207
Tableau 8-40 : Paramètres du profil utilisé à Wissant	8-226
Tableau 8-41 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Wissant ..	8-228
Tableau 8-42 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement – profil 1	8-228
Tableau 8-43 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) à Wissant	8-229
Tableau 8-44 : Houles (en m) à Wissant	8-229
Tableau 8-45 : Calculs des débits linéiques injectés dans le modèle	8-231
Tableau 8-46 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Tardinghen ..	8-240
Tableau 8-47 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement.....	8-241
Tableau 8-48 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus à TARDINGHEN	8-241
Tableau 8-49 : Paramètres des quatre profils utilisés à Audresselles.....	8-251
Tableau 8-50 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Audresselles	8-253
Tableau 8-51 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) à Audresselles.....	8-254
Tableau 8-52 : Houles (en m) à Audresselles	8-256
Tableau 8-53 : Calculs des débits linéiques injectés dans le modèle	8-257
Tableau 8-54 : Paramètres des quatre profils utilisés à Ambleteuse	8-269
Tableau 8-55 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Ambleteuse ..	8-271
Tableau 8-56 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) à Ambleteuse	8-271
Tableau 8-57 : Houles (en m) à Ambleteuse	8-272
Tableau 8-58 : Calculs des débits linéiques injectés dans le modèle	8-273
Tableau 8-59 : Paramètre du profil utilisé pour calculer les franchissements à Wimereux ...	8-284
Tableau 8-60 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Wimereux	8-285
Tableau 8-61 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) à Wimereux	8-286
Tableau 8-62 : Houles (en m) à Wimereux.....	8-286
Tableau 8-63 : Calculs des débits linéiques injectés dans le modèle	8-288
Tableau 8-64 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Etaples ..	8-296
Tableau 8-65 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus à Etaples	8-297
Tableau 8-66 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus au Touquet - Paris-Plage	8-305

Tableau 8-67 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus au Touquet - Paris-Plage.....	8-306
Tableau 8-68 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Groffliers.....	8-317
Tableau 8-69 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus à Groffliers	8-317

ANNEXES

- A Note méthodologique relative au produit « Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France » Edition 2012
- B Tests de sensibilité au calcul de la surcote de déferlement sur les sites du Nord – Pas de Calais
- C Cartographie des brèches unitaires

GLOSSAIRE

Aléa : Intensité d'un événement naturel caractérisé par une probabilité. Un aléa est défini par un phénomène (par exemple hauteur de submersion pour une inondation) et par sa période de retour.

Bas-champs : Plaine inter-dunaire à caractère humide marqué, située entre les estuaires de la Canche et de l'Authie.

Berne : Bourrelet sableux situé en haut de plage et correspondant à une forte accumulation sableuse. Cette structure est souvent caractérisée par une section pratiquement horizontale du profil de plage.

Condition aux limites : Terme utilisé en modélisation pour définir les frontières d'un domaine sur lequel il est possible d'appliquer des lois (hauteur $H(t)$; débit $Q(t)$).

C-MAP : Base de données mondiale regroupant les données bathymétriques et les données marégraphiques des services hydrographiques nationaux. Les données France sont issues des données du SHOM.

Hs (Hauteur significative) : C'est la valeur moyenne du tiers supérieur des hauteurs de vagues observées au cours d'une période donnée, obtenu par analyse statistique.

Jet de rive (zone de swash) : Le jet de rive constitue la frontière entre la partie émergée de la plage et la zone de déferlement. Il se caractérise par une fine lame d'eau animée par un courant alternatif qui dans un premier temps monte vers le rivage et redescend vers la zone de déferlement.

LIDAR : Technologie de mesure optique. Elle est utilisée de manière aéroportée pour effectuer des mesures topographiques détaillées sur de grandes superficies, et ainsi constituer un MNT.

MNT : Modèle Numérique de Terrain. C'est la représentation numérique en trois dimensions de la géométrie d'un site. (Topographie et bathymétrie)

Moeres : Marais ou étang côtier drainé, asséché et cultivé sur les côtes des Flandres. Désigne aussi une région marécageuse à l'est de Dunkerque, à cheval sur l'actuelle frontière franco-belge.

Mollières : Terme picard désignant les près salés issus d'alluvions marines que l'on a endiguées. Les mollières assurent la transition entre les milieux marins et terrestres et sont peuplées de plantes halophiles qui apprécient la salinité de ces terrains.

Offshore : Domaine océanique éloigné des côtes.

Période de retour : Définit la fréquence statistique d'un événement naturel donné. A titre d'exemple, un événement de période de retour 100 ans apparaît en moyenne tous les 100 ans. Inversement, un événement de période de retour 100 ans a 1 chance sur 100

de se produire une année donnée. Les périodes de retour 10 ans, 100 ans et 1000 ans sont respectivement nommées décennale, centennale et millénaire.

Perré : Revêtement situé sur la face amont d'un ouvrage de protection, destiné à parer aux dangers d'affouillement et de rupture face à la mer.

Pertuis : Ouverture pratiquée pour permettre le passage ou l'écoulement de l'eau.

Polder : Terres marécageuses conquises sur la mer par endiguement et drainage.

Poulier : Sur les côtes de la Manche, banc de galets ou de sable à l'entrée d'un estuaire et formant un cordon littoral qui peut gêner la navigation.

Réflexion : Lorsque la houle atteint un ouvrage, une partie de l'onde incidente est réfléchi dans la direction opposée.

Réfraction : Modification de la hauteur et de la direction des crêtes des houles induit par un changement bathymétrique.

Rencloture : Endiguements par lesquels on annexe à la terre des portions de marais marins littoraux.

Runup : C'est l'effet conjugué de la surcote de déferlement et du jet de rive. Le runup représente donc la différence entre le niveau maximal atteint par l'eau lors du déferlement sur le rivage, et le niveau moyen de la mer au large de la zone de déferlement.

Shoaling : Phénomène de transformation de la houle apparaissant lorsque la profondeur des fonds diminue, et se traduisant par une augmentation de la hauteur des vagues.

Surcote de déferlement : La surcote de déferlement (*Wave setup* en anglais) est la surélévation du niveau moyen de la mer induit par l'action de la houle. L'amplitude de la surélévation dépend de la hauteur et de la période de la houle, ainsi que de la bathymétrie.

Surcote météorologique : Surélévation du niveau d'eau suite à l'action de processus météorologiques. La surcote se traduit par la différence entre le niveau de la marée prédite et le niveau réellement observé.

Surverse (overtopping) : Franchissement et déversement de la houle en arrière du cordon littoral caractérisé par des ouvrages de protection ou des structures sédimentaires (ex : dune).

Synoptique : Adjectif qualifiant les phénomènes atmosphériques dont l'ordre de grandeur est de quelques milliers de kilomètres pour les dimensions horizontales, de quelques kilomètres pour la dimension verticale et de quelques jours pour la durée.

T : Période de la houle. C'est le temps, exprimé en secondes, séparant deux crêtes de houle.

Transgression flandrienne : Désigne la montée du niveau marin lors de la fin du dernier épisode de glaciation (vers -7 000). L'augmentation de la température moyenne de + 4°, entraîne une fonte de glaciers, ainsi qu'une expansion thermique des océans.

VSC : Visites Simplifiées Comparées. Méthode de suivi de l'état d'ouvrages d'art, reposant sur l'inspection régulière de ces ouvrages.

Zéro hydrographique : Référence pour les mesures altimétriques en mer. Dans les documents nautiques, les mesures bathymétriques ou de niveau de la mer sont généralement exprimées par rapport à ce niveau zéro. En France, le zéro hydrographique est voisin du niveau des plus basses mers théoriques. Il se distingue de la référence NGF IGN69 (Nivellement Général de la France), utilisée pour les mesures terrestres et correspondant au niveau moyen de la mer à Marseille.

1 **PREAMBULE**

Conséquences attendues du changement climatique à l'échelle planétaire, l'élévation du niveau moyen des océans et l'augmentation des tempêtes (plus fréquentes et d'une intensité accrue) sont des facteurs aggravants des risques littoraux de submersion marine et d'érosion littorale.

C'est dans ce contexte que la DIREN Nord Pas-de-Calais, aujourd'hui devenue DREAL, assistée par le CETMEF et entourée d'un comité de pilotage regroupant les principaux acteurs institutionnels concernés, a engagé la réalisation d'une étude ambitieuse visant à caractériser l'aléa de submersion marine intégrant les conséquences du changement climatique sur les zones littorales et arrière-littorales du Nord – Pas de Calais.

Le groupement **DHI / GEOS** a été retenu par la DREAL Nord - Pas de Calais pour répondre à la troisième et dernière phase du programme de caractérisation des aléas naturels littoraux lancé par la DIREN en 2006 avec une attention particulière portée sur l'aléa de submersion marine intégrant les conséquences du changement climatique à l'horizon 2100.

Conformément aux attentes du maître d'ouvrage, l'étude permettra de fournir les outils nécessaires à la définition d'une véritable stratégie régionale de gestion intégrée des risques littoraux de submersion et d'érosion.

Il s'agira dans un premier temps d'aborder les grands mécanismes à l'échelle de la région Nord Pas-de-Calais et d'avoir une vision d'ensemble des paramètres entrant en jeu dans les processus naturels et anthropiques affectant le littoral. Sur la base de la bibliographie des documents existants, il s'agira d'élaborer la carte des phénomènes naturels et de recenser les événements de tempête et leurs conséquences sur le trait de côte (ruptures d'ouvrages, inondations, dégâts).

Dans un second temps, une démarche scientifique rigoureuse et efficace sera mise en place pour modéliser et caractériser l'aléa submersion marine actuel avec les paramètres de hauteur d'eau et de vitesses de courant. La submersion marine se différencie des inondations de plaine par le caractère brutal du phénomène. Cette méthodologie requiert l'utilisation de modèles numériques puissants développés depuis des années à DHI (propagation de la houle, calcul des champs d'inondations) ainsi qu'une très bonne connaissance scientifique des phénomènes mis en jeu et des méthodes de calcul associées (surcote de déferlement et *runup* des vagues par exemple).

Enfin à l'issue de la seconde étape, après calage et validation des modèles numériques pour la situation actuelle, les tendances à long terme seront prises en compte dans les simulations pour la caractérisation des aléas submersions marines et érosion côtière intégrant des scénarios climatiques de référence. En outre, pour l'évaluation de l'évolution du trait de côte, nous proposons de compléter les analyses faites dans le document du P.L.A.G.E. avec une analyse d'image satellite récente et ancienne.

2 ELEMENTS DE CONTEXTE – EVOLUTION DU DOSSIER

Les études de phase 2 relatives à la détermination des aléas submersions marines ont été entreprises à partir du mois de Février 2010 suite à la réception de la phase 1 concernant la compréhension du fonctionnement du littoral. Ces études ont été présentées lors de la première série de concertation durant le mois d'Octobre 2010. Un certain nombre d'analyse et d'hypothèse ont été formulées pour réaliser les études techniques. Citons notamment :

- Le calcul de l'aléa de référence prenant en compte les effets dynamiques de la houle : les surcotes de déferlement ont ainsi été estimées par formule empirique et par le calcul dans les profils (calcul 1D) ;
- Le choix des sites basé sur l'analyse VSC, l'analyse historique et l'analyse topographique ;
- La détermination du scénario de référence : largeur de la brèche, position, cinétique.

Parallèlement et suite à l'événement Xynthia du 26 Février 2010, l'état a précisé dans la circulaire du 27 Juillet 2011 les modalités de prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux. Par ailleurs la révision du guide méthodologique d'élaboration des PPR littoraux a été entreprise à partir de Février 2011. Ainsi les évolutions d'approche méthodologique, le besoin d'affiner certains paramètres exprimé lors des concertations et la nécessité d'être conforme avec la circulaire de Juillet 2011 ont impliqué des changements dans la caractérisation des aléas submersion marine :

- Détermination des surcotes de déferlement de la houle par modélisation 1D et 2D ;
- Prise en compte du changement climatique à courte échéance (+ 0,20 m en 2013 ; + 0,60 m à 2100) ;
- Prise en compte des incertitudes ;
- Généralisation de la largeur de la brèche à 100 m ;
- Actualisation des niveaux marins extrêmes de pleine mer (SHOM-CETMEF 2012).

Le présent rapport d'étude reprend donc l'ensemble des évolutions méthodologiques précédemment citées et décrites plus en détail dans les chapitres suivant.

3 PRÉSENTATION DE LA MÉTHODOLOGIE

L'objectif de cette étape est de produire une carte des aléas de submersion en considérant la configuration actuelle de période de retour 10 ans et 100 ans et à l'horizon 2100 pour l'événement de période de retour 100 ans.

La submersion marine est une inondation temporaire de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques et maritimes sévères provoquant des ondes de tempête. Trois phénomènes peuvent alors se produire:

Débordement : la mer envahit par débordement les terres situées sous le niveau exceptionnel de la mer.



Figure 3-1 : Exemple de débordement de la mer

Rupture : les protections telles que les digues et les cordons dunaires peuvent céder sous l'effet de la mer, et créer des raz-de-marée.



Figure 3-2: Exemple de rupture du cordon dunaire

Franchissement : les terres situées au-dessus du niveau de la mer peuvent parfois aussi être inondées, lorsque des projections d'eau de mer franchissent les ouvrages de protection sous l'effet de la houle. Le niveau atteint par les inondations peut alors être supérieur au niveau de la mer.



Figure 3-3: Exemple de franchissement de perré

Ces trois phénomènes peuvent se produire conjointement ou indépendamment. Cependant le phénomène de franchissement apporte des volumes d'eau négligeables en comparaison des volumes apportés par le débordement ou la rupture. De ce fait, le franchissement n'est pas étudié lorsque qu'une inondation est par ailleurs générée par débordement ou rupture.

Le calcul de l'aléa submersion marine est par conséquent mené pour chaque zone identifiée comme potentiellement submersible, en tenant compte des spécificités du site considéré (type d'ouvrages, dunes, type de franchissement, scénarios de rupture).

La période de retour définit la fréquence **statistique** à laquelle un événement donné est susceptible de se produire. A titre d'exemple, un événement de période de retour 100 ans apparaît **en moyenne** une fois tous les 100 ans, bien que plusieurs événements similaires puissent se produire sur cette période. Formulé autrement, l'événement centennal a 1 chance sur 100 de se produire à une année donnée. Ainsi, durant une période d'observation de 100 ans, l'événement centennal a une probabilité d'occurrence de 63,4%. Dans le présent contexte, la période de retour caractérise l'état de la mer (niveau et condition de houle), mais est indépendante des conséquences éventuelles telles que les ruptures d'ouvrage.

Il s'agit donc dans un premier temps de définir les niveaux marins extrêmes et les conditions de houle, pour 2 périodes de retour étudiées, soit les périodes de retour décennales et centennales. Ces conditions sont déterminées tout le long du littoral du Nord – Pas de Calais à partir de données statistiques et d'un modèle numérique de propagation de la houle.

En parallèle, la connaissance des niveaux marins extrêmes le long des côtes permet, par comparaison avec la topographie des terres, d'identifier les sites potentiellement

exposés à la submersion marine. Cette identification est ensuite ajustée et complétée par l'historique des submersions marines en Nord – Pas de Calais et par les conclusions de l'étude VSC, qui fournit une connaissance des risques de rupture des digues et cordons dunaires. Ci-dessous figure sur la région les territoires dont la cote des terrains est inférieure à 4,5 m NGF, valeur qui est toujours dépassée par les estimations des niveaux centennaux sur les différents sites.

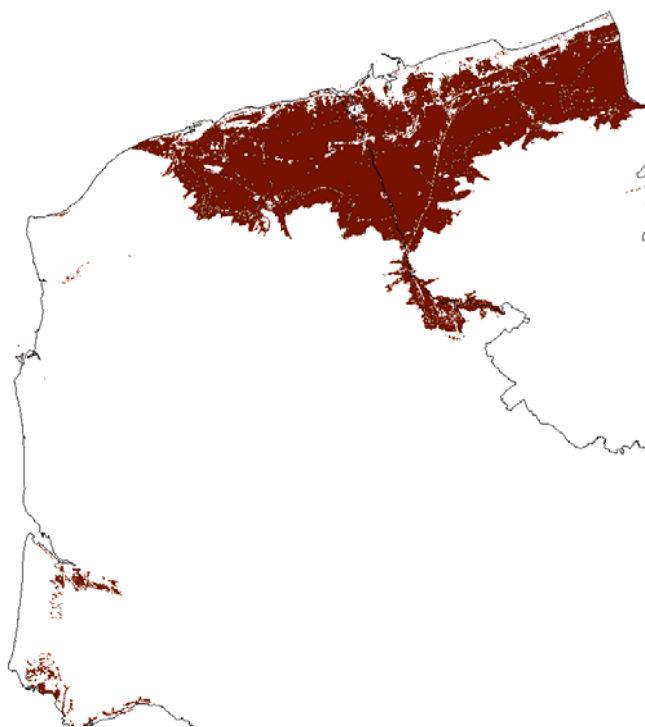


Figure 3-4 : Zones basses < 4,5 m NGF sur la région Nord – Pas de Calais

Pour chaque site ainsi soumis à l'aléa submersion, les conditions de mer définies pour les périodes de retour 10 ans et 100 ans sont ensuite simulées à l'aide d'un modèle numérique hydrodynamique. Ce modèle numérique calcule l'évolution dans le temps de l'inondation, et fournit les hauteurs de submersion et les vitesses d'écoulement permettant de caractériser l'aléa, ainsi que les temps de propagation de l'inondation. Les cartographies de l'aléa issues du modèle sont ensuite ajustées afin de classer en aléa fort les secteurs situés à moins de 100 m de la côte et des ouvrages de protection.

Pour les sites dont les ouvrages de défense contre la mer sont susceptibles de se rompre, une largeur de brèches est étudiée dans le cas général : une largeur de 100 m correspondant au retour d'expérience de la tempête Xynthia et aux attendus de la circulaire de juillet 2011. Des adaptations particulières ont cependant été adoptées pour certains sites. Elles sont décrites dans les monographies des sites.

De plus, il aurait été possible de simuler simultanément plusieurs brèches dans une même digue ou dans une même dune, ou encore des ruptures en cascade des diverses digues de protection situées en retrait à l'intérieur des terres. Pour chaque période de retour, de multiples scénarios auraient donc pu être simulés, cependant seule l'hypothèse d'une unique brèche par site a été retenue afin de définir une configuration réaliste et probable, sans rechercher à majorer l'aléa.

Il est à noter que l'identification des sites pouvant être soumis à l'aléa submersion est effectuée d'après **l'état actuel des digues et cordons dunaires**. De ce fait, les cartographies de l'aléa résultant de cette analyse représentent également la situation actuelle, et un suivi régulier de l'état des protections littorales est nécessaire afin de suivre l'évolution dans le temps du risque de submersion.

4 DETERMINATION DES FORÇAGES METEO-MARINS A LA COTE

4.1 Principe et méthode

Les fluctuations du niveau de la mer sont liées aux facteurs astronomiques et climatiques. Le niveau marin extrême est défini comme la combinaison d'un signal de marée, d'une surcote météorologique et d'une surcote de déferlement qui se produit dans la zone de déferlement de la houle. La surcote de déferlement correspond à une surcote locale du niveau marin provenant du déferlement de la houle.

La hauteur d'eau mesurée par les marégraphes est une combinaison de la marée et de la surcote météorologique. Ainsi les événements de référence sont étudiés par une méthode statistique sur le niveau de la mer mesuré par les marégraphes, définissant les niveaux marins extrêmes, auxquels il convient éventuellement d'ajouter l'effet local de la surcote de déferlement. Ce niveau marin extrême est variable le long du littoral.

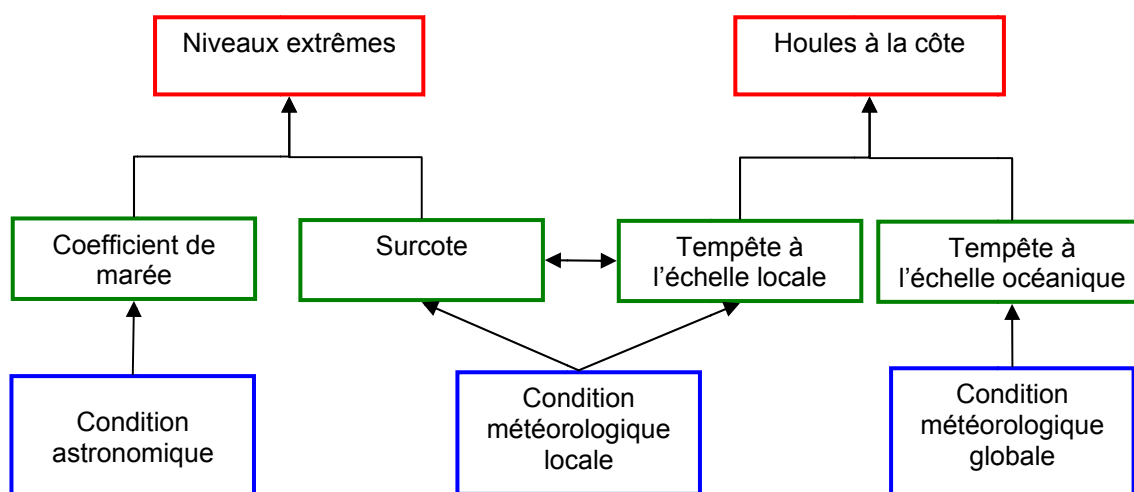


Figure 4-1 : Description des relations entre les différents processus.

Il est important de noter que la période de retour T d'un niveau extrême n'est pas égale à la combinaison d'un niveau (marée + surcote) de période de retour T et d'une surcote de déferlement de même période T . Il est donc nécessaire de prendre en compte la corrélation de ces événements et d'effectuer une analyse statistique croisée selon la méthode du « Beach Management Manual ».

4.2 Détermination de la houle à la côte

La connaissance des conditions de houle à la côte est nécessaire pour quantifier les niveaux marins extrêmes. En effet, d'une part la houle tend à augmenter le niveau de la mer dans les zones de déferlement, et d'autre part elle conditionne directement la quantité d'eau passant par-dessus les perrés en cas de franchissement.

En absence de mesures, la caractérisation des vagues au droit des sites de submersion n'est pas immédiate. C'est pourquoi, pour connaître les conditions de houle aux abords des sites submersibles, il est nécessaire de calculer au moyen d'un modèle numérique la propagation et la génération des houles depuis le large, où elles sont connues, jusqu'au littoral.

4.2.1 Présentation du modèle

MIKE 21 SW est un modèle de houle spectrale basé sur la conservation de la densité de l'action d'onde qui permet de simuler la propagation des états de mer (mers de vent et houles océaniques) dans les domaines offshore et côtier. Le modèle inclut les effets de réfraction et de shoaling liés aux variations de bathymétrie, la génération de la houle par action du vent, la dissipation de la houle par moutonnement, déferlement bathymétrique ainsi que par frottement sur le fond. La résolution par la méthode des volumes finis se base sur un maillage flexible composé d'éléments triangulaires dans le plan horizontal. Ces éléments peuvent être affinés dans les zones d'études d'intérêt particulier.

Il faut noter que ce modèle ne prend pas en compte les phénomènes de diffraction et réflexion de la houle. L'application du modèle spectral est ainsi valable aux abords du littoral, mais n'apporte pas suffisamment de précision pour décrire la houle au pied des ouvrages de protection ou dans les zones portuaires.

4.2.2 Emprise et bathymétrie

L'emprise du modèle MIKE 21 SW couvre une zone comprise entre le littoral britannique et français, centrée sur le Pas-de-Calais et s'étend sur environ 160 km le long des côtes françaises depuis la Baie de Somme, au sud, jusqu'à 15 km après la frontière belge, au nord (Figure 4-2). Les frontières sont suffisamment éloignées du domaine d'intérêt pour que les conditions limites puissent se propager sans effets de bord.

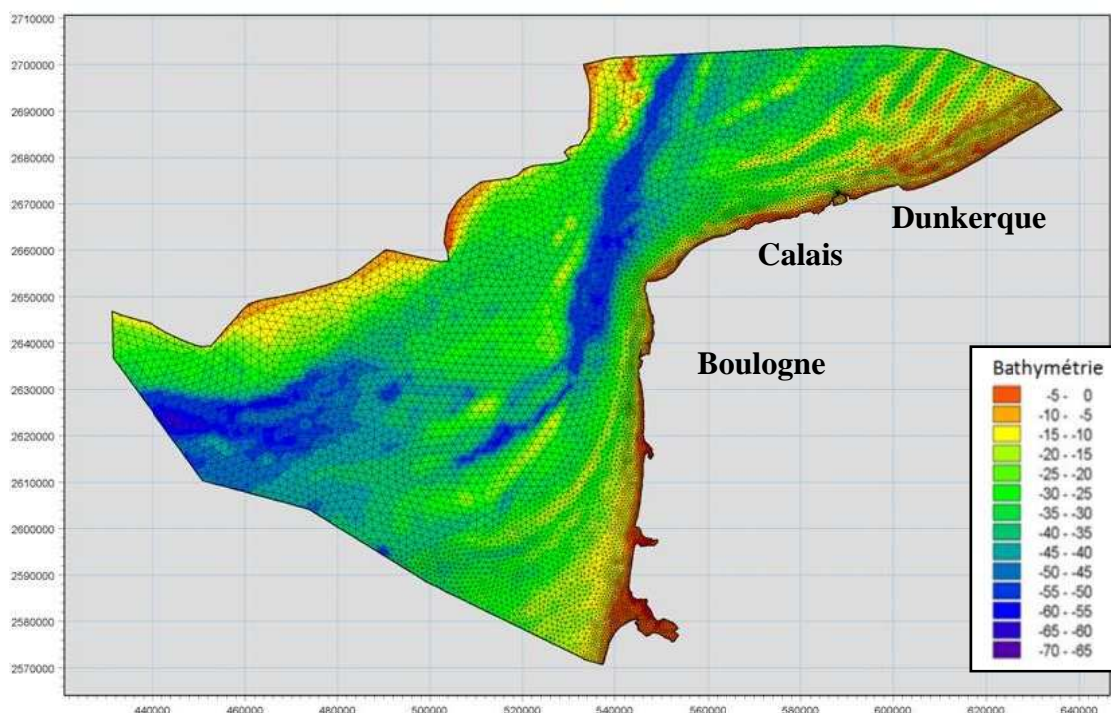


Figure 4-2: Maillage du modèle MIKE 21 SW (Zéro de référence : niveau moyen de la mer)

Le maillage est composé d'éléments triangulaires dont la taille a été ajustée suivant les évolutions bathymétriques et la précision souhaitée. Au large, la précision spatiale est de 1000 m environ et décroît jusqu'à 300 m aux abords du littoral régional du Nord Pas-de-Calais. L'ensemble du domaine est donc caractérisé par un maillage composé de 8348 nœuds et 15911 éléments.

La carte bathymétrique du modèle est obtenue par interpolation des sondes bathymétriques et des levés topographiques du SHOM sur le maillage ainsi défini. La bathymétrie obtenue présente des valeurs comprises entre -60 m et + 4 m par rapport au niveau moyen de la mer.

4.2.3 Conditions limites et paramètres d'entrée

Les données de houle au large sont issues de l'Atlas Numérique d'Etats de Mer Océanique et Côtier (ANEMOC) recouvrant la période 1979-2002 au pas de temps horaire. Les paramètres d'entrée du modèle sont la hauteur significative, la période pic, la direction moyenne et l'étalement directionnel de la houle.

La base de données ANEMOC a été réalisée par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement d'EDF (EDF R&D LNHE) en collaboration avec le Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF) qui la gère et la commercialise. L'atlas a été élaboré à partir des résultats de deux modèles numériques de propagation des houles (un océanique et un côtier) emboîtés qui permettent de représenter les conditions de houle au large des côtes françaises. Le premier modèle est un modèle océanique présentant un maillage très large. Il permet à partir de conditions de vent au large (forçage avec le modèle météorologique ERA-40 de l'ECMWF) de générer les houles océaniques qui en résultent. A partir de ces résultats, il est alors possible d'alimenter le second modèle qui présente un maillage

plus fin et qui permet de propager avec plus de précision la houle vers la côte. L'ensemble des résultats obtenus a été validé avec les mesures des bouées du réseau CETMEF. L'atlas numérique ANEMOC permet donc de disposer d'une longue série temporelle de valeurs de houle proche du littoral, très utile pour les calculs statistiques.

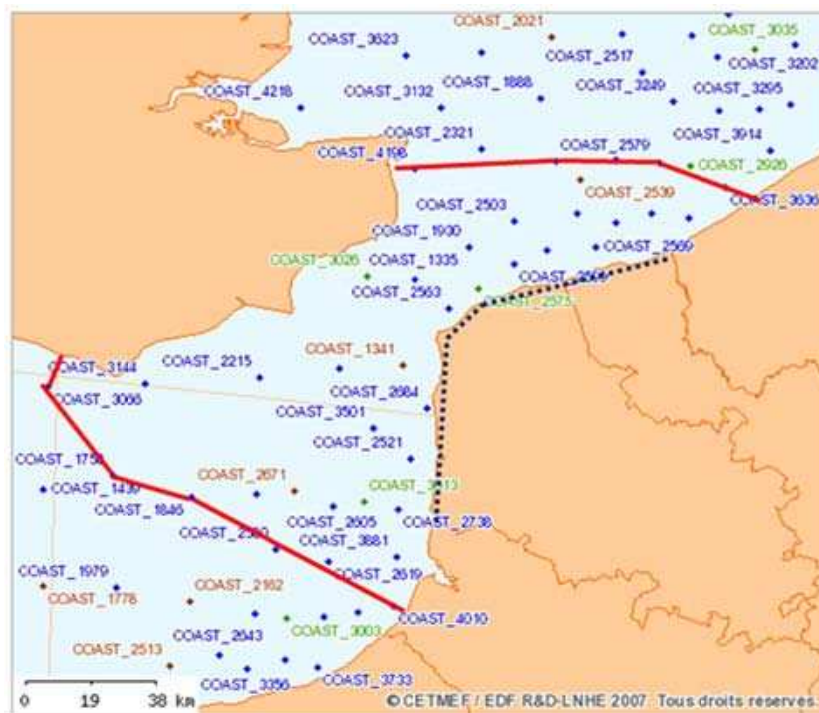


Figure 4-3 : Illustration des limites marines du modèle en fonction des données ANEMOC disponibles

Pour toute la durée de la simulation, la variation du plan d'eau est intégrée à partir des hauteurs mesurées aux niveaux des marégraphes de Boulogne-sur-Mer, Calais et Dunkerque. Il convient de noter que la variation du niveau d'eau est importante pour la propagation de la houle à la côte puisque qu'elle influe sur la réfraction bathymétrique.

L'action du vent a également été prise en compte selon la formulation de Kahma and Calkoen (1994). Les données de vent utilisées sont les mesures des stations Météo-France de Boulogne-sur-Mer et Dunkerque, au pas de temps 3h de 1979 à 1994 et 1h de 1995 à 2002.

Les calculs ont été réalisés en tenant compte de la discrétisation des domaines de fréquences, c'est-à-dire que le modèle est capable de discerner et d'évaluer l'interaction entre le spectre de fréquence d'une houle océanique, et le spectre d'une mer de vent (généralisé par l'action du vent sur le plan d'eau). Ce mode de calcul est appelé « *fully-spectral formulation* ».

4.2.4 Calage

Le calage du modèle a été effectué par comparaison des données au large de Dunkerque (houlographe n°05901 du réseau CANDHIS) sur l'année 1992. Le calage

en hauteur et période de houle est bon. Les tests de sensibilité réalisés sur le paramètre de frottement sur le fond, la formulation du forçage du vent et le déferlement n'ont pas montré d'amélioration significative sur les résultats de la propagation.



Figure 4-4 : Localisation du houlographe n°05901 d u réseau CANDHIS

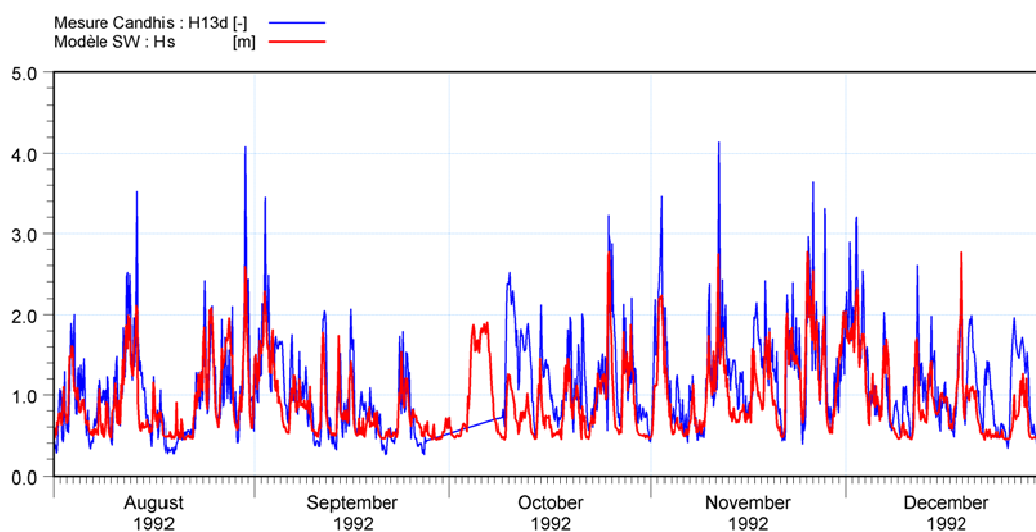


Figure 4-5 : Comparaison des résultats de hauteurs significatives du modèle de propagation avec les données CANDHIS

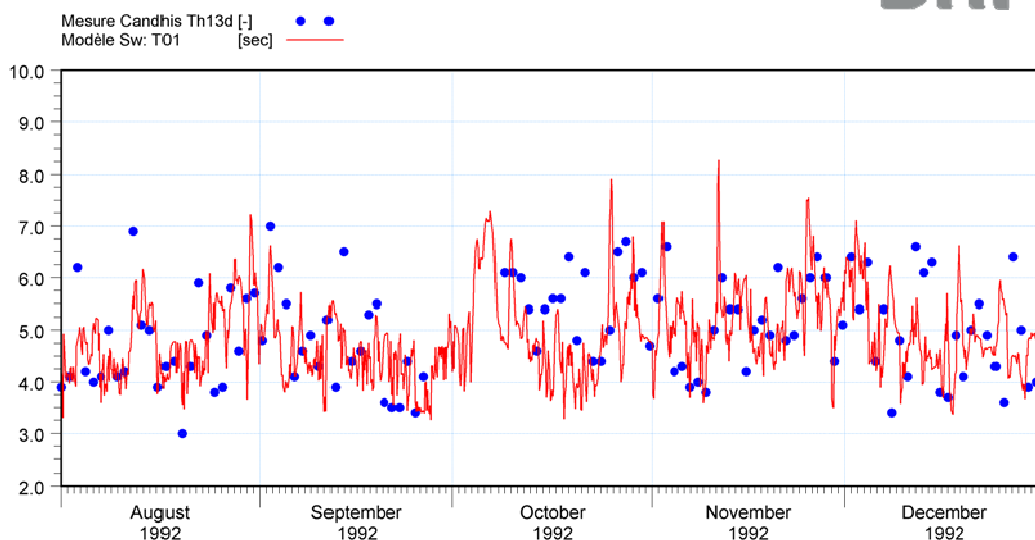


Figure 4-6 : Comparaison des résultats en période du modèle de propagation avec les données CANDHIS

4.2.5 Résultats obtenus

Deux exemples caractéristiques de propagation de houle sont présentés sur les deux figures suivantes :

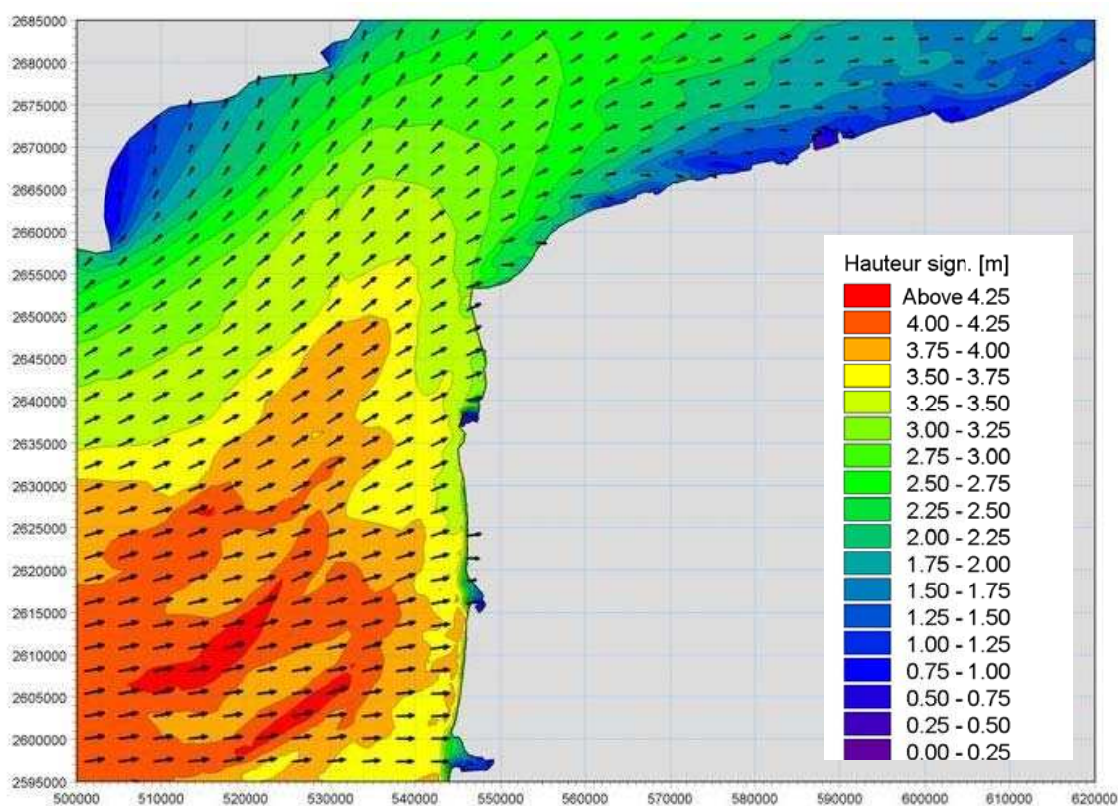


Figure 4-7 : Calcul de propagation des houles sur le sur le Nord Pas-de-Calais, à titre indicatif, pour le 27 février 1990 à 01h00 (heure locale)

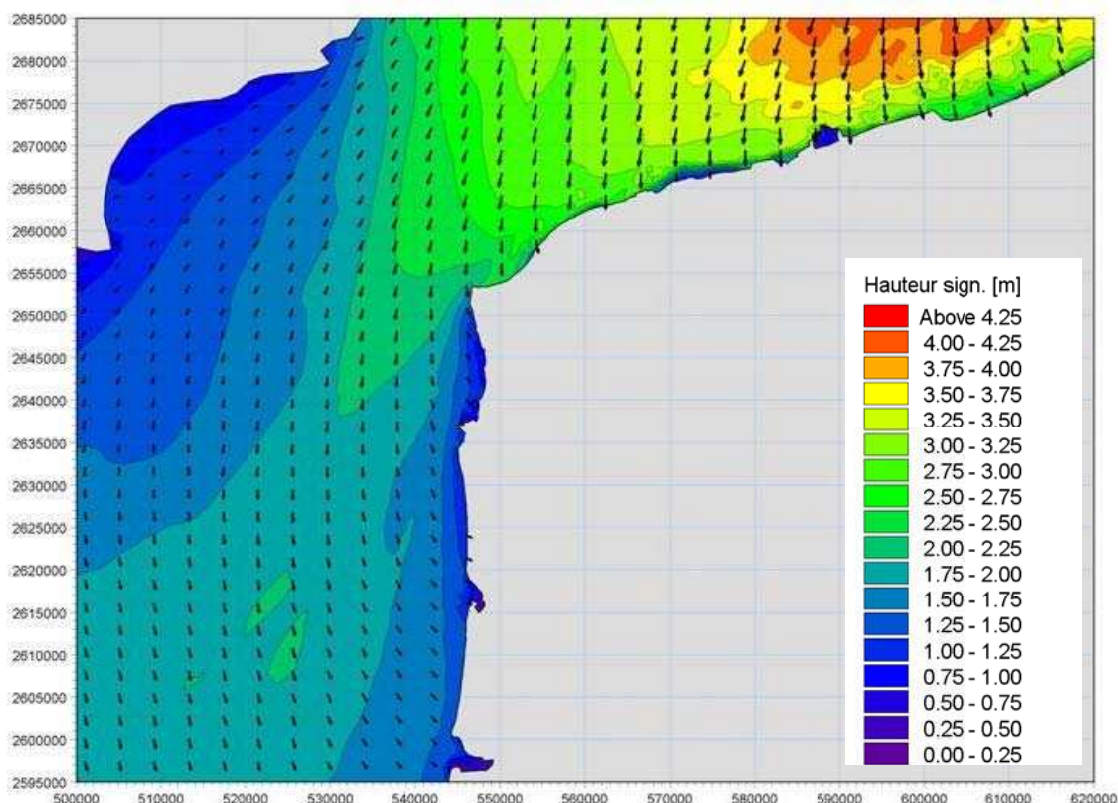


Figure 4-8 Calcul de propagation des houles sur le Nord Pas-de-Calais, à titre indicatif, pour le 8 novembre 2001 à 18h00 (heure locale)

Ces deux figures illustrent l'amortissement très sensible de la hauteur des houles depuis le large jusqu'au littoral. Par ailleurs, la réfraction des houles sur le fond tend globalement à orienter les houles perpendiculairement à la côte

A l'issue de la simulation, il est alors possible d'extraire en tous points du maillage, et plus particulièrement au droit des sites d'intérêt, les caractéristiques de la houle (période, hauteur, direction).

4.3 Définition des niveaux extrêmes

4.3.1 Statistiques des niveaux marins extrêmes de pleine mer

Les niveaux extrêmes de pleine mer (au sens du SHOM) ont été obtenus graphiquement à partir des courbes du cédérom « Statistiques des niveaux marins extrêmes de pleine mer Manche et Atlantique » (© CETMEF/SHOM 2008) et des SIG et notices de l'actualisation réalisée en 2012.

La livraison 2012 enrichit l'information de 2008 par augmentation de la chronique enregistrée et par la prise en compte des points secondaires (campagnes de mesure, chroniques discontinues,...). Ci-dessous figurent pour la région Nord Pas de Calais les deux extrapolations spatiales des niveaux marins de pleine mer.

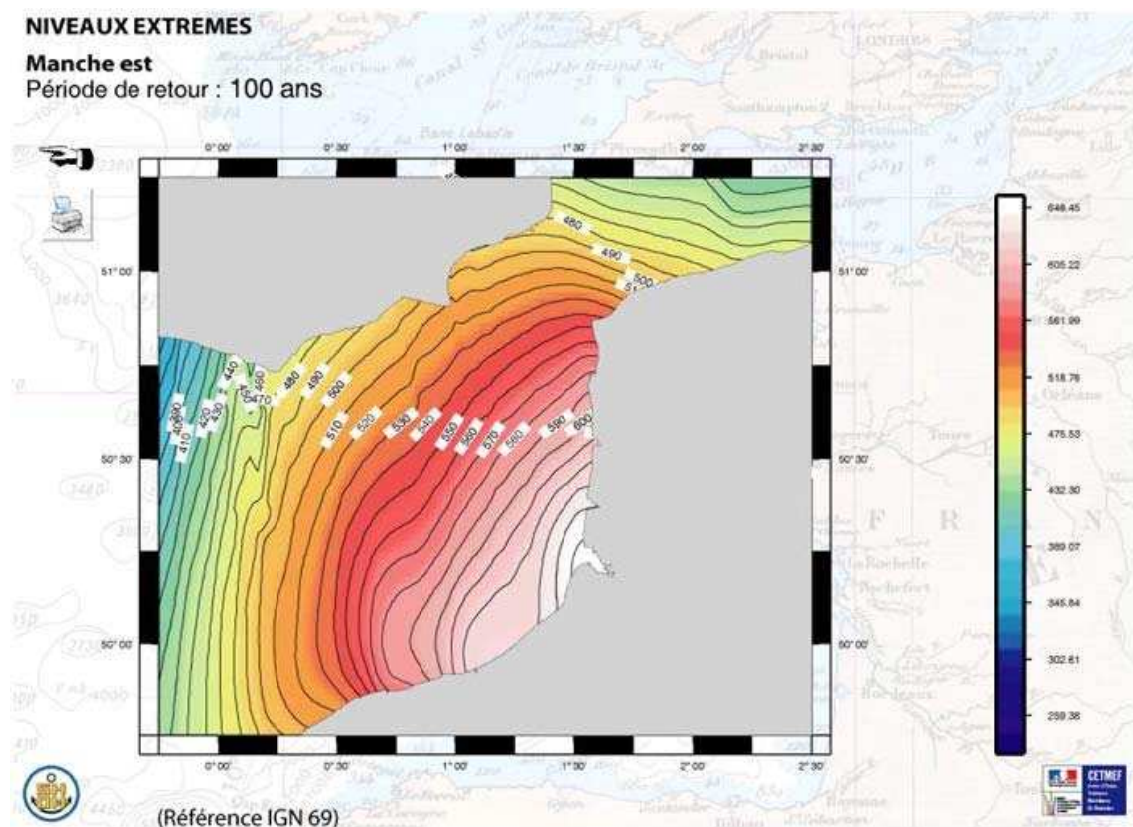


Figure 4-9 : Cartographie des niveaux extrêmes de période de retour 100 ans sur la Manche Est et Mer du Nord par rapport à l'IGN 69 (© CETMEF/SHOM 2008)

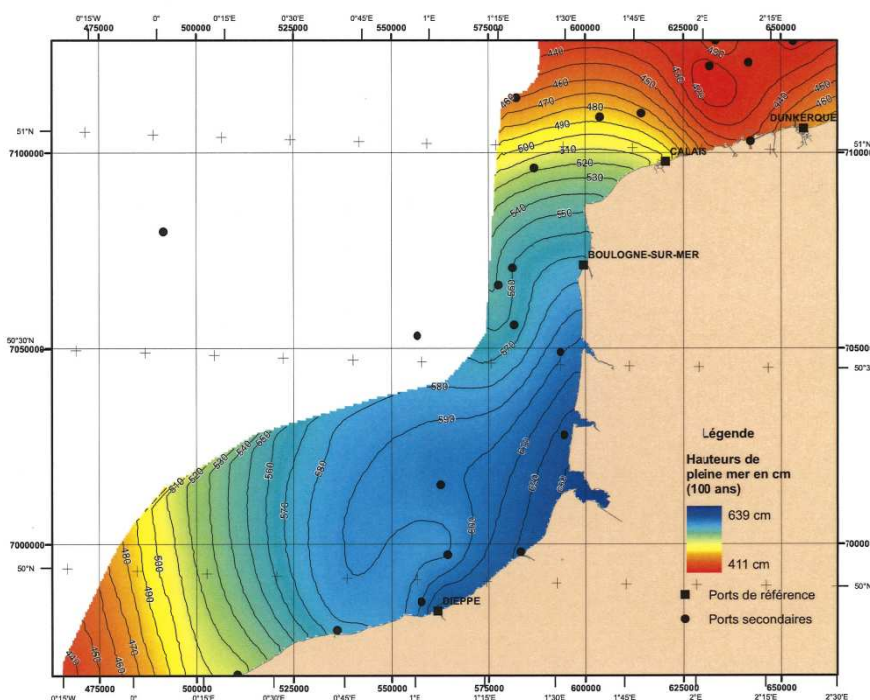


Figure 4-10 : Cartographie des niveaux extrêmes de période de retour 100 ans sur la Manche Est et Mer du Nord par rapport à l'IGN 69 (© CETMEF/SHOM 2012)

Ces niveaux marins extrêmes de pleine mer rassemblent les phénomènes statiques (comme la marée) et les phénomènes dynamiques de grande ampleur de type météorologique. Les facteurs les plus influents sur la variation du niveau d'eau à l'échelle régionale sont le vent et la pression atmosphérique. Les forts vents d'ouest poussent les masses d'eau vers les côtes et vers l'intérieur des estuaires (vents d'afflux) et engendrent des surcotes. A l'inverse, des forts vents d'est poussent l'eau vers le large et engendrent des décotes.

A ce phénomène s'ajoute l'effet des basses pressions atmosphériques (phénomène du baromètre inversé). En effet, une chute barométrique se répercute sur un plan d'eau à raison d'un centimètre pour une baisse d'un hectopascal. Concrètement, une dépression atmosphérique en voie de creusement sur la mer s'accompagne d'un noyau de baisse de pression et d'une zone de vents forts à l'origine d'une onde de tempête dont la célérité est fonction de la racine carrée de la profondeur de l'eau. A l'approche des côtes, la vitesse de l'onde diminue en raison du relèvement des fonds, ce qui réduit sa longueur et augmente son amplitude. D'abord modérée au large, la surcote apparaît plus importante à la côte, notamment dans les estuaires par effet de concentration. La somme du niveau théorique de la marée et d'une surcote atmosphérique est appelée marée de tempête.

Ainsi, on peut par exemple tirer de ces travaux, pour les ports de Boulogne-sur-Mer, Calais et Dunkerque, les valeurs ci-après exprimées dans le système IGN69. Pour rappel, les altitudes sont mesurées dans le système IGN69 par rapport au niveau moyen de la mer à Marseille, tandis que dans le système Cote Marine (CM), elles sont mesurées par rapport au niveau des plus basses mers dans le port le plus proche. L'écart entre les deux systèmes est également indiqué dans le tableau ci-après, ainsi que les différences de niveaux extrêmes aux ports de référence.

Tableau 4-1 : Niveaux extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) pour différentes périodes de retour

Ports	Réf. IGN69 / CM	Période de retour							
		10 ans		20 ans		50 ans		100 ans	
		2008	2012	2008	2012	2008	2012	2008	2012
Boulogne-sur-Mer	-4,388	5,55	5,49	5,63	5,57	5,75	5,66	5,83	5,74
Calais	-3,459	4,72	4,77	4,80	4,85	4,90	4,96	4,97	5,04
Dunkerque	-2,693	4,42	4,40	4,50	4,49	4,63	4,61	4,74	4,70

Par ailleurs, la spatialisation des niveaux marins extrêmes entre les deux éditions est présentée dans la figure ci-après.

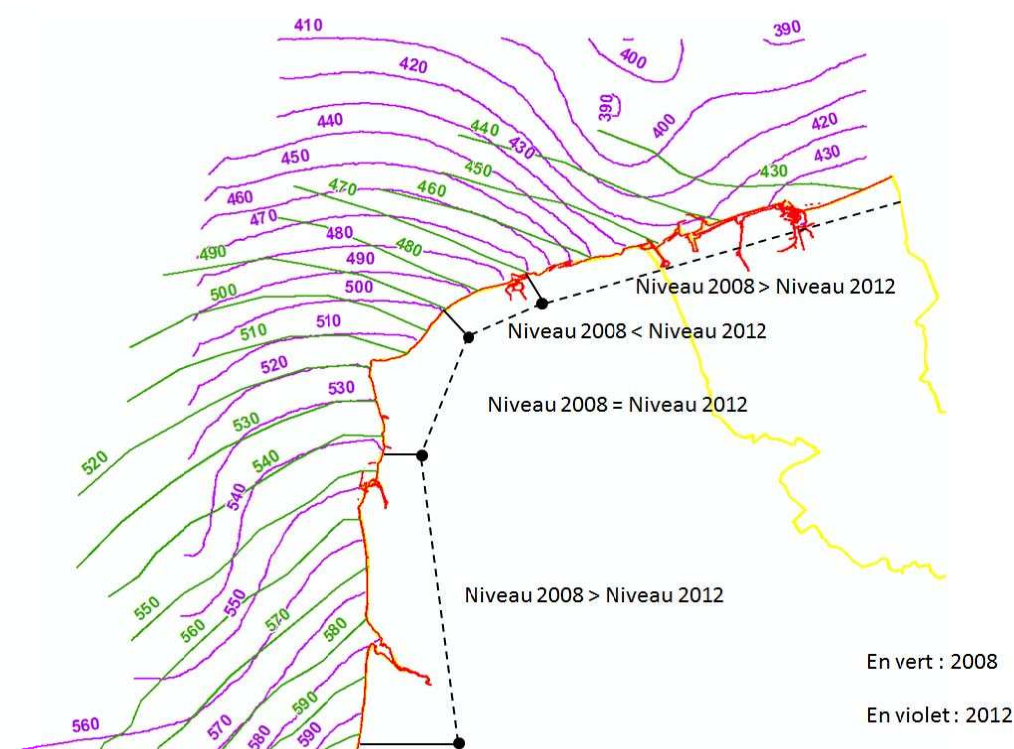


Figure 4-11 : Comparaison des niveaux marins de pleine mer issus des données du SHOM (niveaux décennaux)

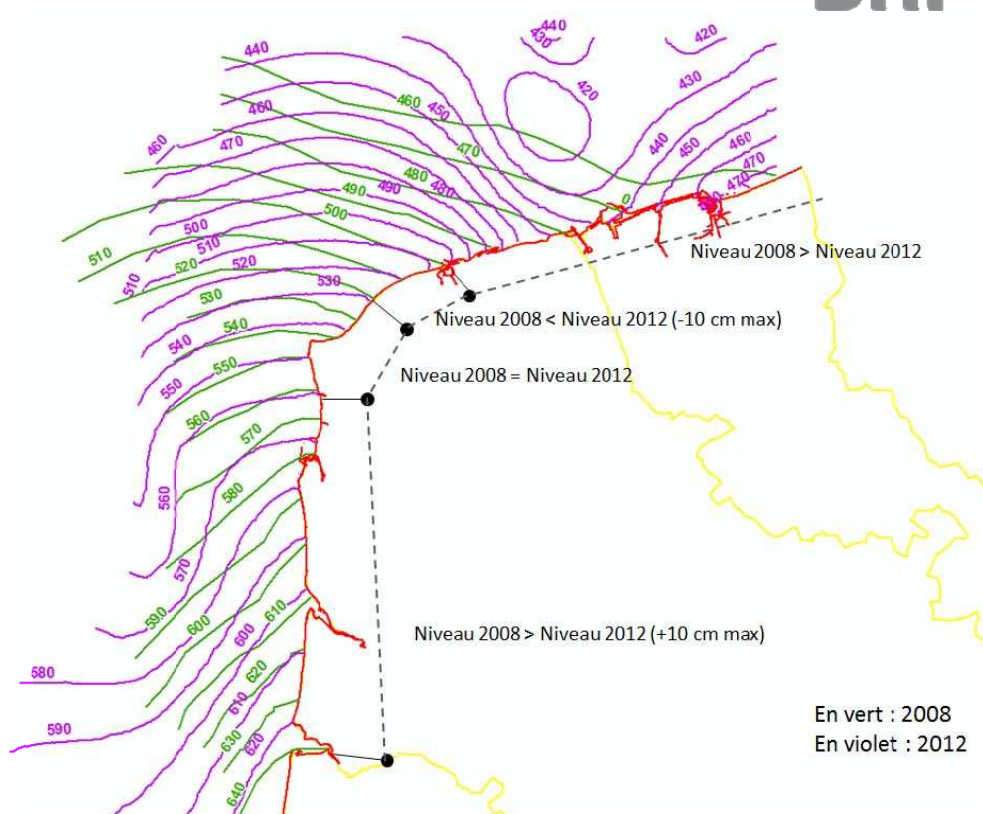


Figure 4-12 : Comparaison des niveaux marins de pleine mer issus des données du SHOM (niveaux centennaux)

La comparaison des interpolations spatiales entre les cartes 2008 et 2012 montre des différences notables entre Calais et la frontière Belge, expliquées principalement par la prise en compte des points secondaires forçant l'interpolation spatiale.

Les niveaux finaux retenus pour la modélisation des submersions marines sont :

- Les niveaux issus des travaux 2012 pour les ports de référence (Dunkerque Calais et Boulogne) ;
- Les plus forts niveaux entre les produits 2012 et 2008 sur les autres sites.

Cette hypothèse est recommandée dans la note méthodologique établie par le CETMEF et le SHOM qui est annexée au rapport (annexe A). Le choix des niveaux marins retenus est explicité dans les monographies par sites.

Ces niveaux marins extrêmes sont établis à partir de mesures effectuées en dehors des zones d'influence de la houle, et ne tiennent donc pas compte de la surcote de déferlement. Pour les sites étudiés exposés à la houle, il convient donc d'ajouter à ces niveaux extrêmes une surélévation due à la surcote de déferlement.

A ce niveau statique a été ajouté une surcote de 20 cm constituant une première étape vers le changement climatique, conformément à la circulaire du 27 juillet 2011, pour l'aléa actuel. Nous avons considéré, par ailleurs, une augmentation moyenne de 60 cm pour l'aléa futur à l'horizon 2100. Ce scénario est conforme au scénario

pessimiste précisé par l'ONERC dans sa note d'adaptation au changement climatique.

4.3.2 Estimation de la surcote de déferlement

La surcote de déferlement correspond à la surélévation du niveau moyen due au déferlement des vagues. La figure ci-dessous illustre ce phénomène.

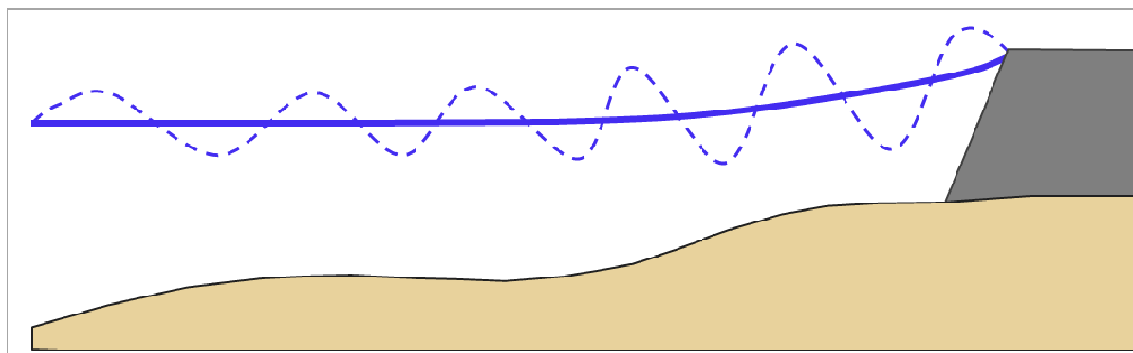


Figure 4-13 : Effet de la surcote de déferlement de la houle sur le niveau de la mer à l'approche de la côte

La surcote de déferlement s'applique donc à chaque site significativement exposé à la houle. Il se traduit par une augmentation locale du niveau de la mer, sur toute la durée durant laquelle une forte houle est observée. Afin d'illustrer le phénomène, la figure ci-après présente la comparaison de :

- une marée astronomique (marée « théorique », sans effet de la tempête), en rouge ;
- une marée présentant une surcote météorologique, en vert ;
- une marée présentant une surcote météorologique et de déferlement, en violet.

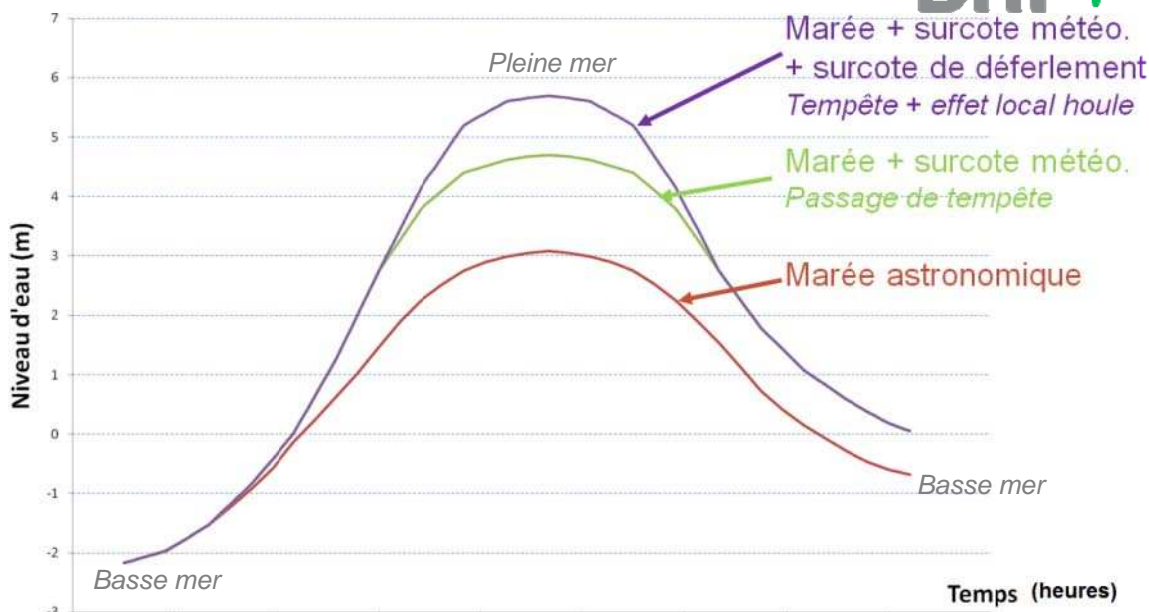


Figure 4-14 : Effet d'une surcote météorologique et d'une surcote de déferlement sur le niveau de pleine mer

4.3.3 Prise en compte des incertitudes

Les incertitudes ont été prises en compte sur les sites soumis au déferlement de la houle, précisément sur l'augmentation dynamique du niveau marin à la côte. Les principaux paramètres hydrodynamiques sont le résultat d'une chaîne de calcul complexe. Il est ainsi nécessaire d'évaluer l'incertitude générée par les principales valeurs issues des calculs sur le résultat final. Les variables analysées sont :

- La hauteur de la houle incidente ;
- La période de la houle incidente ;
- Le niveau marin statique.

Par ailleurs la bathymétrie au pied des ouvrages ou cordons dunaires est également soumise à une variabilité. C'est pourquoi une variation forfaitaire de l'estran a été prise en considération.

Les incertitudes prises indépendamment ne peuvent expliquer l'incertitude globale résultante. C'est pourquoi un test combinant les différentes incertitudes a été mené. L'ensemble des paramètres, des justifications et des résultats est disponible en annexe B. Les monographies par site reprennent les estimations des incertitudes dans l'établissement des niveaux totaux.

4.4 Statistique croisées Houle / Niveau marin

Si les périodes de retour de la houle au large et les niveaux extrêmes peuvent être estimés indépendamment les uns des autres, l'analyse statistique des paramètres croisés est nécessaire pour définir la période de retour de l'événement global. La méthode préconisée par le département de l'environnement anglais (DEFRA), décrite

par Hawkes (2005) permet de définir les caractéristiques de l'événement centennal combinant un niveau d'eau extrême et une hauteur de houle exceptionnelle.

La caractérisation d'un événement de période de retour donné revient donc à définir un couple de niveau extrême / houle. Pour cela, les conditions de houle issues de l'Atlas Numérique d'Etats de Mer Océanique et Côtier (ANEMOC), ont été utilisées. Ces conditions de houle au large ont été propagées jusqu'à la côte, tel que présenté précédemment, à l'aide du modèle numérique MIKE 21 SW pour définir les variations des conditions de houle le long du littoral. Ainsi pour chaque site étudié, il est possible d'associer une hauteur de houle à un niveau extrême et une période de retour.

Il existe cinq degrés de corrélation entre la hauteur de houle et le niveau d'eau qui sont : « indépendance », « faible dépendance », « forte dépendance », « très forte dépendance », « dépendance exceptionnelle ». Ce degré de corrélation dépend des paramètres en jeu et de la configuration géographique de la zone d'étude. Le CETMEF a établi une carte des facteurs de corrélation sur tout le littoral français. A Dunkerque, le coefficient de corrélation est de 0,21, à Calais de 0,2 et à Boulogne-sur-Mer de 0,16. D'après le tableau de correspondance du CETMEF, ce coefficient correspond à un facteur de dépendance compris entre 2,5 et 25. Il est ainsi conseillé de définir ce facteur de dépendance à 25 (signifiant : « faible dépendance »). Ce paramètre est donc fixé à 25 dans le cas de cette étude. Les valeurs correspondant à une période de retour conjointe de 100 ans sont consignées dans le tableau ci-dessous.

		Tc = 100 ans - Facteur de dépendance 25													
Niveau marin	Tn (années)	100	50	20	10	5	3,5	2	1,8	1	0,7	0,4	0,2	0,07	0,04
Houle (Hs)	Tv (années)	0,04	0,07	0,2	0,4	0,7	1	1,8	2	3,5	5	10	20	50	100

Tableau 4-2 : Périodes de retour conjointes niveau / houle – facteur de dépendance 25

Les résultats issus de cette modélisation permettent ainsi d'obtenir les statistiques combinées fournissant les relations entre niveau marin extrême et hauteur de houle, pour les périodes de retour étudiées. Les figures suivantes illustrent ces statistiques combinées obtenues à Dunkerque, Calais et Boulogne-sur-Mer.

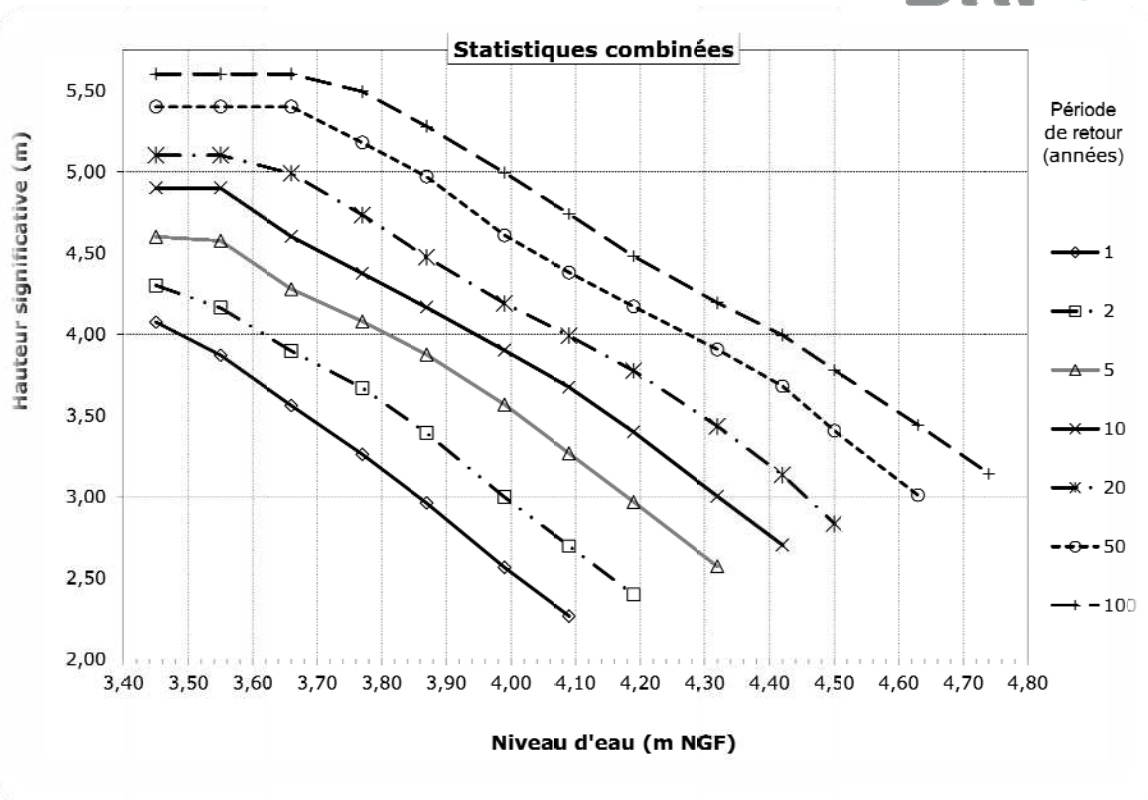


Figure 4-15 : Période de retour des combinaisons de niveaux extrêmes / houle au large à Dunkerque.

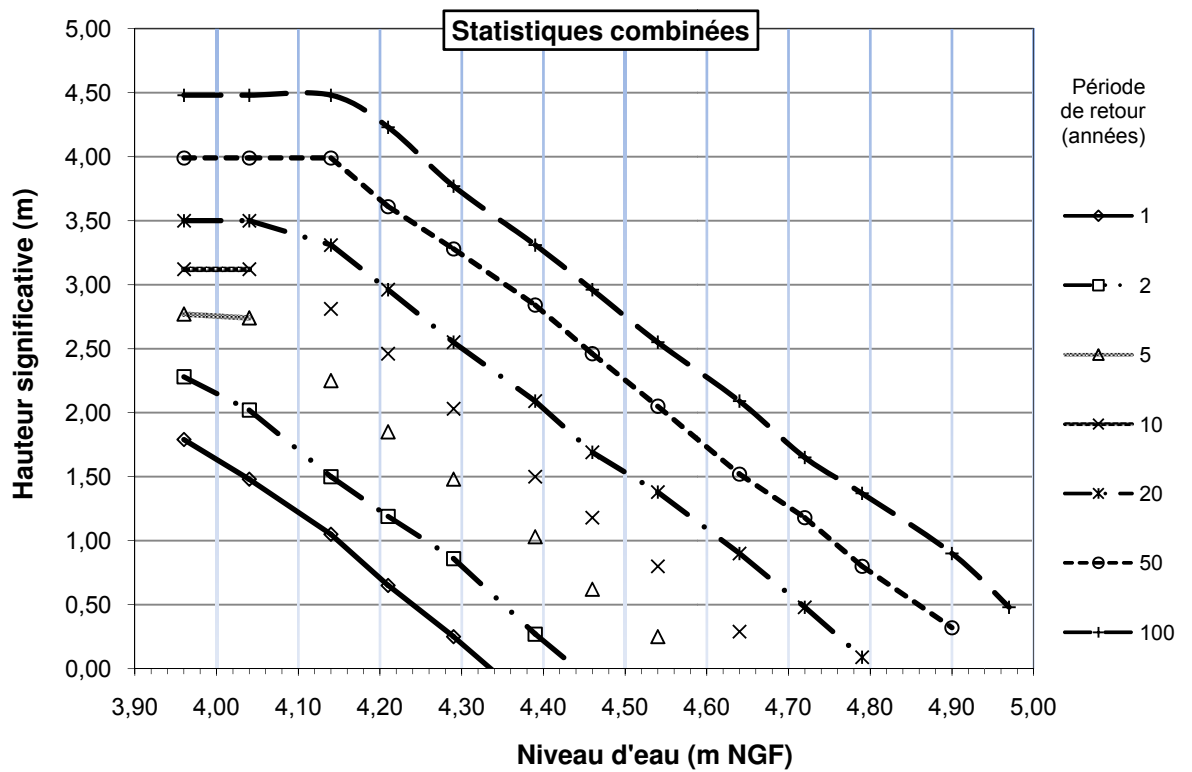


Figure 4-16 : Période de retour des combinaisons de niveaux extrêmes / houle au large à Calais.

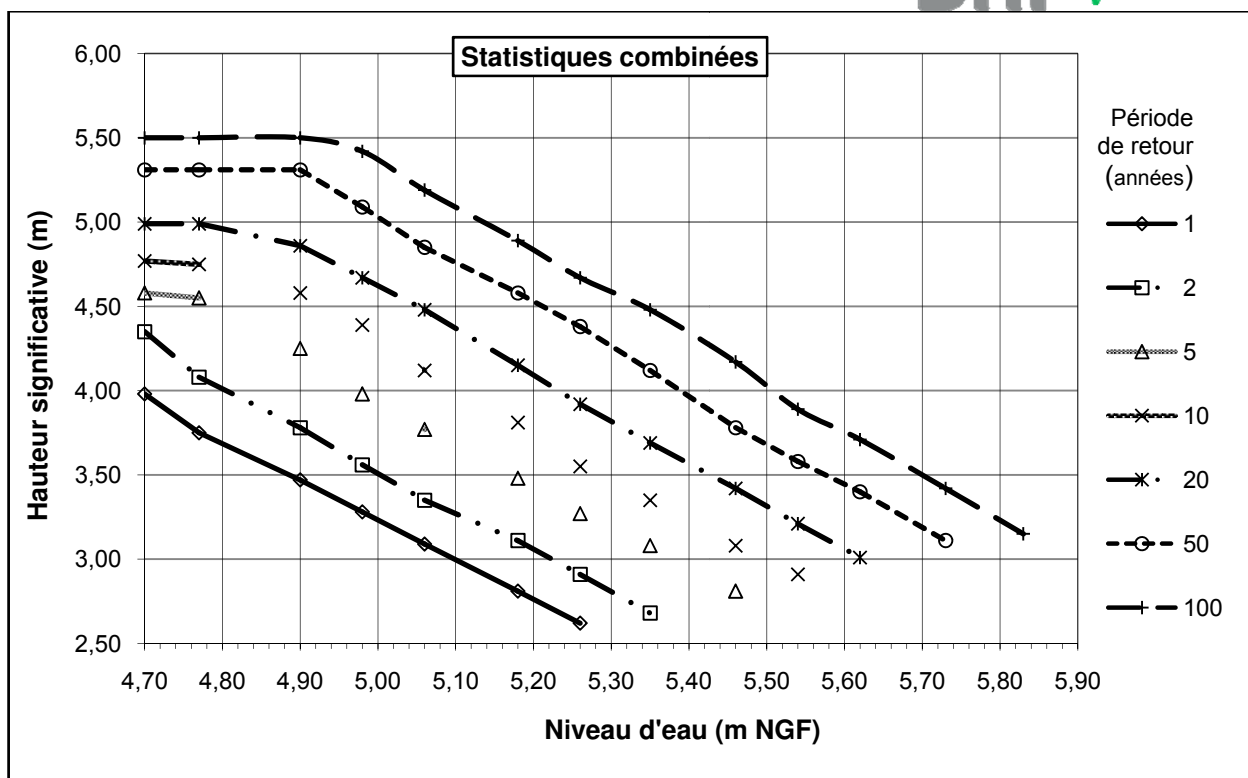


Figure 4-17 : Période de retour des combinaisons de niveaux extrêmes / houle au large à Boulogne-sur-Mer.

Chaque courbe de ce graphique représente une période de retour. Pour chacune de ces périodes de retour, la courbe fournit la multitude de correspondances possibles entre le niveau marin et la hauteur de la houle. Ainsi, pour une période de retour donnée, le niveau marin augmente lorsque la hauteur de houle diminue, et inversement. Une même période de retour peut donc correspondre à un niveau marin élevé associé à de petites vagues, ou à un niveau marin plus faible associé à de fortes vagues.

4.5 Application aux sites à rupture et aux sites à débordement

Le seul paramètre caractérisant ce phénomène est le niveau d'eau. Le couple retenu pour la modélisation le plus pénalisant est le niveau marin élevé associé à une faible houle.

Les conditions de mer, définies par ce couple, sont propagées à l'aide d'un modèle numérique. Le modèle utilisé, nommé LITPACK et développé par DHI, permet de calculer l'évolution de la houle et de la surcote de déferlement à l'approche de la côte. Cette modélisation est effectuée le long d'un profil de plage, sur une distance de l'ordre de 2 km, c'est-à-dire à partir des fonds généralement compris entre -10 et -15 m IGN69. Ces profils sont construits à l'aide des données bathymétriques de la base de données C-Map et des données topographiques LIDAR sur l'estran.

Le modèle fournit ainsi les conditions de mer au pied de l'ouvrage, en tenant compte de la bathymétrie locale. La différence de niveau à pleine-mer entre les conditions de

mer au large et au pied de l'ouvrage constitue l'estimation de la surcote de déferlement.

La méthodologie employée est résumée par la figure suivante :

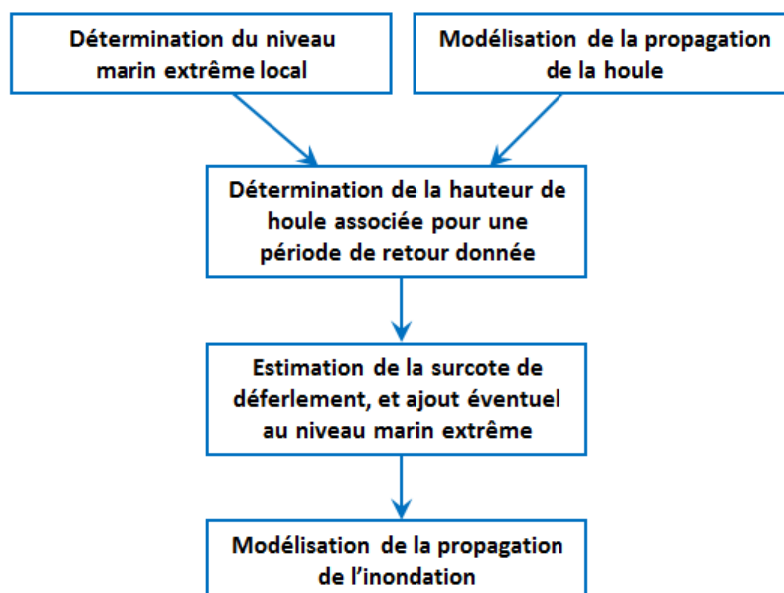


Figure 4-18 : Méthodologie pour la modélisation de débordements et ruptures d'ouvrages

Comme rappelé au chapitre 3, un grand nombre de calcul de surcote de déferlement pour les sites qui y sont soumis a été réalisé. De l'ensemble de ces tests, nous avons pu établir des corrélations statistiques (excepté sur les rives de l'Aa) par sites que nous utiliserons dans la suite du document. Un exemple est présenté ci-dessous.

Site de Tardingen	
Niveau marin étudié (m NGF)	Surcote de déferlement calculée (m)
5,1	0,42
5,4	0,34
5,7	0,26
6,0	0,19
6,3	0,02

Figure 4-19 : Surcotes de déferlement calculées sur le site de Tardingen depuis 2010

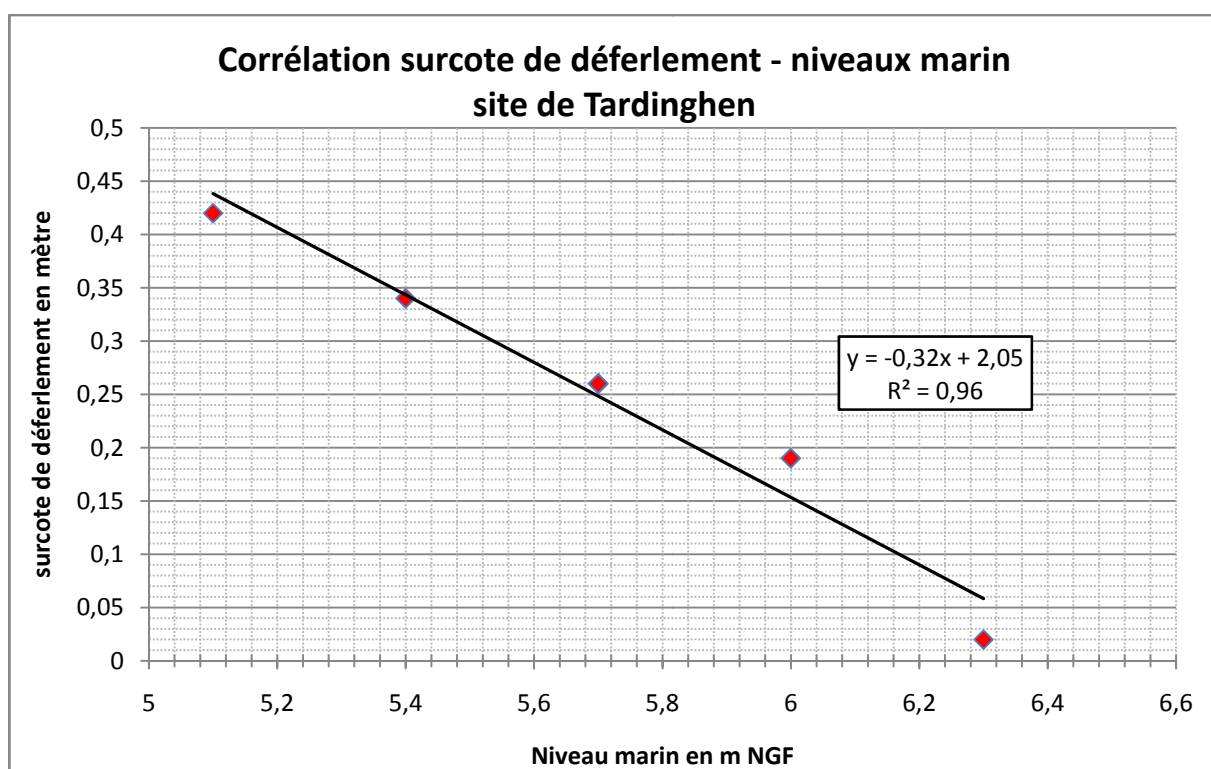


Figure 4-20 : Graphe des surcotes de déferlement calculées sur le site de Tardinghen depuis 2010

4.6 Application aux sites soumis au franchissement d'ouvrages

Les sites soumis au franchissement d'ouvrage de protection sont situés au-dessus du niveau extrême de la mer. Leur inondation ne peut donc pas être étudiée grâce à la seule connaissance du niveau (même en tenant compte de la surcote de déferlement), mais doit être analysée en estimant le débit franchissant l'ouvrage. Ce débit dépend tout autant du niveau moyen de la mer que de la hauteur de la houle au pied de l'ouvrage, de la période de la houle et de la géométrie de l'ouvrage (pente et hauteur).

Par conséquent tous les couples *niveau marin / houle* définis par les probabilités croisées sont testés pour caractériser le couple le plus pénalisant. Pour cela les conditions de mer définies sont propagées à l'aide du modèle numérique LITPACK, qui permet de calculer l'évolution de la houle dans le profil et la surcote de déferlement à l'approche de la côte (approche 1D). Le modèle fournit ainsi les conditions de mer au pied de l'ouvrage, en tenant compte de la bathymétrie locale.

L'estimation du débit de franchissement est effectuée par l'intermédiaire des formulations de l'EUROTOP proposés dans le « Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures - Assessment Manual » sur l'ensemble du marégramme relatif au couple le plus défavorable.

Deux critères supplémentaires sont vérifiés préalablement au calcul des débits de franchissement par l'EUROTOP :

- Un critère concernant la position du creux de la houle par rapport au pied de l'ouvrage. Si la moitié de la hauteur significative de la houle est plus grande que la profondeur d'eau en pied d'ouvrage, le découvrant au creux de la houle, les débits de franchissement sont considérés comme nuls.
- Un critère de déferlement bathymétrique. Il est généralement admis que les houles déferlent dès lors que le rapport $H/D > [0,6 ; 0,8]$ (H : hauteur de houle ; D : hauteur d'eau disponible en pied d'ouvrage). Le critère retenu dans le modèle LITPACK est de 0,8. La distance sur le profil entre le point empirique de déferlement et le pied d'ouvrage est alors considérée statuer sur la prise en compte ou non de ce critère. Il a été montré que sur l'ensemble des sites à franchissement, le critère ne serait pas retenu.

La méthodologie employée se résume donc de la manière suivante :

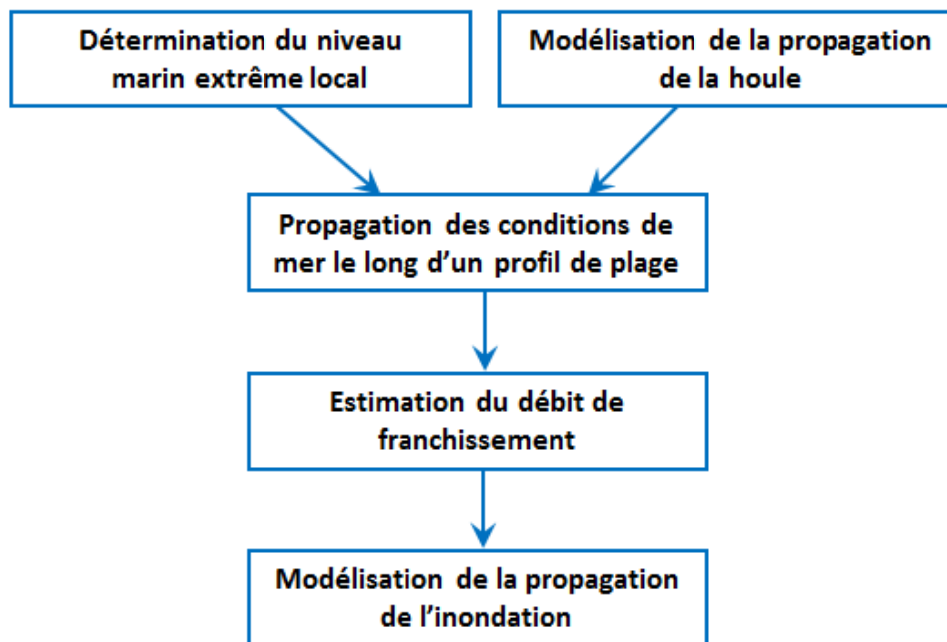


Figure 4-21 : Méthodologie pour la modélisation de franchissements

La modélisation de la propagation de l'inondation terrestre est détaillée au chapitre 6.

5 IDENTIFICATION DES ZONES EXPOSEES A UN ALEA SUBMERSION

La première cause de submersion marine est liée au débordement d'ouvrages de protection ou de cordon dunaire du fait de leur faible altitude, ou encore à leur franchissement exceptionnel par des « paquets de mer ».

Dans un premier temps, l'ensemble du linéaire côtier a été caractérisé par une courbe topographique issue de l'analyse du MNT du levé LIDAR acquis par la DDTM 59 et par des données (si disponibles) sur les ouvrages hydrauliques situés sur le front de mer. Ce linéaire, comparé aux niveaux marins extrêmes établis au paragraphe 4.3.1, a permis de déterminer les points sensibles aux débordements pour chaque période de retour étudiée. Cette comparaison a de la même manière permis d'identifier les sites potentiellement soumis au franchissement, lorsque l'écart entre le niveau extrême et la topographie littorale est faible. Il est à noter que la topographie en retrait du cordon littoral a également été prise en compte : ainsi un site peut ne pas être retenu, même si l'altitude des digues ou dunes est faible, si la topographie en retrait immédiat est relativement haute. En effet, ce type de topographie limiterait la propagation des inondations. Le recensement des tempêtes ayant occasionné des dégâts (en phase 1), a permis de vérifier la cohérence des résultats en comparant la cartographie obtenue par l'analyse du MNT et les sites ayant déjà subi des submersions par débordement, rupture d'ouvrage ou franchissements. Pour les conditions de franchissement ou de rupture des ouvrages de défense, les données ont été complétées par celles de l'analyse VSC menée par la DDTM 62. L'étude VSC a permis d'identifier des sites n'ayant jamais connu de submersion mais dont les caractéristiques des ouvrages de protection (par exemple dune en érosion ou digue faiblement dimensionnée) laisse craindre une future rupture, ou au contraire des sites ayant connu des tempêtes historiques mais dont l'évolution des protections (engraissement du cordon dunaire) écarte désormais tout risque de rupture.

Une visite de terrain complémentaire a été réalisée afin de vérifier et de recueillir des informations complémentaires utiles à la modélisation.

Enfin, une étude morphologique a été menée sur les sites non identifiés par l'étude VSC complétant en dernier ressort l'identification des sites présentant un potentiel risque de rupture. Les paramètres pris en compte sont la revanche de l'ouvrage par rapport au niveau marin extrême R , la longueur de l'ouvrage L au-dessus du niveau marin considéré et la hauteur au terrain naturel à l'arrière de l'ouvrage H . Ces paramètres sont expliqués par la figure suivante.

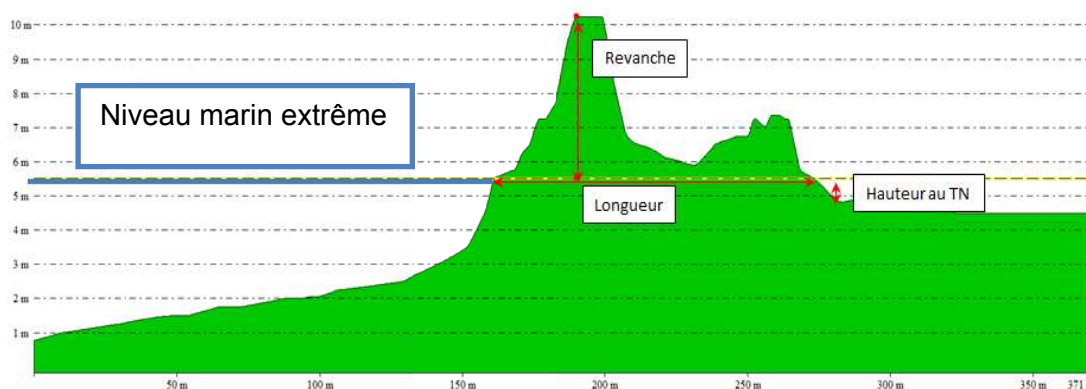


Figure 5-1 : Paramètres retenus pour l'étude morphologique

Le choix des sites s'opère en croisant les trois paramètres. Deux grandeurs représentatives ont été retenues pour une détermination graphique. Le paramètre L (m) et le rapport R/H . En effet un rapport R/H fort correspond soit à une revanche élevée soit à une zone arrière littorale faiblement poldérisée (ou à une combinaison des deux) et traduit un risque faible. A contrario une revanche faible et/ou une zone arrière littorale très basse correspond à une morphologie de type digue et subséquemment à un risque élevé.

En effectuant une analyse rétrospective sur les sites à rupture historique, les limites retenues pour qualifier un site ont été fixées à $L < 70$ m et au rapport $R/H < 7$.

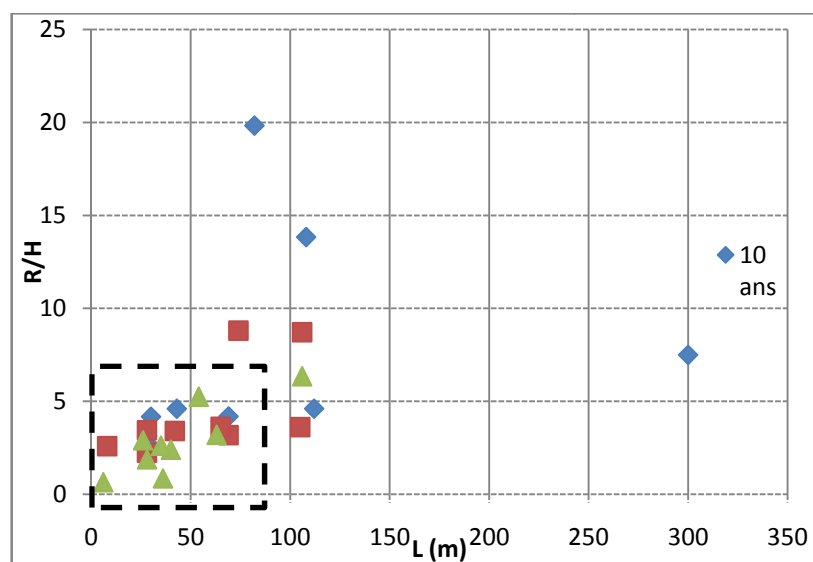


Figure 5-2 : Relation entre les paramètres L et le rapport R/H pour les sites présentant une rupture d'ouvrage

Au final la hiérarchie et l'arbre des décisions sont schématisés sur la Figure 5-3.

Pour tous les cas de ruptures, comme précisé dans la circulaire du 27 juillet 2011, la largeur des brèches modélisées est fixée à 100 mètres, exception faite des sites

particuliers autour des chemins d'accès (Petit Fort Philippe et le chemin Delesalle à Groffliers).

Des modèles locaux avec un maillage de 3 m ont été développés afin d'analyser précisément les écoulements dans ces zones excepté dans le Dunkerquois où la maille de calcul a été portée à 8 mètres et sur le site du Touquet où la maille a été portée à 6 mètres. Ces résolutions adaptées ont été rendues nécessaire par la taille de l'emprise modélisée. Le choix final procède d'une adéquation précision / temps de calcul.

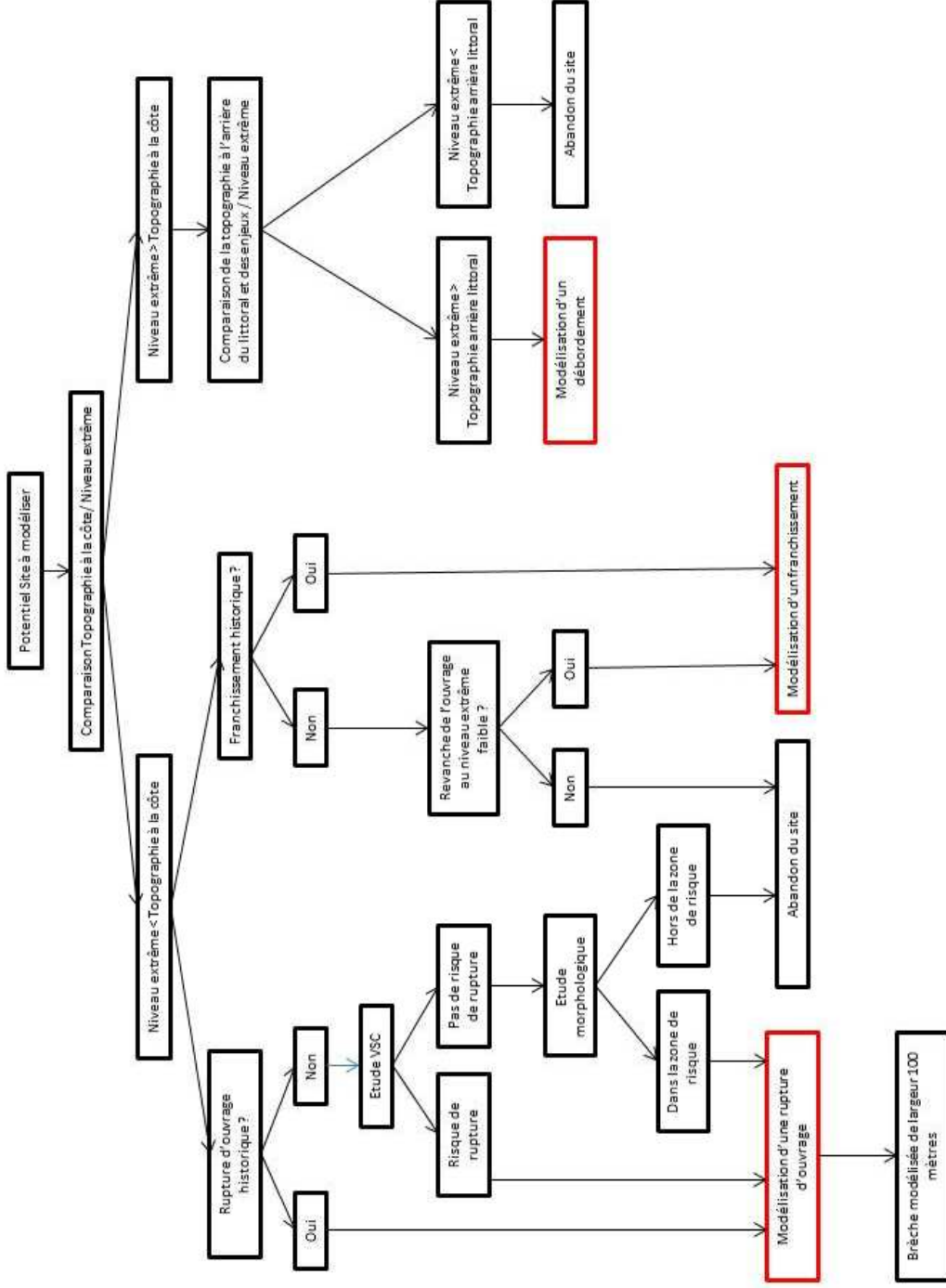


Figure 5-3 : Arbre des décisions

Secteurs retenus

Bray-Dunes (59) : franchissement de perré

Ce secteur ayant déjà subi des inondations par le passé, il est connu pour être sujet au franchissement du perré.

L'altitude du perré est homogène sur tout son linéaire, mais le profil transversal de la plage diffère entre la partie Ouest et la partie Est. Le calcul de la propagation de la houle sur ce site est donc effectué sur deux profils distincts.

Comme pour l'analyse de tous les autres sites soumis au franchissement, le calcul de propagation de la houle tient compte de l'effet de la surcote de déferlement.

Bray-Dunes (59) : rupture du cordon dunaire

L'analyse de la topographie de Bray-Dunes a conduit à montrer que le secteur situé derrière la dune à l'Est de la commune, actuellement occupé par un camping, est situé sous les niveaux marins extrêmes. La dune étant localement étroite, l'analyse morphologique a été réalisée sur ce secteur. Cette dune a une longueur L de 69 mètres, une revanche R égale à 2,07 mètres et une hauteur au terrain naturel H de 0,65 mètres. Selon le graphique montré précédemment, ce secteur est considéré comme à risque et a donc été retenu comme potentiellement submersible en cas de rupture du cordon dunaire.

Ce secteur est néanmoins entouré de dunes, et l'extension de cette submersion serait donc très limitée spatialement du fait de la topographie. Les effets dynamiques de la submersion marine sur ce site étant par conséquent négligeables, la cartographie de l'aléa a exceptionnellement été effectuée par analyse topographique, c'est-à-dire que la surface inondée est celle dont la topographie est située sous le niveau marin.

Malo-les-Bains (59) : franchissement de perré

L'inondation du perré par le franchissement des vagues a été observée à plusieurs reprises par le passé, notamment en mars 1949 et février 1953.

Le calcul du débit franchissant le perré est effectué sur trois profils transversaux de la plage, afin de tenir compte des variations de géométrie de l'ouvrage (hauteur et pente).

Dunkerque (59) : rupture de digue (Canal exutoire)

Ayant subi à plusieurs reprises des ruptures dans la digue des Alliés (en 1949 et 1953) ce secteur a été identifié comme sensible bien que l'étude VSC ne révèle pas de risque particulier.

Les archives font état de brèches d'une cinquantaine de mètres. Conformément à la circulaire du 27 juillet, la largeur de la brèche retenue pour la modélisation est de 100 mètres. Le niveau de la mer pris en compte à l'entrée de la brèche tient par ailleurs compte de la surcote de déferlement.

De plus le niveau d'eau initial des canaux, avant apparition de la rupture, conditionne l'instant à partir duquel leur débordement va avoir lieu. Ce niveau initial peut donc avoir un effet sur les inondations de Dunkerque, et doit donc être défini de manière réaliste. Une analyse fréquentielle sur les niveaux du canal exutoire sur 5 années réelles fournies par l'Institution Interdépartementale des Wateringues a été effectuée. Le niveau -1,51 m NGF dans le canal exutoire est retenu (cf. § 8.4). Pour le canal de Furnes et le

canal de jonction, les niveaux d'eau initiaux sont respectivement de 0,90 m IGN69 et de -0,17 m IGN69, correspondant au Niveau Normal de Navigation pour ce dernier. Le niveau retenu dans le canal de Furnes correspond au niveau de gestion pratiqué par la Région Flamande.

Le modèle construit s'étend jusqu'à la frontière avec la Belgique. Les principaux canaux des Wateringues du Dunkerquois (cf. § 8.4) ont été pris en compte afin de reproduire le plus fidèlement possible la dynamique (stockage et propagation dans les canaux).

Oye-Plage (62) et rives de l'Aa (59) : rupture et débordement

Secteur dunaire en forte érosion (un recul de 0,9 m/an en moyenne sur la période 1949 – 2006 a été estimé par l'analyse diachronique des traits de côtes), le quartier des Escardines à Oye-Plage a été identifié avec VSC comme potentiellement submersible si la dune venait à disparaître suite à une forte tempête érosive. Bien que la morphologie de la dune ne soit pas de nature à retenir ce site, l'étude d'une brèche à cet emplacement a été retenue pour cette raison.



Figure 5-4 : trait de côte de 1949 (source : université du littoral) et de 2006

Les archives font état d'une rupture de la digue Taaf lors de la tempête de 1953, provoquant une inondation au niveau de l'observatoire des vanneaux. Une brèche de 100 m a donc été retenue à la jonction de la digue Taaf et de la digue de 1925 hors du casier formé par les Escardines et la digue Taaf.

Par ailleurs la possibilité de l'intrusion des eaux marines au niveau du camping ne peut être écartée sur la base des critères présentés ci-dessus. Ce site sera retenu. Cependant, à l'identique du site de Bray Dune, la dynamique de submersion n'aura pas d'influence sur ce site. Il sera traité par superposition altimétrique.



Figure 5-5 : site du camping de Grand Fort Philippe

Sur Petit Fort Philippe, bien qu'aucune rupture d'ouvrage n'ait été vécue (seules des dégradations liées à des chocs mécaniques dus à la houle ont été relevées) et bien que l'étude VSC n'ait rien identifiée sur ce site, nous considérerons la possibilité d'une défaillance de la frange littorale. En effet, pour les niveaux considérés les critères morphologiques qualifient l'ouvrage (pour le niveau 100^{al} par exemple L<50 mètres et R/H # 5).

Par ailleurs des points bas existants le long des rives de l'Aa au droit des communes de Petit-Fort-Philippe et Grand-Fort-Philippe ont justifié une étude de débordement des berges sur ce secteur.

L'effet de la surcote de déferlement qui s'applique le long de la dune de Oye-Plage se répercute alors dans les marais mais aussi à l'entrée du chenal de Gravelines. Bien que le chenal soit protégé de la houle, l'hypothèse d'un niveau marin extrême à l'entrée du chenal tenant compte d'une surcote de déferlement est donc retenue. Cette hypothèse est justifiée par des tests effectués avec le modèle numérique, montrant que le niveau de la mer à l'entrée du chenal est identique au niveau à l'entrée des marais (c'est-à-dire proche de la zone de déferlement). Néanmoins, il a été montré que le niveau de la mer dans le chenal diminue progressivement en se propageant du Nord du chenal vers le Sud où à l'extrémité de celui-ci une décote est constatée.

Enfin, les portes de l'écluse de Gravelines sont considérées fermées. Un test de sensibilité a montré sous des conditions plus défavorables que l'ouverture de la porte Nord n'entraînait pas de modification significative des résultats.

Marck (62) : débordement

L'analyse topographique effectuée à partir des données LIDAR a montré qu'il existait, pour des niveaux marins élevés, un risque de débordement sur les terres situées en retrait des marais.

Le site étant exposé à la houle, la modélisation est réalisée en considérant une surélévation du niveau de la mer due à la surcote de déferlement.

Calais (62) : débordement de quais portuaires

L'analyse des données LIDAR a montré que les quais du port de Calais étaient potentiellement submersibles lors d'un événement de niveau marin extrême de période de retour supérieur à 100 ans. En 1953, la mer a baigné les quais et les terre-pleins ce qui a causé de nombreux affaissements de pavages et revêtements bitumeux.

Le débordement étudié se situant à l'intérieur des infrastructures portuaires, c'est-à-dire à l'abri de la houle, la surcote de déferlement n'est pas considérée pour ce site. Les événements historiques ont cependant montré qu'il pouvait exister une surcote dans les enceintes portuaires, sans qu'il n'y ait de déferlement de la houle. A l'heure actuelle, ce type de surcote est mal connu et ne peut être quantifié. Les statistiques sur les niveaux marins extrêmes étant issues des mesures de niveau effectuées dans des ports, on peut cependant considérer que les niveaux statistiques considérés tiennent compte de ce type de surcote.

D'autre part, l'écluse entre le Port d'échouage et le bassin des Chasses de l'Ouest appelée l'écluse de 10 mètres a déjà fait l'objet d'une défaillance par le passé, ce qui peut conduire à sa mise hors service. La porte de l'écluse a donc été supposée ouverte dans une modélisation de défaillance.

Blériot-Plage (62) : rupture du cordon dunaire

L'analyse des données LIDAR ainsi que l'étude VSC ont montré qu'il existait un point bas dans le cordon dunaire correspondant à un chemin d'accès à la plage. Ce secteur a également subi des dégâts lors de la tempête de 1953.

Compte tenu de la géographie du site et des caractéristiques des ruptures de cordons dunaires historiques dans la région, une brèche de 100 mètres a été retenue pour la modélisation. Ce choix résulte donc des retours d'expériences concernant les dunes de la région. Aucun débordement par-dessus la dune n'est pris en compte du fait de sa hauteur importante. Le niveau de la mer ici considéré tient compte de la surcote de déferlement.

Sangatte (62) : rupture du cordon dunaire

En 1953, une brèche de 30 mètres dans le cordon dunaire a entraîné la submersion d'une vingtaine d'hectares de terre agricole. Depuis la dune s'est considérablement engraisée mais le risque existe encore immédiatement à l'Est de la digue de Sangatte où le cordon dunaire est le plus mince.

Compte tenu de la géographie du site et des caractéristiques historiques de la rupture du cordon dunaire, une brèche de 100 mètres a été retenue pour la modélisation, comme préconisé par la circulaire du 27 juillet 2011. Par ailleurs, la dune étant élevée, aucun débordement par-dessus la dune n'est modélisé.

Le site étant exposé à la houle, le niveau de la mer tiendra compte de la surcote de déferlement.

Sangatte (62) : rupture de digue

L'analyse des données LIDAR a montré qu'il existait un point bas sur la digue de Sangatte. Bien que ce point n'ait pas été repéré dans l'étude VSC, l'hypothèse d'une brèche dans cet ouvrage a été retenue pour la modélisation. En effet, la digue de Sangatte a connu de nombreux événements occasionnant des submersions marines,

notamment en 1953 où une brèche de 15 m de large a permis à la mer de submerger la route nationale par 40 cm d'eau et les champs à l'arrière.

La largeur de brèche retenue pour la modélisation est de 100 mètres. La surcote de déferlement est par ailleurs prise en compte.

Il est difficile de définir *a priori* où précisément la brèche sera susceptible de se produire sur l'ensemble de la digue. Aussi, trois positions de brèche distinctes ont été simulées sur ce secteur. Les résultats présentés sont alors une combinaison des résultats obtenus pour chacune des trois simulations. Ainsi les cartographies présentées sur ce secteur présentent les valeurs maximales de chaque paramètre étudié (hauteur, vitesse, aléa), quelle que soit la position de la brèche dont elles découlent. Par exemple un secteur en aléa faible pour une position de brèche, et non inondé pour les autres positions, est finalement classé en aléa faible. De même, un secteur classé en aléa fort pour une position, et aléa moyen pour les autres, est finalement classé en aléa fort.

Enfin compte tenu de la cote relativement élevée de la digue, le débordement par-dessus celle-ci n'est pas considéré.

Wissant (62) : franchissement de perré

Le perré de Wissant est sujet au franchissement, notamment relevé lors des tempêtes de février 1990 et janvier 2007.

La baie de Wissant (communes de Tardinghen et de Wissant) a un fonctionnement complexe. De nombreuses études soulignent l'impact du Banc à la Ligne sur la propagation de la houle pénétrant en Baie de Wissant, modifiant à la fois sa direction et dissipant son énergie. Les études de modélisation des houles réalisées ont clairement souligné l'aspect érosif des houles les plus pénalisantes en provenance de la mer du Nord. Cependant, malgré leur vigueur plus limitée en baie de Wissant, les houles en provenance de la Manche ont certainement aussi contribué à l'évolution du Banc à la Ligne. Ces houles de secteur ouest-sud-ouest induisent une dérive sédimentaire en provenance du sud et contournent le Cap Gris-Nez vers le nord-est. L'orientation très oblique de la ligne du rivage dans la baie par rapport à la direction des houles dominantes de la Manche, tend à rendre ce trait de côte très dynamique et peu stable. Ainsi une fois que l'accumulation sableuse en direction du Banc à la Ligne est enclenchée, cette situation peut soudainement dominer. La dérive sédimentaire se trouve ainsi fortement réduite le long du littoral de la baie et avec l'engraissement progressif du Banc à la Ligne, le trait de côte dans de la baie va naturellement reculer suite au déficit en apports de sédiments. De plus, l'engraissement progressif du banc va changer les conditions de houles à l'intérieur de la baie de manière à mieux protéger la partie ouest de la baie. Le phénomène va se décaler à l'est au fur et à mesure que le Banc à la Ligne s'allonge vers le nord-est.

La géométrie de ce perré est représentée à partir de deux profils d'ouvrage qui ont permis d'estimer le débit de franchissement.

Tardinghen (62) : rupture du cordon dunaire et débordement

La côte de la baie de Wissant est en forte érosion avec un recul de l'ordre de 4 à 5 m/an sur 76 ans (entre 1930 et 2006). Ce site a donc été identifié comme potentiellement submersible si la dune venait à disparaître suite à une forte tempête érosive. De plus, la

tempête historique de février 1990 a déjà généré la formation d'une brèche dans le cordon dunaire de la dune d'Aval.



Figure 5-6 : trait de côte de 1930 et de 2006

Une brèche de 100 mètres a été retenue pour la modélisation, bien qu'une telle largeur n'ait à ce jour pas été observée sur cette dune.

En l'état actuel, l'exutoire du ruisseau des Anguilles est par ailleurs submersible pour l'événement centennal. Le débordement est donc combiné à la rupture du cordon dunaire.

Du fait de son exposition à la houle, ce site tient également compte de la surcote de déferlement.

Audinghen (62) : franchissement de perré

Le franchissement du perré d'Audinghen a été observé durant l'événement de janvier 1978. Néanmoins ce perré présente une étendue très limitée, qui ne justifie pas l'emploi d'un modèle numérique. De plus la topographie du site, qui s'élève rapidement en s'éloignant de la mer, empêche les paquets de mer de pénétrer vers l'intérieur des terres. Ce site n'est donc pas retenu pour la modélisation.

Audresselles (62) : franchissement de perré

Le perré d'Audresselles est sujet au franchissement, qui a notamment eu lieu lors des tempêtes de février 1990 et janvier 2007.

La géométrie de ce perré n'étant pas uniforme sur toute sa longueur, quatre profils transversaux de la plage et de l'ouvrage ont permis d'estimer les débits de franchissement. Une surcote de déferlement est prise en compte sur ce site exposé à la houle.

Ambleteuse (62) : franchissement de perré

Le perré d'Ambleteuse a subi des franchissements de la mer à plusieurs reprises, notamment durant les tempêtes d'octobre 1958 ou février 1990.

Du fait de la variation de géométrie d'une extrémité à l'autre de ce perré, quatre profils transversaux distincts de la plage et de l'ouvrage ont été utilisés pour estimer le débit de franchissement. Une surcote de déferlement est prise en compte sur ce site exposé à la houle.

Wimereux (62) : franchissement de perré

Le franchissement du perré de Wimereux a été notamment observé lors des événements d'octobre 1961, novembre 1967 ou encore février 1990.

La géométrie de ce perré étant uniforme sur toute sa longueur, un unique profil transversal de la plage et de l'ouvrage a permis d'estimer le débit de franchissement. Le muret de couronnement a été intégré à la géométrie de l'ouvrage. Une surcote de déferlement est prise en compte sur ce site exposé à la houle.

Etaples (62) : débordement de berges

L'analyse des données topographiques a mis en évidence un risque de débordement sur la commune. Ce phénomène a donc été retenu pour la modélisation.

Ce site étant protégé de la houle du large, le niveau de la mer modélisé ne prend pas en compte la surcote de déferlement.

Saint-Josse (62) : rupture de digue

Ce site a été submergé à plusieurs reprises par le passé suite à des ruptures de digue. La tempête des 4 et 5 octobre 1967 a ainsi entraîné une brèche d'une trentaine de mètres de largeur. Conformément à la circulaire du 27 juillet 2011, la largeur de brèche retenue pour la modélisation est 100 mètres.

Le site étant localisé en amont dans l'estuaire de la Canche, il est bien protégé de la houle. Le niveau de la mer considéré pour la modélisation ne tient donc pas compte de la surcote de déferlement.

Les données topographiques issues du LIDAR présentent des lacunes dans ce secteur. DHI a utilisé des données issues du MNT PPIGE afin de compléter et d'étendre le modèle créé sur ce site. Le MNT PPIGE présente une précision planimétrique de 35 cm en zone urbaine et 45 cm en zone rurale et une précision altimétrique de 50 cm en zone urbaine et 75 cm en zone rurale. En conséquence les cartographies des inondations sur ce site sont présentées à titre indicatif.

Le Touquet-Paris-Plage (62) : rupture et surverse de digue

L'analyse des données LIDAR a montré qu'il existait un point bas sur la digue de l'aéroport du Touquet. Bien que ce point n'ait pas été repéré dans l'étude VSC, l'étude morphologique a révélé un risque de rupture. L'hypothèse d'une brèche dans cet ouvrage a été retenue pour la modélisation.

Compte tenu de la circulaire du 27 juillet 2011, une brèche de 100 mètres a été retenue pour la modélisation. De plus la modélisation tient compte des débordements éventuels par-dessus la partie de digue toujours existante.

De par sa situation, ce site est protégé de la houle, et le niveau de la mer à l'entrée de la brèche ne tient donc pas compte de la surcote de déferlement.

Il est à noter que deux positions de brèche distinctes ont été simulées sur ce secteur.

La modélisation de la rupture de l'ouvrage sur la Grande Tringue est également effectuée. DHI considère une brèche de la largeur de l'ouvrage, soit 12 m.

Les résultats présentés sont alors une combinaison des résultats obtenus pour chacune des trois simulations indépendantes et non pour des brèches simultanées.

Le manque de données topographiques indiqué pour Saint-Josse concerne également en partie ce secteur. Là aussi, le modèle créé par DHI sur le site du Touquet-Paris-Plage inclue les données du MNT PPIGE. Les cartographies des inondations sur ce site sont donc présentées à titre indicatif.

Berck (62) : franchissement de perré

Le franchissement du perré de Berck a été relevé en 1912, 1923 et en 1990.

Le perré de Berck est relativement élevé, la cote de la crête de l'ouvrage se situe à 12,75 m IGN 69 au Nord et à 10,5 m IGN 69 au Sud. Pour l'évènement centennal, la revanche de l'ouvrage est trop importante pour permettre des franchissements par paquets de mer.

Ce site n'est donc pas retenu pour la modélisation.

Groffliers (62) : rupture du cordon dunaire

Secteur dunaire en forte érosion, ce site a été identifié avec VSC comme potentiellement submersible si la dune venait à disparaître suite à une forte tempête érosive.



Figure 5-7 : trait de côte de 1947(source: CETE) et de 2006

Une brèche de 100 mètres a été retenue pour la modélisation, conformément à ce que préconise la circulaire du 27 juillet 2011.

Le cordon dunaire est néanmoins élevé, c'est pourquoi aucun débordement par-dessus la dune n'est simulé.

Ce secteur étant protégé de la houle, le niveau de la mer à l'entrée de la brèche ne tient donc pas compte de la surcote de déferlement.

De plus, l'étude morphologique menée sur le chemin Delesalle, chemin creusé au travers du cordon dunaire a montré une possibilité de rupture. En effet la revanche au niveau extrême est égale à 0,12 mètres, la longueur L à 19 mètres et la hauteur au terrain naturel H est égale à 0,9 mètres. Ce site a donc été retenu comme potentiellement submersible en cas de rupture du cordon dunaire. Néanmoins, le cordon dunaire ne présentant pas de risque de rupture à d'autres endroits, la largeur de la brèche modélisée est fixée à 10 mètres.

Ce secteur étant protégé de la houle, le niveau de la mer à l'entrée de la brèche ne tient donc pas compte de la surcote de déferlement.

Groffliers (62) : rupture de l'ouvrage hydraulique et surverse

L'analyse des données LIDAR ainsi que l'étude VSC ont montré qu'il existait un point bas au niveau du petit port de la Madelon. En outre la tempête de 1990 fait état de 10 ha de champs inondés du fait de franchissement de la mer au-dessus de la route au niveau de la Madelon.

Compte tenu du risque de rupture de l'ouvrage hydraulique révélé par l'étude VSC, outre le franchissement de la route, une brèche de la largeur de l'ouvrage, 16 mètres, a été retenue pour la modélisation. La surverse par-dessus les digues est également prise en compte.

Ce secteur étant protégé de la houle, le niveau de la mer à l'entrée de la brèche ne tient donc pas compte de la surcote de déferlement.

Tableau 5-1 : Principales caractéristiques retenues pour la modélisation

Site	Débordement	Franchissement	Rupture
Bray-Dunes		√	√
Malo-les-Bains		√	
Dunkerque			√
Oye-Plage et rives de l'Aa	√		√
Marck	√		
Calais	√		
Blériot-plage			√
Sangatte			√
Wissant		√	
Tardinghen			√
Audresselles		√	
Ambleteuse		√	
Wimereux		√	
Etaples	√		
Saint-Josse	√		√
Le Touquet- Paris-Plage	√		√
Groffliers			√

Les autres sites étudiés mais n'étant pas considérés soumis à l'aléa submersion sont listés dans le tableau suivant.

Tableau 5-2 : Sites étudiés mais non soumis à la submersion

Site	Justification
Leffrinckoucke	La dune est située au-dessus du niveau millénal, et ne présente donc pas de risque de débordement. L'étude VSC n'a par ailleurs pas fait apparaître de risque de rupture du cordon dunaire
Zuydcoote	La dune est située au-dessus du niveau millénal, et l'étude VSC n'a pas fait apparaître de risque de rupture du cordon dunaire
Marck	Des dunes se sont formées en face de l'ouvrage depuis la tempête de février 1953, supprimant le risque de rupture de digue
Sangatte, secteur Est	Une rupture historique a eu lieu sur ce secteur, mais l'étude VSC n'a pas fait apparaître de risque dans l'état actuel
Merlimont-Plage	La topographie étant actuellement assez haute, ce site n'a pas été retenu pour la modélisation de rupture du cordon dunaire. Les dunes sont en effet situées environ 7 m au-dessus du niveau centennal. Le perré est quant à lui situé environ 3 m au-dessus de ce même niveau (cote comprise entre 10 et 11 m IGN69).
Stella-Plage	Aucune tempête historique n'a été identifiée sur ce site ; le perré y est relativement haut (3,70 m au-dessus du niveau centennal), rendant son franchissement impossible
Le Touquet-Paris-Plage (façade ouest)	Aucune tempête historique n'a été identifiée sur ce site ; le perré y est relativement haut (cote comprise entre 10 et 11 m IGN69, soit 3,70 m au-dessus du niveau centennal), rendant son franchissement peu probable
Hardelot-Plage	Aucune tempête historique n'a été identifiée sur ce site ; le perré y est relativement haut (environ 10 m IGN69, soit localement 2 m au-dessus du niveau décennal, 4 m ailleurs), rendant son franchissement impossible
Boulogne-sur-Mer	L'étude VSC et l'analyse topographique n'ont pas fait apparaître de risque de débordement.
Berck	Le perré de Berck est élevé, la cote de la crête de l'ouvrage se situe à 12,75 m IGN 69 au Nord et à 10,5 m IGN 69 au Sud. Pour l'évènement centennal, la revanche de l'ouvrage est trop importante pour permettre des franchissements par paquets de mer.

L'emplacement de chaque site étudié et discuté précédemment est présenté sur les figures Figure 5-9 à Figure 5-12. Ces cartes présentent les phénomènes modélisés pour les sites retenus, ainsi que les largeurs de brèches en cas de rupture et les cotes de points bas ou de perré en cas de débordement ou franchissement. La justification des sites non retenus est également rappelée. La légende est présentée en figure Figure 5-8.

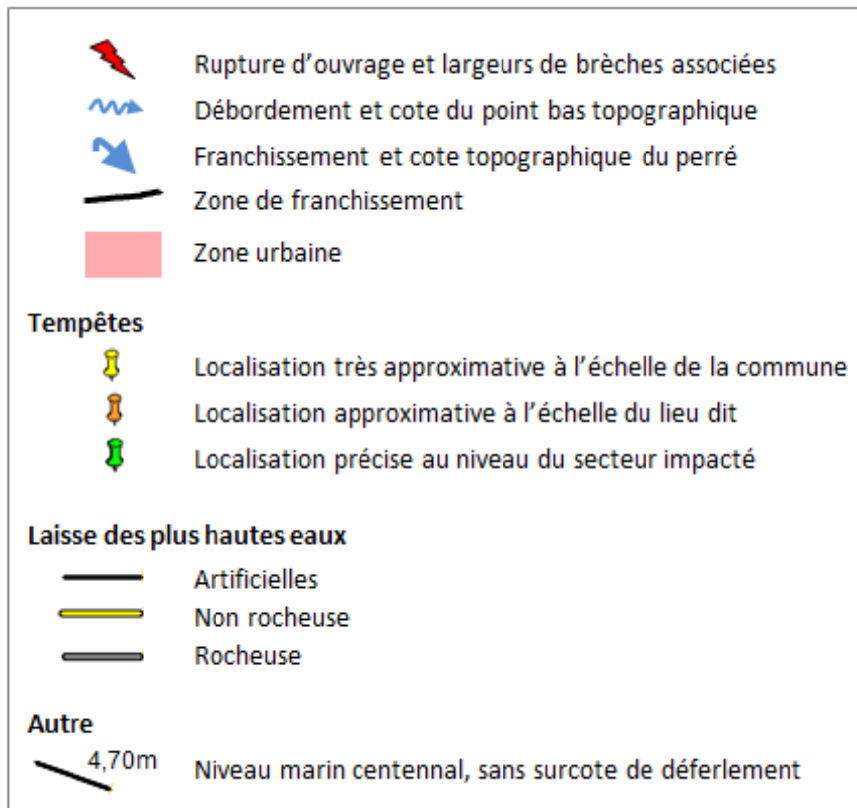


Figure 5-8 : Légende des cartes informatives

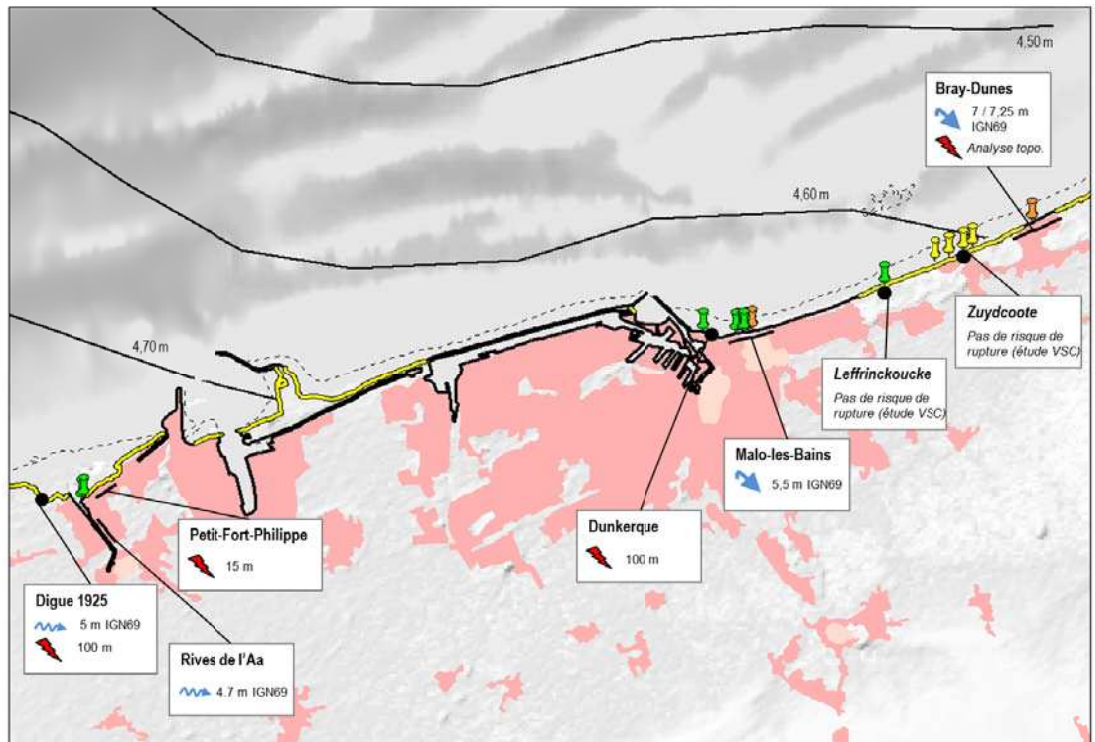


Figure 5-9 : Sites étudiés sur le secteur 1, côté Est

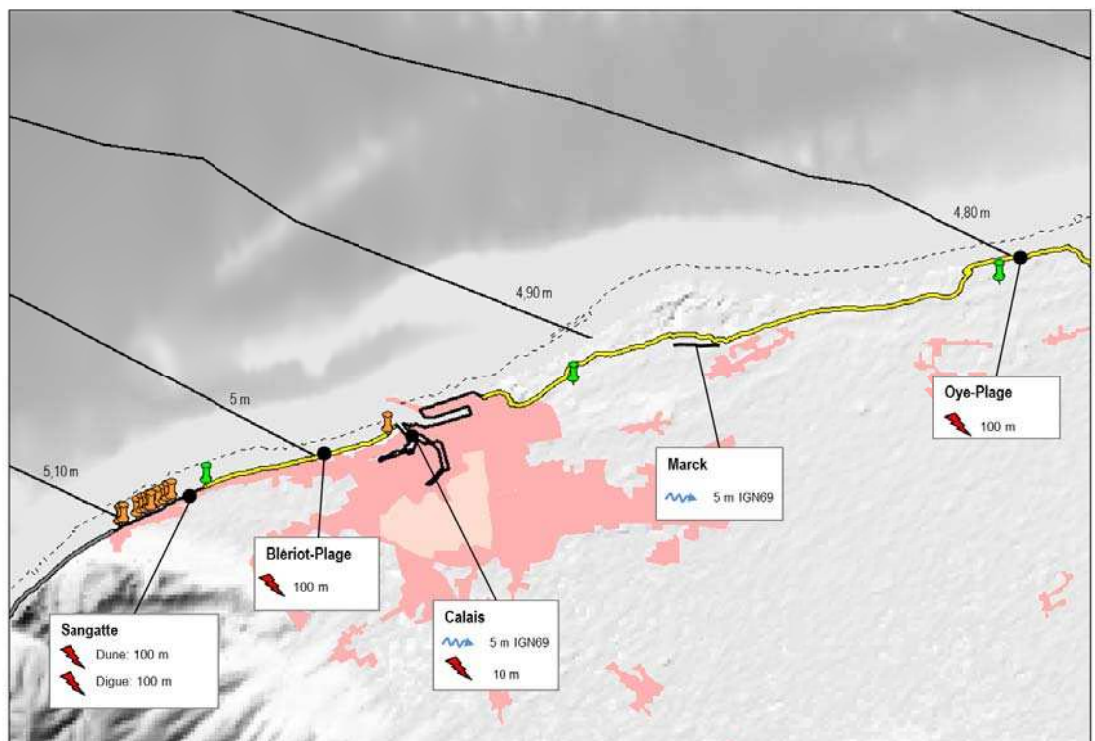


Figure 5-10 : Sites étudiés sur le secteur 1, côté Ouest

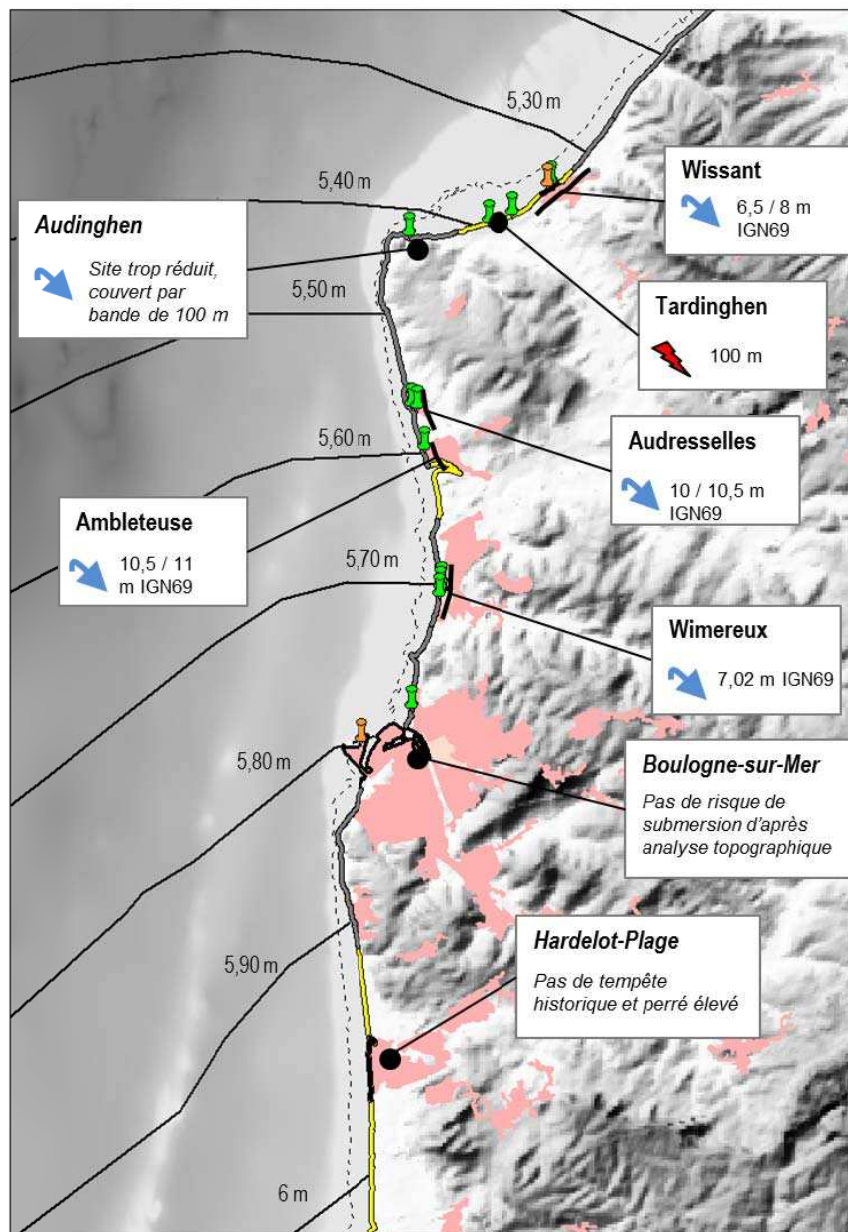


Figure 5-11 : Sites étudiés sur le secteur 2, partie Nord

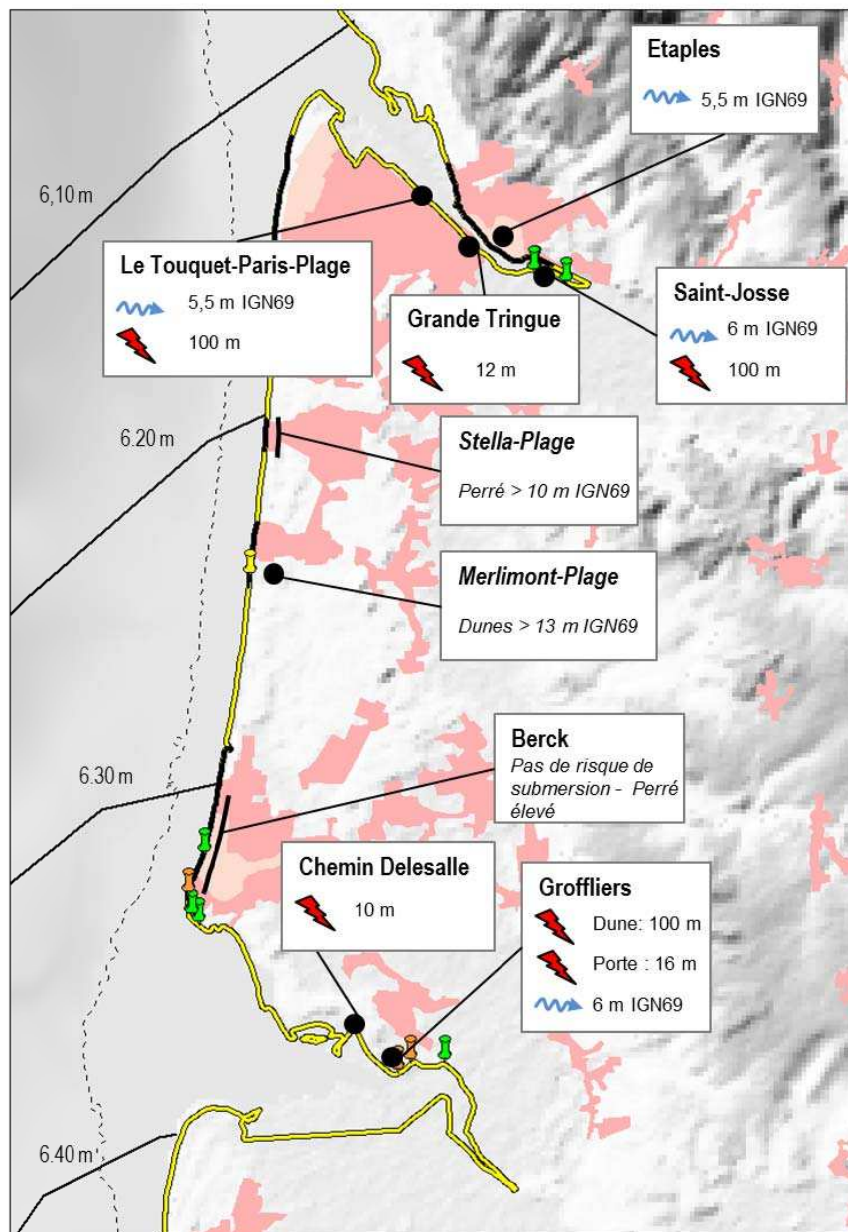


Figure 5-12 : Sites étudiés sur le secteur 2, partie Sud

6 MODELISATION DU PHENOMENE DE SUBMERSION

6.1 Principe généraux

Dix-sept sites ont potentiellement été identifiés comme secteurs à risque du point de vue de la submersion marine.

Pour chacun des sites, un modèle de submersion a été mis en place. Chacun de ces modèles calcule l'évolution des hauteurs et vitesses d'écoulement, dans le temps et l'espace, en fonction d'un débit imposé en frontière du modèle. Trois types de submersion sont considérés (rupture, franchissement et débordement). Ainsi le débit à l'entrée est estimé en utilisant les caractéristiques de brèche (rupture), de houle (franchissement), de niveau de la mer en comparaison à la cote des quais ou des berges (débordement).

6.1.1 Présentation du logiciel de modélisation

Les modèles de submersion ont été élaborés à l'aide du logiciel MIKE 21. Il utilise une description bidimensionnelle permettant de représenter les écoulements à surface libre, tant dans les zones côtières que dans les lacs, les rivières et les estuaires. Le code résout les équations de Barré-de-Saint-Venant en différences finies pour les régimes transitoires. Pour la présente étude, il permet de simuler les écoulements en tenant compte du frottement sur le fond, des écoulements torrentiels, présents essentiellement dans les ruptures, des moments convectifs et croisés, de la dispersion de la quantité de moments et du recouvrement / découverture des zones sèches.

6.1.2 Description de la topographie

La topographie du modèle est issue du MNT du levé LIDAR et interpolé sur un maillage régulier avec une résolution de 3 mètres. Cette taille de maille permet de tenir compte notamment des routes, des bâtiments et éventuellement des ouvrages identifiés lors du levé LIDAR. Le modèle de Dunkerque et celui d'Oye-Plage et des rives de l'Aa présentent une résolution de 8 m, afin de pouvoir couvrir de plus grandes étendues. Nous avons également retenu une résolution de maille de 6 mètres pour le modèle du Touquet après l'extension de bathymétrie réalisée à partir des données PPIGE. Ces différentes résolutions permettent de tenir compte des éléments structurants (digues, et routes), et des tests réalisés en début d'étude à une échelle locale avec une résolution de 3 m ont montré une grande similitude de résultats. A noter par ailleurs qu'une réduction d'un facteur 2 de la taille de la maille augmente le temps de calcul d'un facteur 8 environ.

Ainsi les ouvrages conditionnant la propagation des inondations, autres que les ouvrages littoraux (remblais routiers ou digues de protection), sont directement inclus dans la topographie. De ce fait, lorsque le niveau de l'inondation dépasse le niveau de ces ouvrages, le modèle reproduit automatiquement le débordement.

Les bâtiments sont de plus supposés être transparents vis-à-vis des écoulements, c'est-à-dire que leur altitude est rapportée au terrain naturel. Cette approche est justifiée par le fait qu'elle permet de tenir compte de la présence d'eau dans les bâtiments. En effet la représentation des volumes d'eau est un critère important dans l'étude de submersions marines. Les tests de sensibilité sur le site de Dunkerque, tenant compte de l'ensemble

des bâtiments, et sur le site de Wissant, tenant compte de la première rangée de bâtiment le long du perré, ont montré que la prise en compte des bâtiments avait :

- un impact global sur l'étendue de la submersion. L'intégration des bâtiments a pour conséquence une réduction de l'emprise globale de la submersion par effet de rugosité.
- un impact local sur l'intensité de l'aléa. L'intégration des bâtiments a pour conséquence une augmentation des aléas par une structuration de la vitesse le long des axes viaires ainsi que le report des volumes qui ne sont pas mobilisés dans les bâtiments.

L'emprise de ces modèles détaillés a été déterminée en fonction des enveloppes obtenues à partir des modèles plus grossiers présentant une maille de 100 m.

La figure ci-après présente un exemple de topographie modélisée sur le site de Groffliers.

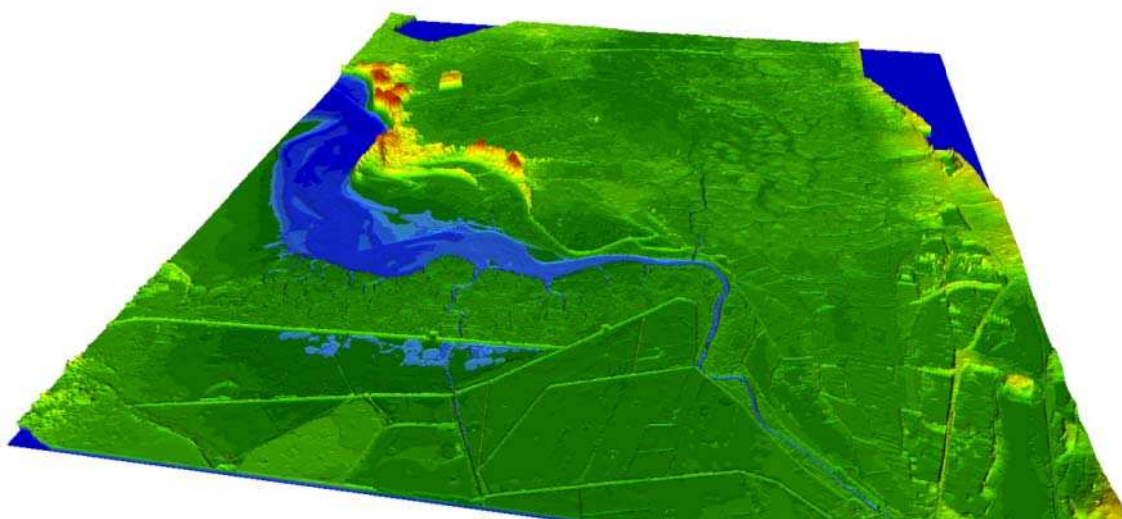


Figure 6-1 : Exemple de MNT utilisé pour la modélisation (Site de Groffliers)

6.1.3 Zones blanches de la topographie

Sur les sites du Touquet – Paris-Plage, Saint-Josse, Groffliers et Wissant, les données topographiques du LIDAR ne suffisent pas à décrire l'emprise maximale de la submersion.

Pour les sites du Touquet – Paris-Plage et de Groffliers, la topographie a été étendue à l'aide de données issues du MNT PPIGE disponible sur la région du Nord – Pas-de-Calais dont les précisions sont rappelées au §5. En conséquence, l'inondation calculée sur ces zones non couvertes par le LIDAR est peu précise, mais permet néanmoins de ne pas avoir « d'effet de mur » qui surestime les paramètres hydraulique près des frontières du modèle. La localisation des parties de modèle étendues à partir des données du PPIGE est précisé dans les monographies par site.

Sur Wissant, la topographie couverte par le LIDAR ne comprend pas l'ensemble de l'étang situé au Sud de ce site. La topographie a été étendue sur la surface totale de l'étang avec la même valeur, afin de bénéficier d'une continuité sur ce point d'eau.

6.1.4 Conditions aux limites

Dans le cas de débordement ou d'écoulement à travers une brèche, le modèle intègre directement le niveau de la mer comme condition limite. Le débit pénétrant sur le site étudié est alors calculé automatiquement en fonction de la topographie ou des caractéristiques de la brèche, à l'aide d'une équation de seuil.

Dans le cas des franchissements, les débits calculés suivant la formulation empirique proposée dans le « Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures - Assessment Manual », sont imposés en condition aux limites dans le modèle hydrodynamique.

L'ensemble des données locales et notamment des surcotes de déferlement par site est donné dans les monographies par sites.

6.1.5 Calage du modèle

Tout modèle hydraulique nécessite un calage afin de satisfaire au principe d'analogie. Le calage est la phase qui consiste à ajuster les paramètres de calcul du modèle, afin que celui-ci reproduise correctement un événement historique donné. Cette étape requiert donc des informations détaillées sur les conditions rencontrées lors de cet événement.

Dans un contexte de submersion marine, les éléments conditionnant les résultats du modèle sont :

- La qualité du MNT utilisé pour la description de la topographie (incluant notamment les digues de protection) ;
- La rugosité du sol ;
- La géométrie (altitude, largeur) de la brèche éventuelle ;
- L'instant de la rupture par rapport à la marée ;
- La vitesse de rupture ;
- Le nombre de cycle de marée simulé.

La sensibilité à chacun des facteurs ci-dessus est variable pour chaque secteur étudié. En effet chaque site présente des conditions topographiques et des conditions de marée qui lui sont propres.

La difficulté souvent rencontrée dans le domaine des submersions marines réside dans l'absence ou la faible disponibilité de données de calage. Dans le cadre de cette étude, seul l'événement survenu sur Dunkerque en 1953 rassemble le minimum de données pour que soit entreprise une opération de paramétrage du modèle hydraulique.

Ainsi, le calage a été effectué sur la rupture de la digue des Alliés à Dunkerque en février 1953. Pour cela les conditions suivantes ont été simulées :

- Niveau de pleine mer de 5,31 m IGN69 ;
- 2 brèches dans la digue des Alliés présentant une largeur totale de 50m ;

- Début d'apparition des brèches à 2h20 ;
- Brèches totalement ouvertes à partir de 3h20.

La figure ci-après présente les résultats de cette simulation, à confronter aux informations récoltées suite à l'inondation de 1953.

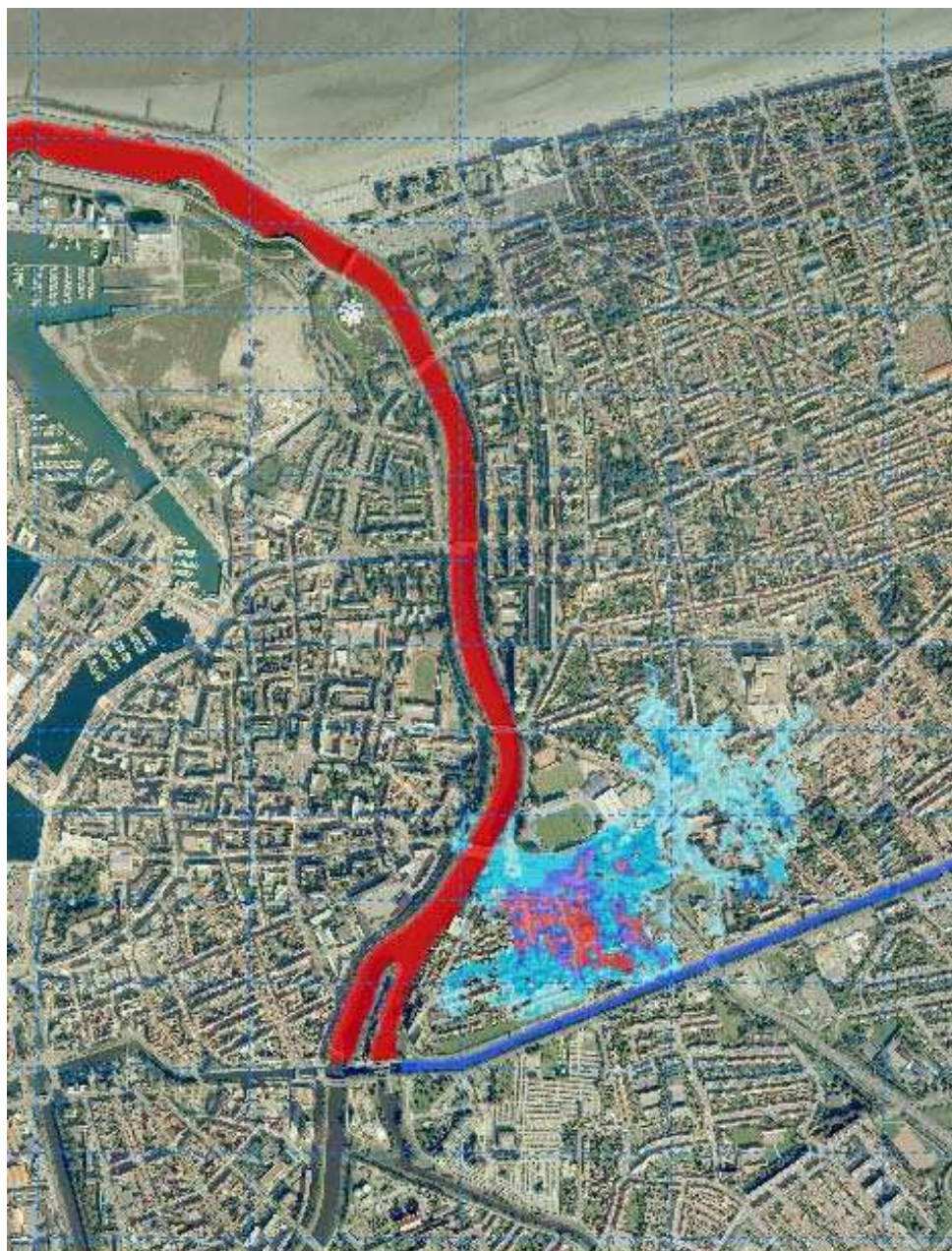


Figure 6-2 : Résultat de la simulation de la rupture de digue de 1953 à Dunkerque

Cette figure montre que l'emprise des inondations issue de la modélisation est proche de la description faite de l'événement historique (elle ne comprend pas les dommages relevés dans la zone de l'avant-port, représentés par ailleurs). En effet, la cote mesurée pour l'inondation historique au droit d'une laisse de crue relevée rue Paul Dufour est d'environ 3,7 m NGF (soit 70cm d'eau dans la rue), tandis que la cote maximale

calculée par le modèle à cet endroit est de 3,78 m NGF. Cependant l'exercice mérite d'être relativisé dans la mesure où les données les plus incertaines correspondant à la géométrie et à la cinétique de la brèche sont précisément les paramètres les plus sensibles du modèle.

Il est à noter que les caractéristiques simulées pour cet événement diffèrent sensiblement des conditions retenues pour les événements de référence. En effet l'ouverture de la brèche pour cet événement est initiée environ 1h30 plus tard que pour les événements de référence, en comparaison à l'heure de la pleine mer. De plus pour la représentation de la rupture de 1953, l'ouverture de la brèche s'effectue sur une durée de 1h, contre seulement 15 minutes pour les autres simulations de projet. Ces différences engendrent un écart significatif de volume entrant dans le canal exutoire, ce qui explique les différences entre les résultats observés sur les conditions de 1953, et ceux présentés au chapitre 8, tant pour l'événement décennal que pour l'événement centennal.

6.1.6 Limites du modèle

Un modèle hydraulique de propagation des inondations a été construit avec le logiciel MIKE 21. Ce modèle, présentant un maillage fin d'une résolution de 3 m (localement 8 m et 6 m), reproduit les principales caractéristiques topographiques des secteurs potentiellement exposés à la submersion marine.

Le modèle a été construit sur la base des données topographiques LIDAR, présentant une importante densité de mesures. Néanmoins, toute mesure altimétrique présente une incertitude qui se répercute sur la précision du modèle. L'incertitude de ce dernier est donc de l'ordre de 20 cm en altitude. Dans le plan horizontal, la précision du modèle est liée à sa résolution, c'est-à-dire que l'incertitude sur l'extension des inondations est de l'ordre de quelques mètres. Cette précision est donc compatible avec une analyse des cartes à une échelle 1/5000^{ème}.

Pour les sites pour lesquels une rupture de digue ou de cordon dunaire est étudiée, la modélisation est par ailleurs effectuée suivant l'hypothèse d'apparition d'une unique brèche par site. Pour les sites de Sangatte, Rives de l'Aa et Le Touquet-Paris-Plage, plusieurs positions de brèche ont été simulées, mais pas de manière simultanée. Ainsi, l'hypothèse d'apparition de brèches multiples et simultanées sur chaque site n'a pas été retenue. Cette hypothèse conduirait à se rapprocher de l'hypothèse d'effacement des ouvrages, qui a été écartée afin de ne pas surestimer l'aléa. Les largeurs des brèches ainsi retenues sont fixées de manière forfaitaire en s'appuyant sur les retours d'expérience régionaux ou nationaux, dans la mesure où il n'est pas possible d'estimer *a priori* ces largeurs, qui dépendent de nombreux facteurs.

De plus les ruptures ne sont considérées que pour les ouvrages littoraux, et non pour les ouvrages de second rang situés à l'intérieur des terres. Cette hypothèse vise également à ne pas surestimer l'aléa derrière ces ouvrages de second rang. Il est néanmoins à noter que la simulation de brèches dans ces digues aboutirait à une augmentation de l'aléa au-delà de ces ouvrages, mais pourrait sous-estimer l'aléa sur les secteurs compris entre ces ouvrages et la mer du fait d'une réduction du niveau de l'eau.

Le phénomène de franchissement de perré dépend de nombreux facteurs, dont la variabilité des caractéristiques des vagues qui ne peut être reproduite. Le franchissement par paquet de mer est en effet un phénomène discontinu, ce qui rend délicate

l'estimation de ces débits. Ainsi le débit de franchissement, variable suivant la fréquence des vagues, est représenté par un débit moyen, qui ne représente pas l'amplitude maximale du débit instantané. Enfin, le modèle reproduit l'écoulement de ces débits moyens de franchissement, en les supposant s'écouler à la surface des perrés. Or l'expérience montre que le franchissement d'ouvrage s'observe lorsque la mer est déchainée, et s'accompagne parfois de la projection de galets. Toute la violence du phénomène ne peut donc être reproduite par le modèle, ce qui justifie un traitement spécifique pour la cartographie de l'aléa sur ces secteurs, tel que décrit au chapitre suivant.

Les résultats présentés dans ce document présentent des cartographies d'inondation déterminées pour le seul risque de submersion marine. Par conséquent, les éventuelles concomitances avec les crues « continentales » ne sont pas considérées. Il faut enfin signaler que ces résultats s'appuient sur la position et les caractéristiques actuelles du trait de côte, et ne prennent pas en compte l'évolution attendue du changement climatique. L'analyse de l'évolution du trait de côte et de ses effets sur l'exposition du littoral au risque de submersion, ainsi que les conséquences du changement climatique font l'objet de la phase suivante de la présente étude.

6.2 *Hypothèses particulières appliquées aux sites à rupture et aux sites à débordement*

6.2.1 *Les conditions aux limites*

Chaque simulation est effectuée sur deux cycles de marée (environ une journée). On suppose alors que la surcote météorologique liée au passage de la dépression et la surcote de déferlement s'appliquent lors de la première pleine mer, tandis que seul un reste de surcote météorologique s'applique lors de la seconde pleine mer. En effet, la surcote de déferlement est générée par les fortes houles qui n'interviennent généralement que sur la première partie de la tempête. La figure ci-après illustre en exemple une condition de marée utilisée pour la modélisation.

Au-delà de deux cycles de marées, on vérifie que la propagation de l'inondation devient négligeable (c'est-à-dire que son étendue n'évolue plus) par comparaison de l'inondation à deux instants distincts. On considère par ailleurs que sur des durées supérieures à deux cycles, l'évolution de l'inondation (sa propagation ou à l'inverse son retrait) dépend de paramètres n'étant pas modélisés (réseau de drainage, pompage, réseaux d'eaux pluviales, infiltrations, interventions humaines, etc.).

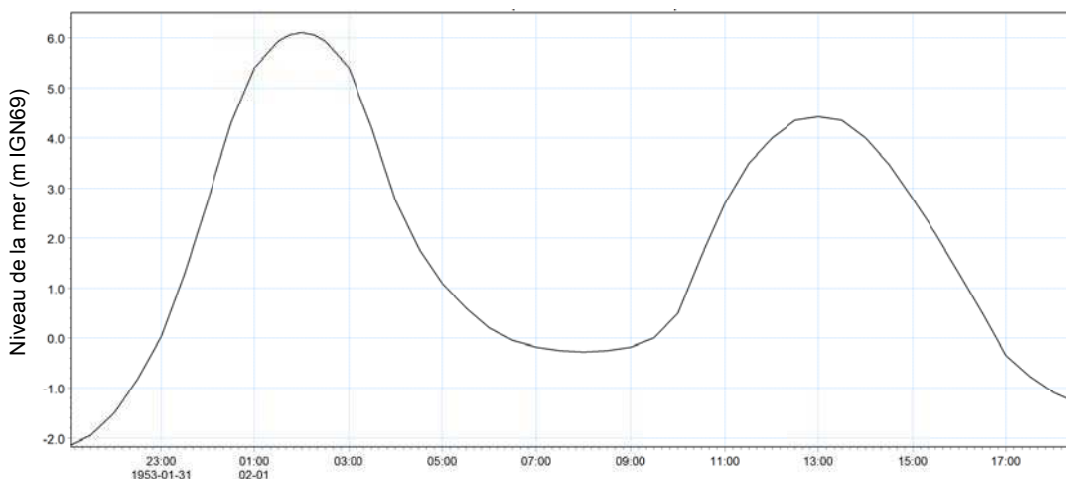


Figure 6-3 : Exemple de condition de marée simulée

6.2.2 Représentation des brèches

Pour les sites présentant des ruptures de digue ou de dune, la brèche est représentée de manière simplifiée compte tenu des incertitudes existant sur sa géométrie exacte. La géométrie d'une brèche dépend en effet fortement de plusieurs facteurs tels que l'état de l'ouvrage à l'instant de la rupture ou les conditions de la mer. Il n'est donc pas possible de définir avec certitude quelle sera la forme de la brèche pour un site donné. Par conséquent, les brèches sont représentées avec des largeurs fixes dans le temps.

Il n'est de plus pas possible de corrélérer la géométrie de la brèche à la période de retour des événements étudiés. De ce fait la description des brèches présentées ci-après s'applique aux différentes périodes de retour étudiées.

Chaque brèche est finalement caractérisée par une forme trapézoïdale, comme illustré ci-dessous.

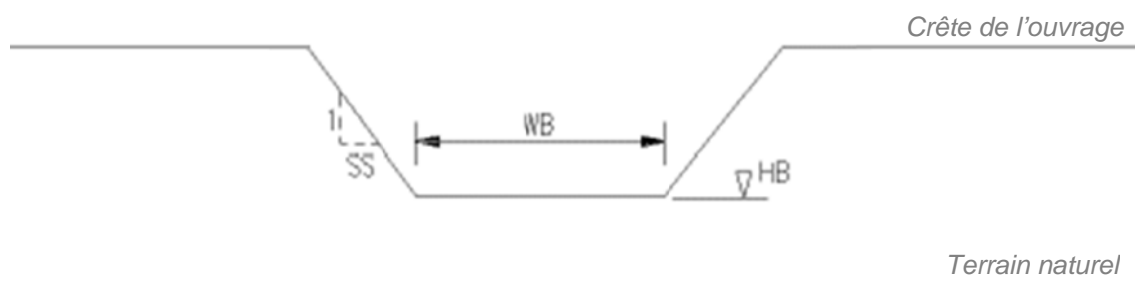


Figure 6-4 : Exemple de représentation de brèche

En effet pour les ouvrages de faible hauteur, la largeur de la brèche est généralement grande par rapport à la hauteur, et le fond de la brèche peut être supposé horizontal car il est limité par la topographie du terrain naturel. De ce fait, une brèche dans une digue ou un cordon dunaire peut s'apparenter à une forme rectangulaire, à laquelle on peut ajouter des pentes transversales afin de mieux représenter la réalité, puisque sous l'effet de l'érosion les parois latérales de la brèche ne peuvent être verticales. Cependant, du

fait de la faible hauteur de l'ouvrage, la section d'écoulement est peu dépendante de la valeur de cette pente, et est au contraire principalement caractérisée par la largeur de la brèche.

La brèche est ainsi décrite par trois paramètres : la largeur au point bas de la brèche (notée WB), la cote de ce point bas (HB), ainsi que la pente transversale (SS).

Pour les brèches simulées dans les cordons dunaires, la pente transversale est de 1/1 (1 m vertical pour 1 m horizontal). Pour les digues, la pente est plus abrupte et vaut 3/1 (3 m vertical pour 1 m horizontal).

La cote du point bas de la brèche est variable dans le temps : elle est initialement égale au niveau maximal de la mer, puis s'abaisse jusqu'à la cote du terrain naturel

Enfin, la largeur des brèches est fixe dans le temps et est par défaut égale à 100 mètres (excepté le chemin Delesalle à Groffliers et à Petit Fort Philippe où l'hypothèse ne peut être physiquement retenue). Les ouvrages particuliers (portes à la mer, écluse,...) lorsque le principe de la défaillance a été retenu sont quant à eux modélisés dans leur géométrie réelle (Calais, Grande Tringue et Madelon).

Ces brèches ne sont simulées que sur les ouvrages littoraux, et non sur les digues situées à l'intérieur des terres. En effet ces derniers ne sont pas exposés à la même violence de la mer que les ouvrages littoraux, bien que leur débordement puisse être à l'origine d'une érosion. On considère donc dans les simulations que ces ouvrages ne présentent pas de brèches.

Un seul site (Dunkerque - rupture de la digue des Alliés) présente cependant un ouvrage de second rang plus directement exposé : il s'agit de l'ouvrage de jonction, considéré en position fermée lorsque la rupture se produit (au regard des consignes et pratiques de gestion de cet ouvrage, il apparaît qu'en l'absence de crues continentales – ce qui correspond au postulat dans lequel se place l'étude de submersion marine – l'ouvrage est réputé fermé pour maintenir les niveaux normaux de navigation).

La formation de la brèche conduit à la propagation, dans le canal exutoire, d'une onde de submersion particulièrement violente, qui vient frapper l'ouvrage de jonction en lui appliquant une charge hydraulique soudaine et brutale. Elle le surverse pendant quelques heures. Dans cette configuration, on ne peut exclure le risque de rupture de cet ouvrage de second rang, ce qui propagerait l'onde de submersion à l'aval.

Bien que l'hypothèse d'une rupture partielle ou totale de l'ouvrage de jonction n'ait pas été étudiée dans le cadre de la présente étude (cela nécessiterait une approche de modélisation distincte, et adaptée au réseau des Wateringues), elle pourrait faire l'objet d'une étude complémentaire.

6.2.3 Tests de sensibilité

En l'absence de calage sur les modèles des tests paramétriques ont été réalisés de manière à appréhender la réponse des modèles aux hypothèses formulées. Plusieurs tests de sensibilités concernant la durée de formation de la brèche et l'instant de la

rupture de l'ouvrage ont été menés sur différents sites pilotes de la zone d'étude dans les phases d'étude précédentes.

Des tests de sensibilité à l'instant d'initiation de la brèche et à la durée d'ouverture de la brèche ont ainsi été effectués pour les ruptures de digue à Dunkerque et à Sangatte, où les effets dynamiques de la propagation de l'inondation sont importants. Ces tests ont permis de montrer d'une part qu'une durée d'ouverture sur une durée supérieure à 15 min (test effectués à 30 et 60 min) tend systématiquement à réduire l'emprise des inondations, plus précisément l'afflux d'eau dans les premiers temps de l'inondation, diminuant également la vitesse des écoulements. Le retour d'expérience acquis sur les études de dangers des ouvrages maritimes ou des cordons dunaires montre que les temps de formation de brèche compris entre 15 et 30 minutes sont réalistes. La rupture instantanée sur ce type d'ouvrage ne peut quant à elle être retenue. La durée de 15' retenue pour l'étude apparaît donc à la fois sécuritaire et réaliste.

D'autre part ces tests ont aussi montré que l'instant de l'ouverture de la brèche est important. Des tests ont été réalisés avant PM-1h, à PM-1h, à PM et PM+1h. En débutant l'ouverture des brèches 1 h avant la pleine mer, l'étendue des inondations est maximale. En effet, une ouverture plus tôt que l'instant retenu fournit une emprise similaire mais diminue les vitesses d'écoulement maximales, et donc l'aléa maximal dans les zones proches de la brèche, tandis qu'une ouverture plus tard que l'instant retenu réduit considérablement la zone inondée et sous-estime donc l'aléa. Enfin le principe de réalité ne tend pas à proposer une rupture avant PM-1h, la défaillance des ouvrages étant dépendant de la charge hydraulique qu'ils supportent.

6.2.4 Hypothèses retenues

Les hypothèses retenues pour les brèches simulées sont donc une ouverture de brèche 1h avant la pleine-mer sur une durée de 15 minutes. Cette durée, très courte, résulte d'un choix sécuritaire, puisqu'elle permet à la mer de s'engouffrer rapidement au-delà de l'ouvrage. Cette hypothèse reste cependant réaliste, contrairement à une rupture instantanée qui néglige totalement la durée d'affaissement de l'ouvrage. Cet abaissement rapide de la brèche est initié 1 heure avant la pleine mer. Cet instant résulte d'un choix, puisqu'il n'est pas possible de le corréliser aux conditions de mer, dans la mesure où il dépend notamment du matériau et de l'état de l'ouvrage. Cet instant a également pour objectif de représenter une rupture pénalisante, puisqu'il représente un compromis entre :

- une rupture intervenant à la pleine mer, qui conduit à de fortes vitesses d'écoulement (dues au fort dénivelé entre le niveau de l'eau et celui du terrain naturel derrière la digue) mais un volume d'eau entrant limité par l'apparition tardive de la brèche ;
- une rupture apparaissant tôt lors de la marée montante, qui conduit à un grand volume d'eau entrant et donc de grandes hauteurs d'eau, mais des vitesses faibles.

Sur les sites où les conditions générales ne peuvent s'appliquer, les hypothèses particulières sont précisées dans les monographies.

6.3 Hypothèses particulières appliquées aux sites à franchissements

Dans les cas de franchissement, les conditions de houle à deux kilomètres du rivage sont propagées avec un modèle 1D pour calculer le niveau de la mer et la hauteur de houle au pied de l'ouvrage. Le débit en provenance de la mer est estimé en fonction de ces conditions au pied de l'ouvrage de protection.

Ce débit est calculé pour une seule pleine mer, car le franchissement est généré par la forte houle qui, comme dans le cas précédent, n'apparaît que sur un cycle de marée. Le débit ainsi calculé pour les différents sites est fourni dans les monographies par sites.

Pour chaque période de retour, plusieurs couples Niveau de la mer / Hauteur de houle sont possibles. Chacun de ces couples sont alors testés pour finalement retenir le couple le plus pénalisant, c'est-à-dire celui générant le plus de débit d'après la formule indiquée précédemment. Les couples de niveau marin et de hauteur significative de houle (H_s), finalement retenus à deux kilomètres du rivage pour la modélisation sont présentés dans les monographies par sites. Les couples de niveau marin et de hauteur de houle (H_s) calculés par le modèle à la verticale du pied de l'ouvrage sont également fournis dans les monographies par sites.

La figure suivante illustre ces paramètres (niveau marin et hauteur de houle), à deux kilomètres du rivage et à la verticale du pied de l'ouvrage.

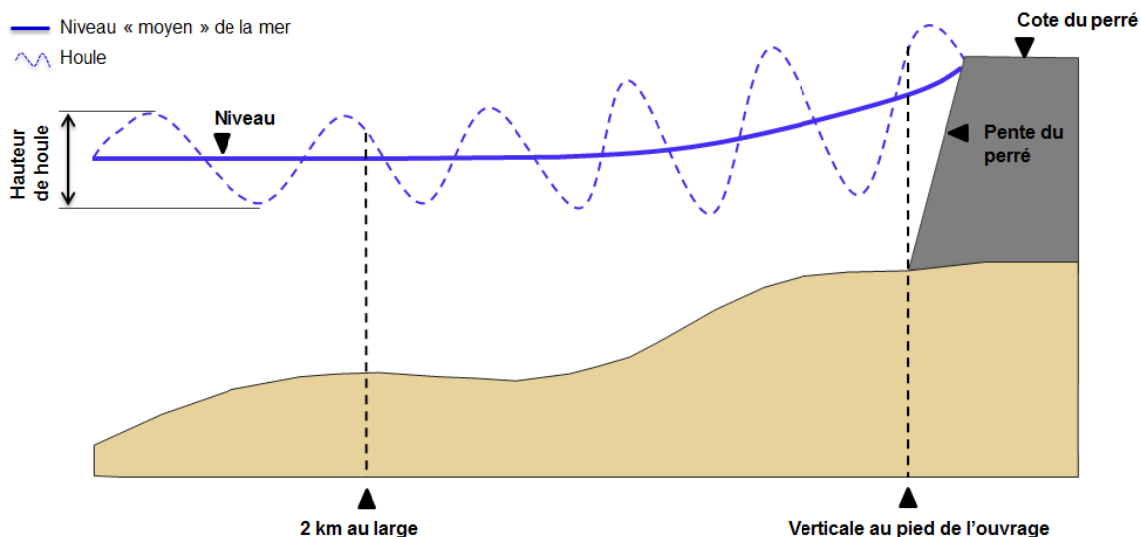


Figure 6-5 : Niveau marin et hauteur de houle, au large et au pied de l'ouvrage

La figure ci-dessous présente la chaîne de calcul pour la submersion du franchissement par paquets de mer.

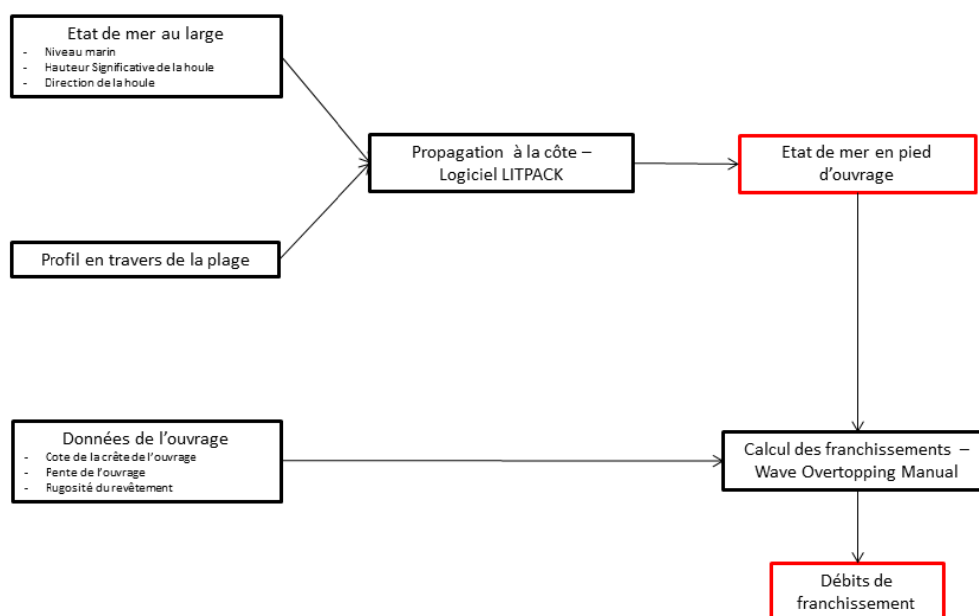


Figure 6-6 : Chaîne de calcul des débits de franchissement par paquets de mer au pied de l'ouvrage

La propagation des états de mer du large jusqu'en pied d'ouvrage est effectuée grâce au logiciel LITPACK (cf. paragraphe 4.6).

Les calculs de débits de franchissement sont effectués à partir de l'application des formulations empiriques qui ont été développées et calées par l'université de Wallingford (formulation issue du « Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures - Assessment Manual »). La géométrie générale du perré guide en grande partie les débits. Cette géométrie est décrite par les cotes et les pentes du perré, la présence de bermes et de risbermes, la présence ou non d'un couronnement.

En règle générale les couronnements des perrés ne sont pas intégrés dans le calcul des débits de franchissement. Le site de Wimereux déroge à cette règle dans la mesure où l'altimétrie générale de l'ouvrage conduirait en l'absence du couronnement à modéliser des débordements plutôt que des franchissements par paquet de mer.

Lorsque la pente du perré est abrupte, le débit de franchissement est faible car l'eau peut difficilement remonter cette pente. A l'inverse lorsque la pente du perré est douce, le débit de franchissement augmente. De la même manière, lorsque la cote du perré est élevée, il est plus difficile pour les paquets de mer d'atteindre le haut de l'ouvrage, et le débit de franchissement est par conséquent faible. A l'inverse, le débit est fort lorsque la cote du perré est proche du niveau marin étudié.

Enfin le revêtement du perré intervient également dans le calcul des débits de franchissement. Un ouvrage empierré par blocs de 2 à 5 tonnes permet de dissiper l'énergie de la houle, là où un revêtement fortement réflexif (béton, maçonnerie jointive) transfère directement cette énergie sur le jet de rive.

Le débit de franchissement ainsi estimé en fonction des caractéristiques du perré, et en fonction des conditions de houle à la verticale du pied de l'ouvrage, est alors considéré constant le long du perré. Le débit total est donc proportionnel à la longueur du perré.

7 CARTOGRAPHIES DES ALEAS

7.1 Définition de l'aléa

Les résultats et rendus sont présentés sous forme de cartographies de hauteur d'eau maximale, vitesse maximale, et aléa maximal.

L'aléa instantané est défini par croisement des hauteurs et vitesses instantanées. Le tableau ci-dessous présente les différentes classes d'aléa en fonction du croisement de ces deux variables.

Tableau 7-1 : Définition de l'aléa en fonction des hauteurs et vitesses

Vitesse	$U < 0,2 \text{ m/s}$	$0,2 < U < 0,5 \text{ m/s}$	$U > 0,5 \text{ m/s}$
Hauteur			
$H < 0,5 \text{ m}$	Faible	Moyen	Fort
$0,5 < H < 1 \text{ m}$	Moyen	Moyen	Fort
$H > 1 \text{ m}$	Fort	Fort	Très Fort

L'utilisation de ces catégories est justifiée par le danger croissant auquel les personnes sont exposées, lorsque la hauteur de l'inondation et/ou la vitesse d'écoulement augmente. Le graphique suivant montre ainsi que la capacité de déplacement d'une personne est fortement réduite dès lors que la hauteur d'eau dépasse 0,5 m ou la vitesse 0,25 m/s. Cette capacité est encore réduite pour un enfant ou pour un adulte non sportif. De ce fait, lorsque les fortes hauteurs et les fortes vitesses sont combinées, le déplacement à pieds n'est plus possible, et toute évacuation requiert l'utilisation de bateaux motorisés.

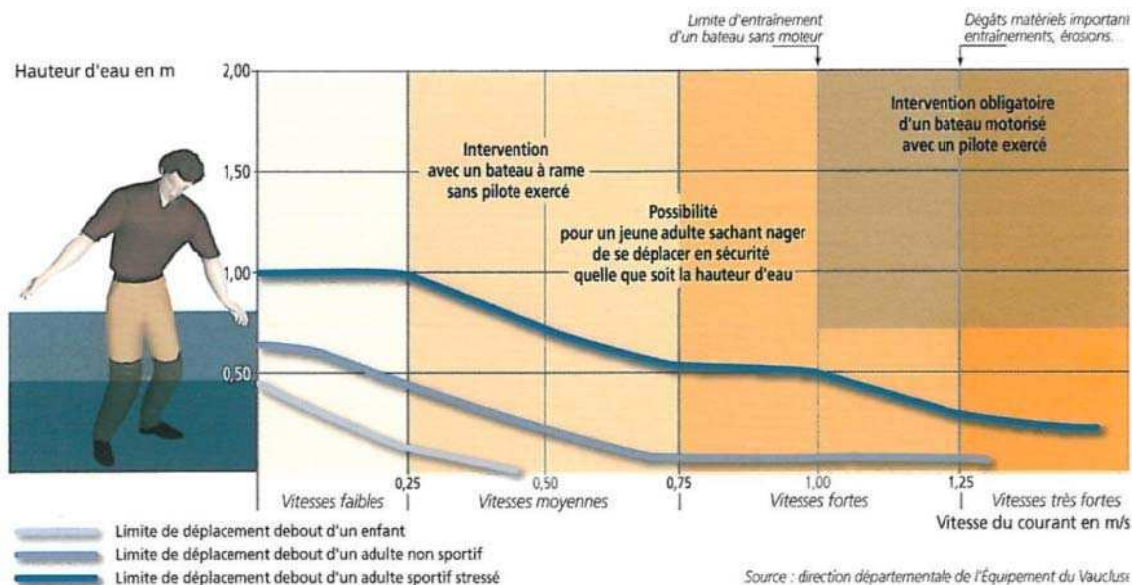


Figure 7-1 : Possibilités de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement (Source : DDE 84)

L'aléa instantané est ainsi calculé tout au long de la propagation de l'inondation à l'aide de cette classification. L'aléa issu de la modélisation est alors l'aléa maximal en chaque point de l'espace, obtenu par comparaison de l'aléa instantané tout au long de la propagation de l'inondation. L'aléa maximal modélisé est donc issu d'un calcul instantané de l'aléa, et non d'un croisement des hauteurs maximales et des vitesses maximales, qui surestimerait significativement l'aléa. On ne peut donc pas simplement comparer les cartographies de hauteurs maximales et de vitesses maximales pour aboutir aux cartographies d'aléa.

7.2 Surclassement en arrière des ouvrages

Une bande de 100 m de largeur le long des digues et cordons dunaires pouvant présenter un risque de rupture est indiqué sur la cartographie des aléas. Cette bande appelée « bande de précaution » sera caractérisée par un aléa très fort. Cette bande est justifiée par le fait que le modèle ne représente qu'un nombre limité de positions de brèches, derrière lesquelles est calculé un aléa très fort du fait de l'invasion brutale de l'eau. Or il existe en réalité une infinité de positions possibles de la brèche le long des ouvrages à risques. L'application de cette bande permet de tenir compte de l'ensemble des positions possibles des brèches. Dans ce dossier, la bande est forfaitairement fixée à 100 mètres et pourra dans le cadre de l'élaboration des PPRL finaux être modulée suivant les critères définis dans la circulaire du 27 Juillet 2011.

Une bande de 100 m spécifique aux sites soumis au franchissement de perré est située le long de ces ouvrages. Cette seconde bande vise à tenir compte de phénomènes ne pouvant pas être reproduits par le modèle. Comme indiqué au paragraphe 6.1.6, le modèle reproduit un débit moyen de franchissement : par conséquent l'amplitude maximal instantanée du débit n'est pas reproduite. La force et la vitesse maximale de ces paquets de mer, qui se traduisent par des projections de galets et un étalement important de l'eau, sont ainsi représentées par cette bande. Cette bande est représentée uniquement lorsqu'il y a franchissement par des hachures sur les figures présentées au

chapitre suivant. Dans ce dossier la bande est forfaitairement fixée à 100 mètres et pourra dans le cadre de l'élaboration des PPRL finaux être modulée suivant les critères définis dans le guide méthodologique d'élaboration des PPRL.

La délimitation de la bande de 100 m pour les sites soumis à rupture de digue ou de cordons dunaires est précisée dans les monographies par sites.

7.3 Temps d'arrivée de l'inondation

Le modèle numérique élaboré pour chaque site permet de connaître l'emprise de l'inondation à chaque instant, ce qui permet ainsi de suivre l'évolution temporelle de cette emprise.

Le temps de propagation de l'inondation étant un paramètre important pour la gestion de la crise, le temps d'arrivée a également été cartographié. Le temps d'arrivée est défini comme le temps nécessaire à l'inondation pour atteindre un point donné. Il est calculé à partir de l'instant de la rupture, ou à partir du début du débordement lorsque l'inondation est seulement due à ce phénomène.

La cartographie ainsi réalisée pour chaque site présente l'emprise de l'inondation avec une fréquence de 30 minutes.

Compte tenu du caractère très localisé et relativement rapide des inondations dues au franchissement de perré, les sites soumis à ce phénomène n'ont pas fait l'objet de cartographie des temps d'arrivée.

Les rendus cartographiques relatifs aux temps d'arrivée de l'inondation sont fournis sous forme numérique uniquement. A titre d'exemple, les cartographies pour l'événement centennal à Sangatte, pour une brèche de la digue de 15 m et une brèche de 100 m, sont présentées ci-après.

On observe ainsi sur ces cartes que pour la brèche de 15 m, la majeure partie de la zone inondée est submergée 1h après l'apparition de la brèche. Pour la brèche de 100 m de largeur, la même zone, délimitée à l'Est par la digue Camin, est également submergée en grande partie 1h après la rupture. La progression de l'inondation est alors limitée par la présence de la digue, jusqu'à ce que celle-ci soit submergée : 1h30 après la rupture, l'inondation s'étend en effet légèrement en aval de la digue. Elle se propage ensuite de manière continue jusqu'à atteindre l'autoroute A16.

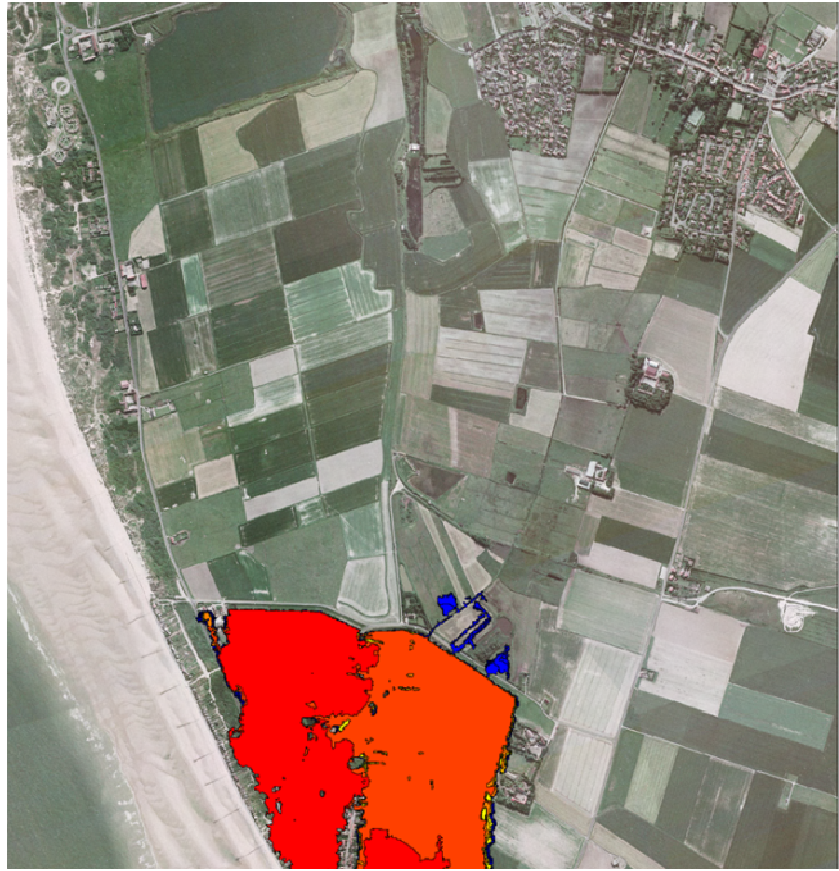
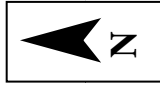


Figure 7-2 : Temps d'arrivée de l'inondation à Sangatte, pour l'événement centennal et une brèche de la digue de 15 m (Phase 2)

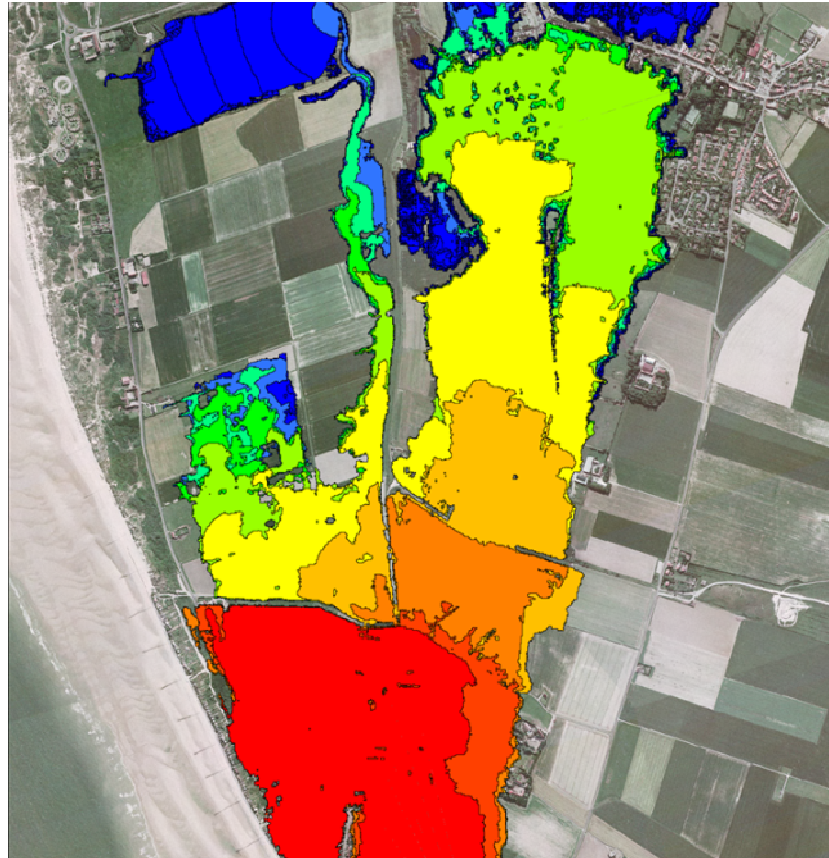


Figure 7-3 : Temps d'arrivée de l'inondation à Sangatte, pour l'événement centennal et une brèche de la digue de 100 m (Phase 2)

7.4 Analyse générale des cartographies

Pour la compréhension générale des phénomènes cartographiés, il est nécessaire de rappeler les éléments importants conditionnant l'aléa submersion.

En premier lieu, pour les sites soumis à des ruptures de digue ou de cordon dunaire, l'extension de l'inondation peut être fortement influencée par la largeur de la brèche, puisque le débit entrant est fonction de cette largeur, comme l'illustre la figure suivante.

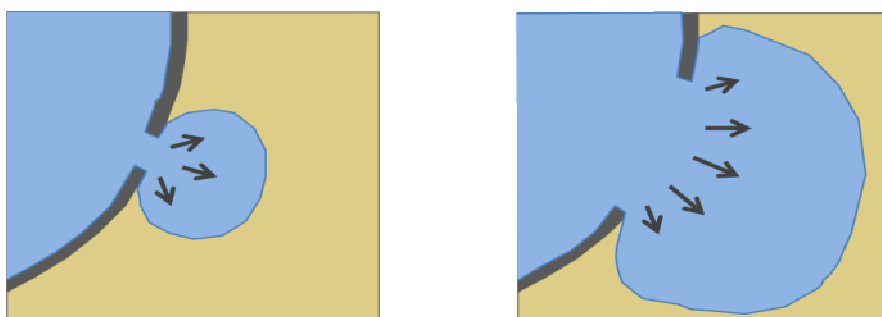


Figure 7-4 : Effet de la largeur de brèche sur l'inondation

Le volume d'eau de mer entrant est également dépendant de la topographie en retrait de la brèche. En effet, lorsque la topographie est relativement élevée ou délimitée par des digues de second rang, le niveau de l'inondation s'approche rapidement du niveau de la mer, et le débit entrant devient alors faible du fait de cet équilibre des niveaux d'eau.

A l'inverse, lorsque la topographie permet un étalement important de l'inondation, le débit entrant n'est plus limité et le volume de l'inondation peut augmenter de manière significative. Cette comparaison est illustrée ci-après.

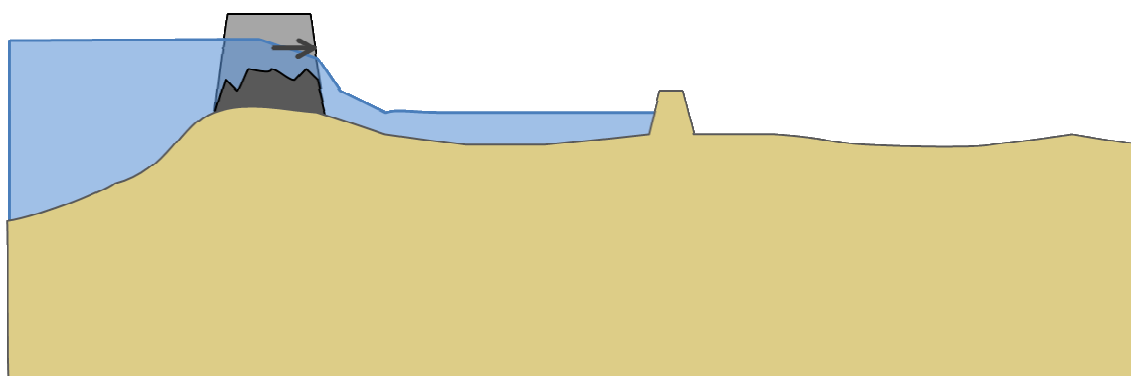


Figure 7-5 : Limitation de l'extension de l'inondation par la topographie

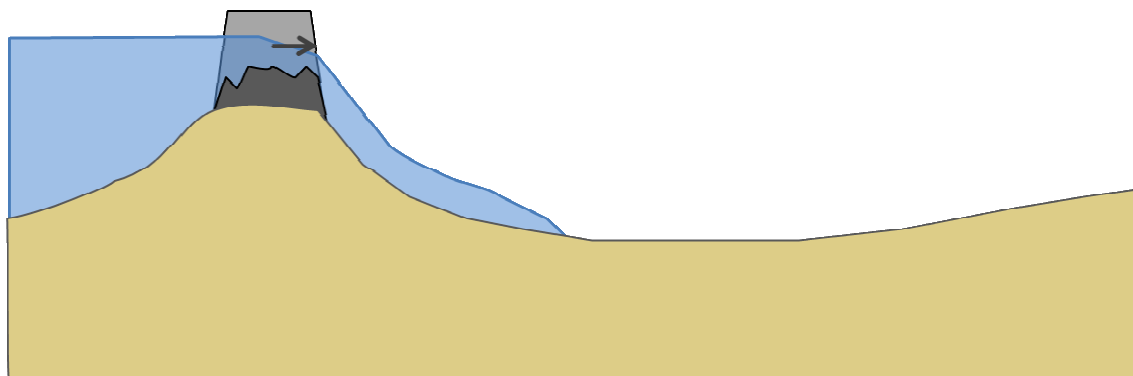


Figure 7-6 : Etalement de l'inondation par une topographie basse

Ces phénomènes sont notamment observés dans le cas de Sangatte, où une brèche de 15 m dans la digue génère un débit entrant suffisamment faible pour que l'inondation soit limitée par la digue Camin. A l'inverse une brèche de largeur 100 m génère un débit plus important qui entraîne le débordement de cette digue. L'eau issue de ce débordement s'écoule alors progressivement dans les zones les plus basses, et étend significativement l'inondation.

Par ailleurs, lorsque le relief présente des pentes très marquées comme sur la figure suivante, l'extension de l'inondation peut être inchangée pour différents niveaux de la mer, et donc pour différents niveaux d'inondation.

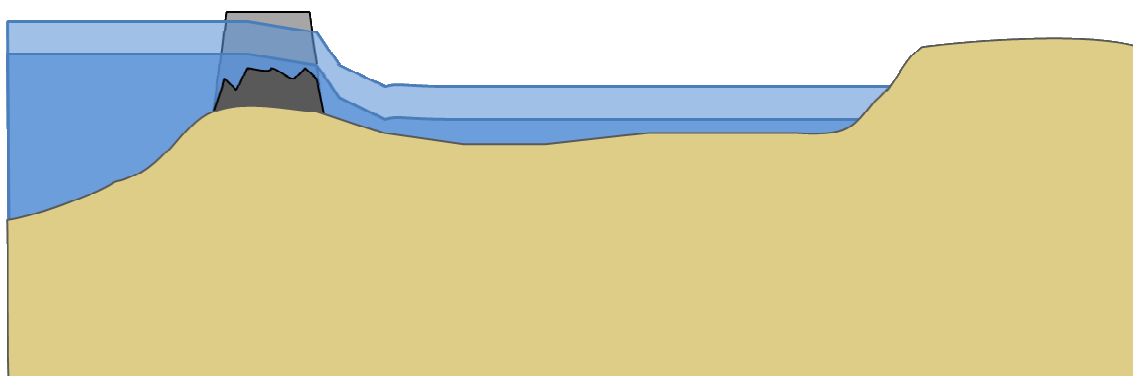


Figure 7-7 : Limitation de l'extension de l'inondation par un relief accentué

Ainsi pour certains sites, l'aléa calculé pour différentes périodes de retour peut présenter la même étendue. Cependant on vérifie que les hauteurs de submersion sont systématiquement plus importantes pour les périodes de retour élevées. L'aléa est donc systématiquement différent pour chaque période de retour même lorsque son extension est identique. Ceci est notamment observé à Dunkerque, mais également à Tardinghen ou Le Touquet-Paris-Plage.

8 MONOGRAPHIES PAR SITES

8.1 Bray-Dunes - rupture du cordon dunaire

8.1.1 Hypothèses

Ce secteur est entouré de dunes, et l'extension de cette submersion est donc très limitée spatialement du fait de la topographie. Les effets dynamiques de la submersion marine sur ce site étant par conséquent négligeables, la cartographie de l'aléa a exceptionnellement été effectuée par analyse topographique, c'est-à-dire que la surface inondée est celle dont la topographie est située sous le niveau marin.

Les niveaux marins statiques extrêmes retenus

Les niveaux marins extrêmes à Bray-Dunes ont été extraits des cartes du SHOM 2008 et 2012 pour les périodes de retour décennale et centennale (cf. paragraphe 4.3.1).



Figure 8-1 : niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement décennal est celui du SHOM 2012, plus pénalisant.



Figure 8-2 : niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement d'occurrence centennale est celui du SHOM 2012, plus pénalisant.

Tableau 8-1 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Bray-Dunes

	Niveau extrême de pleine-mer
T10	4,30
T100	4,70

Les niveaux marins totaux retenus

Une élévation du niveau marin lié au réchauffement climatique pris en compte en 2013 de 0,20m a été ajoutée au niveau de pleine-mer centennal. Pour la modélisation de l'évènement centennal incluant le changement climatique à l'horizon 2100, une surcote supplémentaire de 0,40 m a été ajoutée afin d'obtenir une élévation moyenne de 0,60 m conforme au scénario pessimiste établi par l'ONERC.

Le calcul de la surcote de déferlement liée aux niveaux marins précédemment exposés est effectué par propagation de la houle au travers d'un modèle 1D (cf. paragraphe 4.5).

L'incertitude sur les hypothèses de calcul de la surcote de déferlement est de plus intégrée aux niveaux marins finaux (cf. paragraphe 4.3.3).

Tableau 8-2 : Calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement – profil 2

		Surcote de déferlement	Incertainitude sur le calcul du set up
Niveau marin décennal	Hypothèses originales	0,44	0,07
	Hypothèses combinées	0,51	
Niveau marin centennal 2013	Hypothèses originales	0,39	0,07
	Hypothèses combinées	0,46	
Niveau marin centennal 2100	Hypothèses originales	0,30	0,07
	Hypothèses combinées	0,37	

Les niveaux marins totaux s'établissent ainsi :

Tableau 8-3: Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus à Bray-Dunes

	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total retenu
T10	4,30	-	0,44	0,07	4,81
T100	4,70	0,20	0,39	0,07	5,36
T100 à l'horizon 2100	4,70	0,60	0,30	0,07	5,67

8.1.2 Dynamique de submersion

L'analyse topographique effectuée pour l'événement centennal permet de définir l'étendue de l'inondation en considérant comme submersible l'intégralité de la zone située sous le niveau marin. Dans ces conditions, les hauteurs de submersion sont égales à la différence entre le niveau marin et la topographie de chaque point de l'espace.

8.1.3 Cartographie des aléas

Cartographie des aléas 10 ans



Figure 8-3 : Bray-Dunes, rupture cordon dunaire - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal



Figure 8-4 : Bray-Dunes, rupture cordon dunaire - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal

Cartographie des aléas 100 ans

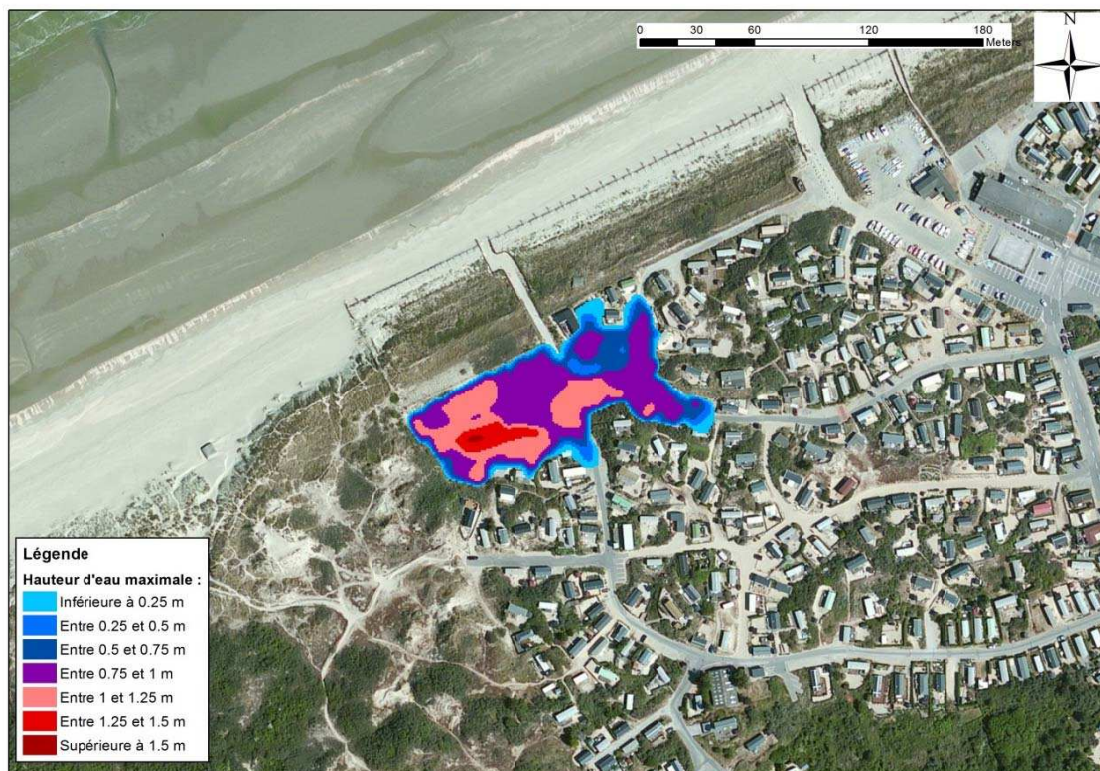


Figure 8-5 : Bray-Dunes, rupture cordon dunaire - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal



Figure 8-6 : Bray-Dunes, rupture cordon dunaire - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal

Cartographie des aléas 100 ans à l'échéance 2100

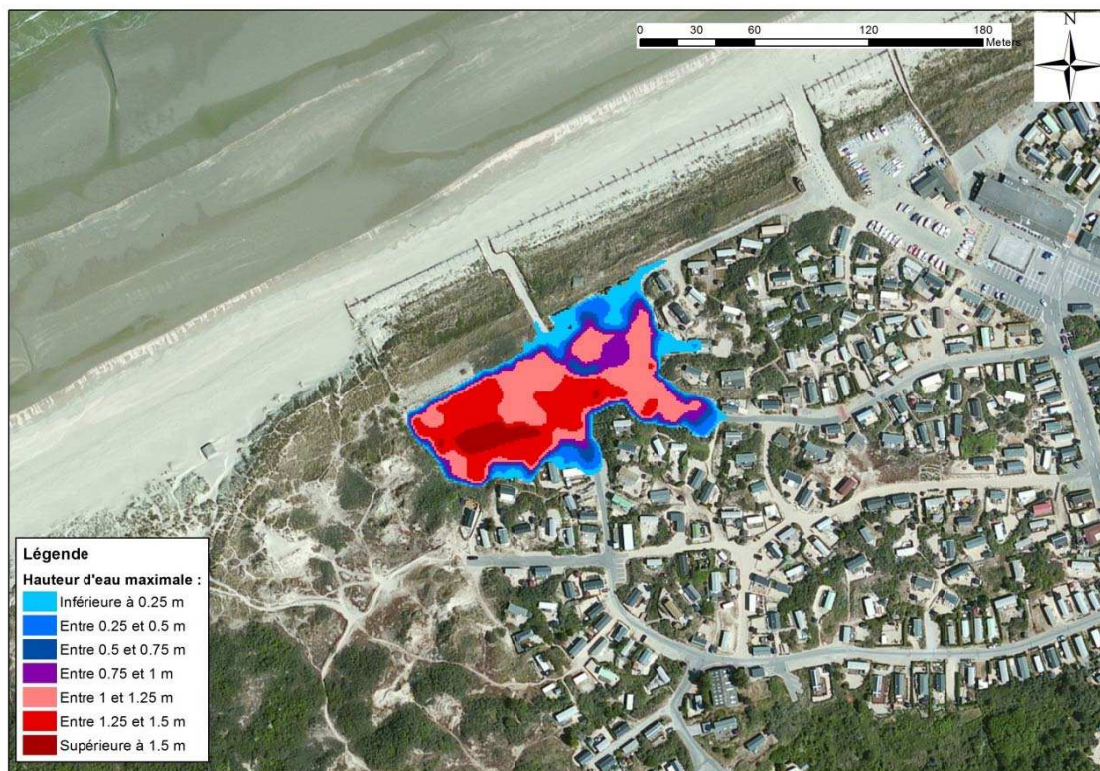


Figure 8-7 : Bray-Dunes, rupture du cordon dunaire - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

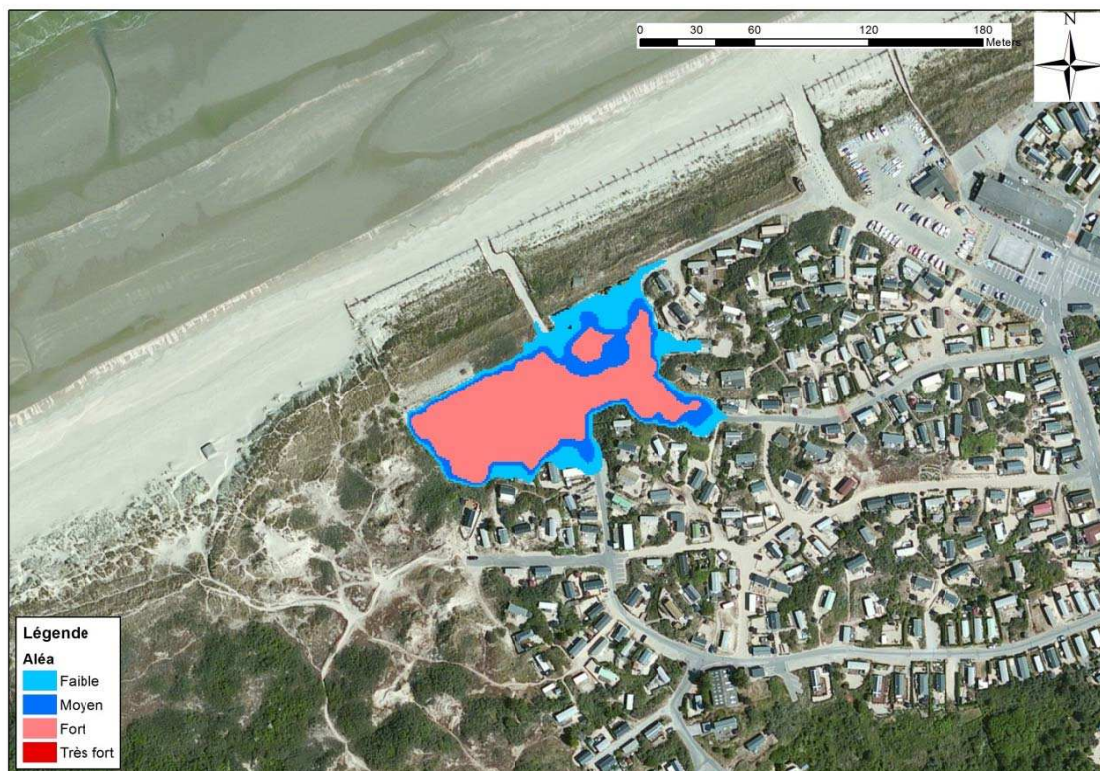


Figure 8-8 : Bray-Dunes, rupture du cordon dunaire - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100

8.2 Bray-Dunes - franchissement de perré

8.2.1 Hypothèses

Caractéristiques de l'ouvrage et des profils

L'altitude du perré est homogène sur tout son linéaire, mais le profil transversal de la plage diffère entre la partie Ouest et la partie Est. Le calcul de la propagation de la houle sur ce site est donc effectué sur deux profils distincts.

Comme pour l'analyse de tous les autres sites soumis au franchissement, le calcul de propagation de la houle tient compte de l'effet de la surcote de déferlement.

Les différents paramètres des deux profils utilisés pour calculer les débits franchissant le perré ont été précisés dans les figures suivantes.



Figure 8-9 : Position des deux profils retenus à Bray-Dunes

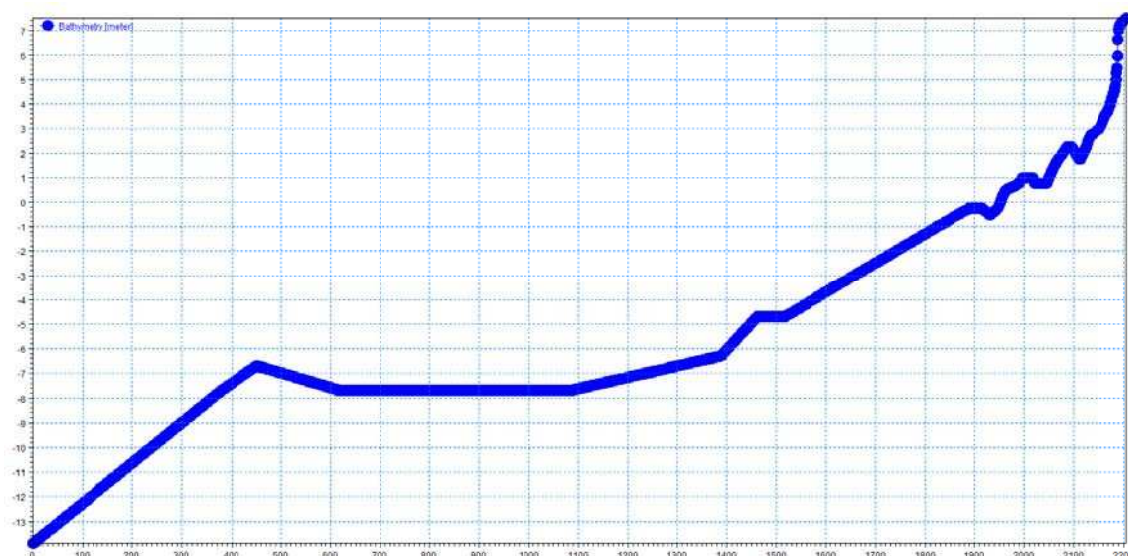


Figure 8-10 : Profil 1

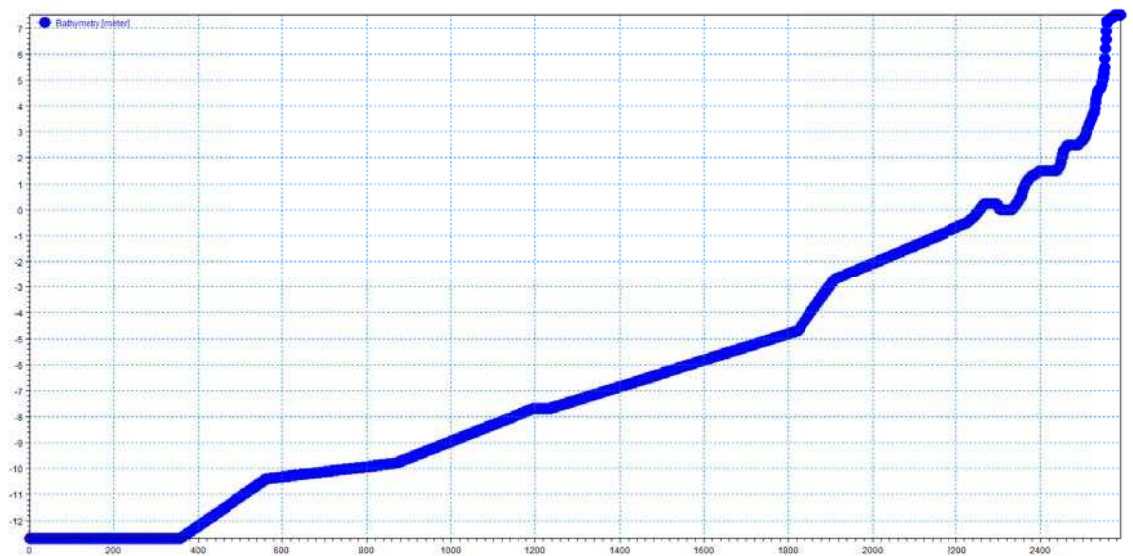


Figure 8-11 : Profil 2

Tableau 8-4 : Paramètres des deux profils utilisés à Bray-Dunes

	Profil 1	Profil 2
Direction des houles (°N)	336	344
Cote du perré (m IGN 69)	7,25	7
Pente du perré (h / l)	1 / 3	1 / 3,67
Linéaire (m)	500	875

Conditions en mer et conditions au pied de l'ouvrage

Les niveaux marins extrêmes au large de Bray-Dunes ont été extraits des cartes du SHOM 2008 pour les périodes de retour décennale et centennale (cf. paragraphe 4.3.1).

Tableau 8-5 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Bray-Dunes

	Niveau extrême de pleine-mer
T10	4,30
T100	4,70

Les niveaux marins totaux retenus

Une élévation du niveau marin lié au réchauffement climatique pris en compte en 2013 de 0,20m a été ajoutée au niveau de pleine-mer centennal. Pour la modélisation de l'évènement centennal incluant le changement climatique à l'horizon 2100, une surcote supplémentaire de 0,40 m a été ajoutée afin d'obtenir une élévation moyenne de 0,60 m conforme au scénario pessimiste établi par l'ONERC.

La propagation des conditions de mer au large au pied de l'ouvrage de Bray-Dunes a été effectuée en 1D le long des deux profils précédemment décrits grâce au logiciel LITPACK (cf. paragraphe 4.5).

L'incertitude sur les hypothèses de calcul de la surcote de déferlement est de plus intégrée aux niveaux marins finaux (cf. paragraphe 4.3.3).

Tableau 8-6 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement – profil 1

		Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul du set up
Niveau marin décennal	Hypothèses originales	0,32	0,08
	Hypothèses combinées	0,40	
Niveau marin centennal 2013	Hypothèses originales	0,30	0,08
	Hypothèses combinées	0,38	
Niveau marin centennal 2100	Hypothèses originales	0,22	0,08
	Hypothèses combinées	0,30	

Tableau 8-7 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement – profil 2

		Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul du set up
Niveau marin décennal	Hypothèses originales	0,44	0,07
	Hypothèses combinées	0,51	
Niveau marin centennal 2013	Hypothèses originales	0,39	0,07
	Hypothèses combinées	0,46	
Niveau marin centennal 2100	Hypothèses originales	0,30	0,07

	Hypothèses combinées	0,37	
--	----------------------	------	--

Les niveaux marins totaux s'établissent ainsi par profils :

Tableau 8-8 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) à Bray-Dunes

T10	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total au pied de l'ouvrage
Profil 1	4,30	-	0,32	0,08	4,70
Profil 2	4,30	-	0,44	0,07	4,81

T100	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total au pied de l'ouvrage
Profil 1	4,70	0,20	0,30	0,08	5,28
Profil 2	4,70	0,20	0,39	0,07	5,36

T100 à l'horizon 2100	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total au pied de l'ouvrage
Profil 1	4,70	0,60	0,22	0,08	5,60
Profil 2	4,70	0,60	0,30	0,07	5,67

Les caractéristiques de la houle en pied d'ouvrage sont les suivantes :

Tableau 8-9 : Houles (en m) à Bray-Dunes

	Hauteur significative de la houle au large (m)	Période de la houle (s)	Hauteur significative de la houle au pied de l'ouvrage (m)	
			Profil 1	Profil 2
T10	1,8	7,86	0,36	0
T100	2,9	9	1,17	0,80
T100 à l'horizon 2100	2,9	9	1,62	1,25

Les signaux de marée utilisés comme conditions aux limites du modèle au large ont été modifiés pour atteindre les niveaux extrêmes de pleine-mer calculés, comme présenté figure suivante.

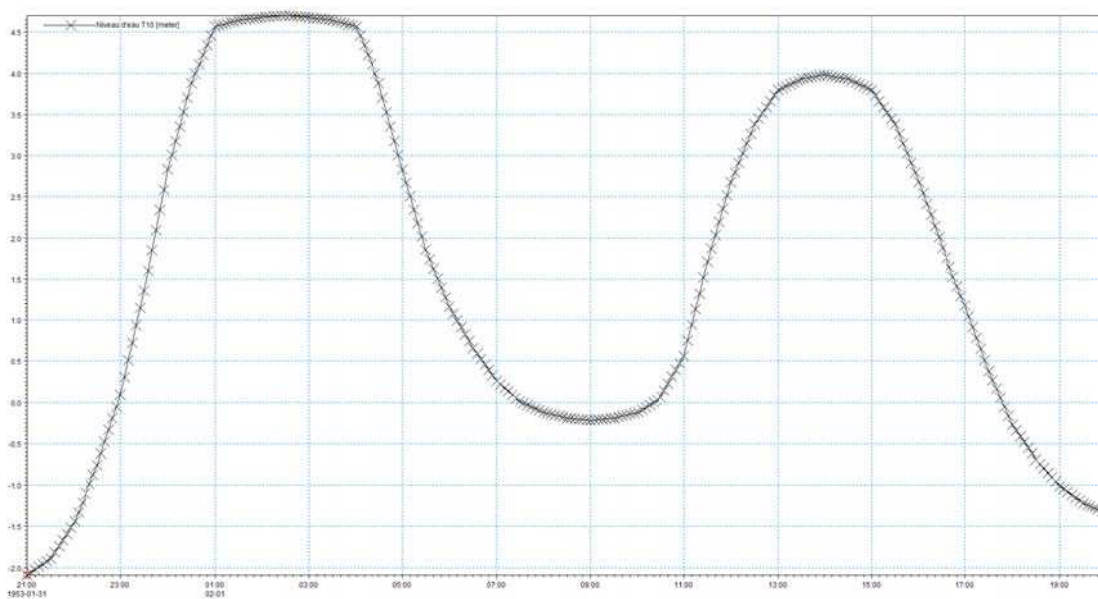


Figure 8-12 : Marégramme utilisé au large pour T10

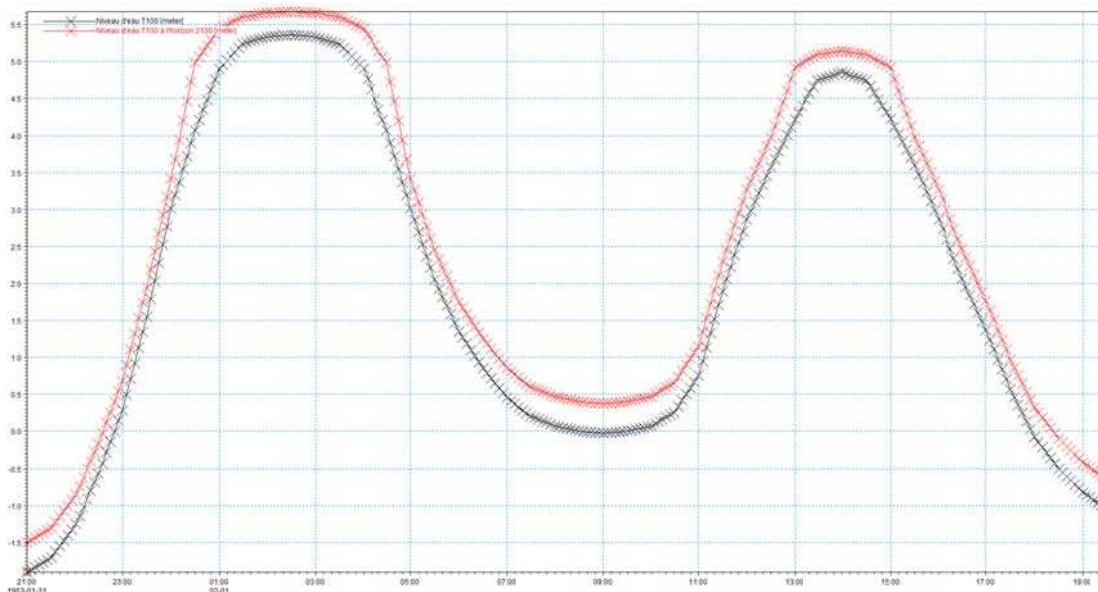


Figure 8-13 : Marégrammes utilisés au large pour T100 et T100 à l'horizon 2100

Les débits injectés dans le modèle hydrodynamique terrestre

L'estimation des débits de franchissement a été effectuée à l'aide de la formule empirique proposée dans le « Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures - Assessment Manual ».

Tableau 8-10 : Calculs des débits linéiques injectés dans le modèle

		Profil 1	Profil 2
10 ans	Revanche au niveau de pleine-mer (m)	2,54	-
	Débit linéique maximal (l/s/m)	0,4	-
100 ans	Revanche au niveau de pleine-mer (m)	1,97	1,64
	Débit linéique maximal (l/s/m)	115	40
100 ans à l'horizon 2100	Revanche au niveau de pleine-mer (m)	1,65	1,33
	Débit linéique maximal (l/s/m)	329	185

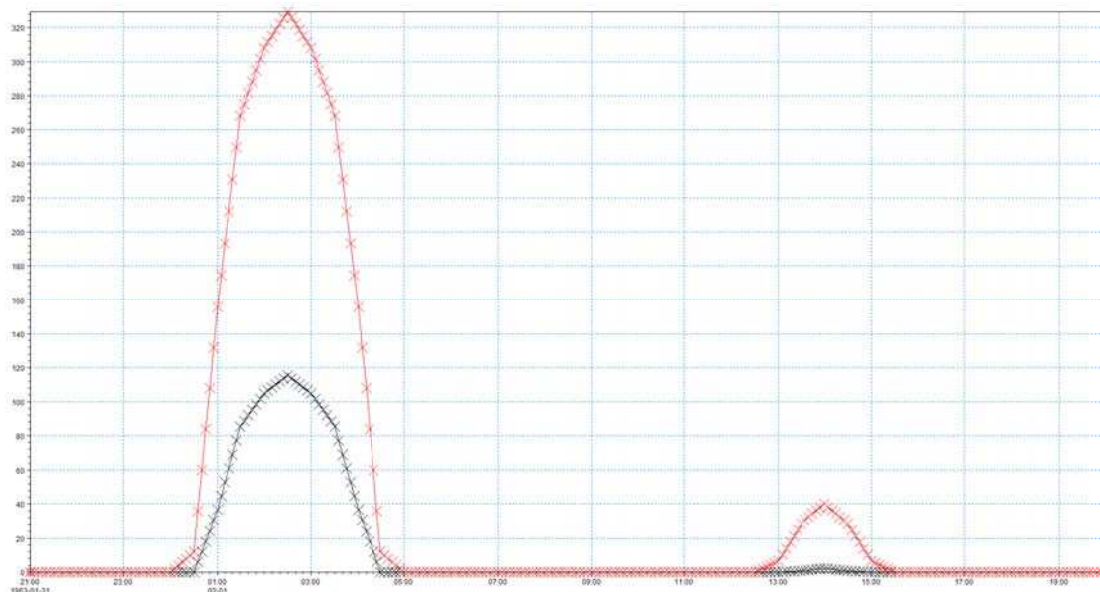


Figure 8-14 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 1 (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))

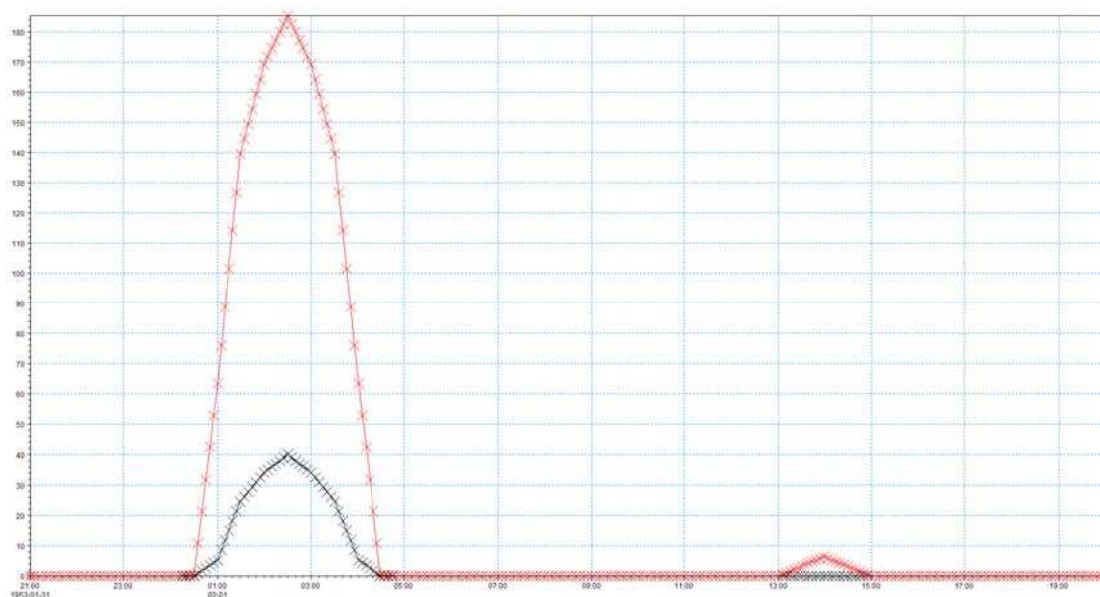


Figure 8-15 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 2 (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))

8.2.2 Dynamique de submersion

Les inondations calculées sont majoritairement limitées à une étroite bande le long du perré. Pour le scénario incluant le changement climatique, l'emprise de l'inondation est plus grande, avec quelques avancées de l'eau jusqu'à l'avenue de la Liberté, notamment en s'écoulant par l'avenue du Général de Gaulle. Les quartiers à l'Est de la ville sont affectés par les écoulements via l'avenue du Casino. A l'Ouest de la ville, une zone basse, est inondée avec des hauteurs d'eau maximales importantes, et est donc classée en aléa fort.

Les aléas restent néanmoins de faible à moyen sur la majeure partie de l'inondation pour ces deux scénarios.

8.2.3 Cartographie

L'ensemble du linéaire du perré, rectiligne et de géométrie constante, est couvert par la bande de 100 m. Au-delà des extrémités de l'ouvrage, le littoral est constitué de dunes ne présentant pas de risque de franchissement, du fait de leur altitude et de leur géométrie.

Dans le sens perpendiculaire au trait de côte, la bande s'applique sur une largeur de 100 m à partir du bord supérieur du perré.

Cartographie des aléas 10 ans



Figure 8-16 : Bray-Dunes - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal



Figure 8-17 : Bray-Dunes - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement décennal



Figure 8-18 : Bray-Dunes - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal

Cartographie des aléas 100 ans

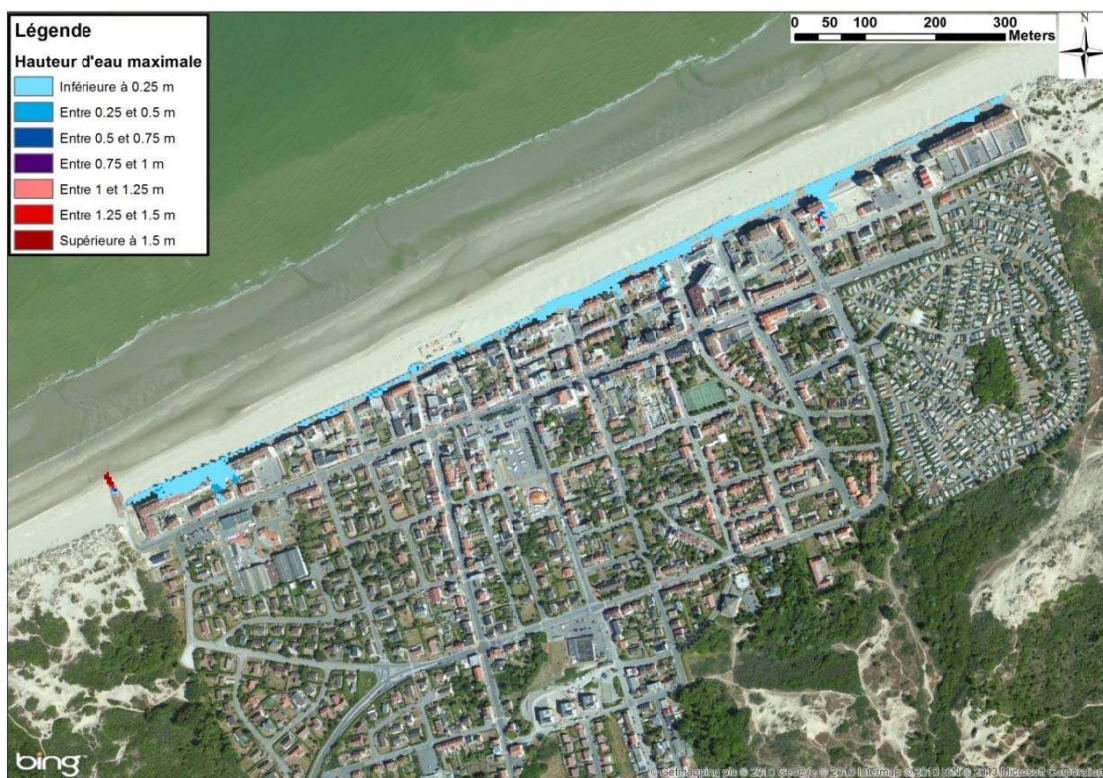


Figure 8-19 : Bray-Dunes - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal



Figure 8-20 : Bray-Dunes - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal



Figure 8-21 : Bray-Dunes - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal

Cartographie des aléas 100 ans à l'échéance 2100

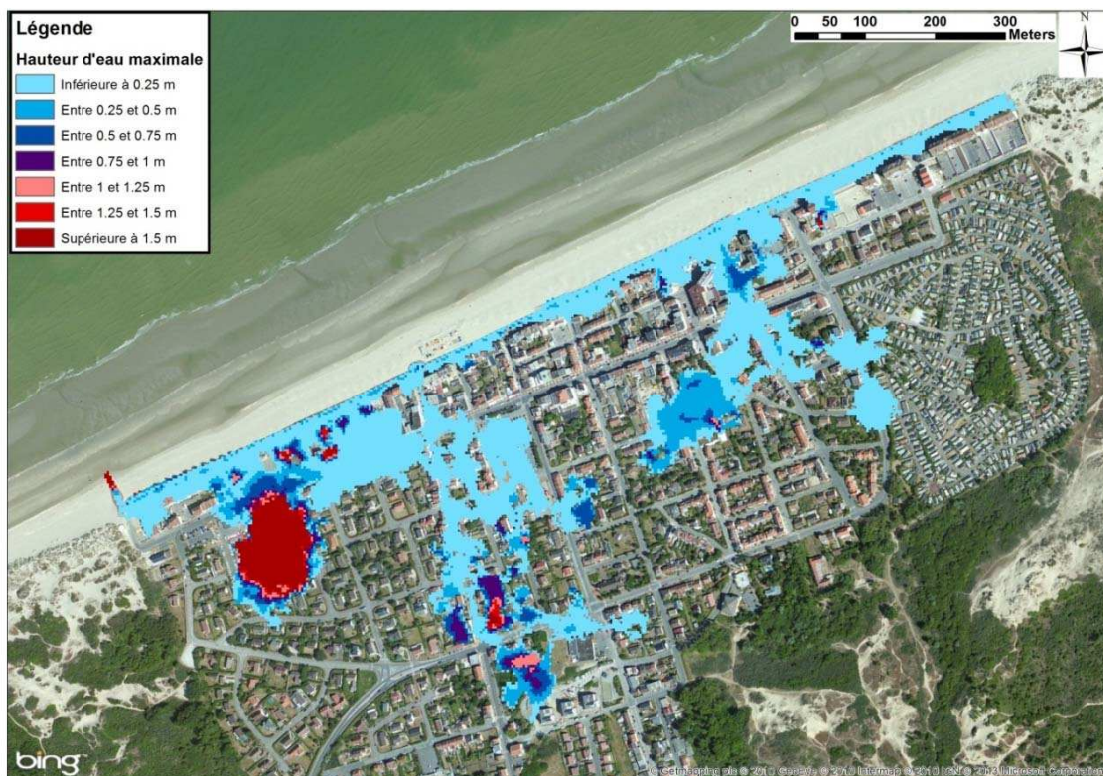


Figure 8-22 : Bray-Dunes - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

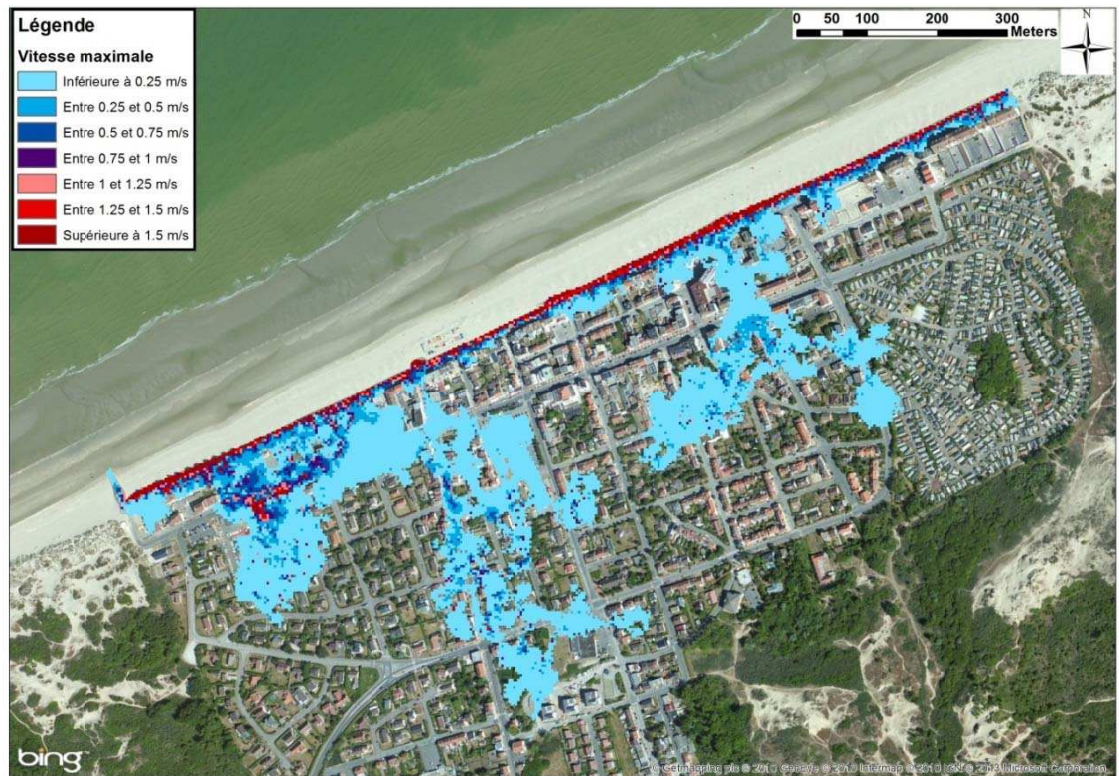


Figure 8-23 : Bray-Dunes – Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

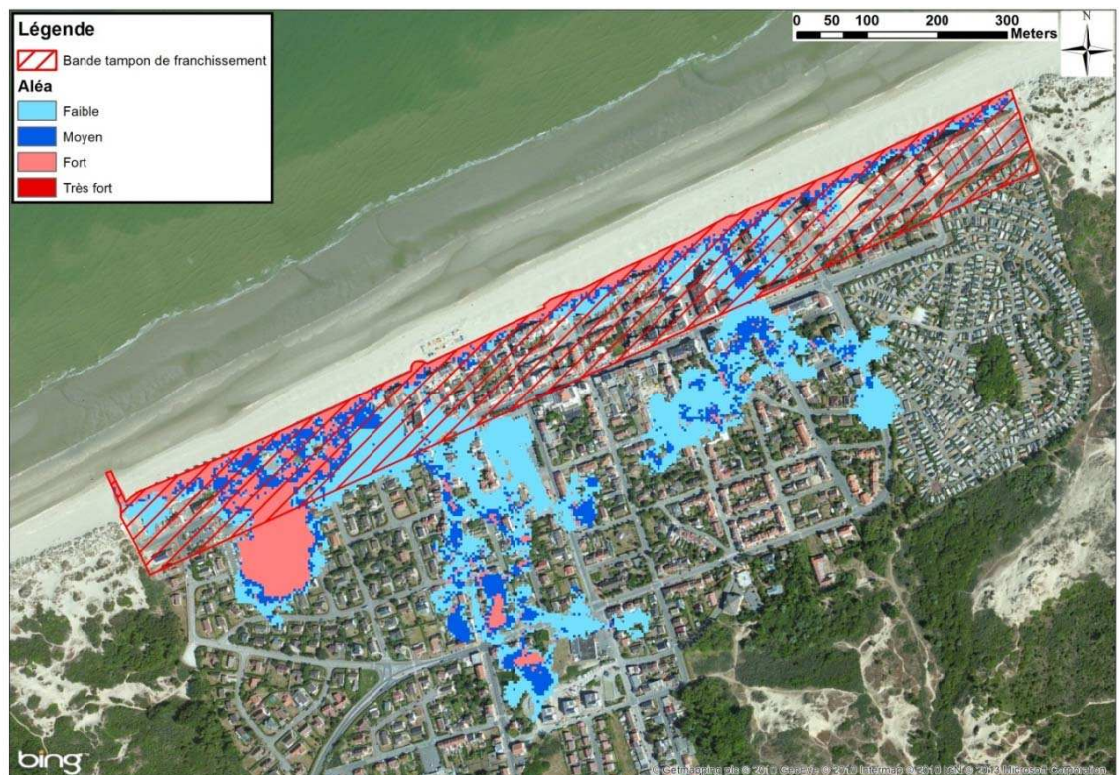


Figure 8-24 : Bray-Dunes - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100

8.3 Malo-les-Bains- franchissement de perré

8.3.1 Hypothèses

Caractéristiques de l'ouvrage et des profils

Le calcul du débit franchissant le perré est effectué sur trois profils transversaux de la plage, afin de tenir compte des variations de géométrie de l'ouvrage (hauteur et pente).

Les différents paramètres des trois profils sont précisés dans les figures suivantes.

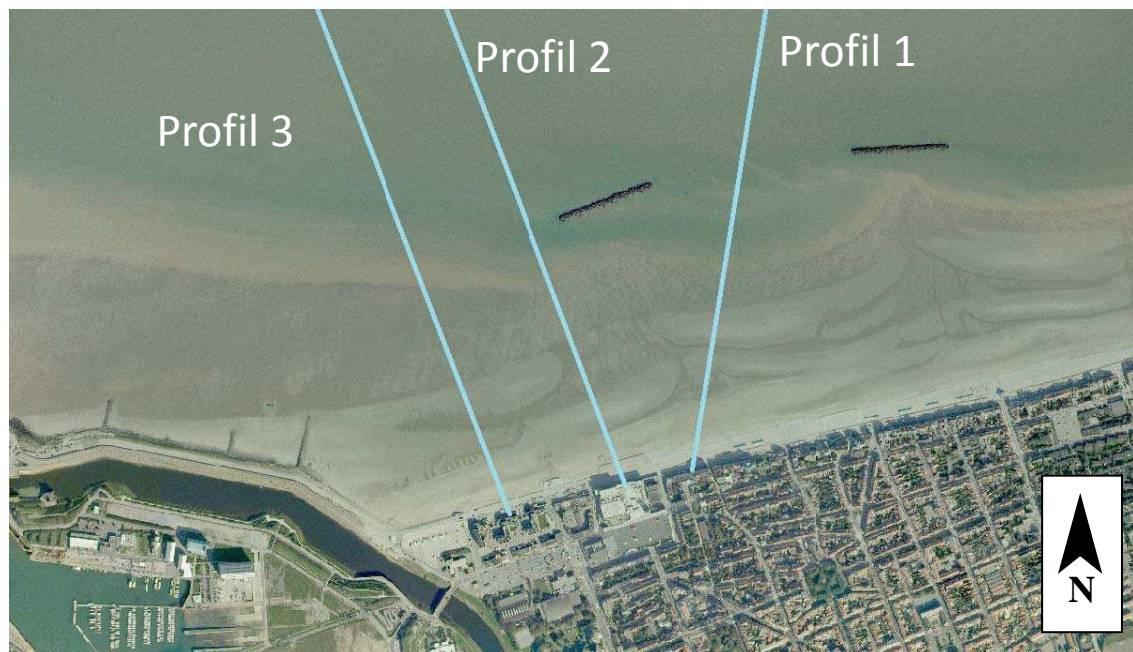


Figure 8-25 : Position des trois profils retenus à Malo-les-Bains

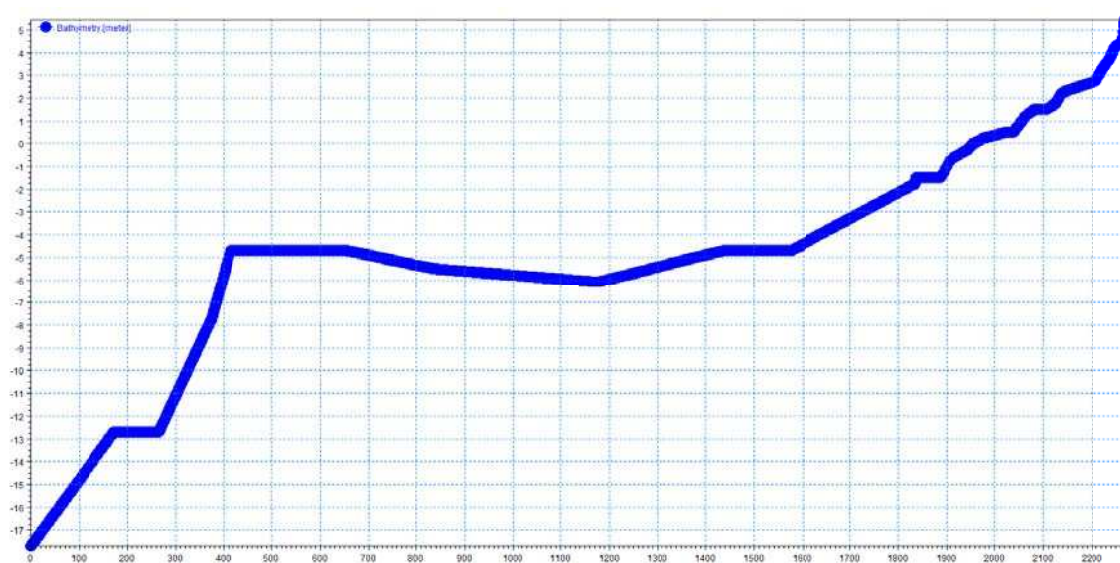


Figure 8-26 : Profil 1

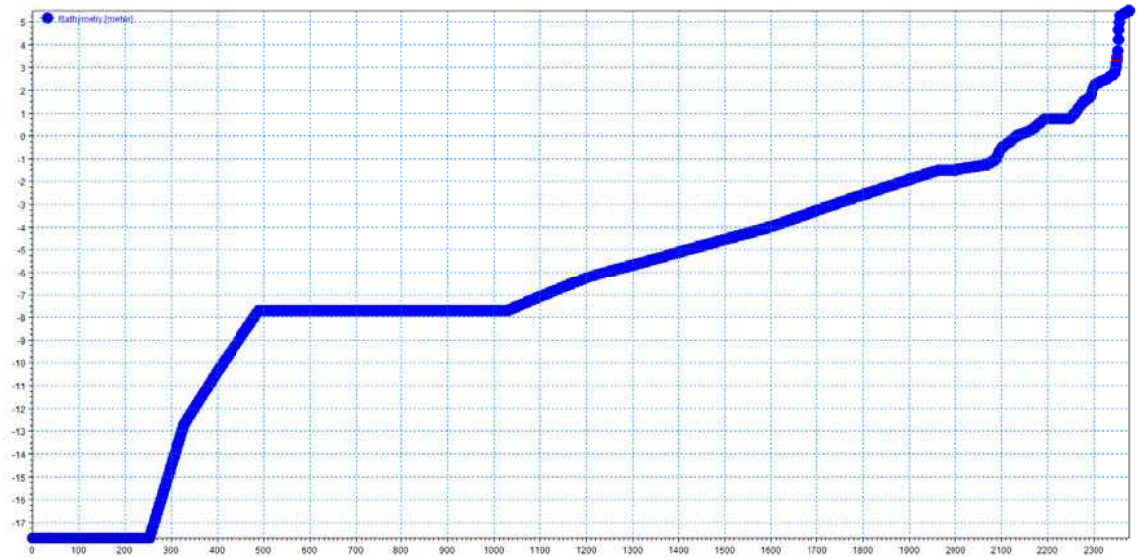


Figure 8-27 : Profil 2

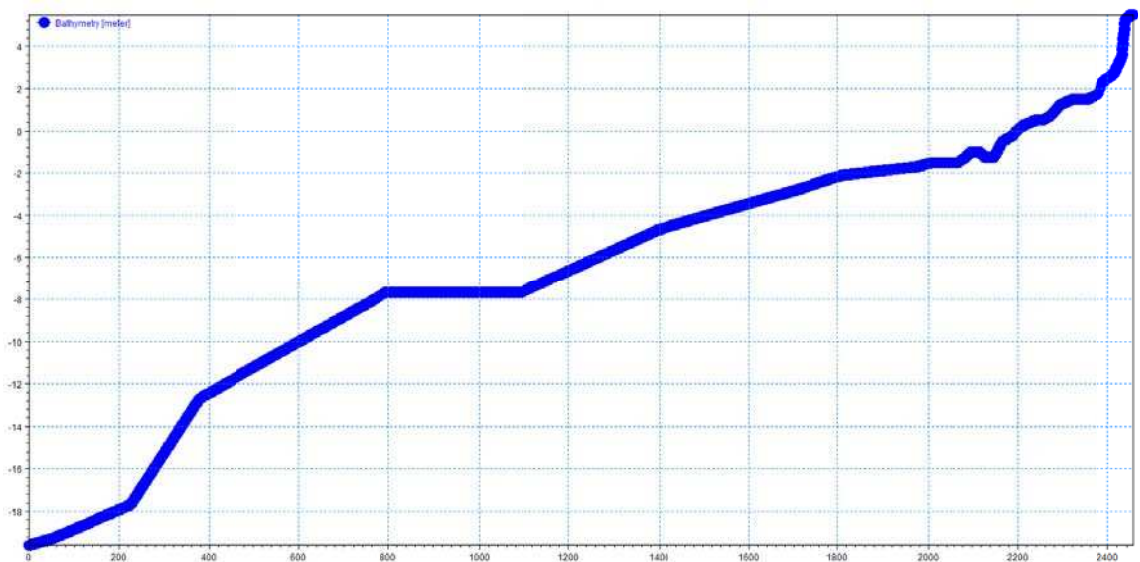


Figure 8-28 : Profil 3

Tableau 8-11 : Paramètres des profils utilisés à Malo-les-Bains

	Profil 1	Profil 2	Profil 3
Direction des houles (°N)	11	339	342
Cote du perré (m IGN 69)	5,5	5,25	5,25
Pente du perré (h / l)	1 / 4,7	1 / 2,86	1 / 4
Linéaire (m)	125	110	330

Conditions en mer et conditions au pied de l'ouvrage

Les niveaux marins extrêmes au large de Malo-les-Bains ont été extraits des cartes du SHOM 2008 et 2012 pour les périodes de retour décennale et centennale (cf. paragraphe 4.3.1).



Figure 8-29 : niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement décennal est celui du SHOM 2012, plus fort que celui du SHOM 2008.



Figure 8-30 : niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement d'occurrence centennale est celui du SHOM 2012, plus pénalisant.

Tableau 8-12 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Malo les Bains

	Niveau extrême de pleine-mer
T10	4,30
T100	4,70

Les niveaux marins totaux retenus

Une élévation du niveau marin lié au réchauffement climatique pris en compte en 2013 de 0,20m a été ajoutée au niveau de pleine-mer centennal. Pour la modélisation de l'évènement centennal incluant le changement climatique à l'horizon 2100, une surcote supplémentaire de 0,40 m a été ajoutée afin d'obtenir une élévation moyenne de 0,60 m conforme au scénario pessimiste établi par l'ONERC.

La propagation des conditions de mer au large au pied de l'ouvrage de Malo-les-Bains a été effectuée en 1D le long des profils précédemment décrits grâce au logiciel LITPACK (cf. paragraphe 4.6).

L'incertitude sur les hypothèses de calcul de la surcote de déferlement est de plus intégrée aux niveaux marins finaux (cf. paragraphe 4.3.3).

Tableau 8-13 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement – profil 1

		Surcote de déferlement	Incetitude sur le calcul du set up
Niveau marin décennal	Hypothèses originales	0,26	0,03
	Hypothèses combinées	0,29	
Niveau marin centennal 2013	Hypothèses originales	0,24	0,03
	Hypothèses combinées	0,27	
Niveau marin centennal 2100	Hypothèses originales	0,19	0,04
	Hypothèses combinées	0,23	

Tableau 8-14 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement – profil 2

		Surcote de déferlement	Incetitude sur le calcul du set up
Niveau marin décennal	Hypothèses originales	0,13	0,05
	Hypothèses combinées	0,18	
Niveau marin centennal 2013	Hypothèses originales	0,10	0,03
	Hypothèses combinées	0,13	
Niveau marin centennal 2100	Hypothèses originales	0,09	0,02
	Hypothèses combinées	0,11	

Tableau 8-15 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement – profil 3

		Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul du set up
Niveau marin décennal	Hypothèses originales	0,13	0,03
	Hypothèses combinées	0,16	
Niveau marin centennal 2013	Hypothèses originales	0,12	0,03
	Hypothèses combinées	0,15	
Niveau marin centennal 2100	Hypothèses originales	0,10	0,02
	Hypothèses combinées	0,12	

Les niveaux marins totaux s'établissent ainsi par profils :

Tableau 8-16 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) à Malo-les-Bains

T10	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total au pied de l'ouvrage
Profil 1	4,30	-	0,26	0,03	4,59
Profil 2	4,30	-	0,13	0,05	4,48
Profil 3	4,30	-	0,13	0,03	4,46

T100	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total au pied de l'ouvrage
Profil 1	4,70	0,20	0,24	0,03	5,17
Profil 2	4,70	0,20	0,10	0,03	5,03
Profil 3	4,70	0,20	0,12	0,03	5,05

T100 à l'horizon 2100	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total au pied de l'ouvrage
Profil 1	4,70	0,60	0,19	0,04	5,53
Profil 2	4,70	0,60	0,09	0,02	5,41
Profil 3	4,70	0,60	0,10	0,02	5,42

Tableau 8-17 : Houles (en m) à Malo-les-Bains

	Hauteur significative de la houle au large (m)	Période de la houle (s)	Hauteur significative de la houle au pied de l'ouvrage (m)		
			Profil 1	Profil 2	Profil 3
T10	2,5	8,7	0,08	1,02	0,94
T100	3,2	9	0,64	1,61	1,47
T100 à l'horizon 2100	3,2	9	0,99	1,82	1,69

Les signaux de marée utilisés comme conditions aux limites du modèle au large ont été modifiés pour atteindre les niveaux extrêmes de pleine-mer calculés, comme présenté figure suivante.

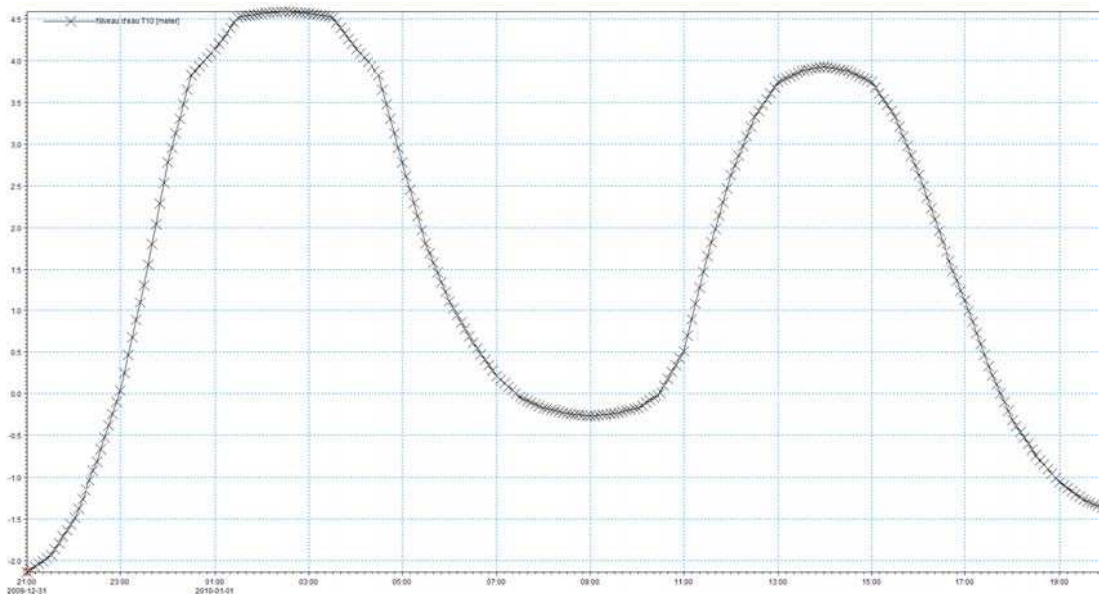


Figure 8-31 : Marégramme utilisé au large pour T10

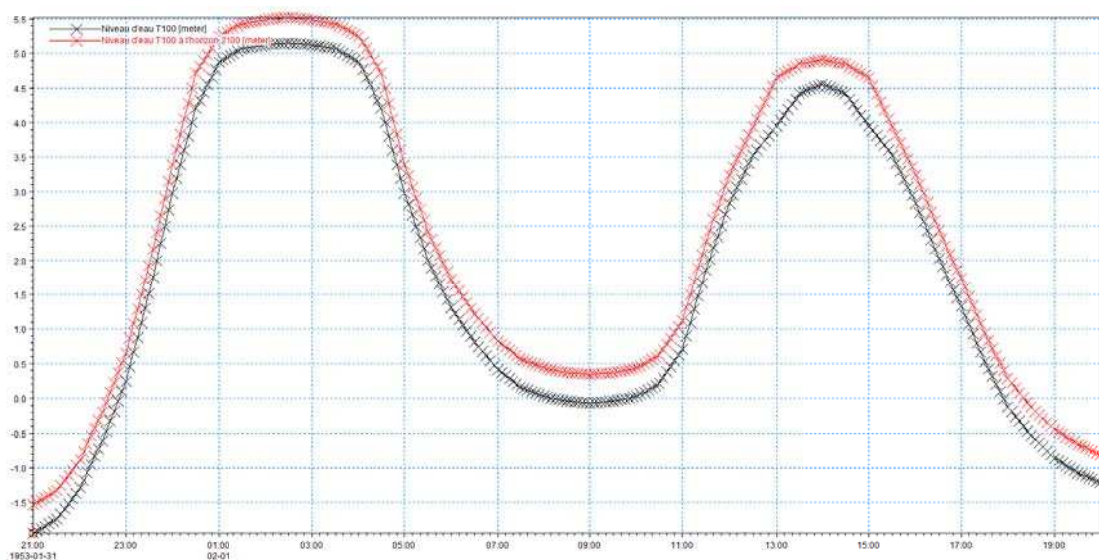


Figure 8-32 : Marégrammes utilisés au large pour T100 et T100 à l'horizon 2100

Les débits injectés dans le modèle hydrodynamique terrestre

L'estimation des débits de franchissement a été effectuée à l'aide de la formule empirique proposée dans le « Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures - Assessment Manual ».

Tableau 8-18 : Calculs des débits linéiques injectés dans le modèle

		Profil 1	Profil 2	Profil 3
10 ans	Revanche au niveau de pleine-mer (m)	0,91	0,77	0,79
	Débit linéique maximal (l/s/m)	0	439	204
100 ans	Revanche au niveau de pleine-mer (m)	0,33	0,22	0,20
	Débit linéique maximal (l/s/m)	257	1629	1154
100 ans à l'horizon 2100	Revanche au niveau de pleine-mer (m)	Débordement	Débordement	Débordement
	Débit linéique maximal (l/s/m)	-	-	-

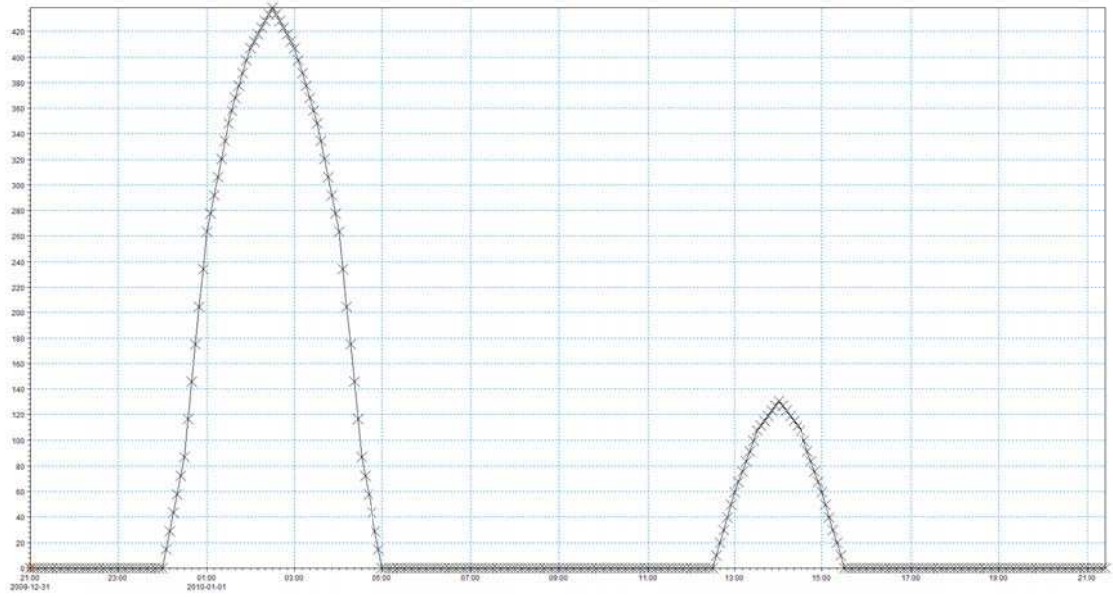


Figure 8-33 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 2 (10 ans)

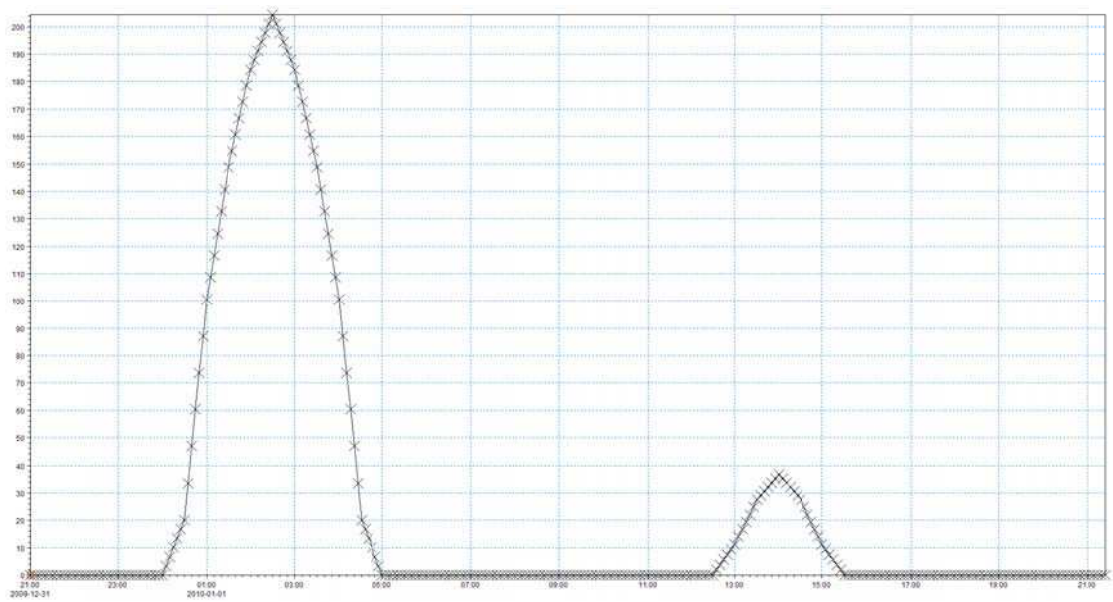


Figure 8-34 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 3 (10 ans)

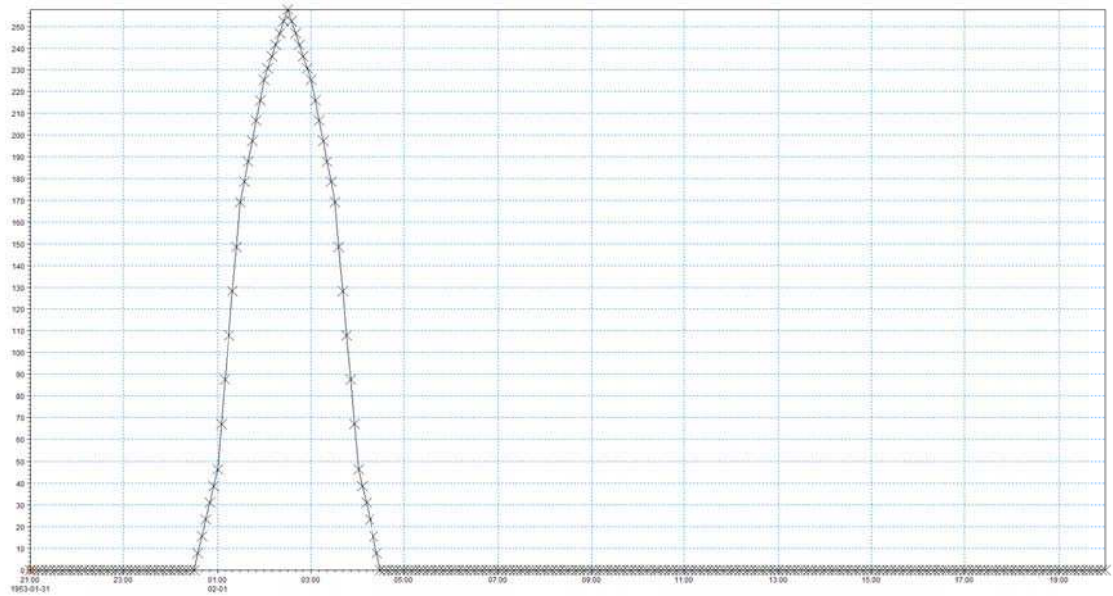


Figure 8-35 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 1 (100 ans)

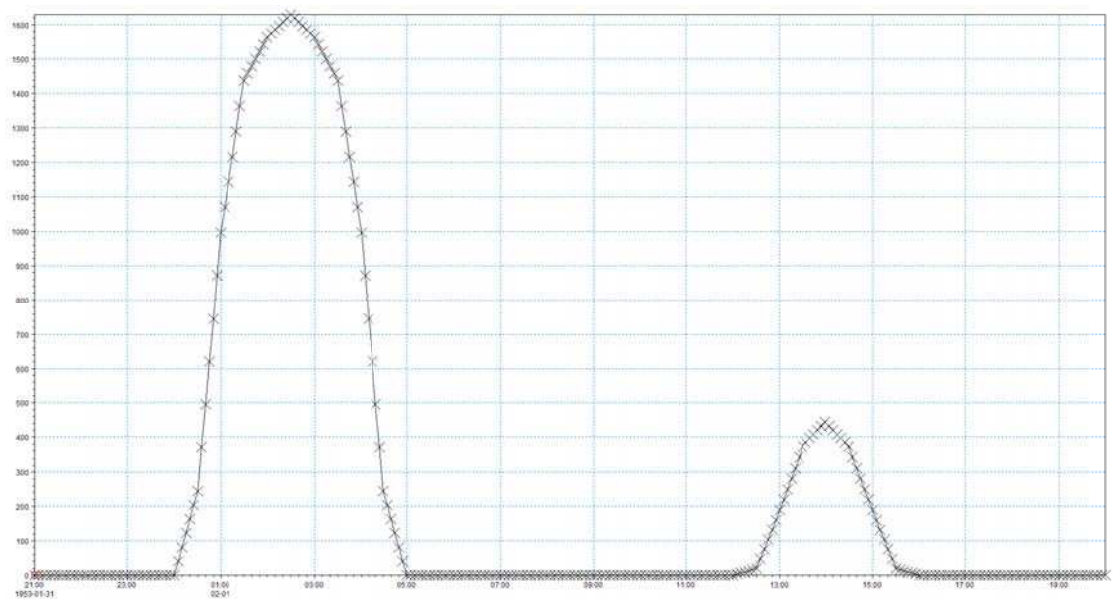


Figure 8-36 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 2 (100 ans)

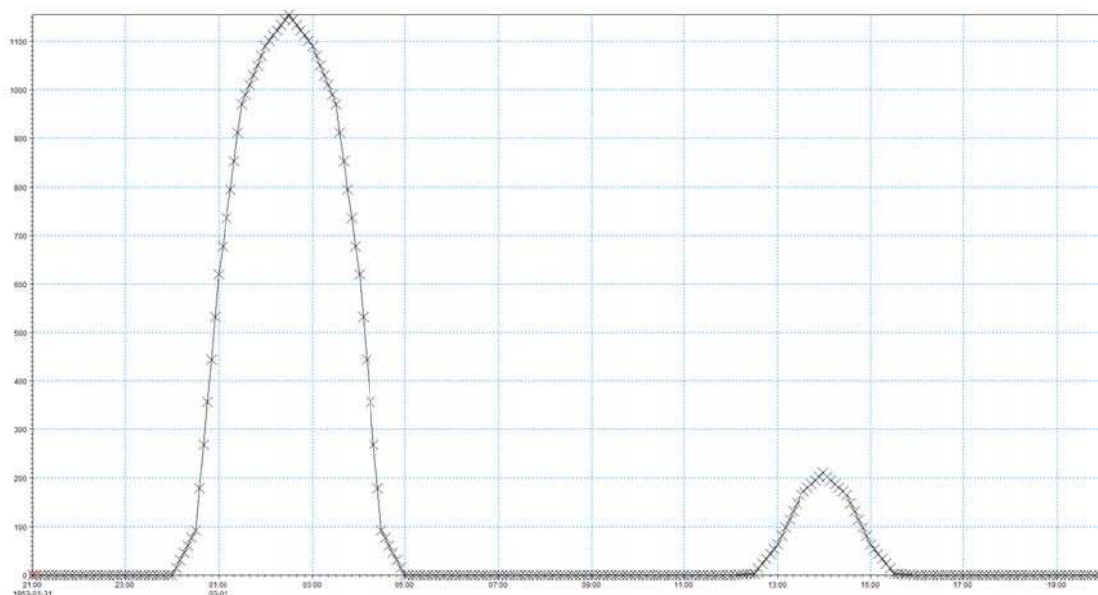


Figure 8-37 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 3 (100 ans)

8.3.2 Dynamique de submersion

L'extension des inondations calculées pour les différentes périodes de retour reste limitée au perré, et n'atteint généralement que la première rangée de bâtiments.

Les caractéristiques de la partie Est (Profil 1) du perré sont telles que le débit linéique de franchissement calculé sur cette partie est faible en comparaison des débits linéiques calculés sur les parties Ouest et centre de l'ouvrage. Il en résulte sur cette partie Est une hauteur d'eau insuffisante pour que l'inondation se propage dans les rues perpendiculaires au perré.

Pour les simulations des aléas 100 ans à l'horizon 2100, l'ampleur de l'inondation est à peine supérieure à la simulation des aléas T100, mais l'aléa plus fort s'explique principalement par des hauteurs d'eau maximales plus élevées sur le perré.

8.3.3 Cartographie

La bande de 100 m est délimitée à l'Ouest par la rue de la Plage, au-delà de laquelle la topographie est rapidement plus élevée. A l'Est, cette bande s'étend jusqu'à la rue de Flandre. En effet, la modélisation de la propagation de la houle sur un profil situé au-delà de cette rue a montré qu'il n'y existait pas de risque de franchissement pour l'événement centennal.

Cartographie des aléas 10 ans



Figure 8-38 : Malo les Bains - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal



Figure 8-39 : Malo les Bains - Cartographie de la vitesse de submersion modélisée pour un événement décennal



Figure 8-40 : Malo les Bains - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal

Cartographie des aléas 100 ans

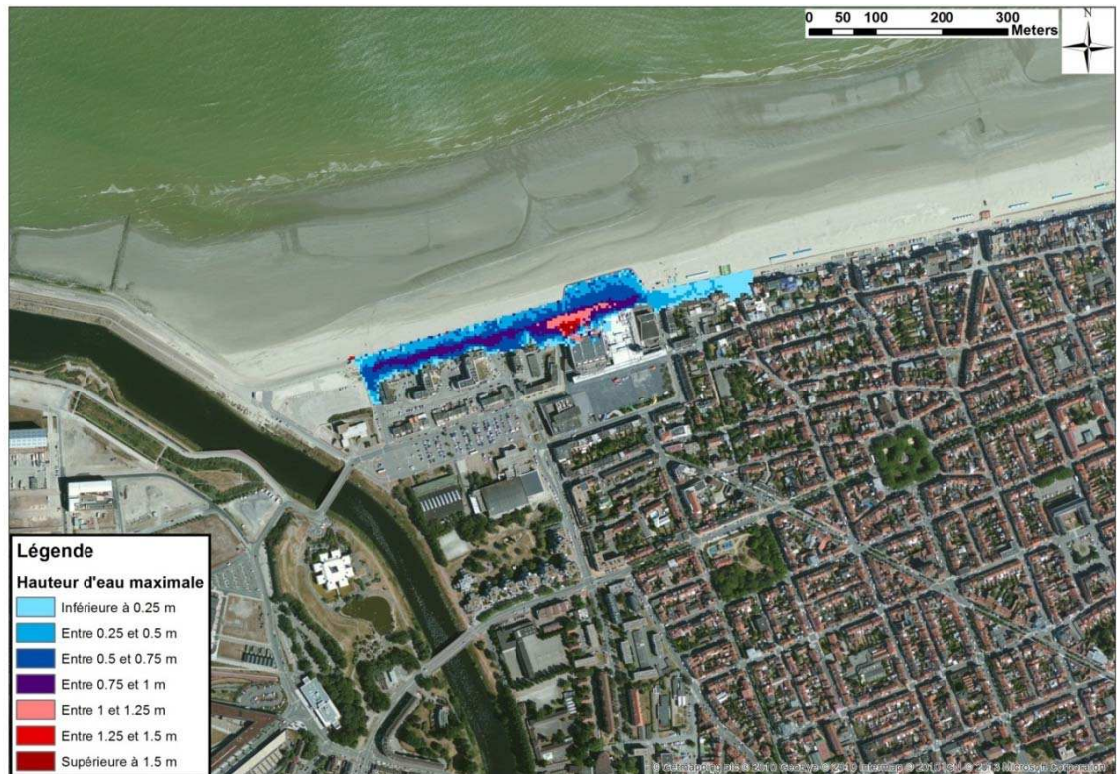


Figure 8-41 : Malo les Bains - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal



Figure 8-42 : Malo les Bains - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal



Figure 8-43 : Malo les Bains - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal

Cartographie des aléas 100 ans à l'échéance 2100



Figure 8-44 : Malo les Bains - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100



Figure 8-45 : Malo les Bains - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100



Figure 8-46 : Malo les Bains - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100

8.4 Dunkerque - rupture de la digue des Alliés

8.4.1 Hypothèses

Les niveaux marins statiques extrêmes retenus

Les niveaux marins à Dunkerque ont été extraits des chroniques enregistrées au marégraphe, le port de Dunkerque étant un port de référence. La chronique d'acquisition des données s'étend du 07/06/1956 au 24/11/2009. La chronique présente 23,3% de lacunes soit une durée utile de 41 années.

Tableau 8-19 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Dunkerque

	Niveau extrême de pleine-mer
T10	4,40
T100	4,70

Les niveaux marins totaux retenus

Une élévation du niveau marin lié au réchauffement climatique pris en compte en 2013 de 0,20 m a été ajoutée au niveau de pleine-mer centennal. Pour la modélisation de l'évènement centennal incluant le changement climatique à l'horizon 2100, une surcote supplémentaire de 0,40 m a été ajoutée afin d'obtenir une élévation moyenne de 0,60 m conforme au scénario pessimiste établi par l'ONERC.

Le calcul de la surcote de déferment liée aux niveaux marins précédemment exposés est effectué par propagation de la houle au travers d'un modèle 1D (cf. paragraphe 4.5).

Le profil utilisé pour déterminer la surcote de déferlement est celui mesuré avant le rechargement de la digue des Alliés. Ce rechargement modifie le profil utilisé pour calculer la surcote de déferlement sur le site de Dunkerque. Un premier confortement transitoire a été réalisé en janvier 2012. Les données bathymétriques suivies par l'université ont été transmis à DHI. Les 2 profils avant / après le rechargement partiel sont représentés dans la figure suivante.

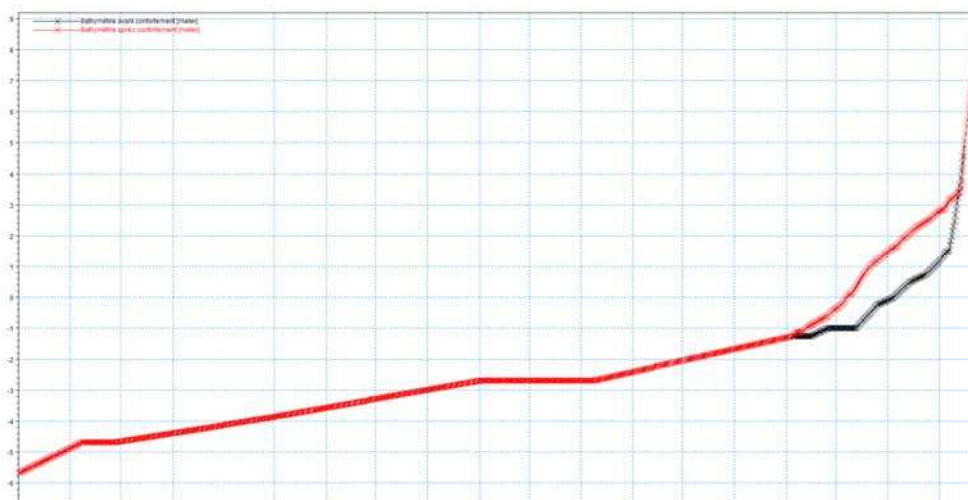


Figure 8-47 : Profils avant et après rechargement de la digue des Alliés à Dunkerque (en rouge profil après rechargement, en noir profil avant rechargement)

Tableau 8-20 : Calcul de la surcote de déferlement liée au profil de l'estran à Dunkerque

		Surcote de déferlement
Niveau marin centennal 2013	Profil avant rechargement	0,32
	Profil après rechargement	0,22
Niveau marin centennal 2100	Profil avant rechargement	0,20
	Profil après rechargement	0,13

La différence des résultats avant et après rechargement de l'estran reste faible et est par ailleurs en partie masquée par l'estimation de l'incertitude sur le calcul. Nous avons donc proposé de maintenir les valeurs issues du calcul avant le rechargement.

L'incertitude sur les hypothèses de calcul de la surcote de déferlement est de plus intégrée aux niveaux marins finaux (cf. paragraphe 4.3.3).

Tableau 8-21 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement

		Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul du set up
Niveau marin décennal	Hypothèses originales	0,46	0,06
	Hypothèses combinées	0,52	
Niveau marin centennal 2013	Hypothèses originales	0,32	0,06
	Hypothèses combinées	0,38	
Niveau marin centennal 2100	Hypothèses originales	0,20	0,06
	Hypothèses combinées	0,26	

Les niveaux marins totaux s'établissent ainsi :

Tableau 8-22 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus à Dunkerque

	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total retenu
T10	4,40	-	0,46	0,06	4,92
T100	4,70	0,20	0,32	0,06	5,28
T100 à l'horizon 2100	4,70	0,60	0,20	0,06	5,56

Les signaux de marée ont été modifiés pour atteindre ces niveaux extrêmes de pleine-mer, comme présenté figure suivante.

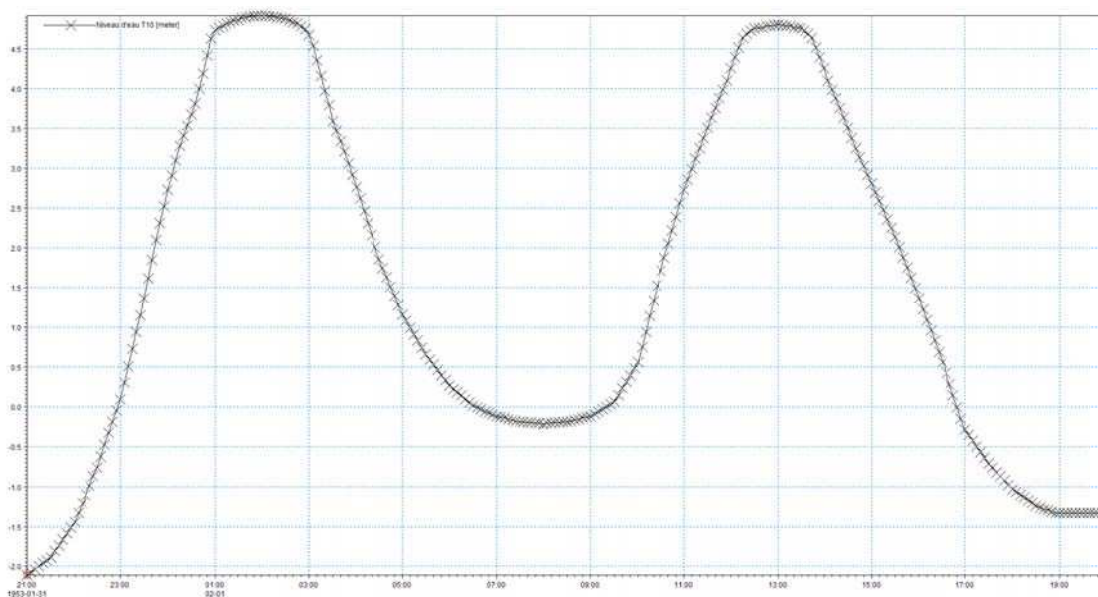


Figure 8-48 : Marégramme utilisé pour T10

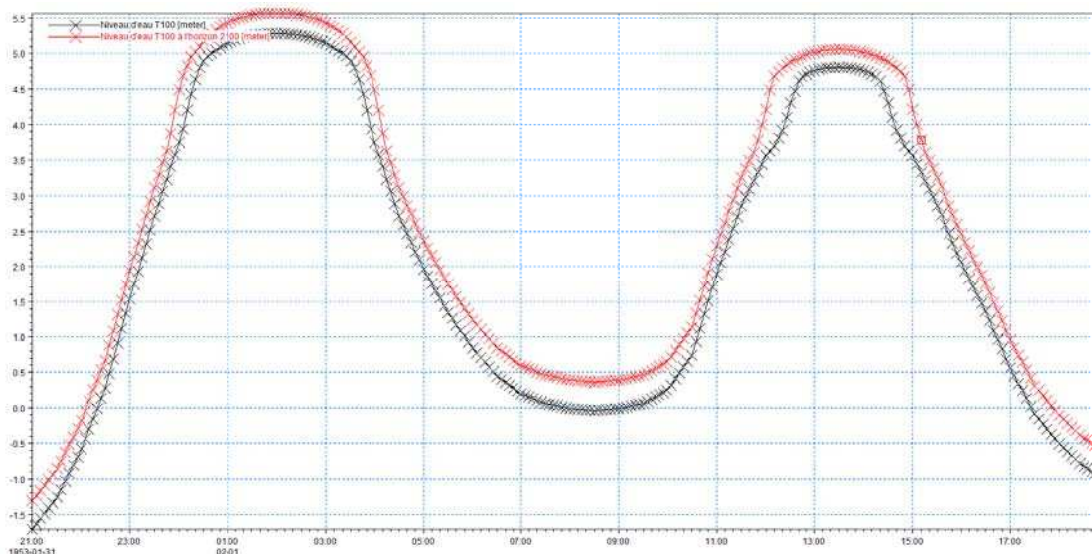


Figure 8-49 : Marégrammes utilisés pour T100 et T100 à l'horizon 2100

Notons également que le modèle a été étendu sur l'avant-port de Dunkerque au niveau du bassin à marée afin de prendre en compte les débordements sur les terre-pleins portuaires. Les niveaux retenus pour l'aléa décennal, centennal et centennal à l'horizon 2100 sont respectivement 4,66 m NGF, 5,09 m NGF et 5,43 m NGF. Ces niveaux ont été déterminés à partir des niveaux statiques de pleine mer sans prise en compte des phénomènes de surcote de déferlement. En effet, la profondeur dans l'avant-port supérieure à celle du littoral adjacent et les évolutions bathymétrique (pentes du fond de l'avant-port) ne sont pas de nature à générer de surcote lié au déferlement bathymétrique dans l'intérieur du port. Cependant le déferlement de la houle à l'entrée du port sur la plage du Braeck pouvant se propager dans l'avant-port, la possibilité de la bascule du plan d'eau dans le bassin à marée (fetch > 2 km) et le phénomène de clapot généré sont des phénomènes pouvant conduire à une sous-estimation du niveau marin total. C'est pourquoi une surcote égale à 50% de la surcote de déferlement due à la houle a été considérée dans le bassin à marée correspondant au retour d'expérience rapporté par le CETMEF lors de la tempête Xynthia.

Conditions initiales pour le canal exutoire

Le canal exutoire est pris en compte dans le modèle 2D, sa bathymétrie est définie à -5 m IGN 69, valeur déterminée à l'aide des profils en travers réalisés par SOGREAH.

La détermination des conditions de remplissage du canal exutoire au moment de l'initialisation de la brèche a été déterminée par une analyse statistique des niveaux d'eau. Ces niveaux sont issus de 5 années d'enregistrement qui ont été fournies par l'Institution Interdépartementale des Wateringues. L'apparition de la brèche étant conditionnée par des niveaux de pleine mer, la chronique fournie a été ré échantillonnée sur les périodes autour de la pleine mer. Ces chroniques permettent de déterminer la densité de probabilité et la fonction de répartition des niveaux dans le canal exutoire.

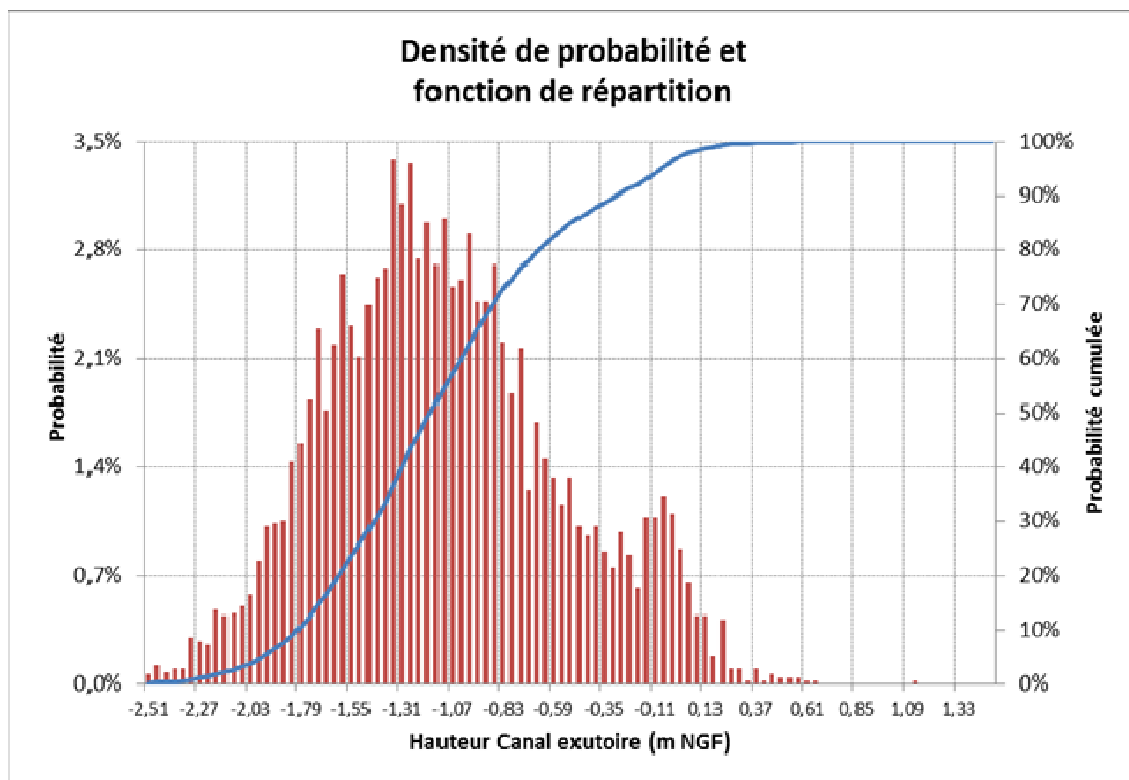


Figure 8-50 : Densité de probabilité (en rouge) et fonction de répartition (en bleu) des niveaux d'eau dans le canal exutoire

Le niveau dans le canal exutoire a ainsi été fixé à -1,51m IGN 69 correspondant au 25^{ième} percentile du total de l'échantillon. Cette valeur est d'une part conforme à la régulation des niveaux effectués dans le canal exutoire confirmé par l'institution des Wateringues et d'autre part n'est pas de nature à cumuler des phénomènes probabilistes maritimes et fluviaux qui pourraient surévaluer le phénomène de submersion.

Ouvrage des 4 écluses

En cohérence avec le niveau initial dans le canal exutoire correspondant à une situation de basses eaux, l'ouvrage de jonction est considéré comme fermé. En effet en l'absence de crues continentales, pour un niveau à -1,51 m NGF dans le canal exutoire, l'ouvrage de jonction est fermé pour maintenir les niveaux normaux de navigation (cf. §6.2.2).

Modèle des wateringues

Le réseau des Wateringues est représenté par un modèle 1D, avec un couplage latéral avec le modèle 2D pour les portions de canaux au plus près de l'ouvrage de jonction, qui sont les plus susceptibles de déborder ou de recevoir de l'eau de la submersion des terrains du modèle 2D. Il est vérifié à posteriori que les niveaux d'eau dans les canaux non couplés au modèle 2D n'atteignent pas la cote de débordement et qu'il n'est donc pas nécessaire d'y intégrer des liens latéraux.

Les extrémités des canaux sont localisés sur les écluses, hormis pour le canal Hougracht interrompu en limite du modèle 2D, et les canaux Langhe-Gracht et Coudekerque. Les canaux de Furnes et de Basse Colme (tels que représentés sur la carte suivante) sont prolongés par une branche représentative de la distance jusqu'à l'écluse du côté Belgique.

Le réseau de canaux modélisé est représenté sur la figure ci-dessous.

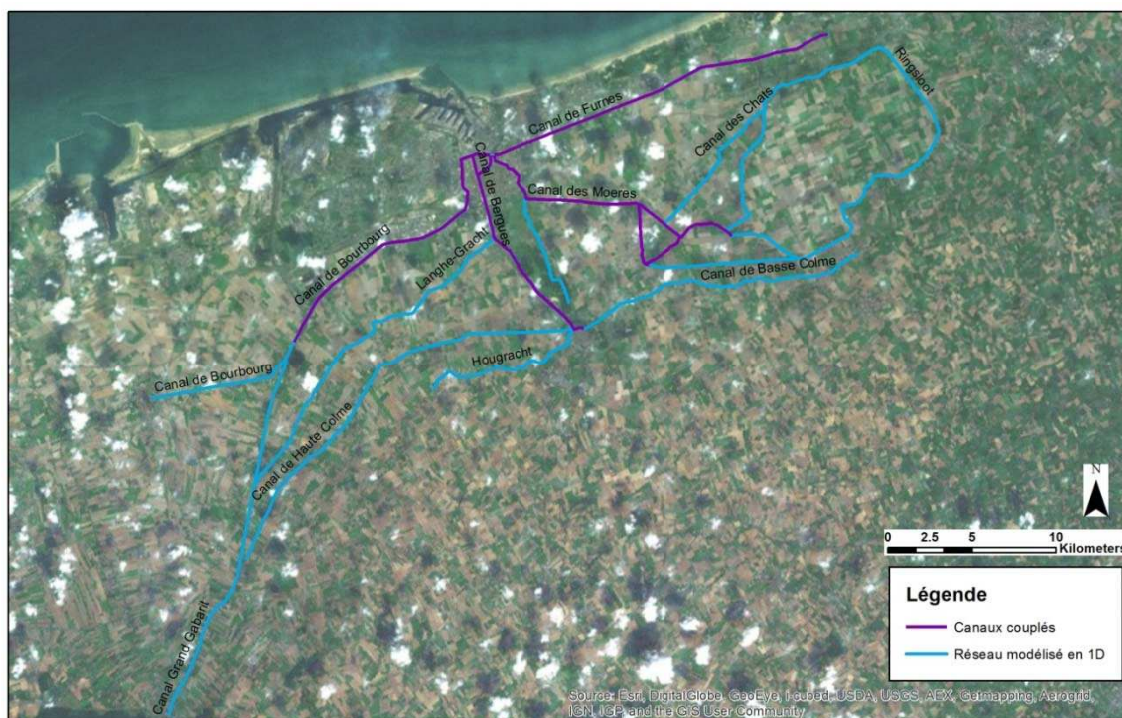


Figure 8-51 : Réseau des canaux modélisés en 1D

Afin de mieux représenter les débordements du canal de Furnes, deux points de débordements en rive Sud ont été identifiés sur le terrain et pris en compte dans la nouvelle version de la simulation :

- La connexion du canal de Furnes avec le lac de Tétéghem via un watergang (figure ci-dessous). Cette connexion se fait via un passage maçonné sous la route, aux dimensions de 0,60 m de large sur 1,20 m de haut. Côté canal de Furnes, la côte radier a été définie à 0,90 m NGF (recensement VNF) soit au niveau d'eau initial dans le canal. Côté lac de Tétéghem, la côte radier a été définie à 1,10 m NGF d'après l'estimation terrain de la pente du passage vers le canal à environ 20 cm. En fonctionnement normal, la connexion hydraulique entre le canal de Furnes et le watergang en rive Sud n'est pas établie, le niveau d'eau dans le watergang a été estimé 2 cm en dessous de la côte radier de l'ouvrage. Le niveau d'eau initial dans le watergang et le lac ont ainsi été ajustés à 1,08 m NGF. Cette structure ainsi que le watergang sont modélisés en 1D et liés au 2D via des liens de déversements latéraux sur les rives du watergang et un lien vers le lac. La mise en charge de cet ouvrage sous la route va permettre un débordement du canal de Furnes vers le watergang puis le lac de Tétéghem.

- La connexion du canal de Furnes avec un fossé longeant la route via la station de pompage de Ghyvelde (près de la frontière belge). Le passage sous la route se fait par un dalot dont les dimensions ont été estimées à 1 m de large pour 1 m de haut, avec un sommet à 1,60 m NGF. A la mise en charge de ce passage, les débordements atteignent la plateforme de la station de pompage (estimée à 1,30 m NGF) et l'eau peut alors se déverser dans le fossé de part et d'autre de la station.

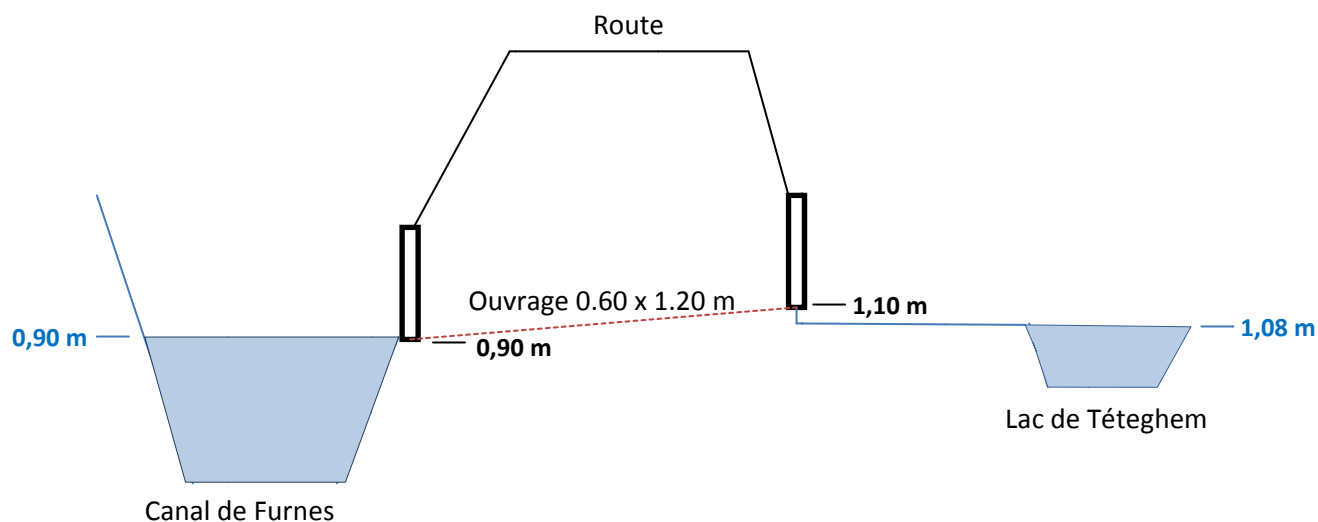


Figure 8-52 : Schéma de la connexion entre le canal de Furnes et le lac de Tétéghem



Figure 8-53 : Watergang du lac de Tétéghem – vue aval et rétablissement hydraulique sous RD



Figure 8-54 : Watergang de la station de pompage de Ghyvelde – vue amont et rétablissement hydraulique sous RD

La figure ci-dessous explicite le couplage 1D/2D réalisé au niveau des 4 écluses, avec les liens latéraux sur toutes les portions de canaux pour prendre en compte l'ensemble des échanges des canaux vers le terrain naturel et inversement. Des portions de liens latéraux (en rouge) représentent spécifiquement les échanges entre l'ouvrage de jonction et l'ensemble canal de jonction – canal de dérivation du canal de Bergues d'une part, et entre l'écluse de Furnes et l'ensemble canal de Furnes – canal des Moeres (isolé par le côté sud du sas) d'autre part.

Le complexe de l'ouvrage de jonction et de l'écluse de Furnes est représenté ainsi par 4 seuils dans le modèle hydraulique :

- Un seuil sur l'ouvrage de jonction alimentant le canal de Bergues et le canal de jonction. La cote du seuil est calé à la cote d'arase de l'ouvrage ;
- Un seuil au niveau de l'écluse de Furnes en amont du sas permettant une alimentation du canal de Furnes et du canal des Moères. La cote du seuil est calé à la cote d'arase de l'ouvrage ;
- Deux seuils permettant d'isoler les différents canaux (Bergues, Moères, Furnes).

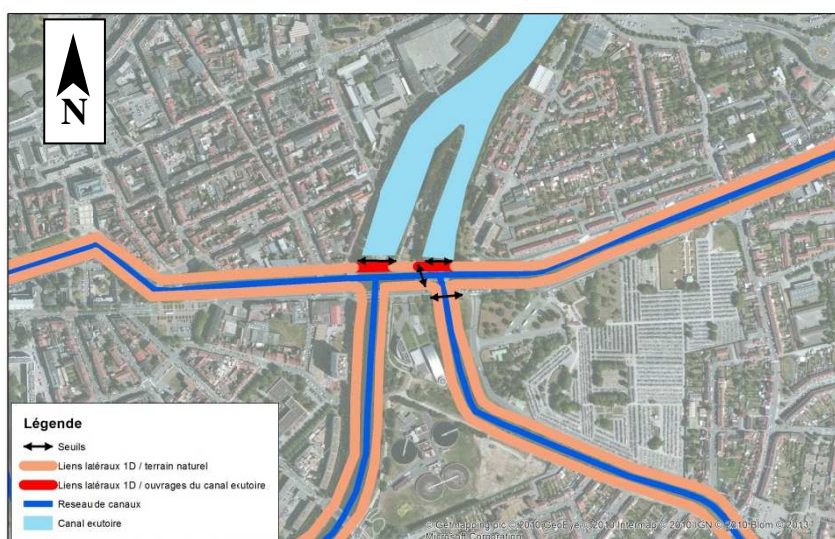


Figure 8-55 : Modalité de couplage 1D / 2D au niveau de l'écluse carrée

La structure des canaux dans le modèle 1D est donnée par les profils en travers fournis. Pour le canal de Furnes, où se concentre la majeure partie de l'inondation, des profils en travers supplémentaires ont été extraits des données LIDAR, avec un espacement de 50 m en zone urbaine près du canal exutoire, et tous les 200 m au-delà. La densification des profils en travers le long du canal de Furnes permet de modéliser plus finement les échanges 1D / 2D via les liens de déversement. Pour le canal des Moeres, également sensible à l'ampleur de l'inondation, quelques profils ont été ajoutés de la même manière, afin d'avoir un espacement inférieur à 200 m sur le premier kilomètre à partir de l'ouvrage de jonction.

La figure ci-dessous schématise les canaux de Furnes et des Moeres (en rouge) couplés latéralement avec le lit majeur (liens en mauve, ainsi que la répartition des profils en travers décrivant la structure des canaux (en noir).

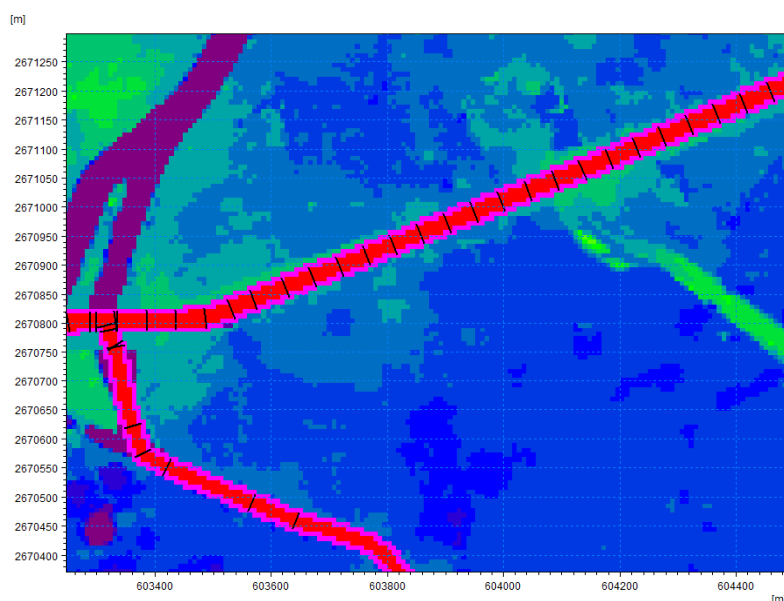


Figure 8-56 : Illustration de la représentation des canaux de Furnes et des Moeres aux abords de l'écluse carrée et de leurs couplages latéraux

Les niveaux d'eau initiaux imposés dans les canaux sont résumés dans le tableau suivant. Les stations de pompage existantes sur l'ensemble des Wateringues ne sont pas considérées, leur influence n'est donc pas prise en compte.

Tableau 8-23 : Niveaux d'eau initiaux dans les canaux

Canal	Niveau d'eau initial (m IGN 69)
Furnes	0.90
Bourbourg	1.26
Grand Gabarit	1.26
Bergues	-0.17
Langhe-Gracht	-0.10
Haute Colme	0.71
Basse Colme	0.00
Hougracht	0.00
Moeres	-1.30
Chats	-1.30
Ringsloot	-1.30
Coudekerque	-1.30

Régulation de l'ouvrage Tixier

L'ouvrage Tixier, entre l'extrémité Ouest du canal exutoire et le port est représenté in extenso par l'ensemble des vannes dans le modèle 1D. Il est ouvert à marée descendante uniquement, et permet une vidange du canal exutoire lorsque son niveau d'eau est

supérieur d'au moins 10 cm à celui du port conformément aux consignes de régulation précisées par l'Institution Interdépartementale des Wateringues.

Nous avons pris en considération dans nos hypothèses de calcul le fonctionnement des asservissements de l'ouvrage Tixier tel que précisé ci-dessus.

Les débits d'eau transitant du canal exutoire vers le port à travers l'ouvrage, ainsi que les niveaux d'eau dans le port (bleu marine) et le canal exutoire (turquoise) pour la simulation avec le niveau centennal sont représentés sur le graphique ci-dessous.

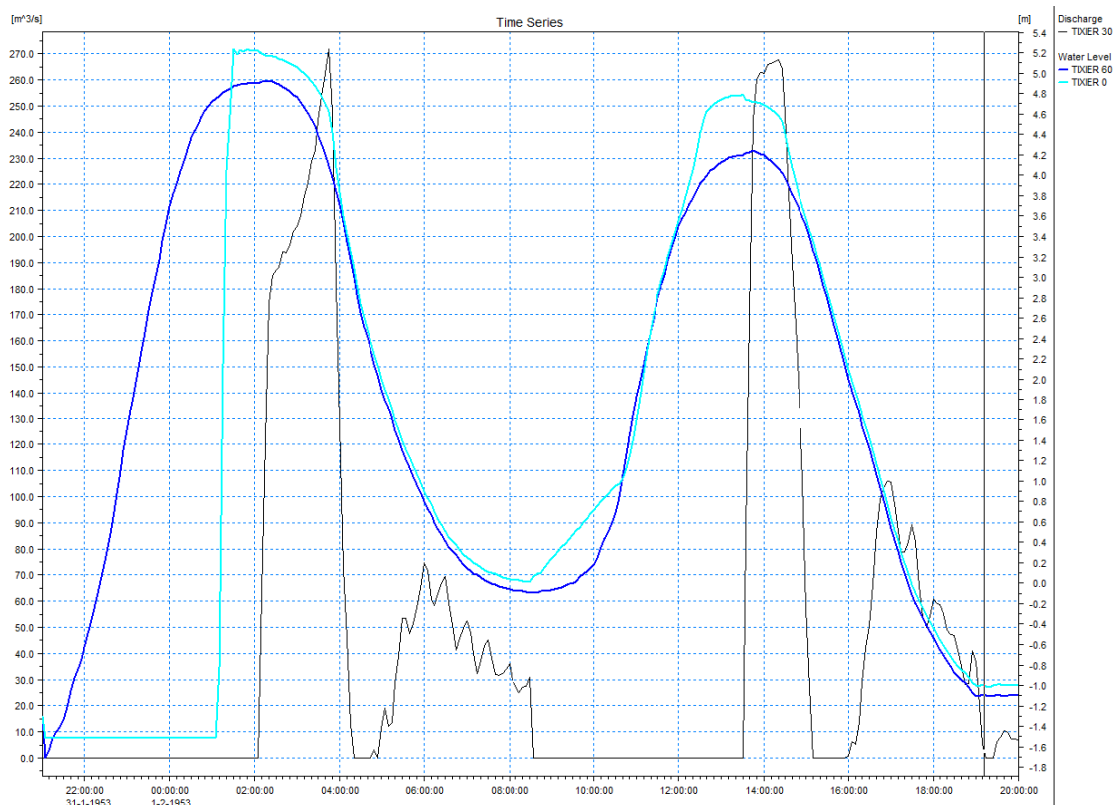


Figure 8-57 : Débits passant par l'ouvrage Tixier (noir) et niveaux d'eau dans le port (bleu marine) et le canal exutoire (turquoise)

La carte ci-dessous illustre la différence de hauteur d'eau maximale de submersion entre la simulation avec ouverture de l'ouvrage de Tixier et celle sans. La simulation avec ouverture de l'ouvrage de Tixier donne une surface d'inondation avec des hauteurs d'eau maximales inférieures à celles de la simulation ouvrage de Tixier fermé, jusqu'à 7 cm. A l'Est du canal des Moeres, l'emprise de l'inondation est légèrement inférieure pour la simulation avec ouverture de l'ouvrage Tixier, d'où une différence de hauteur maximale d'eau de l'ordre de 30 cm entre les deux simulations (en rouge sur la carte). La prise en compte du fonctionnement de cet ouvrage permet donc d'évacuer une partie de l'eau introduite dans le canal exutoire et permet alors de limiter légèrement l'inondation par les canaux et par la propagation terrestre. La prise en compte de l'ouvrage ne modifie ainsi que sensiblement l'aléa submersion.

Néanmoins, les résultats de simulations présentés dans ce rapport tiennent compte de l'ouverture de l'ouvrage de Tixier à marée descendante afin de s'aligner sur le protocole de gestion de l'Institution Interdépartementale des Wateringues.



Figure 8-58 : Carte différentielle de hauteur d'eau maximale entre la simulation avec ouvrage de Tixier fermé et celle avec ouvrage de Tixier ouvert à marée descendante pour l'événement centennal

Les hypothèses prises en compte pour la modélisation de la submersion marine sur le site de Dunkerque sont construites sur la base du scénario centennal actuel. Elles sont également justifiées pour le scénario centennal à l'horizon 2100.

Les caractéristiques de la brèche

La brèche simulée dans la digue des Alliés est d'une longueur de 100m. La crête de la digue est arasée de 8,5m à 0,8m IGN 69 en 15 minutes (cf. Paragraphe 6.2.2).



Figure 8-59 : Position de la brèche dans la digue des Alliés

8.4.2 Dynamique de submersion

D'une manière générale, les modifications apportées au modèle de propagation permettent un gain de précision due la description des canaux en 1D. Leur description est issue des profils en travers extraits des données LIDAR discrétisées tous les 100 mètres, alors que les berges des canaux étaient, dans les modèles initiaux, décrits par une bathymétrie de précision 8 mètres. Ceci explique les différences de résultats entre versions, l'interpolation bathymétrique à 8 m pouvant lisser la donnée topographique et en conséquence sur estimer les échanges lit mineur lit majeur.

Les débits représentés ci-dessous ont été calculés dans le canal exutoire, au sud de la brèche et au nord de la zone de débordement du canal. Pour le second point de calcul, le débit de pointe est amorti quasiment de moitié par rapport au point au plus près de la brèche.



Figure 8-60 : Position des sections de mesures du débit dans le canal exutoire

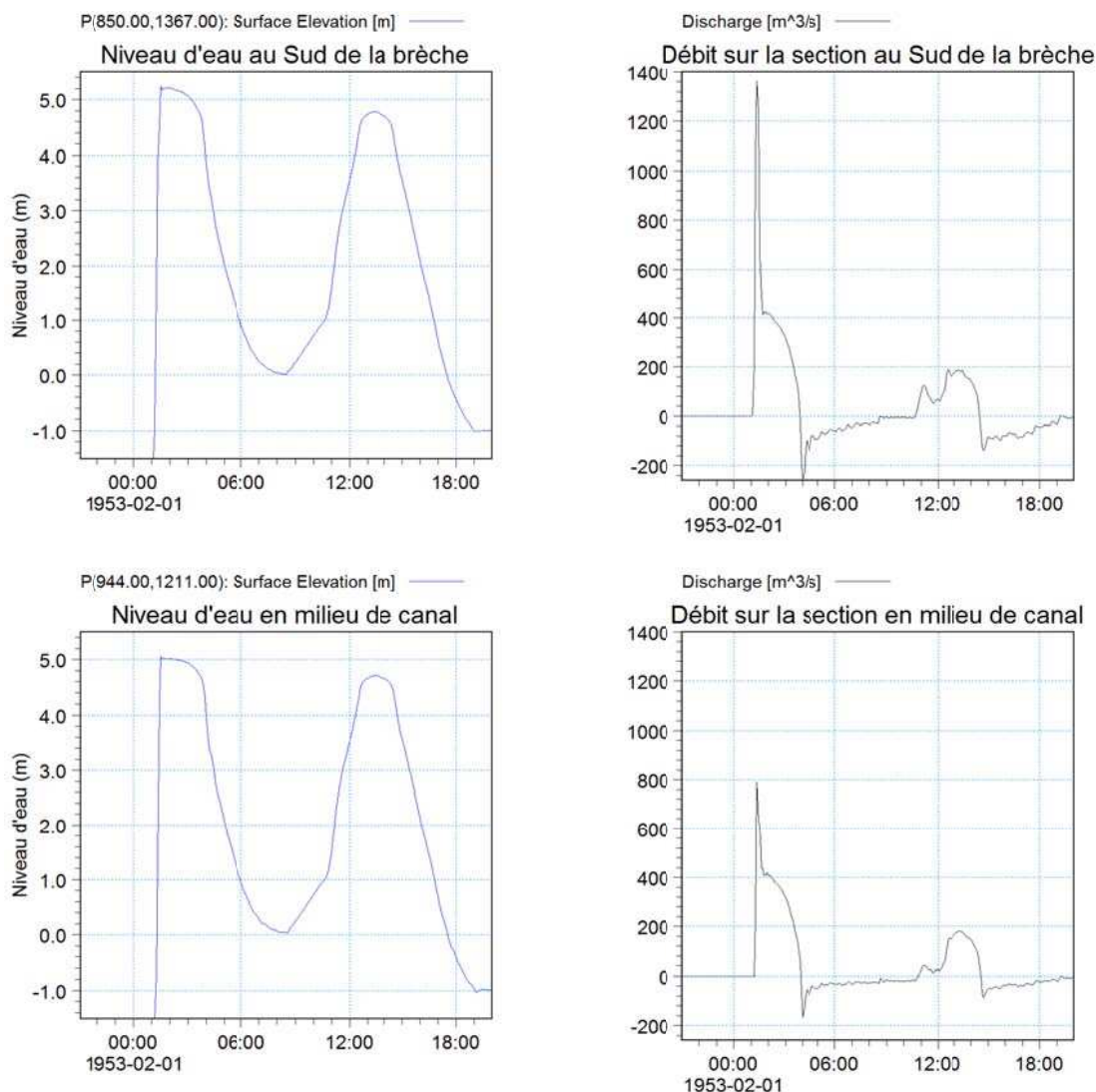


Figure 8-61 : Niveaux d'eau et débits mesurés dans le canal exutoire (au Sud de la brèche et en milieu de canal au Nord de la zone de débordement) pour l'aléa T100.

Au niveau des quatre écluses, le niveau d'eau au sud du canal exutoire atteint l'altitude de l'ouvrage de jonction et de l'écluse de Furnes.

L'évolution au cours de la simulation des hauteurs d'eau et des débits au-dessus de l'ouvrage de jonction et de l'écluse de Furnes (voir carte ci-dessous) est représentée sur le graphique suivant :



Figure 8-62 : Position des sections de mesures du débit et des hauteurs d'eau sur l'ouvrage de jonction et l'écluse de Furnes

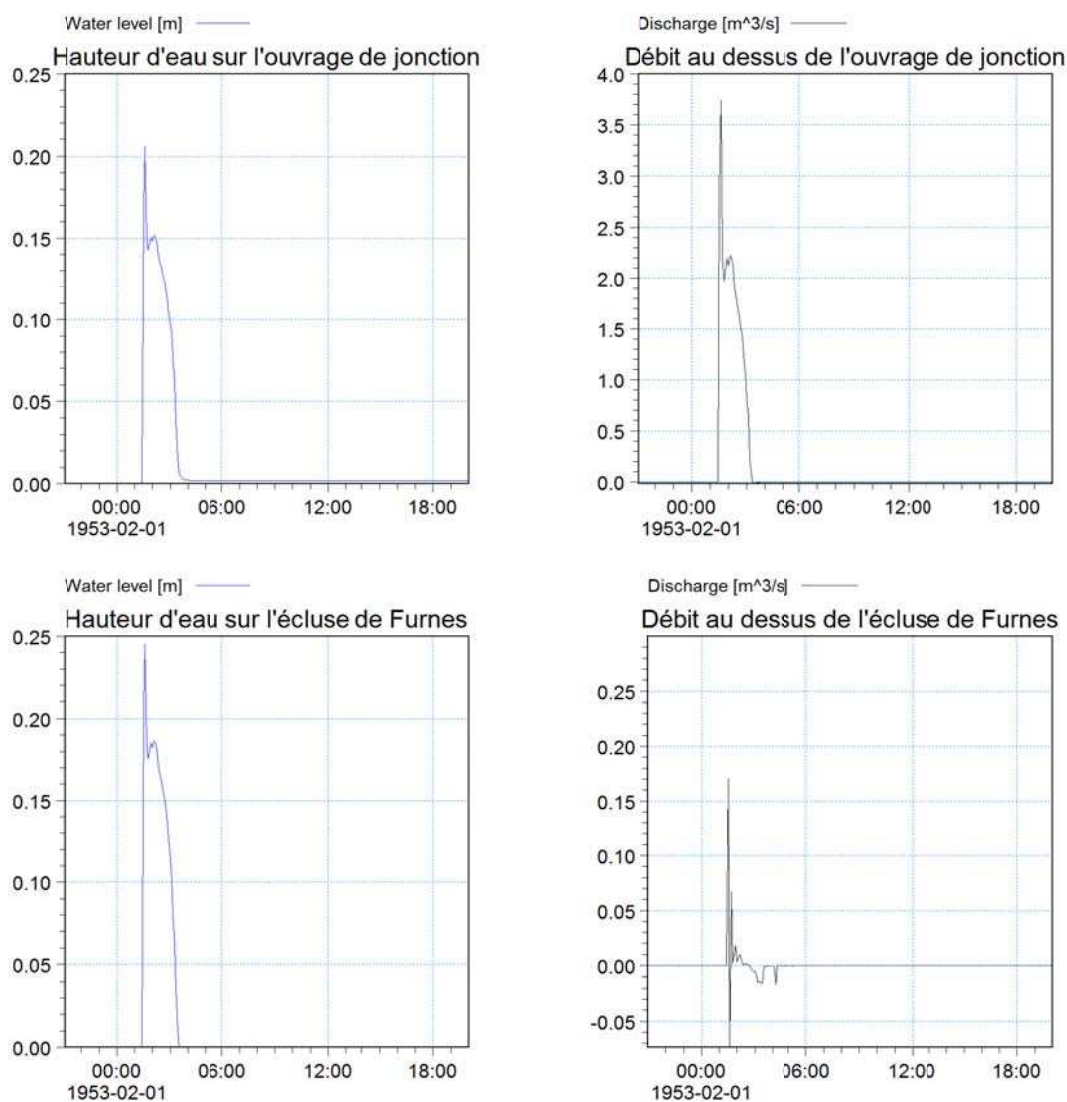


Figure 8-63 : Hauteurs d'eau et débits mesurés au-dessus de l'ouvrage de jonction et de l'écluse de Furnes pour l'aléa T100.

L'eau passant au-dessus de l'ouvrage de jonction se déverse alors dans le canal de jonction menant au canal de Bourbourg et dans le canal de dérivation du canal de Bergues, faisant augmenter le niveau de 8 cm environ (figure suivante, niveau d'eau en noir, débit en bleu).

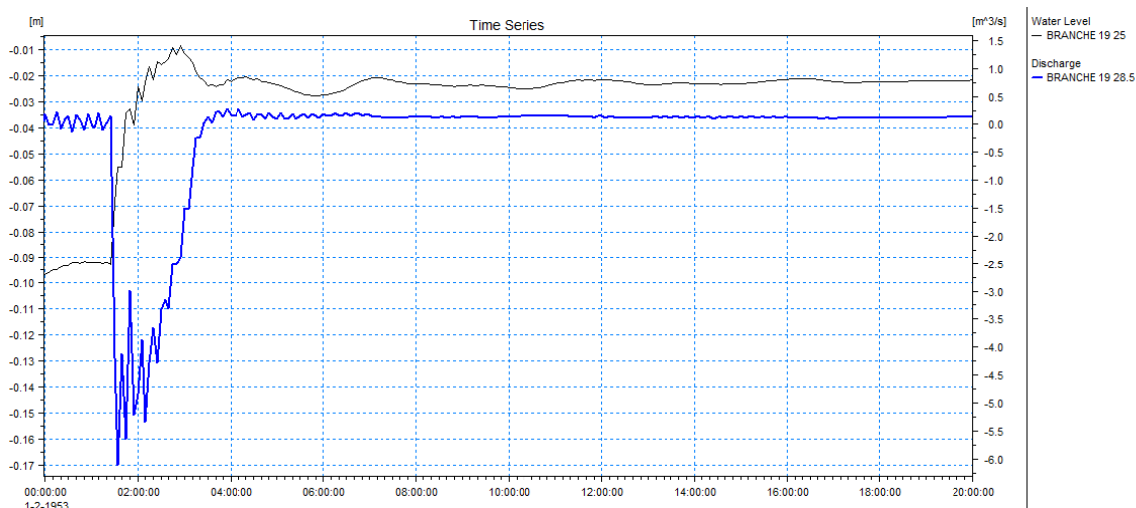


Figure 8-64 : Evolution du niveau d'eau et du débit dans le canal de Bourbourg et de dérivation du canal de Bergues en amont de l'ouvrage de jonction pour l'aléa T100

L'eau se déversant par-dessus l'écluse de Furnes est majoritairement exportée vers le canal de Furnes, le modèle actuel ne prenant pas en compte l'isolement partiel du canal de Furnes par le côté Est du sas. Le canal étant par ailleurs alimenté par les débordements du canal exutoire (cf. plus bas entre le pk 500 et le pk 775), l'élévation de son niveau implique un fonctionnement en régime noyé du seuil précédemment décrit.

En effet, le débordement par l'écluse de Furnes a une double répartition, schématisée sur la figure ci-dessous, d'une part dans le sas et d'autre part directe vers le canal de Furnes.



Figure 8-65 : Schéma de répartition du débordement au-dessus de l'écluse de Furnes

Les débits vers le canal des Moeres est alors quasi nul du fait de sa déconnexion du canal de Furnes par le sas. Ce parti pris de schématisation n'a pas de conséquence sur le canal de Furnes (apport via l'écluse s'élevant à $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_p = 163 \text{ m}^3/\text{s}$ au pk 775), ni sur le canal des Moères dont la capacité est bien supérieure aux quelques m^3/s qui serait générés (cf. Figure 8-74).

Le fonctionnement général du canal de Furnes est précisé dans les vues ci-dessous :

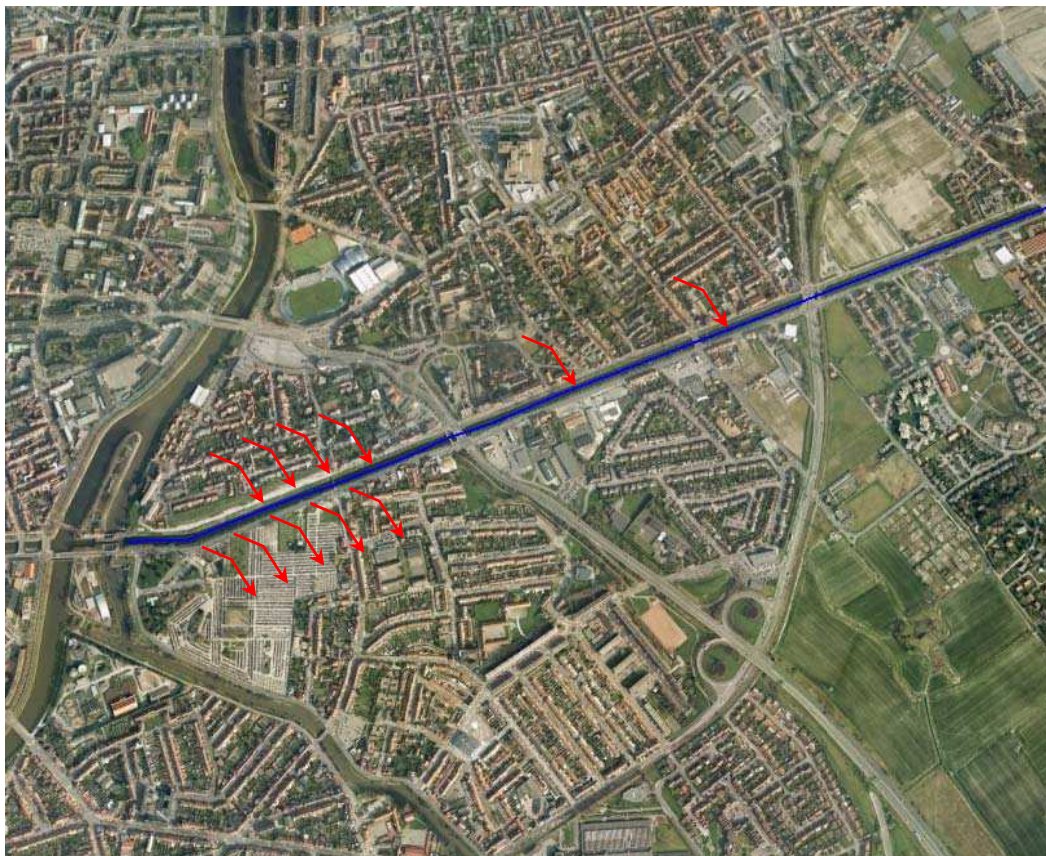


Figure 8-66 : points d'entrée en rive gauche et point de sortie en rive droite du canal de Furnes.



Figure 8-67 : profil en long du canal de Furnes entre pk 0 et pk 1600 1h50 après l'ouverture de la brèche (ligne d'eau maximale) pour l'aléa T100. En rose berge RG, en bleu berge RD.

A noter ainsi que les débordements du canal exutoire sont restitués au canal de Furnes entre pk 500 et pk 775. Cette restitution s'accompagne d'un rehaussement de la ligne d'eau dans le canal responsable du débordement en rive droite entre pk 350 et pk 725. Trois autres points d'alimentation en rive gauche sont à noter entre pk 900 et pk 1600.

L'onde de submersion générée dans le canal de Furnes se propage sur l'intégralité du linéaire. La vue ci-dessous précise les points de débordement depuis le canal (pk 5000 → pk 5800 ; pk 9200 → pk 10250) :



Figure 8-68 : point de sortie en rive gauche du canal de Furnes

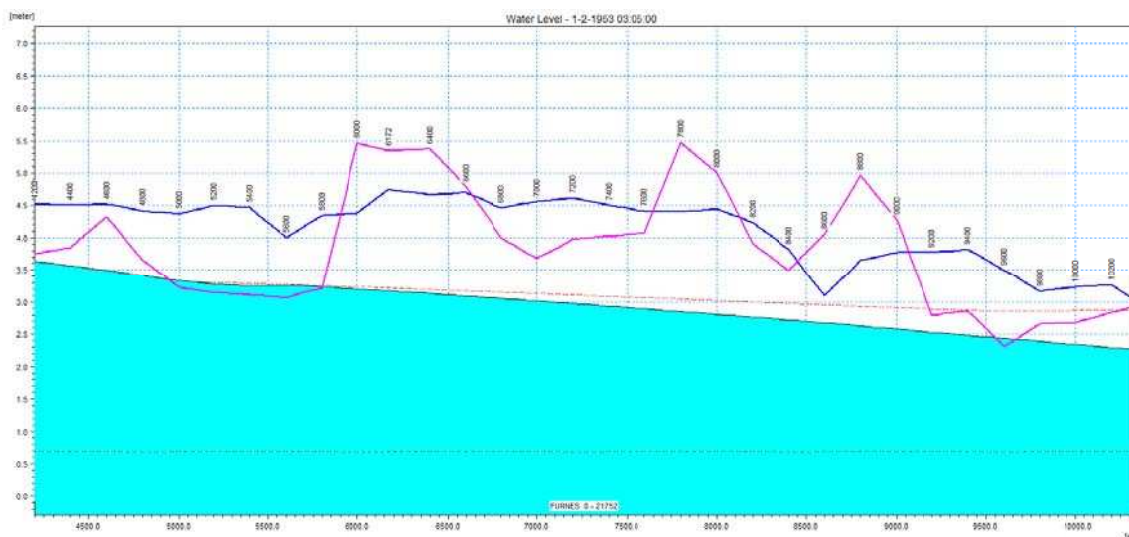


Figure 8-69 : profil en long du canal de Furnes entre pk 4200 et pk 10200 2h05 après l'ouverture de la brèche pour l'aléa T100. En rose berge RG, en bleu berge RD. Niveau d'eau initial en pointillés, ligne d'eau maximale en rouge.

Le laminage dû à la géométrie du canal est précisé sur la vue ci-dessous où les deux hydrogrammes ont été extraits du modèle sur un linéaire sans échanges latéraux :

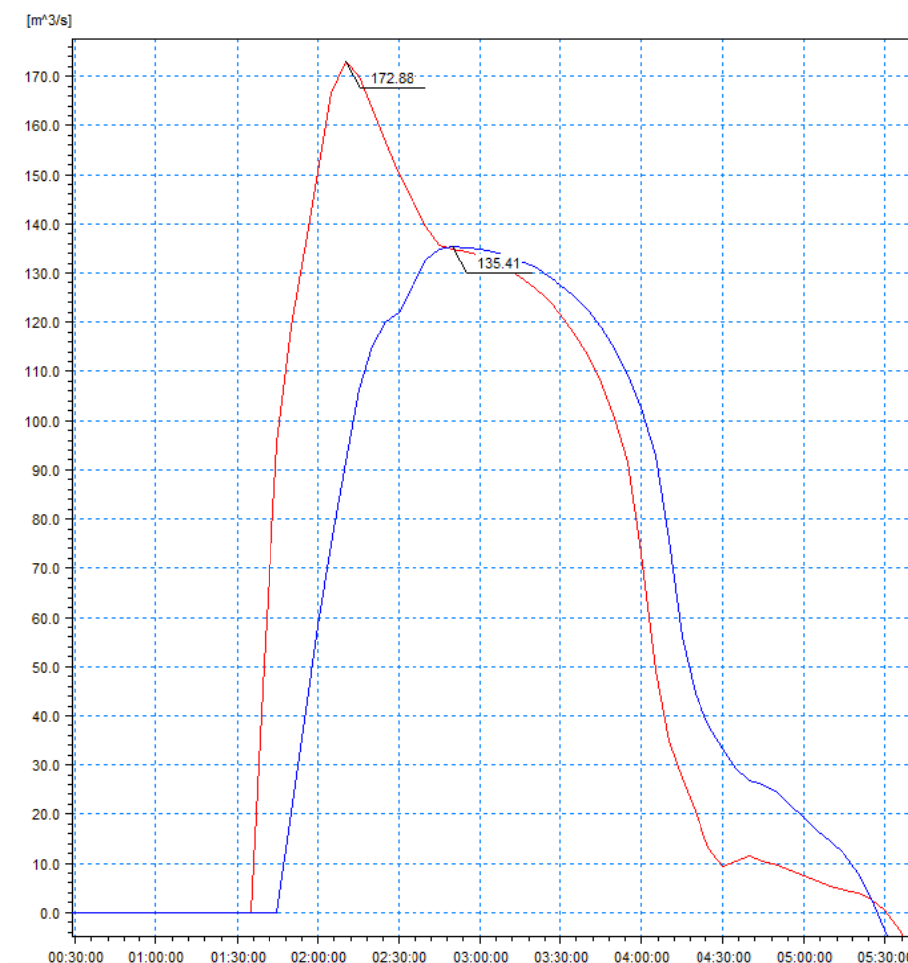


Figure 8-70 : hydrogramme dans le canal de Furnes au pk 1700 (en rouge) et au pk 4900 (en bleu) pour l'aléa T100.

Au final ci-dessous figurent les débits calculés en trois points du canal de Furnes combinant laminage et échanges latéraux.

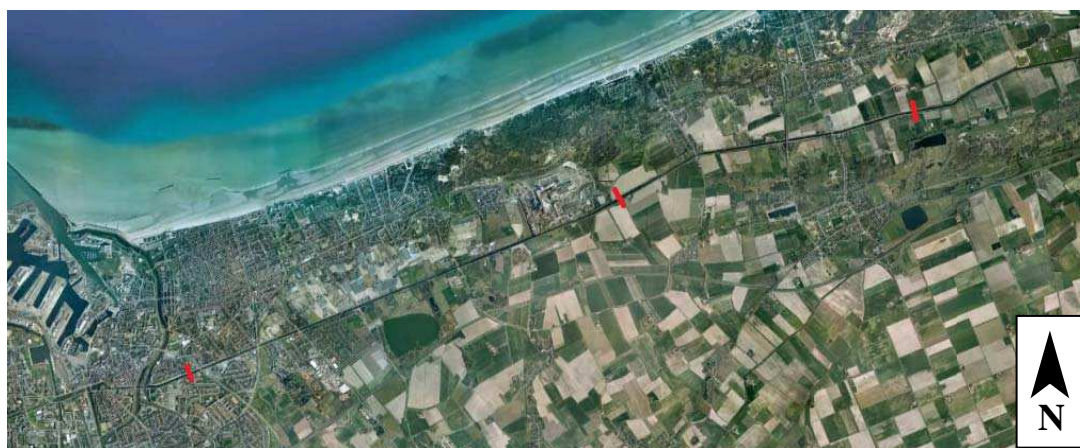


Figure 8-71 : Position des débits mesurés sur le canal de Furnes

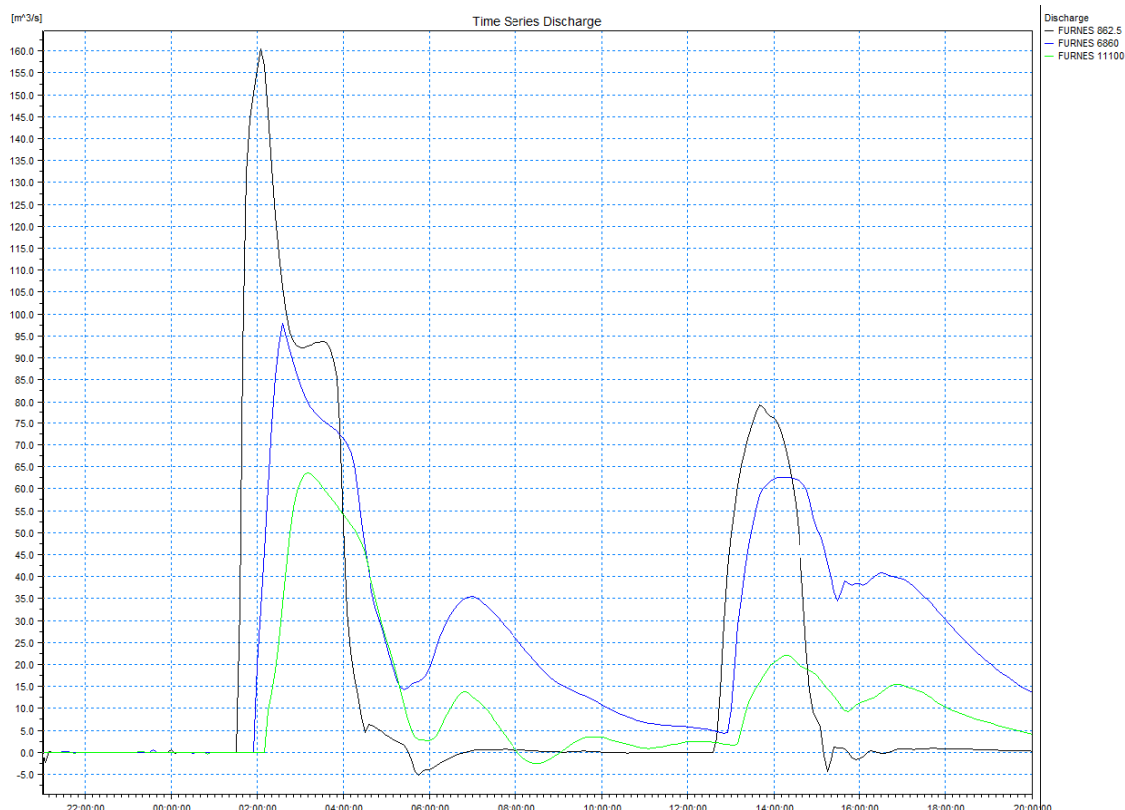


Figure 8-72 : Débits mesurés sur le canal de Furnes pour l'aléa T100 (en noir, bleu et vert par éloignement croissant par rapport à l'écluse de Furnes).

La figure ci-dessous présente le profil en long du canal de Furnes dans son ensemble, avec la ligne d'eau maximale atteinte au cours de la simulation, et les côtes des berges en rives droite et gauche données par les profils en travers mesurés sur le terrain et extraits des données LIDAR. La rive Nord présente davantage de points bas que la rive sud ce qui explique les débordements du canal côté Nord et l'absence de débordement sur la berge côté Sud au-delà du pK 750.



Figure 8-73 : Profil en long du canal de Furnes pour l'aléa T100 – en rouge ligne d'eau maximum, en rose berges RG, en bleu berges RD, en vert condition initiale.

Les débordements du canal de Furnes en rive droite entre pk 350 et pk 725 provoquent une inondation qui s'étale vers le Sud le long du canal des Moeres, avec une hauteur maximale de l'ordre de 50 cm sur l'ensemble de cette surface. Cependant, le niveau reste inférieur à celui des berges du lit majeur du canal de Moeres en rive droite (4 à 5 m IGN 69). Il n'y a donc pas d'échange 1D / 2D mis en évidence.

Pour l'aléa à l'horizon 2100, une restitution dans le canal des Moeres est mise en évidence sans pour autant induire de débordements délocalisés :

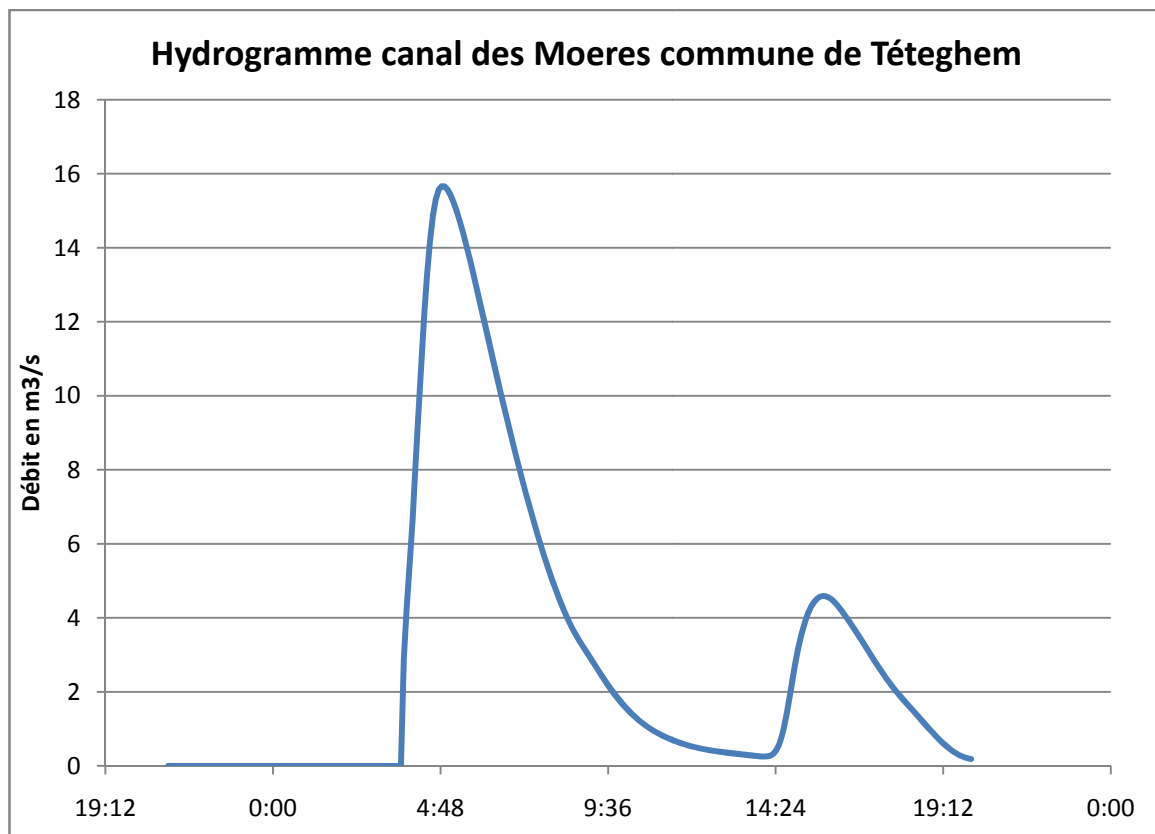


Figure 8-74 : Hydrogramme canal des Moeres T100 à 2100

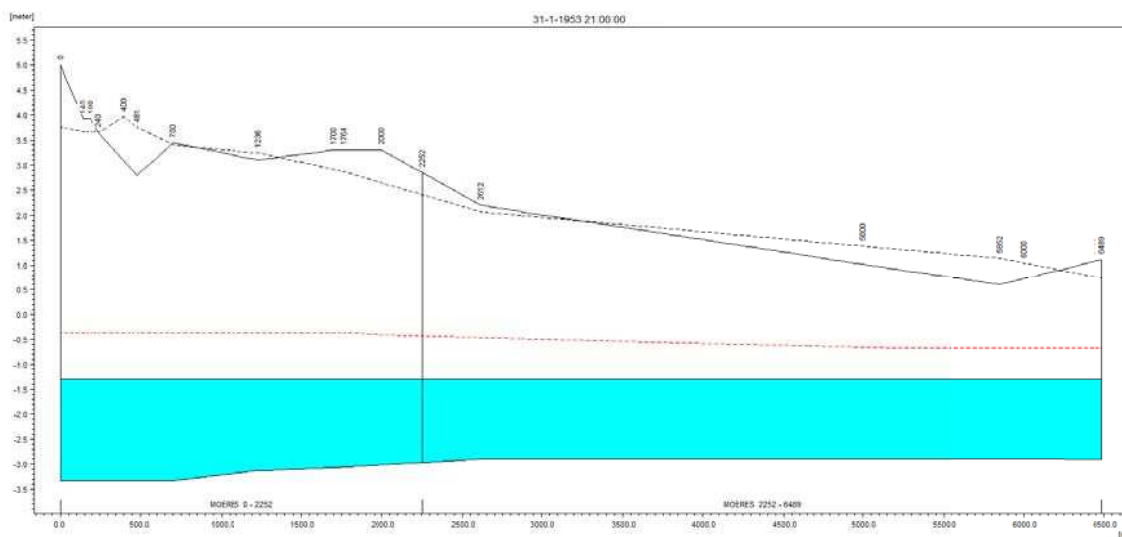


Figure 8-75 : Profil en long de la ligne d'eau T100 à 2100 de l'ouvrage de jonction à Tétéghem – en rouge ligne d'eau maximum, en noir trait plein et pointillés berges RD et RG, fond bleu clair, ligne d'eau au moment de l'extraction

La restitution dans le canal des Moeres se partage plus à l'aval entre le canal de Coudekerque et le canal des Moères (schématisée sur la figure suivante). Le débit de pointe atteint $4 \text{ m}^3/\text{s}$ (cf. figure suivante), soit bien inférieur à celui du canal des Moeres, supérieur à $15 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figure 8-76 : Schéma explicatif de la restitution d'eau dans le canal des Moeres entraînant une modification du débit dans le canal de Coudekerque (affluent du canal des Moeres, au Sud)

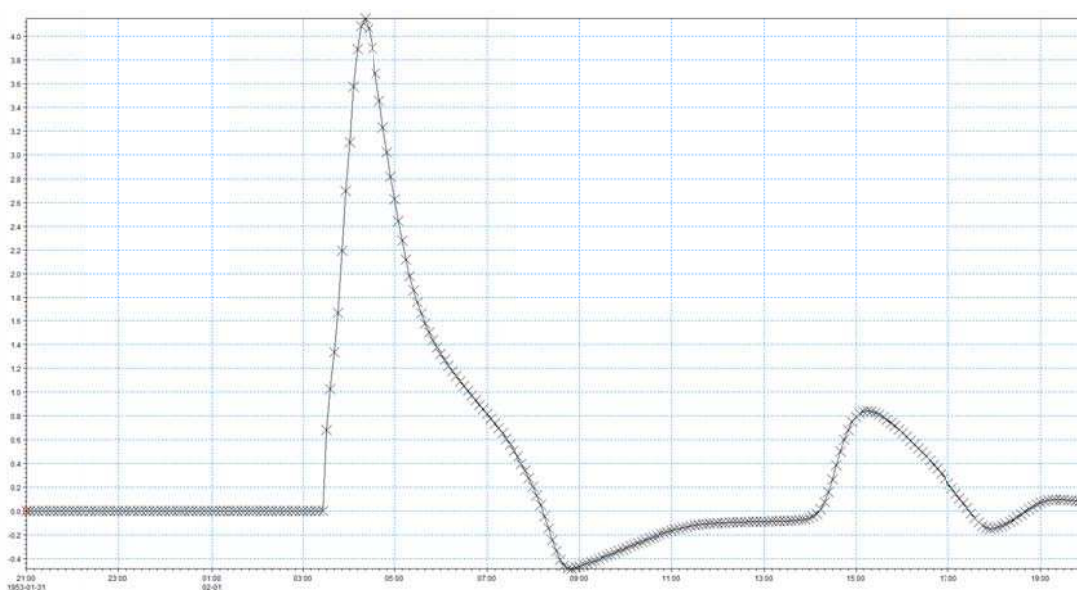


Figure 8-77 : Débits mesurés dans le canal de Coudekerque, T100 à 2100

L'ensemble des lignes d'eau a été vérifié et ne montre pas de débordement nécessitant le couplage lit mineur lit majeur.

La prise en compte du watergang du lac de Tétéghem permet le remplissage du lac sans pour autant engendrer de débordement. Le débit transitant dans le watergang est présenté ci-dessous.

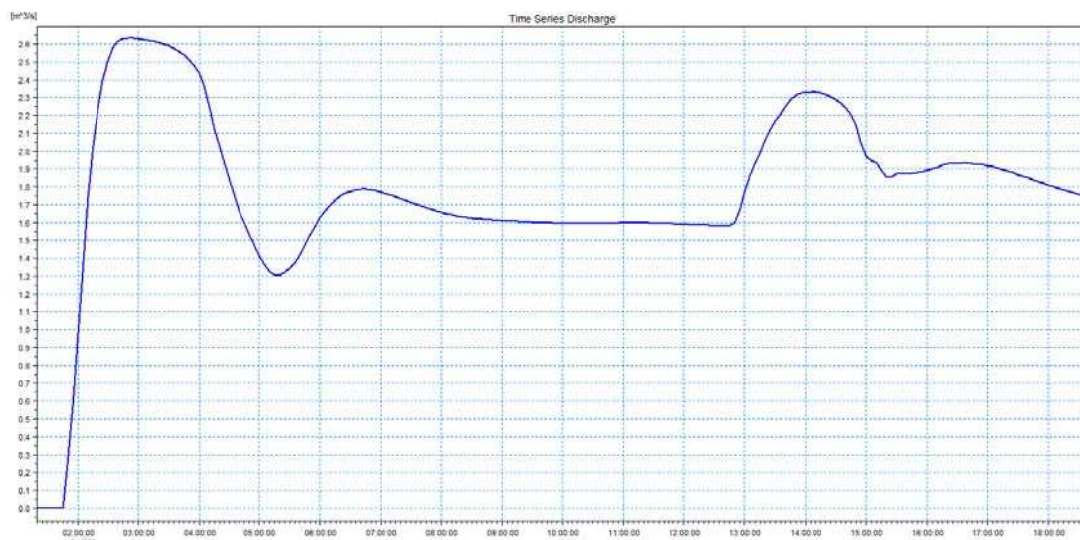


Figure 8-78 : Débit transitant dans le watergang du lac de Tétéghem (m³/s)

Le rétablissement hydraulique au droit de la station de pompage de Ghyvelde provoque un écoulement qui est pris en charge par les fossés latéraux de la route départementale. Cependant les volumes transitant par le dalot sont très supérieurs à la capacité de stockage des fossés. Un débordement est ainsi mis en évidence sur le secteur. Les débits maximums transitant s'établissent à 0,68 m³/s pour un volume total en cours de simulation de 39 000 m³.

8.4.3 Cartographie

Cartographie des aléas 10 ans



Figure 8-79 : Dunkerque –Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal



Figure 8-80 : Dunkerque – Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement décennal



Figure 8-81 : Dunkerque - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal

Cartographie des aléas 100 ans



Figure 8-82 : Dunkerque - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal



Figure 8-83 : Dunkerque – Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal



Figure 8-84 : Dunkerque - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal

Cartographie des aléas 100 ans à l'échéance 2100



Figure 8-85 : Dunkerque - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100



Figure 8-86 : Dunkerque - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100



Figure 8-87 : Dunkerque - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100

8.5 Oye-Plage et Rives de l'Aa - ruptures et débordement

8.5.1 Hypothèses

Les niveaux marins statiques extrêmes retenus

Les niveaux marins extrêmes sur le secteur de l'estuaire de l'Aa ont été extraits des cartes du SHOM 2008 et 2012 pour les périodes de retour décennale et centennale (cf. paragraphe 4.3.1).



Figure 8-88 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement décennal est celui du SHOM 2008, plus fort que celui du SHOM 2012.



Figure 8-89 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement d'occurrence centennale est celui du SHOM 2008, plus fort que celui du SHOM 2012.

Tableau 8-24 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus dans l'estuaire de l'Aa

	Niveau extrême de pleine-mer
T10	4,50
T100	4,80

Estimation de la surcote de déferlement

L'estuaire de l'Aa est un site complexe au niveau hydrodynamique. L'interaction des houles avec les courants marins en fait un site impossible à traiter via un modèle 1D.

Un modèle 2D couplé HD/SW (Hydrodynamic / Spectral Waves) a été construit représentant les rives de l'Aa, ainsi que Oye-Plage et Petit-Fort-Philippe. Ce modèle couplé permet de calculer l'influence des houles sur les courants marins, mais aussi l'influence des courants marins sur les houles dans l'estuaire de l'Aa. La figure suivante représente la bathymétrie/topographie utilisée pour ce modèle 2D. La bathymétrie mise en œuvre est issue des données du SHOM.

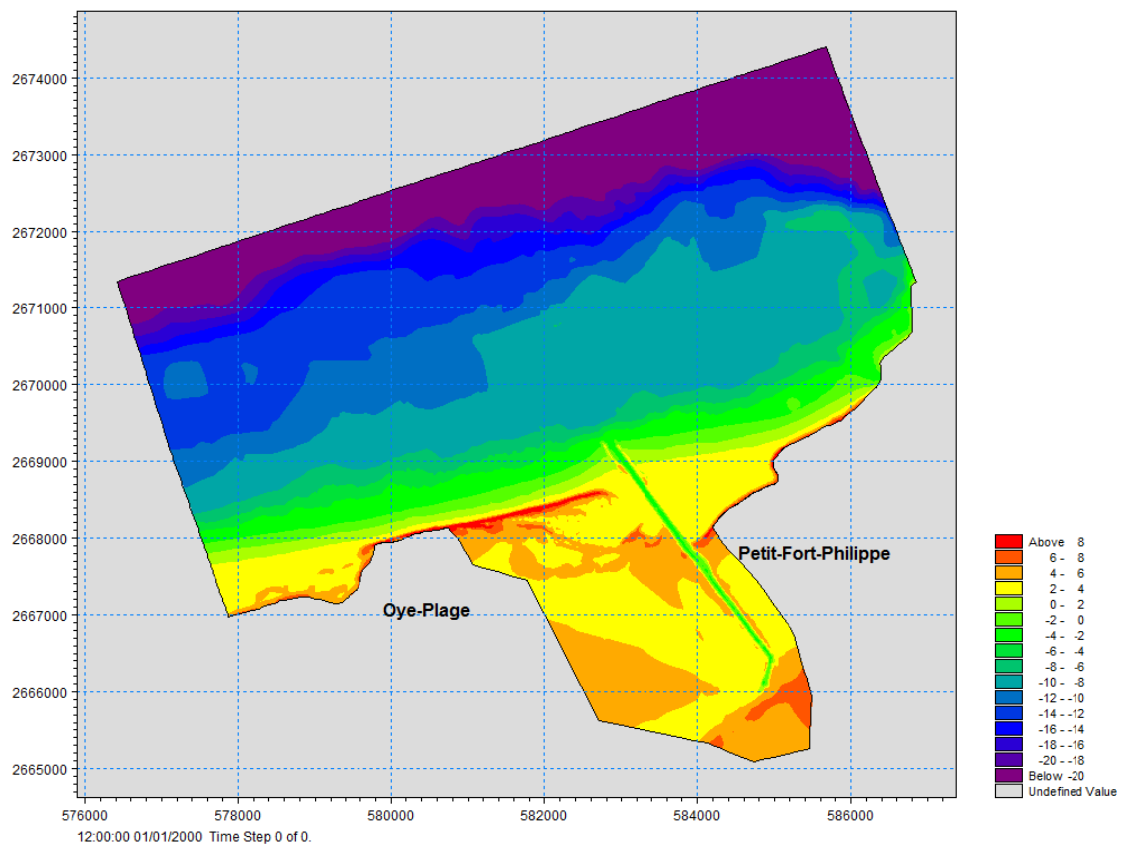


Figure 8-90 : Bathymétrie du modèle créé pour l'estuaire de l'Aa (en m IGN 69)

Le marégramme imposé en condition limite de ce modèle est présenté ci-après. Il est à noter que pour la stabilité du modèle, l'ajout d'un cycle de marée d'initialisation est nécessaire.

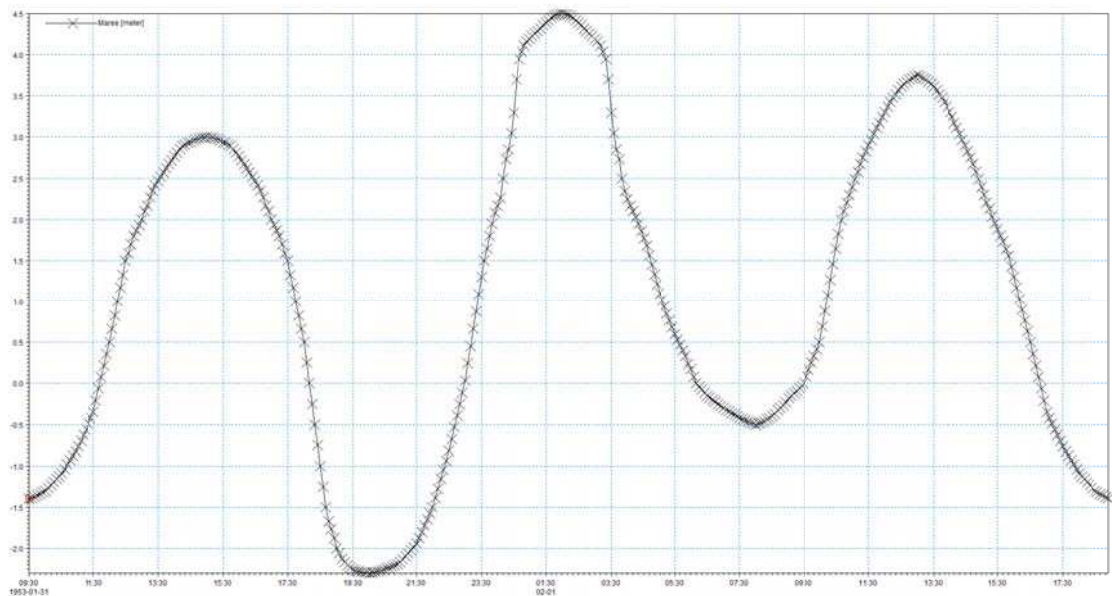


Figure 8-91 : Marégramme imposé en condition limite du modèle couplé 2D sur l'estuaire de l'Aa pour T10

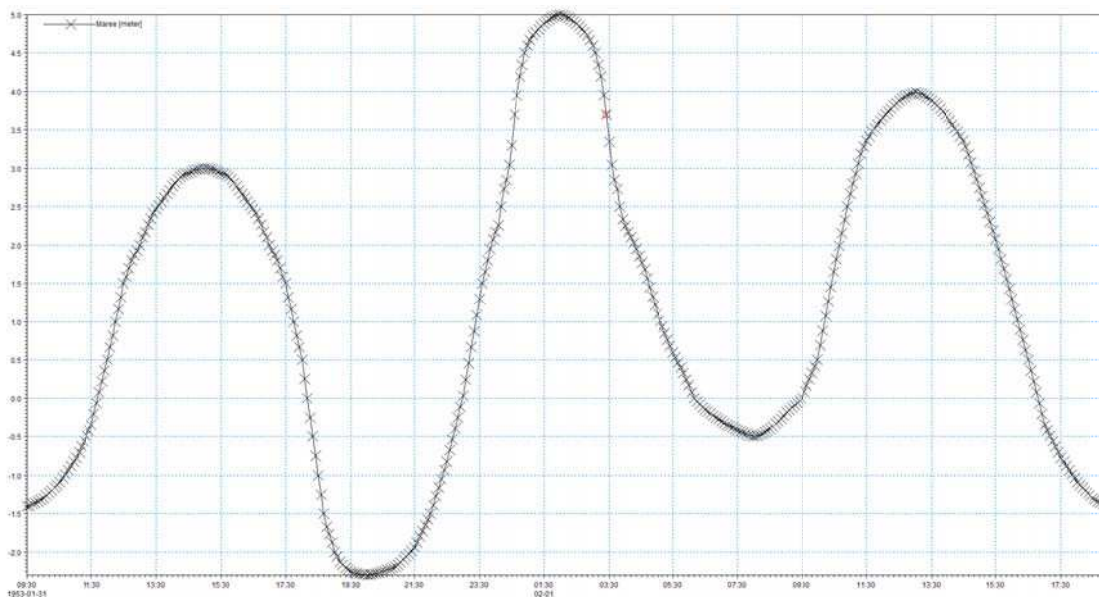


Figure 8-92 : Marégramme imposé en condition limite du modèle couplé 2D sur l'estuaire de l'Aa pour T100

Les différentes surcotes de déferlement sont calculées à partir des séries temporelles des niveaux d'eau extraites en différents points.

Tableau 8-25 : Coordonnées des points d'extraction (Lambert 2 étendu)

		Coord. Est	Coord. Nord
Oye-Plage		580530	2668150
Petit-Fort-Philippe		584380	2668425
Rives de l'Aa	Chenal Nord	583897	2667822
	Chenal Centre	584568	2666946
	Chenal Sud	584942	2666429

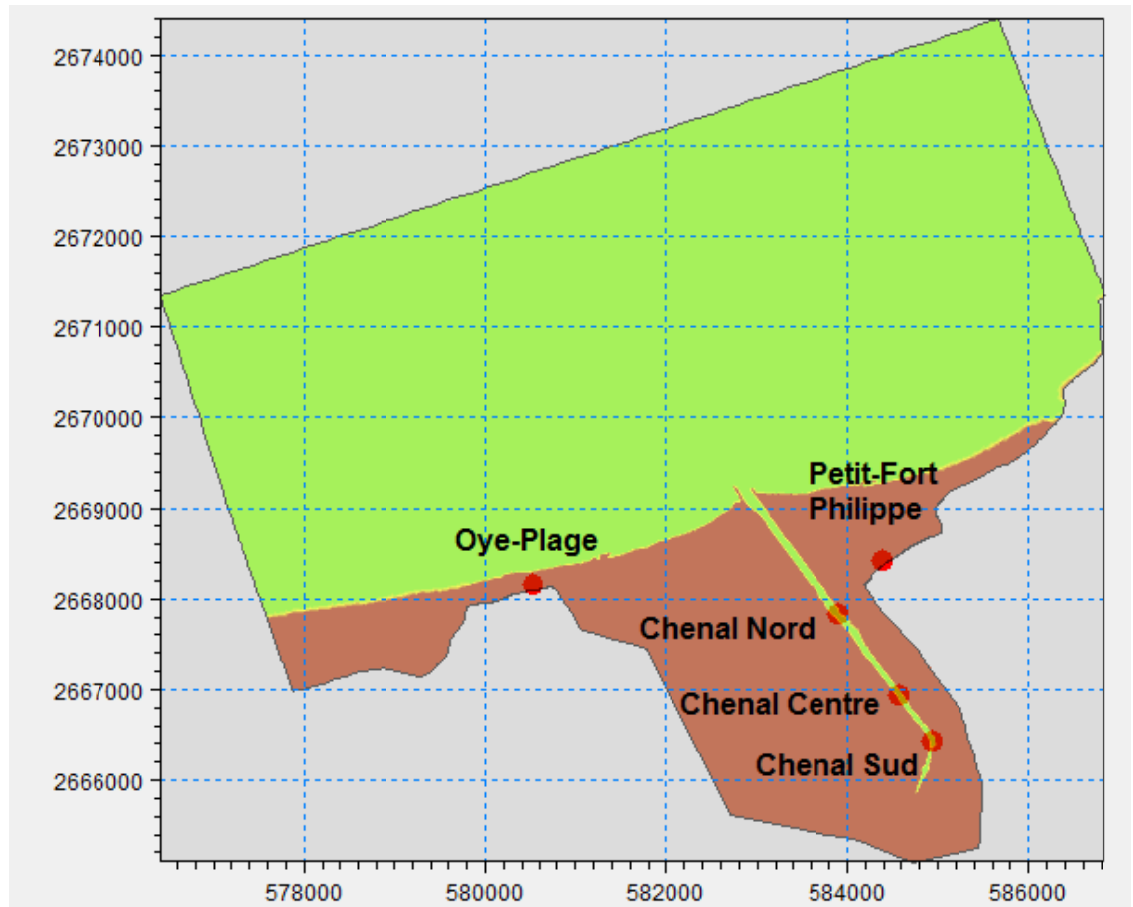


Figure 8-93 : Points d'extraction des niveaux d'eau sur le site de l'estuaire de l'Aa

Les niveaux marins totaux retenus

Le calcul de l'incertitude sur la surcote de déferlement montre que, bien qu'il y ait une évolution sur Oye-Plage et Petit-Fort-Philippe, la décote observée dans le chenal n'est pas affectée.

Tableau 8-26 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement pour un événement de période de retour 10 ans

Niveau marin décennal		Surcote / Décote due au déferlement	Incertitude sur le calcul du set up
Oye-Plage	Hypothèses originales	0,09	0,02
	Hypothèses combinée	0,11	
Chenal Nord	Hypothèses originales	0,02	-
	Hypothèses combinée	-0,01	
Chenal Centre	Hypothèses originales	0,01	-
	Hypothèses combinée	-0,10	
Chenal Sud	Hypothèses originales	-0,04	-
	Hypothèses combinée	-0,10	
Petit-Fort-Philippe	Hypothèses originales	0,12	0,03
	Hypothèses combinée	0,15	

Tableau 8-27 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement pour un évènement de période de retour 100 ans actuel et à l'horizon 2100

Niveau marin centennal 2013		Surcote / Décote due au déferlement	Incertitude sur le calcul du set up
Oye-Plage	Hypothèses originales	0,07	0,02
	Hypothèses combinée	0,09	
Chenal Nord	Hypothèses originales	-0,05	-
	Hypothèses combinée	-0,05	
Chenal Centre	Hypothèses originales	-0,22	-
	Hypothèses combinée	-0,22	
Chenal Sud	Hypothèses originales	-0,24	-
	Hypothèses combinée	-0,24	
Petit-Fort-Philippe	Hypothèses originales	0,08	0,02
	Hypothèses combinée	0,10	

Niveau marin centennal 2100		Surcote / Décote due au déferlement	Incertitude sur le calcul du set up
Oye-Plage	Hypothèses originales	0,09	0,02
	Hypothèses combinée	0,11	
Chenal Nord	Hypothèses originales	-0,14	-
	Hypothèses combinée	-0,14	
Chenal Centre	Hypothèses originales	-0,31	-
	Hypothèses combinée	-0,31	
Chenal Sud	Hypothèses originales	-0,33	-
	Hypothèses combinée	-0,33	
Petit-Fort-Philippe	Hypothèses originales	0,11	0,03
	Hypothèses combinée	0,14	

Les niveaux marins totaux s'établissent ainsi :

Tableau 8-28 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus dans l'estuaire de l'Aa

T10	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote / Décote due au déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total retenu
Oye-Plage	4,50	-	0,09	0,02	4,61
Chenal Nord	4,50	-	0,02	-	4,52
Chenal Centre	4,50	-	0,01	-	4,51
Chenal Sud	4,50	-	-0,04	-	4,46
Petit-Fort-Philippe	4,50	-	0,12	0,03	4,65

T100	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote / Décote due au déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total retenu
Oye-Plage	4,80	0,20	0,07	0,02	5,09
Chenal Nord	4,80	0,20	-0,05	-	4,95
Chenal Centre	4,80	0,20	-0,22	-	4,78
Chenal Sud	4,80	0,20	-0,24	-	4,76
Petit-Fort-Philippe	4,80	0,20	0,08	0,02	5,10

T100 à l'horizon 2100	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote / Décote due au déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total retenu
Oye-Plage	4,80	0,60	0,09	0,02	5,51
Chenal Nord	4,80	0,60	-0,14	-	5,26
Chenal Centre	4,80	0,60	-0,31	-	5,09
Chenal Sud	4,80	0,60	-0,33	-	5,07
Petit-Fort-Philippe	4,80	0,60	0,11	0,03	5,54

Conditions initiales

Les portes de l'écluse de Gravelines sont considérées fermées. Un test de sensibilité a montré que l'ouverture de la porte Nord n'entraîne pas de modification significative des résultats.

Topographie

La bathymétrie du site des rives de l'Aa prend en compte les données topographiques fournies par les services de la commune de Gravelines. Ainsi les digues en bordure du chenal de l'Aa qui initialement pouvaient présenter un lissage dû à l'interpolation topographique, ont été mises à la cote maximum du profil levé. La figure ci-dessous présente l'ensemble des points topographiques fournis et leur prise en compte sur la bathymétrie du site.

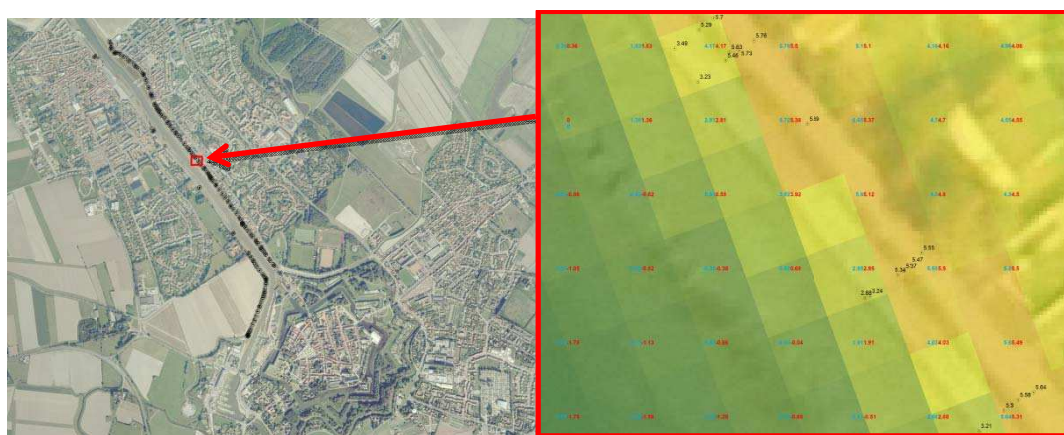


Figure 8-94 : Prise en compte des levés topographiques sur les rives de l'Aa

Les caractéristiques de la brèche

L'étude VSC a permis d'identifier un secteur potentiellement submersible dans le cas d'une brèche dans le cordon dunaire des Escardines. Celle-ci a été simulée avec une longueur de 100 mètres, le sommet de la dune s'effondrant de 12,5 à 4,517m IGN 69 à partir d'une heure avant la pleine-mer sur une durée de 15 minutes.

La brèche simulée à la jonction de la digue Taaf et de la digue de 1925 est d'une longueur de 100m. La crête de la digue est arasée de 6m à 3,7m IGN 69 en 15 minutes (cf. Paragraphe 6.2.2).

Le signal de marée injecté dans ces deux brèches sur la rive gauche de l'Aa est le même et correspond au niveau d'eau à Oye-Plage. Ce marégramme atteint donc un niveau de pleine-mer égal à 5,09m IGN 69 pour le scénario d'occurrence centennale, à 5,51m IGN 69 pour celui incluant le changement climatique.

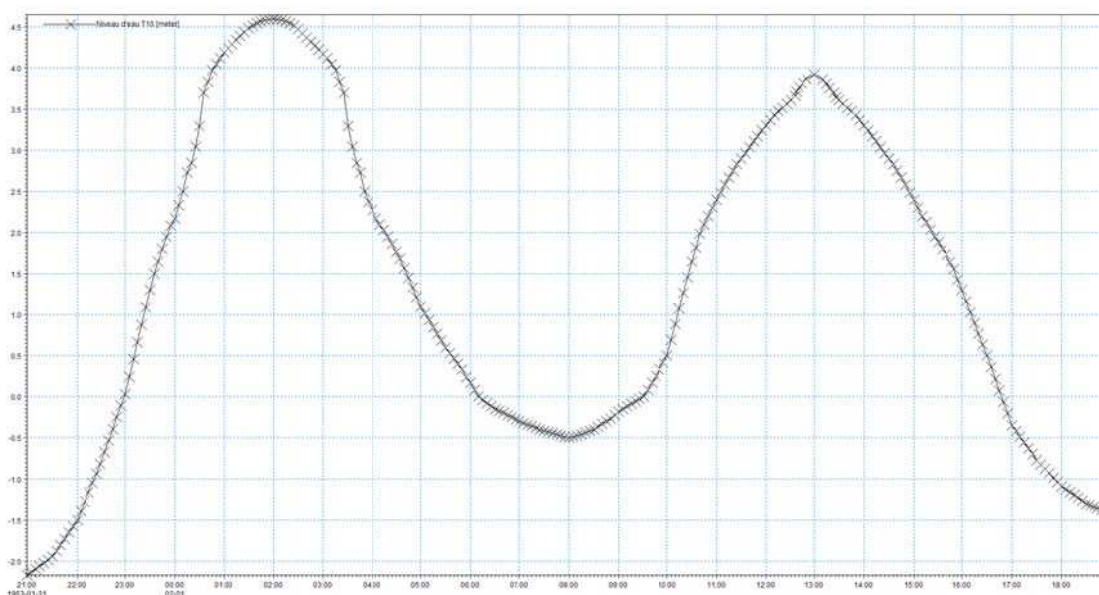


Figure 8-95 : Marégramme injecté dans les deux brèches rive gauche de l'Aa (10 ans)

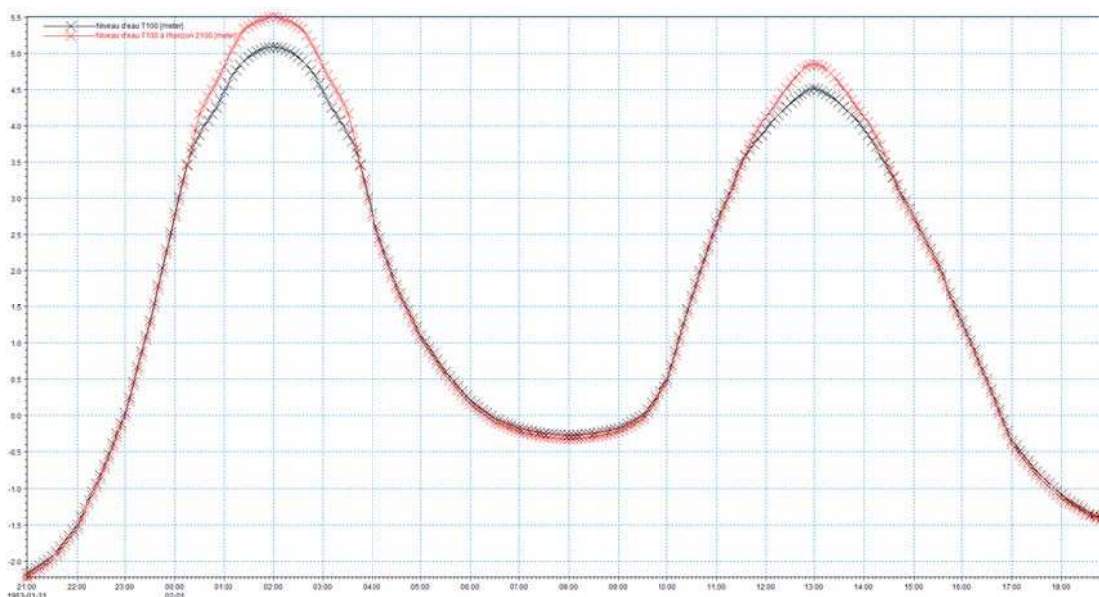


Figure 8-96 : Marégrammes injectés dans les deux brèches rive gauche de l'Aa (100 ans (en noir) et 100 ans à l'horizon 2100 (en rouge))

La brèche simulée à Petit-Fort-Philippe est d'une longueur de 15 mètres, la crête du cordon dunaire s'effondrant de 6,75 m à 4,50 m IGN 69. La rupture de ce cordon dunaire intervient lorsque le niveau de la marée entraîne une charge hydraulique de 50 cm sur la dune, c'est-à-dire lorsque la marée atteint 5.00 m IGN69. Cette cote est atteinte 15 minutes avant la pleine-mer pour T100 et 50 minutes avant la pleine-mer pour T100+CC. La rupture intervient en 15 minutes.

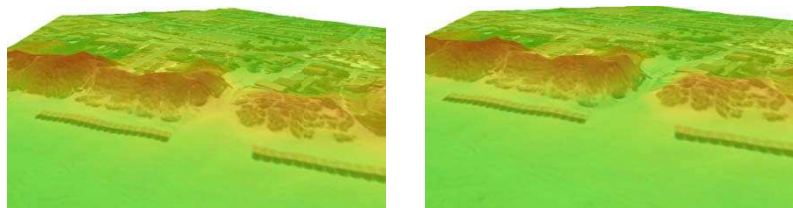
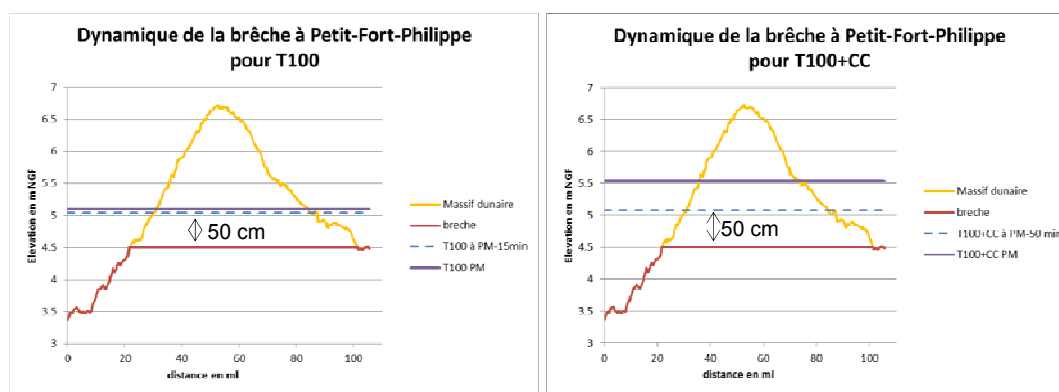


Figure 8-97 : Vue 3D du cordon dunaire et de la brèche de Petit-Fort-Philippe



Le signal de marée injecté dans cette brèche correspond au niveau d'eau à Petit-Fort-Philippe. Ce marégramme atteint donc un niveau de pleine-mer égal à 5,10m IGN 69 pour le scénario d'occurrence centennale, à 5,54m IGN 69 pour celui incluant le changement climatique.

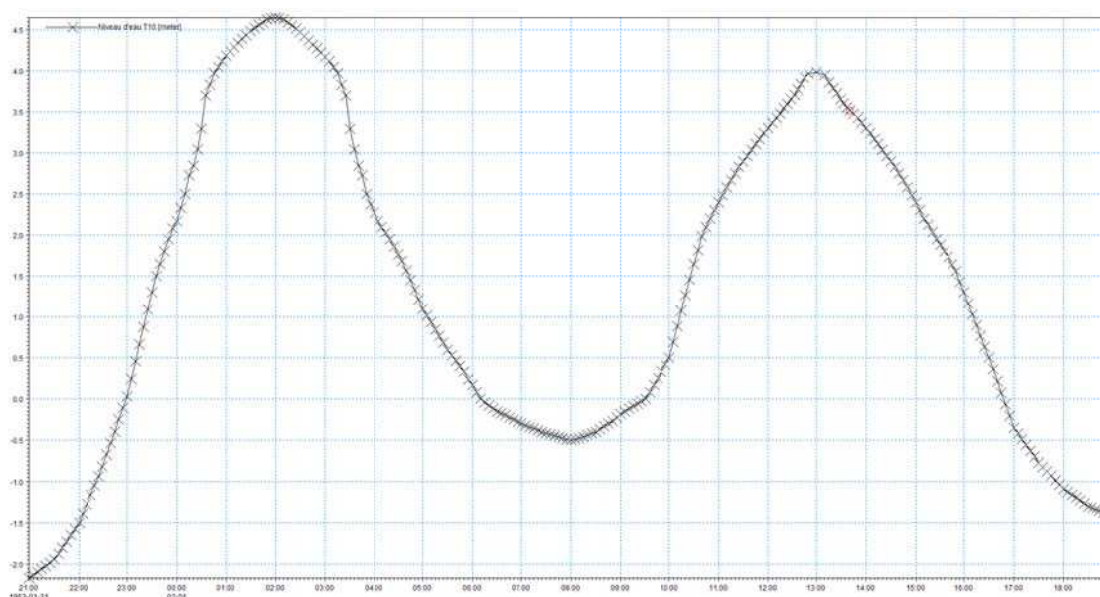


Figure 8-98 : Marégramme injecté dans la brèche à Petit-Fort-Philippe (10 ans)

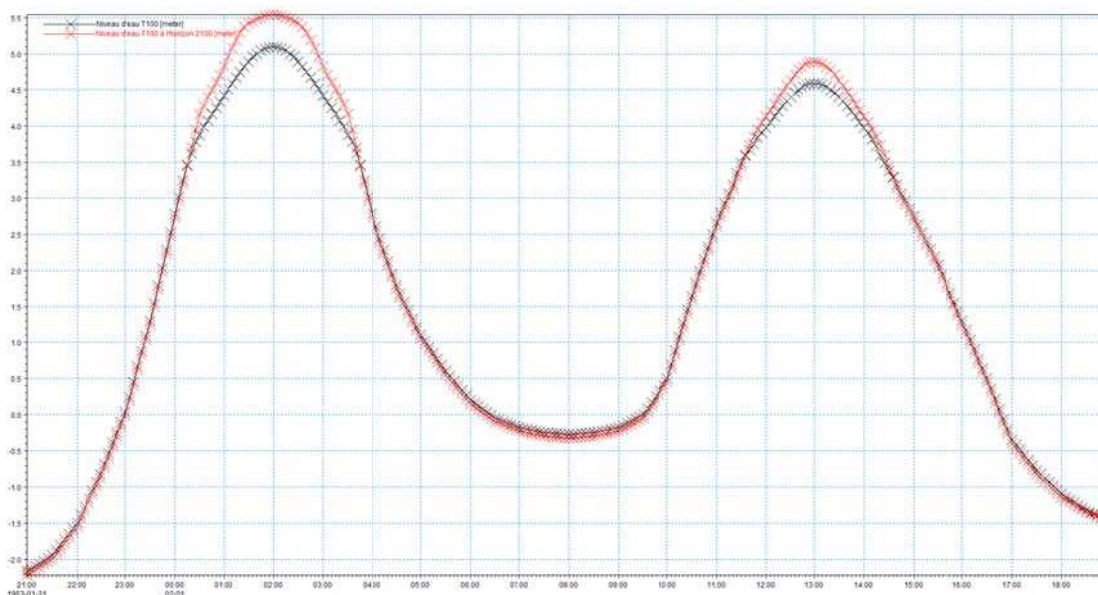


Figure 8-99 : Marégrammes injectés dans la brèche à Petit-Fort-Philippe (100 ans (en noir) et 100 ans à l'horizon 2100 (en rouge))

La position de ces trois brèches simulées est indiquée sur la figure suivante.



Figure 8-100 : Position des brèches simulées sur le secteur des rives de l'Aa

Les hypothèses prises en compte pour la modélisation de la submersion marine sur ce site sont construites sur la base du scénario centennal actuel. Elles sont également justifiées pour le scénario centennal à l'horizon 2100.

8.5.2 Dynamique de submersion

Les inondations sur ce secteur sont issues de la combinaison de la rupture du cordon dunaire aux Escardines, de la rupture des digues Taaf et 1925 sur la rive gauche de l'Aa et de la brèche de Petit-Fort-Philippe sur la rive droite, ainsi que du débordement depuis les marais littoraux et le long des deux rives de l'Aa.

Face à la dune des Escardines et aux marais, le niveau de la mer est surélevé sous l'effet de la surcote de déferlement. Le niveau de la mer à l'entrée du chenal est alors identique au niveau face aux marais et à la dune. En se propageant dans le chenal vers le Sud, le niveau de la mer diminue progressivement. Ainsi, le niveau de la mer au Sud du chenal pour l'événement centennal n'est plus que de 4.76 m IGN69, alors qu'il est de 5.09 m IGN69 à l'entrée du chenal.

Pour l'événement centennal, 15 minutes après l'apparition de la brèche, le quartier des Escardines est en partie inondé, ainsi que les terres situées à l'arrière de la digue Taaf. Les premiers débordements ont lieu à partir des marais 10 minutes avant la pleine-mer et à partir du chenal de l'Aa en rive gauche et en rive droite, respectivement 20 minutes et 50 minutes avant la pleine-mer.

Ces inondations se propagent ensuite rapidement, et touchent dans un premier temps deux secteurs distincts : le secteur au Nord concernant les Escardines, dont les inondations proviennent à la fois de la brèche du cordon dunaire et de la brèche de la digue délimitant les marais, le secteur des rives de l'Aa dont les inondations sont dues au débordement du chenal. Les inondations à Petit-Fort-Philippe restent relativement contenues.

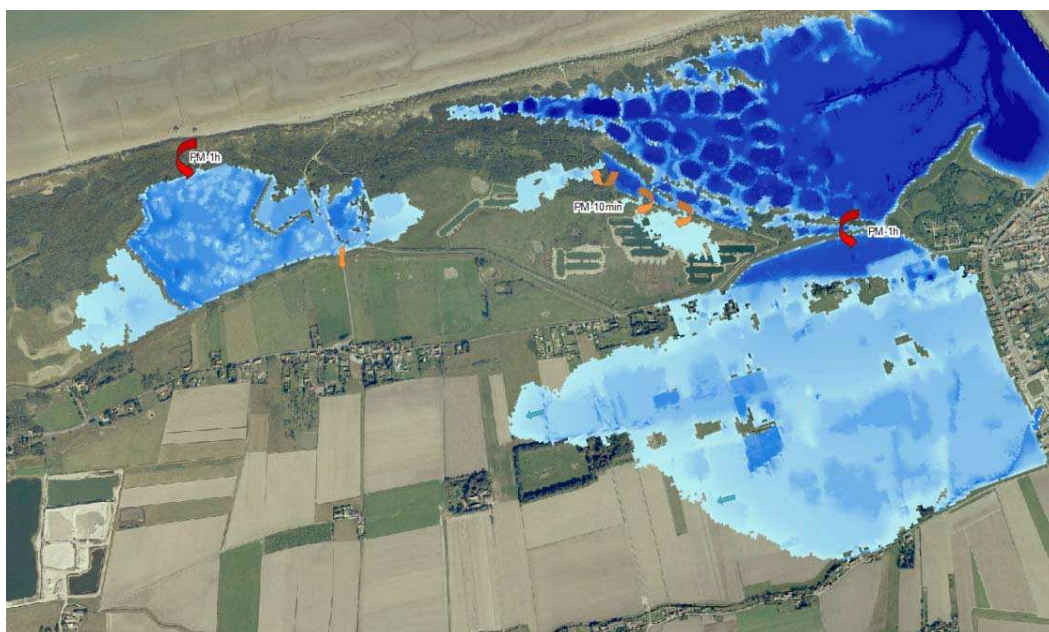


Figure 8-101 : Zone inondée 15 minutes après la pleine-mer sur Oye-Plage – en rouge rupture d'ouvrage en orange débordements (T100)

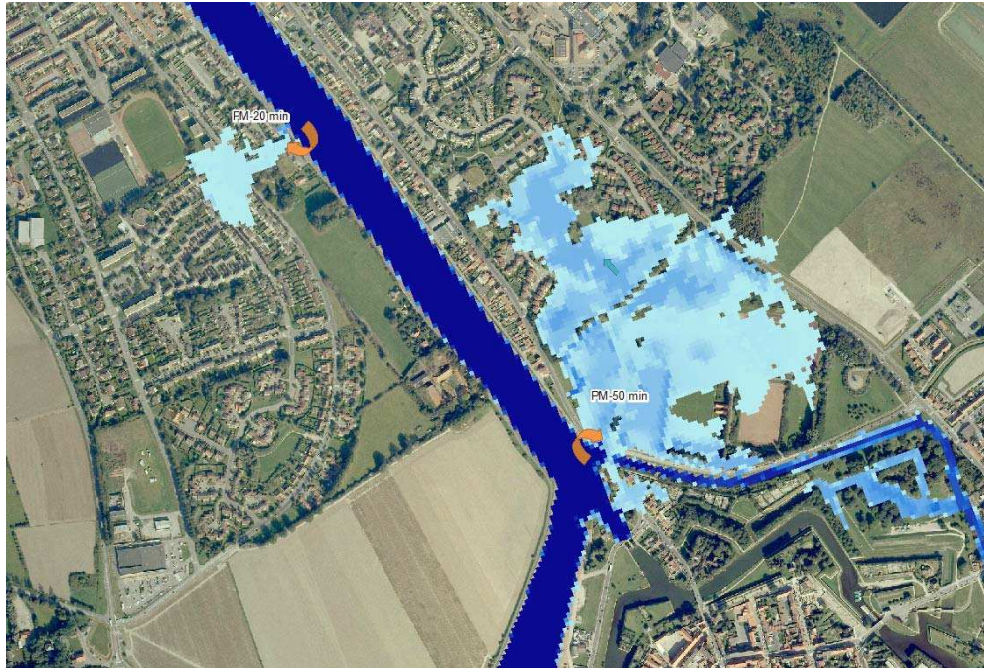


Figure 8-102 : Zone inondée 15 minutes après la pleine-mer sur les rives de l'Aa– en rouge rupture d'ouvrage en orange débordements (T100)



Figure 8-103 : Zone inondée 4 heures après la pleine-mer sur les rives de l'Aa et Petit-Fort-Philippe– en rouge rupture d'ouvrage en orange débordements (T100)

La propagation de l'inondation est ensuite contrainte par la présence de digues de second rang, généralement orientées suivant l'axe Est-Ouest. Ces digues contiennent dans un premier temps les inondations dans le Nord, jusqu'à ce que le niveau soit tel qu'elles franchissent ces digues.

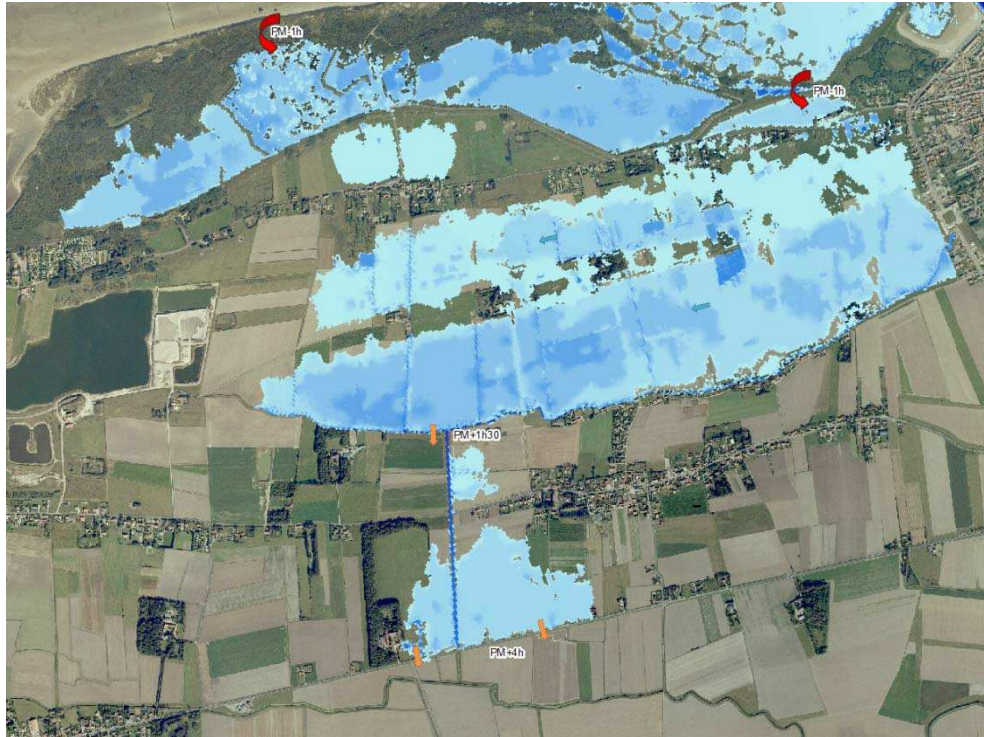


Figure 8-104 : Zone inondée 4 heures après la pleine-mer sur Oye-Plage– en rouge rupture d’ouvrage en orange débordements (T100)

Enfin, lorsque la mer se retire les hauteurs de submersion diminuent à la fois sur le quartier des Escardines et le long des rives de l’Aa. Néanmoins, l’eau continue à s’étaler lentement vers le Sud-Ouest jusqu’à atteindre un niveau d’équilibre.

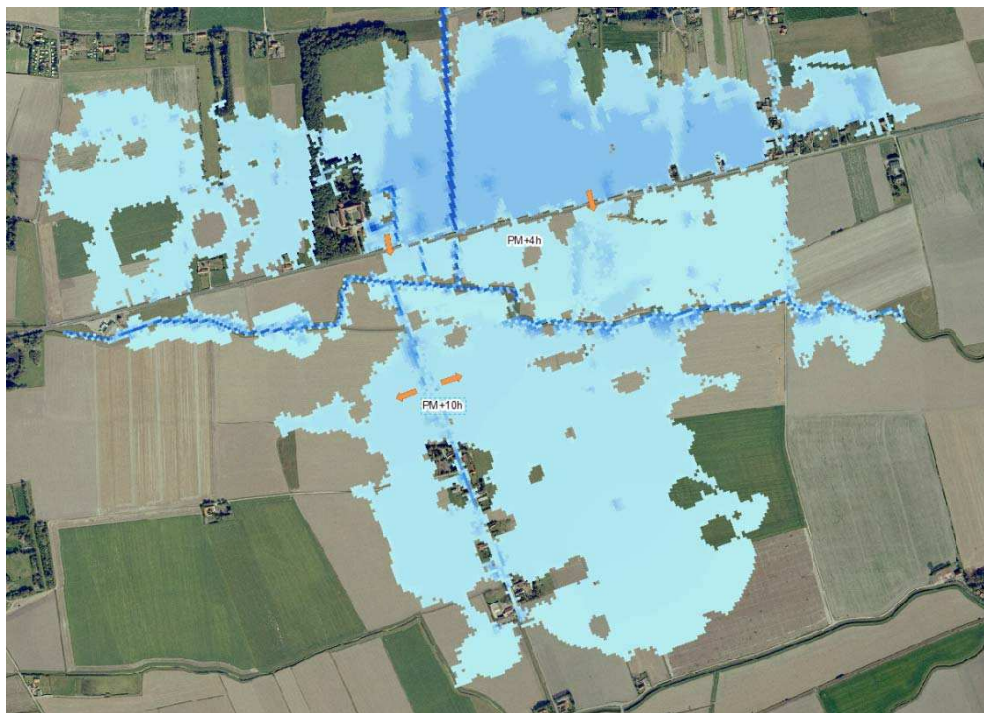


Figure 8-105 : Zone inondée 16 heures après la pleine-mer sur Oye-Plage– en rouge rupture d’ouvrage en orange débordements (T100)

En parallèle, la brèche apparaissant à Petit-Fort-Philippe engendre également des inondations derrière la dune, mais celles-ci restent relativement limitées au niveau de la rue Victor Hugo.



Figure 8-106 : Zone inondée 15 minutes après la pleine-mer sur Petit-Fort-Philippe (T100)

Il est à noter que le fonctionnement hydraulique des ouvrages régulant les niveaux d'eau dans les waterings n'est pas modélisé. Ainsi le modèle ne tient pas compte de l'ouverture de la Porte Noire, séparant le Schelf Vliet du chenal, qui s'ouvre en conditions normales lorsque le niveau d'eau dans le chenal est inférieur au niveau du Schelf Vliet.

8.5.3 Cartographie

La bande de 100 m sur ce secteur concerne le quartier des Escardines, exposé au risque de rupture du cordon dunaire car la dune est actuellement en érosion. Cette bande longe donc la dune à partir des Huttes d'Oye à l'Ouest, et jusqu'aux marais à l'Est. A ce niveau, la bande se prolonge le long de la digue bordant les marais, jusqu'à ce que le terrain naturel redevienne plus élevé que la digue.

Une autre bande de 100 m est appliquée sur l'ensemble de la digue Taaf et la digue 1925.

Aucune bande de 100 m n'est considérée à Petit Fort Philippe, le point de fragilité étant ponctuel et identifié.

Cartographie des aléas 10 ans

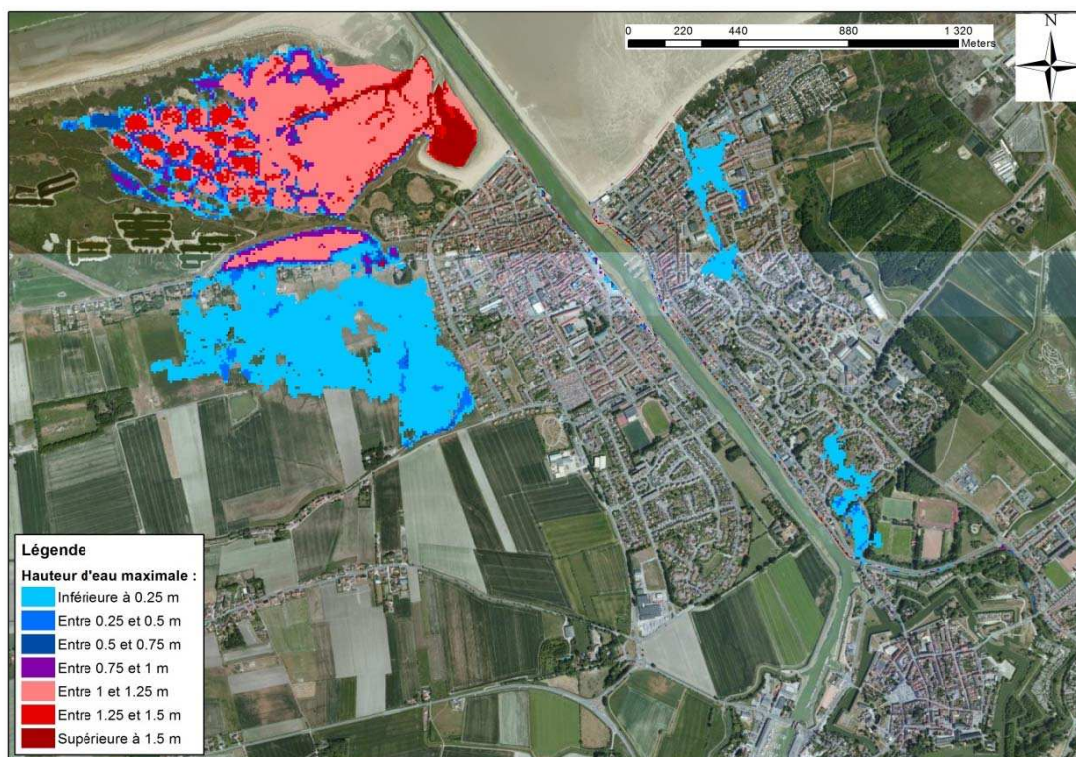


Figure 8-107 : Rives de l'Aa - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal

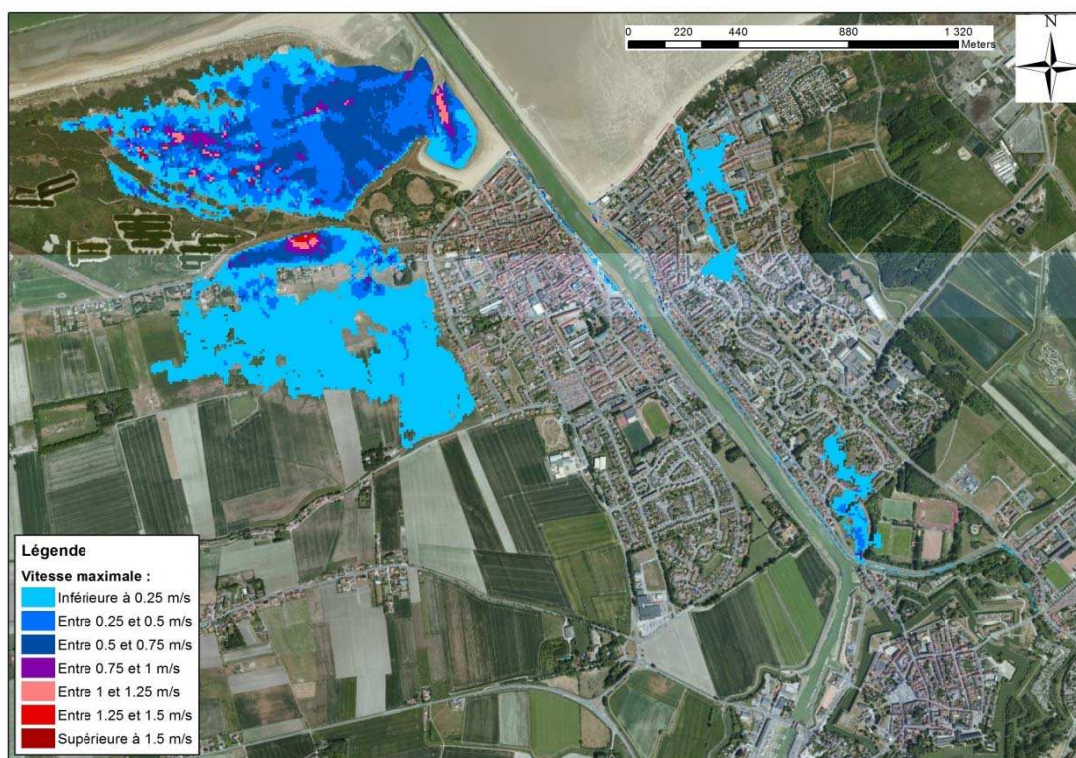


Figure 8-108 : Rives de l'Aa - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal

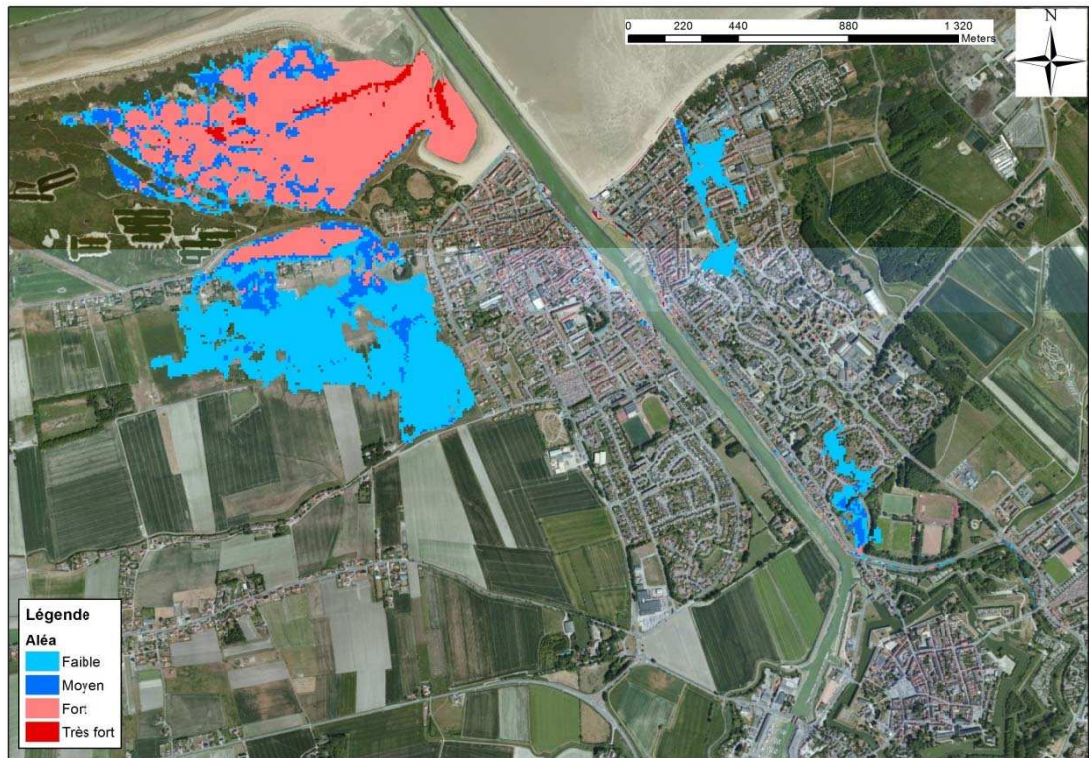


Figure 8-109 : Rives de l'Aa - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal

Cartographie des aléas 100 ans

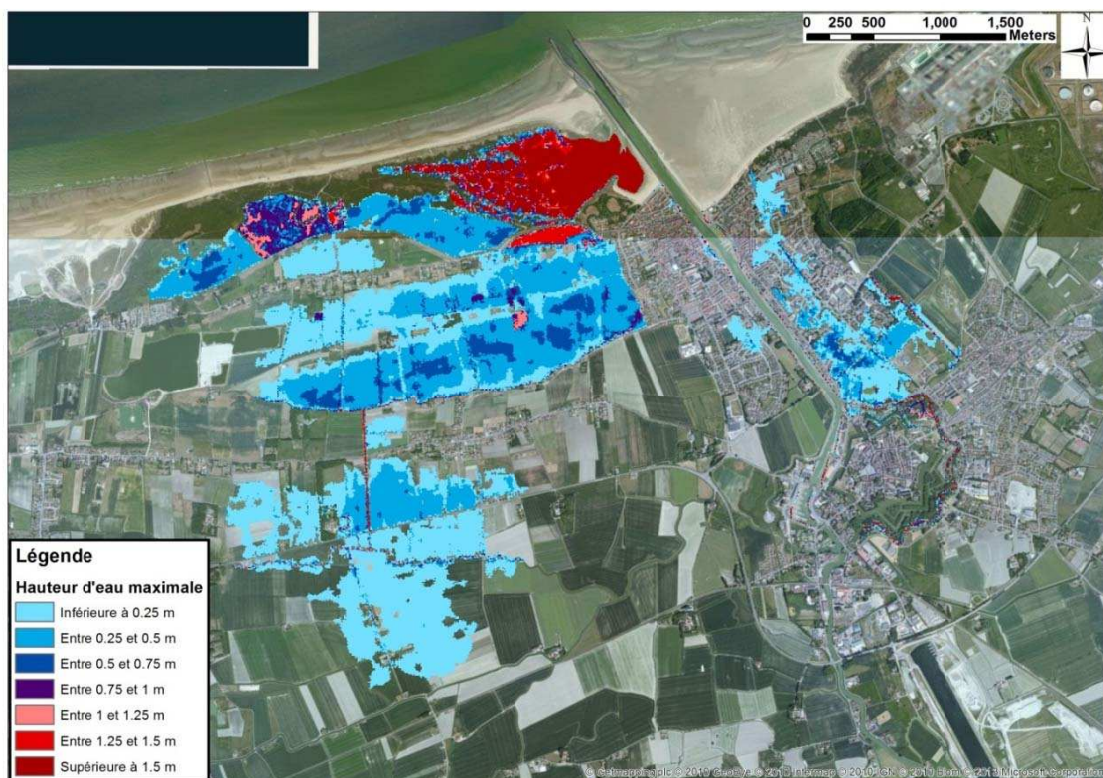


Figure 8-110 : Rives de l'Aa - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal

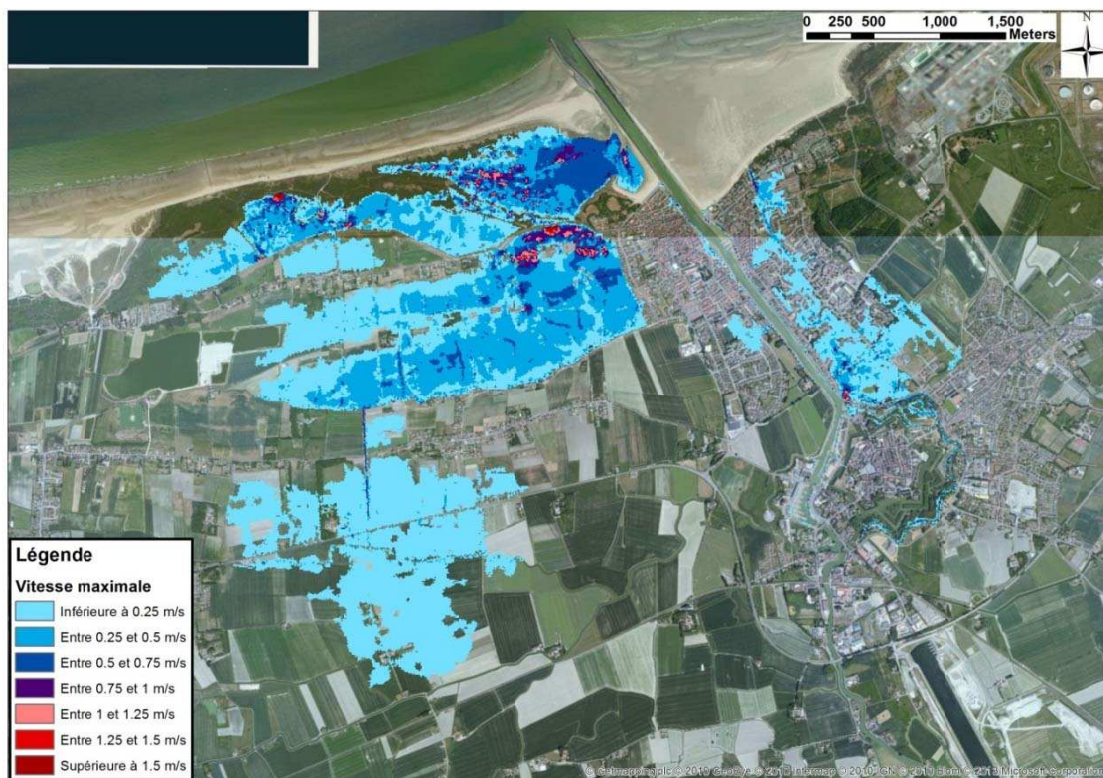


Figure 8-111 : Rives de l'Aa - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal

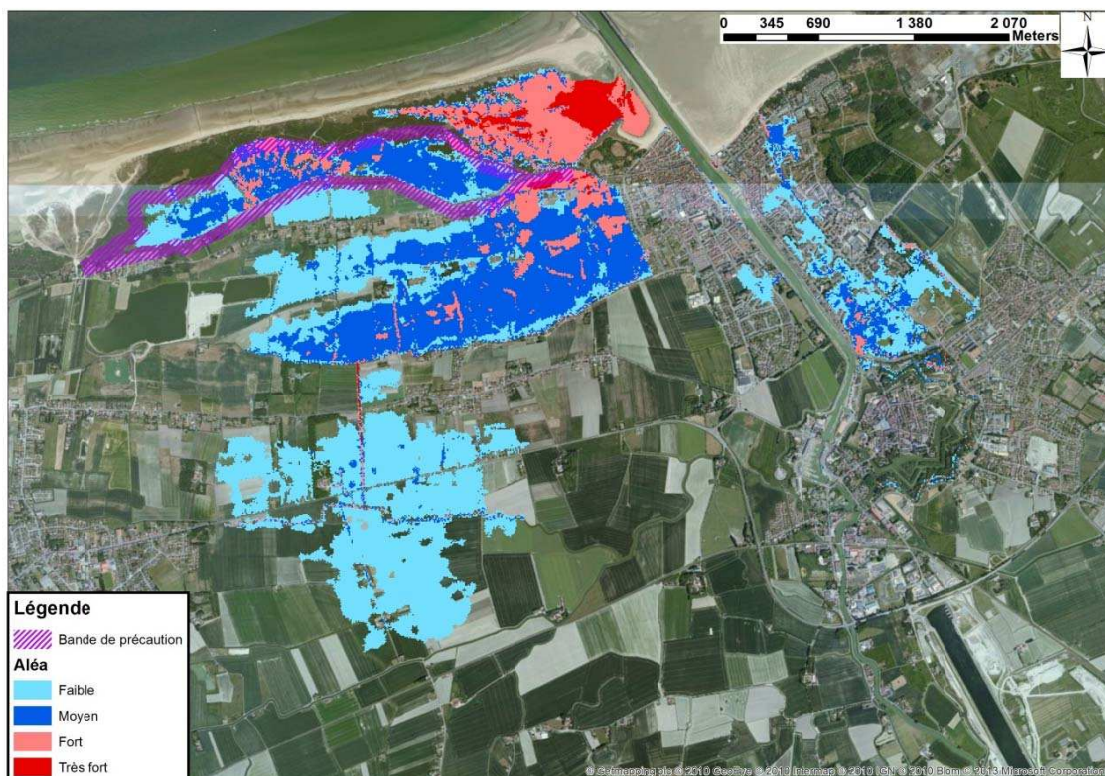


Figure 8-112 : Rives de l'Aa - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal

Cartographie des aléas 100 ans à l'échéance 2100

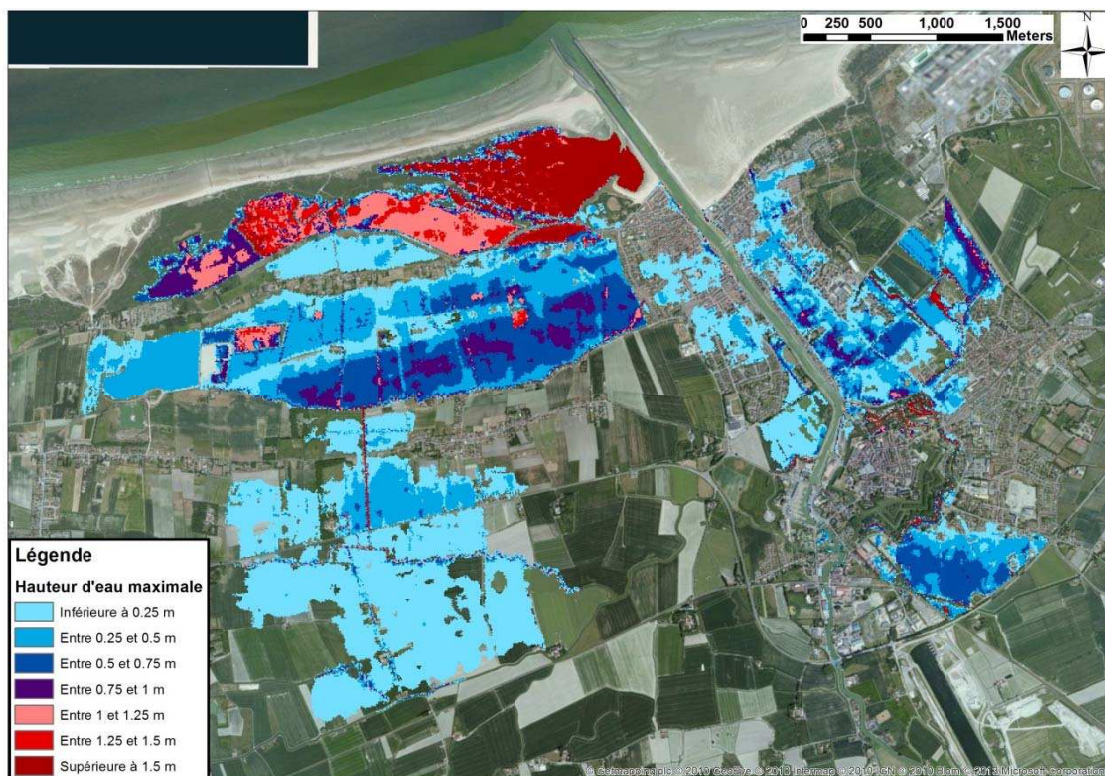


Figure 8-113 : Rives de l'Aa - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

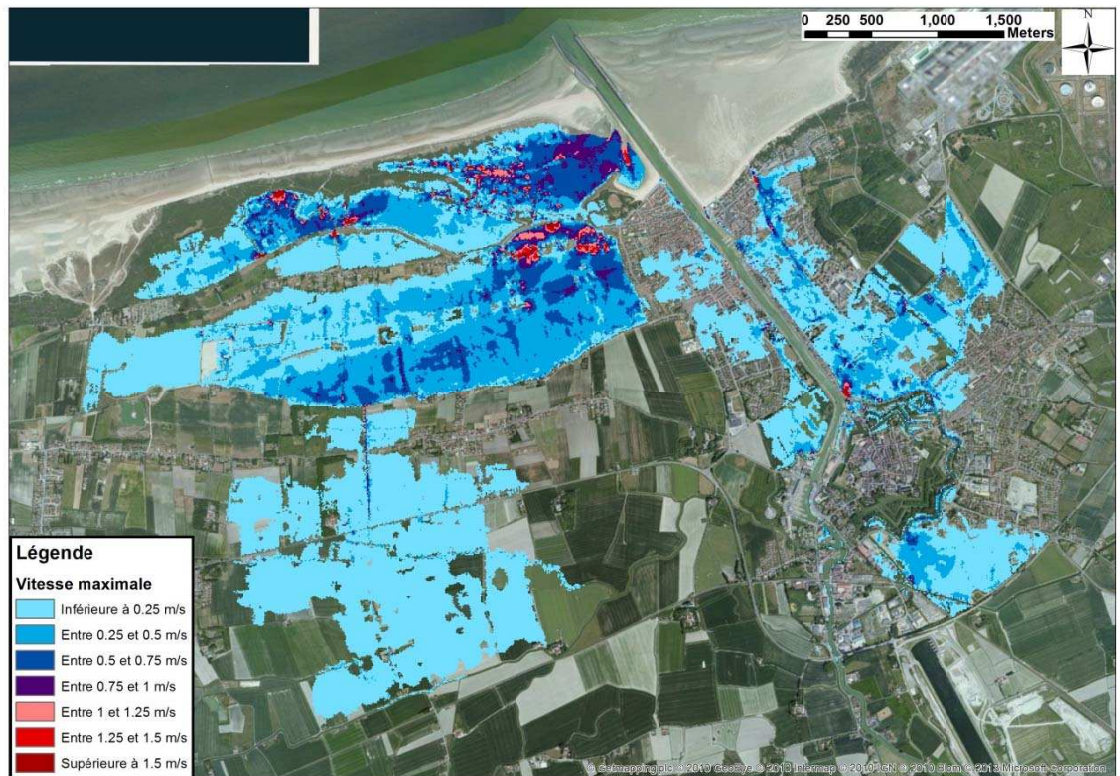


Figure 8-114 : Rives de l'Aa - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

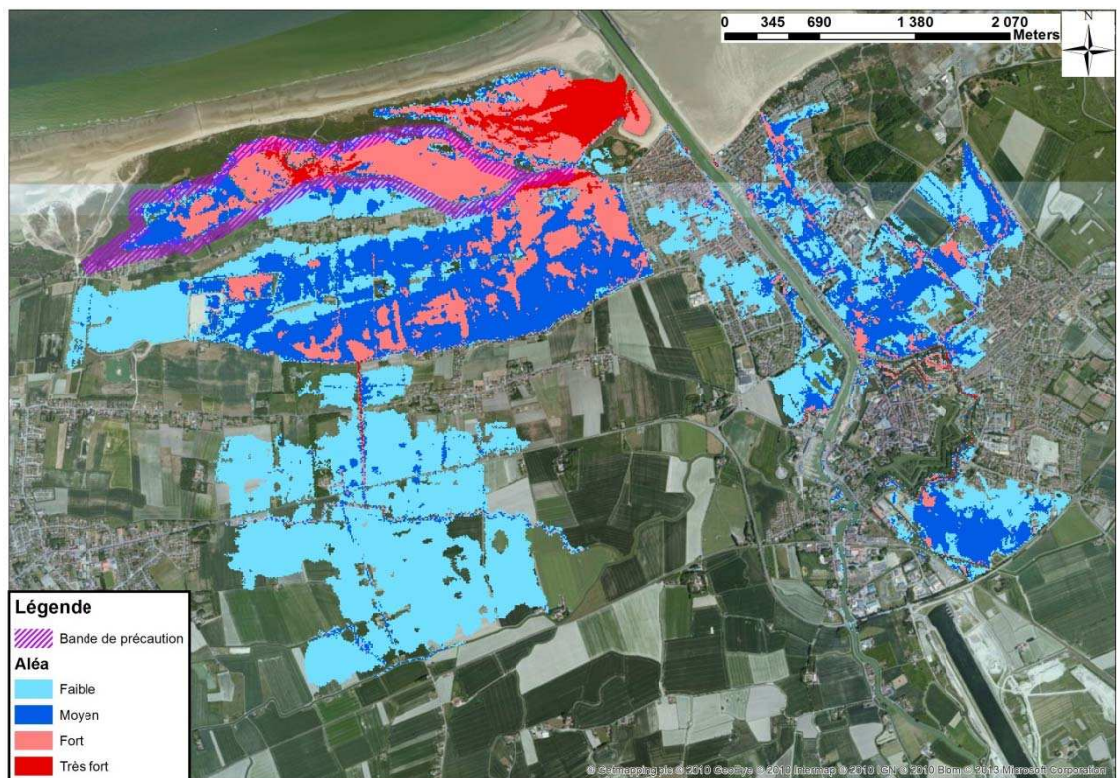


Figure 8-115 : Rives de l'Aa - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100

8.6 Marck - débordement

8.6.1 Hypothèses

Les niveaux marins statiques extrêmes retenus

Les niveaux marins extrêmes à Marck ont été extraits des cartes du SHOM 2008 et 2012 pour les périodes de retour décennale et centennale (cf. paragraphe 4.3.1).



Figure 8-116 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement d'occurrence décennale est celui du SHOM 2008, plus pénalisant.



Figure 8-117 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement centennal est celui du SHOM 2008, plus pénalisant.

Tableau 8-29 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Marck

	Niveau extrême de pleine-mer
T10	4,70
T100	4,90

Les niveaux marins totaux retenus

Une élévation du niveau marin lié au réchauffement climatique pris en compte en 2013 de 0,20m a été ajoutée au niveau de pleine-mer centennal. Pour la modélisation de l'évènement centennal incluant le changement climatique à l'horizon 2100, une surcote supplémentaire de 0,40 m a été ajoutée afin d'obtenir une élévation moyenne de 0,60 m conforme au scénario pessimiste établi par l'ONERC.

Le calcul de la surcote de déferment liée aux niveaux marins précédemment exposés est effectué par propagation de la houle au travers d'un modèle 1D (cf. paragraphe 4.5).

L'incertitude sur les hypothèses de calcul de la surcote de déferlement est de plus intégrée aux niveaux marins finaux (cf. paragraphe 4.3.3).

Tableau 8-30 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement

		Surcote de déferlement	Incetitude sur le calcul du set up
Niveau marin décennal	Hypothèses originales	0,18	0,07
	Hypothèses combinées	0,25	
Niveau marin centennal 2013	Hypothèses originales	0,11	0,04
	Hypothèses combinées	0,15	
Niveau marin centennal 2100	Hypothèses originales	0,07	0,02
	Hypothèses combinées	0,09	

Les niveaux marins totaux s'établissent ainsi :

Tableau 8-31 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus à Marck

	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incetitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total retenu
T10	4,70	-	0,18	0,07	4,95
T100	4,90	0,20	0,11	0,04	5,25
T100 à l'horizon 2100	4,90	0,60	0,07	0,02	5,59

Les signaux de marée ont été modifiés pour atteindre ces niveaux extrêmes de pleine-mer, comme présenté figure suivante.

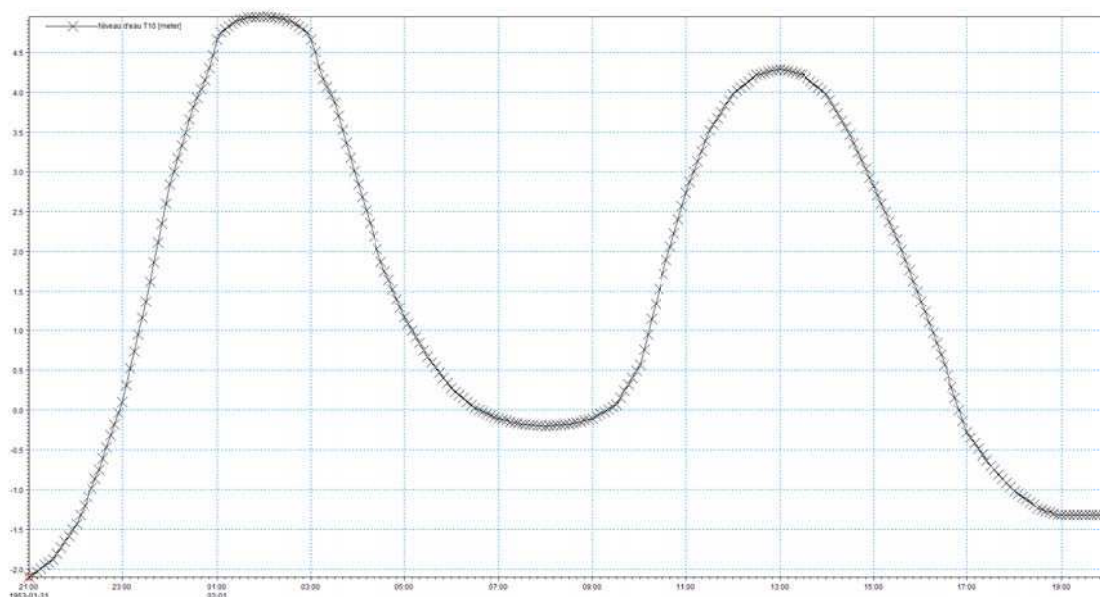


Figure 8-118 : Marégramme utilisé pour T10

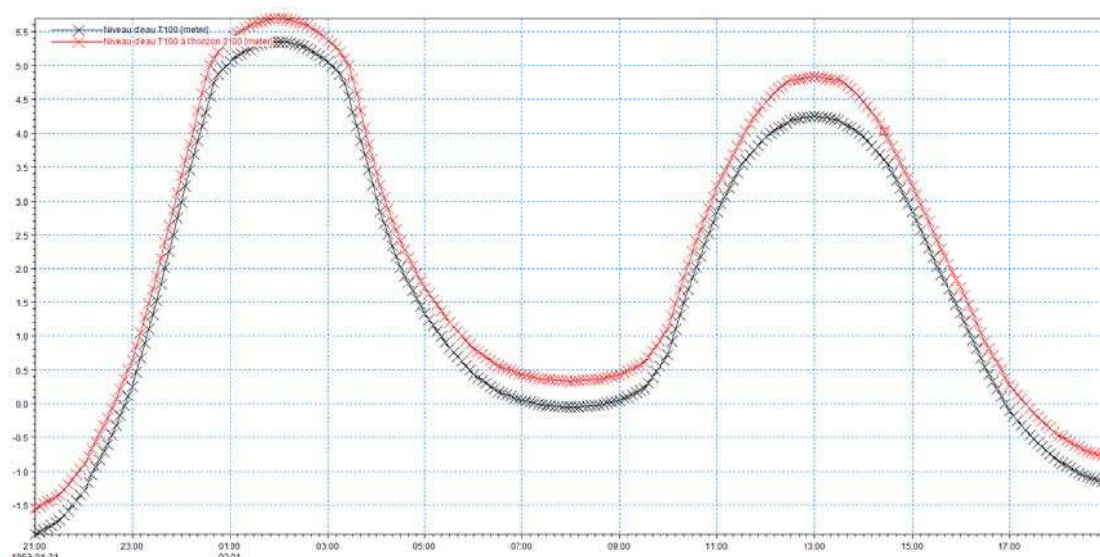


Figure 8-119 : Marégrammes utilisés pour T100 et T100 à l'horizon 2100

8.6.2 Dynamique de submersion

Pour les deux événements modélisés, la digue bordant les marais empêche l'entrée de la mer sur les terres, l'inondation reste en conséquence confinée à la zone des marais. Les hauteurs d'eau maximales sont élevées dans les petits bassins, et les vitesses maximales sont élevées entre les bassins, aboutissant à un aléa globalement fort dans la zone de marais à l'Est. L'aléa est plus faible sur le côté Ouest et au plus près de la digue. Pour l'aléa T100 à l'horizon 2100, l'inondation se propage davantage vers l'ouest des marais que pour l'aléa T100, et les écoulements vers le sud viennent se bloquer contre la digue.

8.6.3 Cartographie

Cartographie des aléas 10 ans



Figure 8-120 : Marck - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal



Figure 8-121 : Marck - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement décennal



Figure 8-122 : Marck - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal

Cartographie des aléas 100 ans



Figure 8-123 : Marck - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal



Figure 8-124 : Marck - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal



Figure 8-125 : Marck - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal

Cartographie des aléas 100 ans à l'échéance 2100



Figure 8-126 : Marck - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

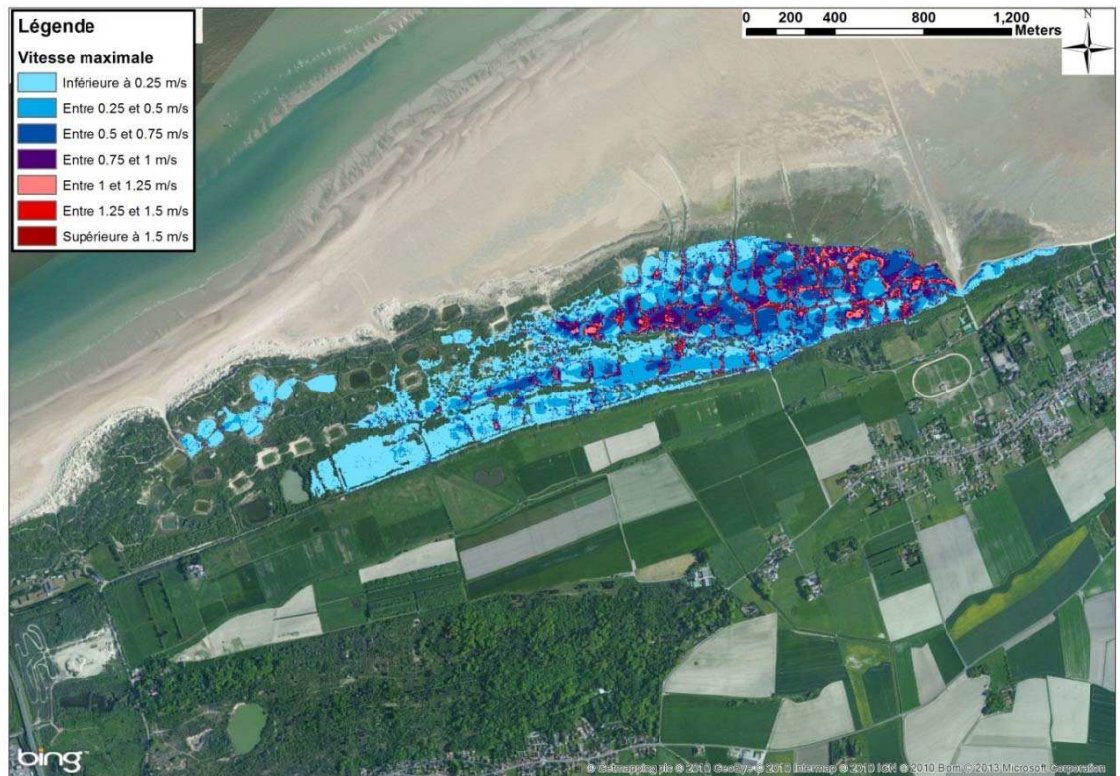


Figure 8-127 : Marck - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

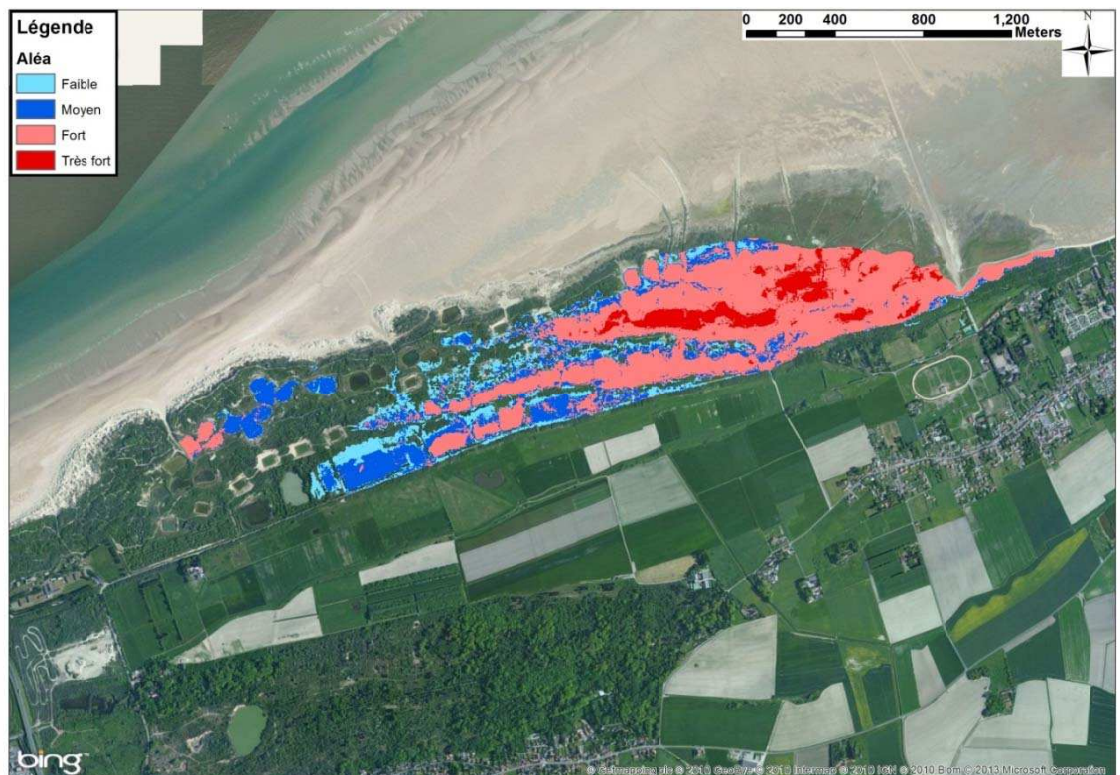


Figure 8-128 : Marck - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100

8.7 Calais - débordement de quais portuaires et rupture d'ouvrage

8.7.1 Hypothèses

Les niveaux marins statiques extrêmes retenus

Les niveaux marins à Calais ont été extraits des chroniques enregistrées au marégraphe, le port de Calais étant un port de référence. La chronique d'acquisition des données s'étend du 23/04/1985 au 17/06/2008. La chronique présente 42,6% de lacunes soit une durée utile de 13,3 années.

Tableau 8-32 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Calais

	Niveau extrême de pleine-mer
T10	4,77
T100	5,04

Les niveaux marins totaux retenus

Une élévation du niveau marin lié au réchauffement climatique pris en compte en 2013 de 0,20m a été ajoutée au niveau de pleine-mer centennal. Pour la modélisation de l'évènement centennal incluant le changement climatique à l'horizon 2100, une surcote supplémentaire de 0,40 m a été ajoutée afin d'obtenir une élévation moyenne de 0,60 m conforme au scénario pessimiste établi par l'ONERC.

Le débordement étudié se situant à l'intérieur des infrastructures portuaires, c'est-à-dire à l'abri de la houle, aucune surcote de déferlement n'est considérée pour ce site.

Figure 8-129 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus à Calais

	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total retenu
T10	4,77	-	-	-	4,77
T100	5,04	0,20	-	-	5,24
T100 à l'horizon 2100	5,04	0,60	-	-	5,64

Les signaux de marée ont été modifiés pour atteindre ces niveaux extrêmes de pleine-mer, comme présenté figure suivante.

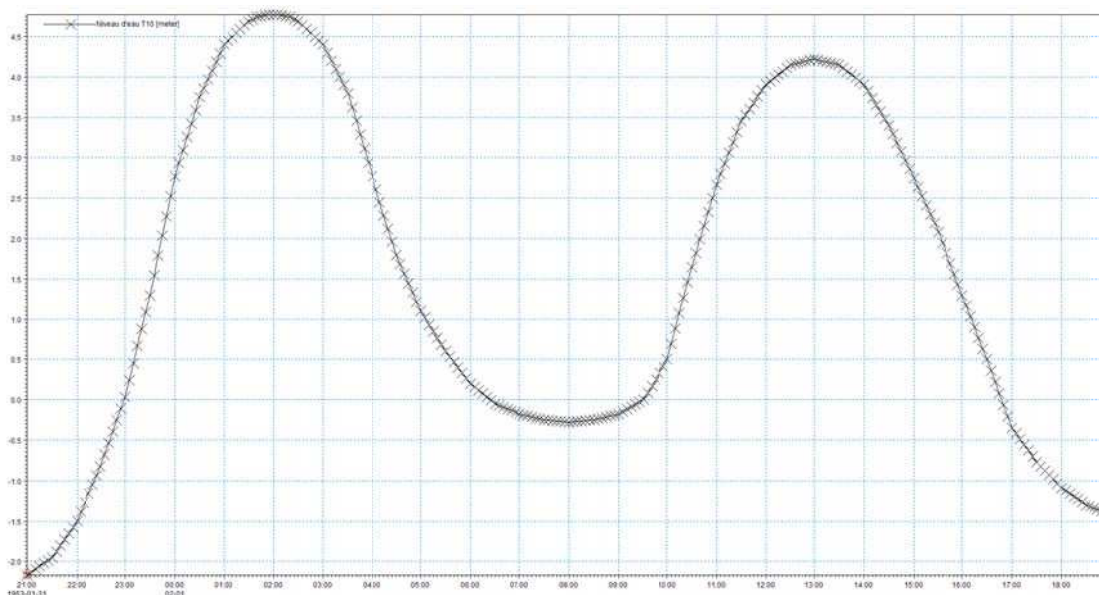


Figure 8-130 : Marégramme utilisé pour T10

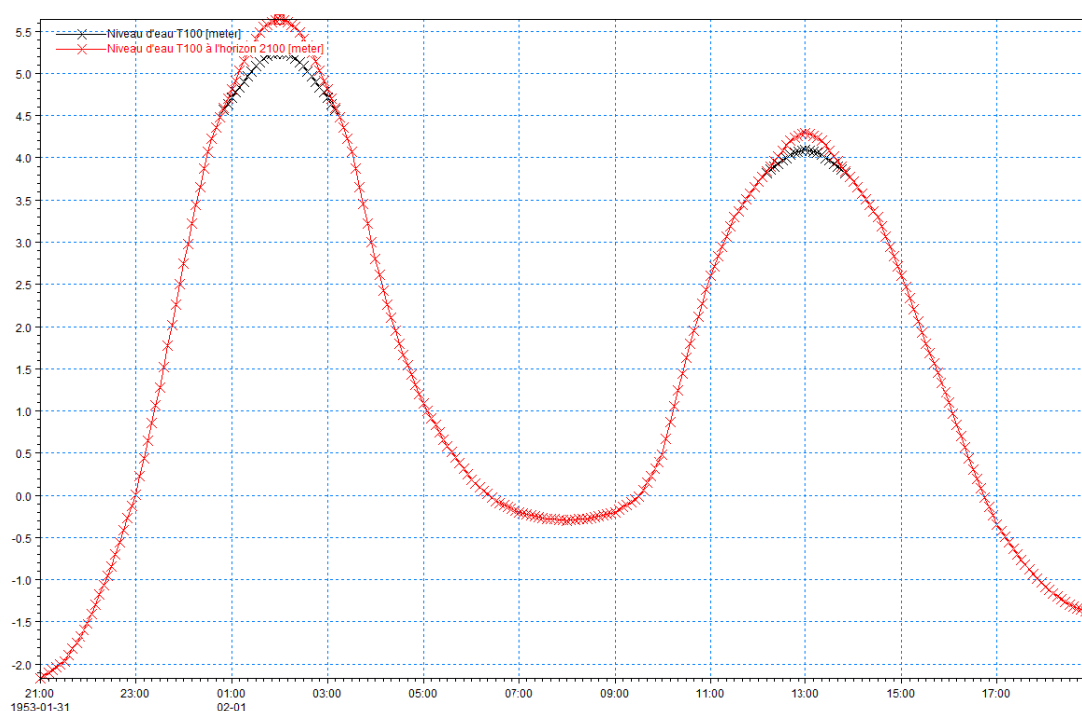


Figure 8-131 : Marégrammes utilisés pour T100 et T100 à l'horizon 2100

Deux modalités seront considérées pour ce site.

- L'écluse de dix mètres séparant le Bassin des chasses du port est supposée fermée. Seuls les débordements sur les quais portuaires seront considérés dans cette modalité.
- L'écluse de dix mètres séparant le Bassin des chasses du port est supposée ouverte. Le niveau marin à pleine-mer sera donc supérieur à 5,45m CM dans le Bassin des chasses pour le scénario incluant le changement climatique. Ainsi, conformément au protocole de gestion des crues, les pompes de la station des Pierrettes, à l'autre extrémité du bassin, sont arrêtées.

Modélisation avec écluse ouverte

Modélisation du bassin des Chasses et des canaux

La bathymétrie dans le port et dans le bassin des Chasses est fixé à -3 m IGN69. Le niveau de l'écluse de dix mètres ouverte est à -2,755 m, défini d'après les plans de l'ouvrage.

Afin de modéliser au mieux la propagation de l'inondation dans le canal et dans le sud de la zone, le canal des Pierrettes (qui se prolonge vers le Sud sous les noms de rivière Neuve puis canal du Haut Banc) est dans cette version prise en compte dans un modèle 1D couplé au modèle 2D, de même que la rivière d'Hames Boucres, son affluent en amont de la voie ferrée.

La limite amont du canal des Pierrettes est couplée avec le modèle 2D au niveau du bassin des Chasses, à quelques mètres en aval de l'ouvrage des Pierrettes. L'aval du canal des Pierrettes est considéré sur la station de pompage de Balinghem, située à plus de 10 km de la voie ferrée, permettant d'y imposer une limite fermée sans que cela influence l'inondation en aval. Les profils en travers levés sur le terrain permettent de représenter la géométrie du canal jusqu'à ce point. Ils sont complétés par des profils extraits des données LIDAR, avec un espacement de 100 m du bassin des Chasses au passage sous la voie ferrée, et de 200 m au-delà.

La structure de la rivière d'Hames Boucres est définie par des profils extraits des données LIDAR, avec un espacement de 200 m sur le premier kilomètre en amont de la voie ferrée puis de 500 m au-delà.

Le niveau d'eau initial dans le canal des Pierrettes et la rivière d'Hames Boucres est imposé à -0,755 m IGN69, niveau inférieur au niveau de déclenchement des pompages et conseillé par l'Institution Interdépartementale des Wateringues.

Les données LIDAR n'étant pas disponibles ou de qualité insuffisante pour étendre suffisamment le modèle en amont de la voie ferrée, le canal des Pierrettes n'est pas couplé au modèle 2D sur cette partie. Nous avons considéré que nous ne pouvions pas restituer d'emprise d'inondation sur un si vaste secteur à partir d'une donnée peu fiable. Un modèle à casiers a été développé afin de restituer les inondations sur cette partie du canal. Cette représentation permet d'établir une courbe de tarage fiable en limite de modèle couplé 1D/2D permettant d'établir des zones inondables fiables sur les secteurs d'intérêt. Quinze casiers ont été définis selon leur altitude et les remblais (routes) pouvant cloisonner et régir les interactions entre casiers. Ainsi, pour chaque casier représentant une zone considérée comme homogène et de surface connue, un volume d'eau est calculé, représentatif du stockage de l'inondation sur cette zone. Des échanges sont possibles entre casiers, si le niveau d'eau stocké atteint la côte de débordement du remblai entre deux casiers (établi par les données LIDAR).

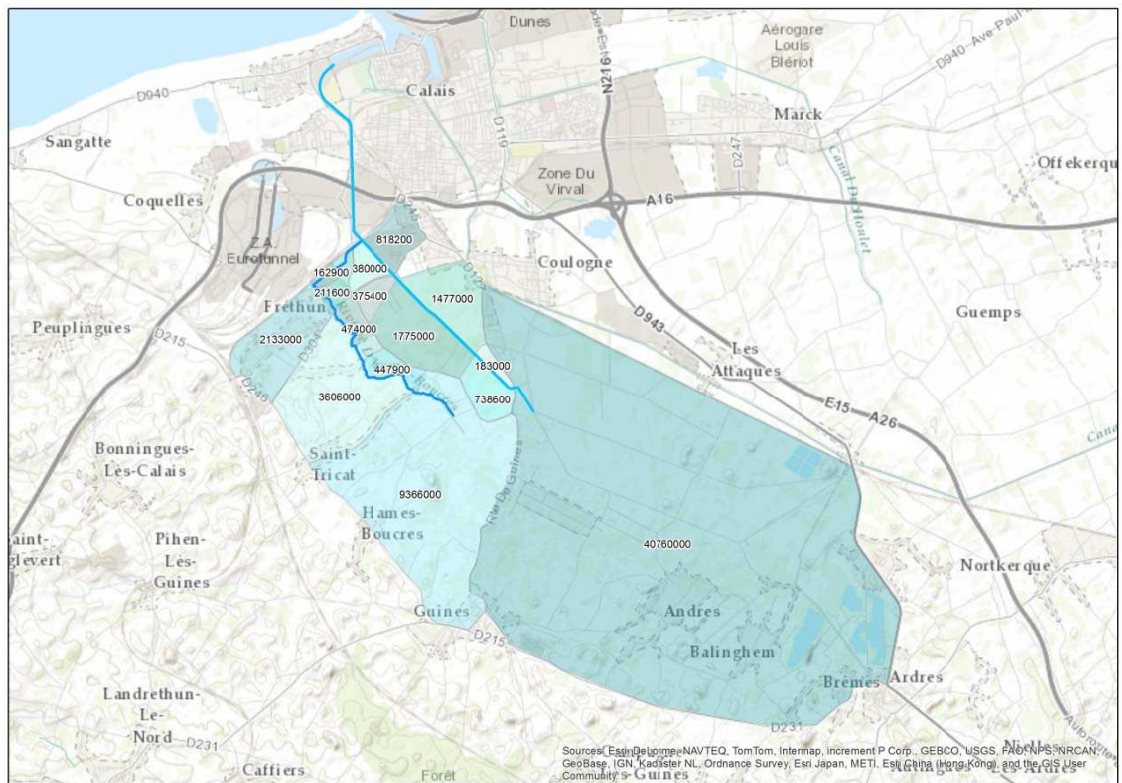


Figure 8-132 : Schéma des délimitations des casiers et leur surface (en m²)

Représentation des ouvrages du canal des Pierrettes

L'ouvrage des Pierrettes, situé à l'Ouest du bassin des Chasses, est composé de 4 vannes qui sont fermées à marée montante et peuvent s'ouvrir à marée descendante si le niveau d'eau dans le canal est supérieur à celui du bassin des Chasses de 10 cm, permettant ainsi d'abaisser le niveau du canal en cas de crue ou d'évacuer l'eau introduite par submersion. Cette régulation a été prise en compte dans notre modélisation.

Cet ouvrage ayant une altitude de 2,38 m IGN69, il est submergé par le niveau marin centennal déterminé sur cette zone. Il est donc représenté au même point dans le modèle 1D, en plus du système d'ouverture et de fermeture des vannes, un seuil permettant le passage de l'eau au-dessus de l'ouvrage vers le canal.

Le canal des Pierrettes s'étend jusqu'à l'écluse carrée représentée par un passage en siphon du canal des Pierrettes sous le canal de Guînes, sur une hauteur de 90 cm et une largeur de 4,23 m. Les données géométriques et altimétriques ont été fournies par VNF.

Le passage sous la voie ferrée est une conduite rétrécissant la section du canal, ses dimensions ont été estimées, à une longueur de 50 m, une largeur de 15 m et une hauteur de 3,54 m. Le niveau haut de la conduite est fixé à 1 m IGN69. En cas d'élévation importante de la ligne d'eau dans le canal, ce passage conditionne l'hydrodynamique en aval de cette zone.

Ces hypothèses prises en compte pour la modélisation de la submersion marine sur le site de Calais sont construites sur la base du scénario centennal actuel. Elles sont également justifiées pour le scénario centennal à l'horizon 2100.

8.7.2 Dynamique de submersion

Le niveau d'eau au Sud du bassin des Chasses atteint la côte de l'ouvrage des Pierrettes 3 h avant la pleine mer. 2h15 avant la pleine-mer, l'eau déborde également par le sud du Bassin des Chasses, sur le parking, pour revenir dans le canal des Pierrettes de l'autre côté de l'écluse, comme le montre la figure ci-dessous avec les débits maximum du modèle 2D vers le 1D et inversement. Les débits du canal vers les terrains en 2D (en vert) sont localisés sur la portion de canal représentant le bassin des Chasses en aval de la station des Pierrettes (sur 5 m), et les premiers mètres en amont de la station. Rapidement, le niveau d'eau dans le canal des Pierrettes augmente de manière à ce que les débordements s'effectuent alors du modèle 1D vers le 2D (en rouge).

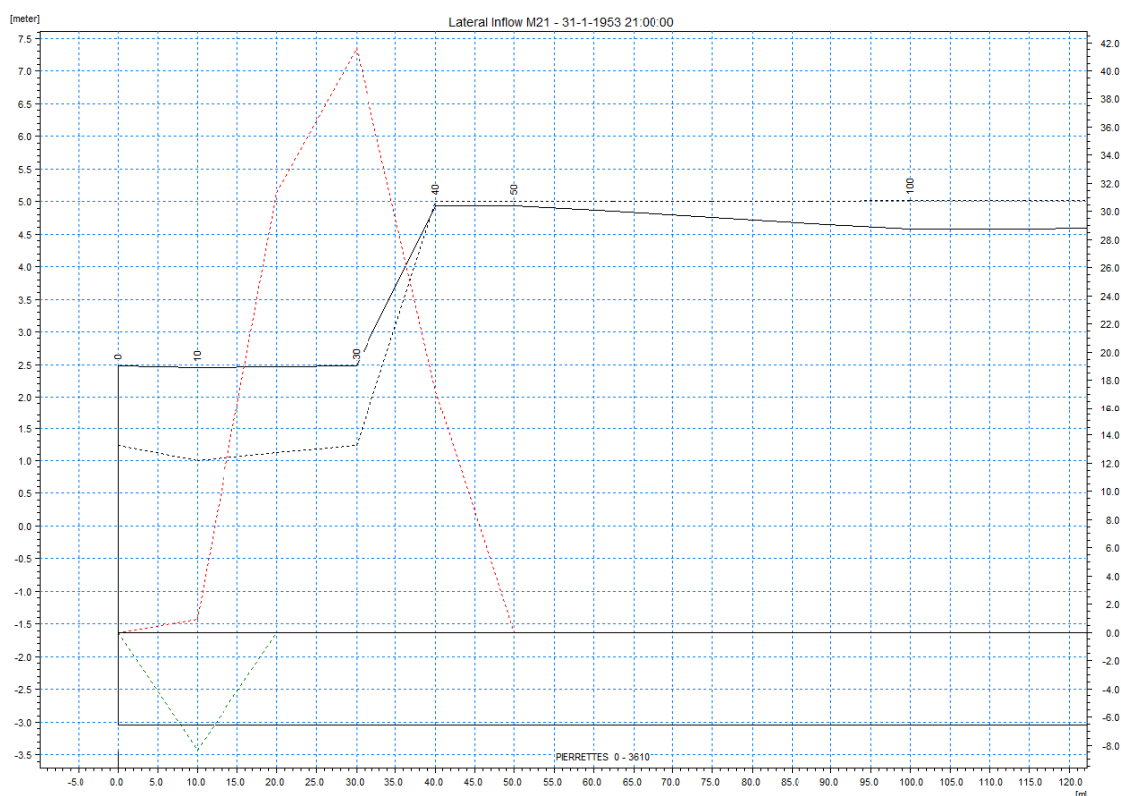


Figure 8-133 : Profil en long des 100 premiers mètres du canal des Pierrettes, aléa T100. RG en trait plein, RD en pointillés, en vert débits du 1D vers le 2D et en rouge débit du 2D vers le 1D

1h15 avant la pleine mer, les premiers débordements du canal des Pierrettes apparaissent au Nord de la voie ferrée, par les points bas des deux rives, puis en rive droite au Nord de l'Avenue Pierre de Coubertin et en rive gauche légèrement au Sud.

Les débordements au Nord restent localisés près du canal des Pierrettes, ceux en rive droite inondent la voie ferrée. Les débordements au Sud se propagent à l'Ouest jusqu'au remblai formé par une route, et à l'Est jusqu'à la voie ferrée. Sur cette zone au Nord de la voie ferrée, un important volume d'eau est stocké, d'où le classement en aléa fort pour la simulation T100. L'A16 forme un remblai bloquant les écoulements de part et d'autre.

8.7.3 Cartographie

Cartographie des aléas 10 ans, écluse fermée

Aucun débordement sur le port de Calais n'est mis évidence par la modélisation pour T10 écluse fermée.

Cartographie des aléas 10 ans, écluse ouverte

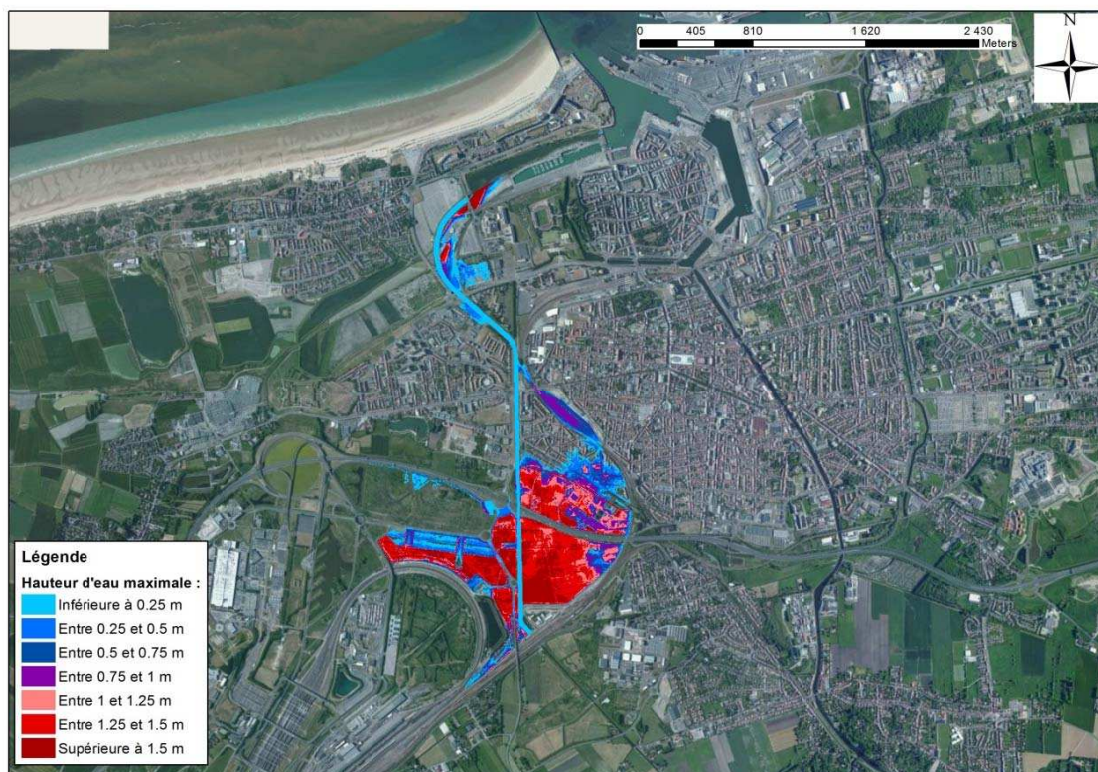


Figure 8-134 : Calais - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal

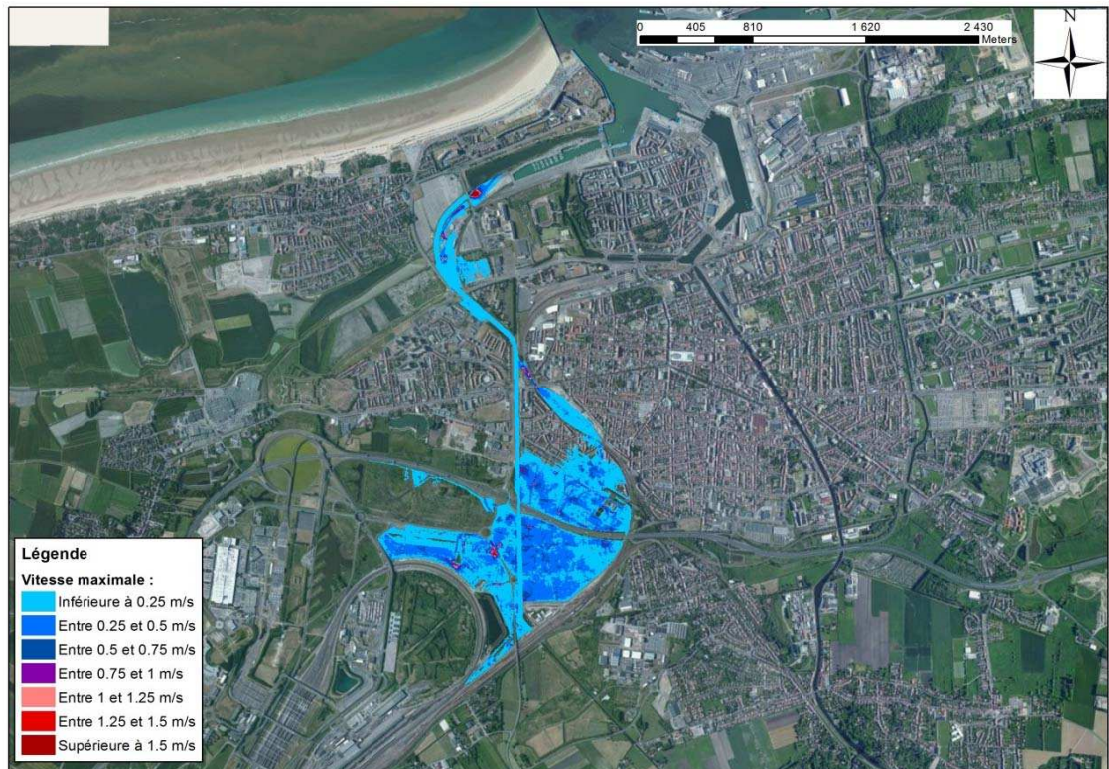


Figure 8-135 : Calais - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement décennal



Figure 8-136 : Calais - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal

Cartographie des aléas 100 ans, écluse fermée



Figure 8-137 : Calais - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennial



Figure 8-138 : Calais - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennial



Figure 8-139 : Calais - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal

Cartographie des aléas 100 ans, écluse ouverte

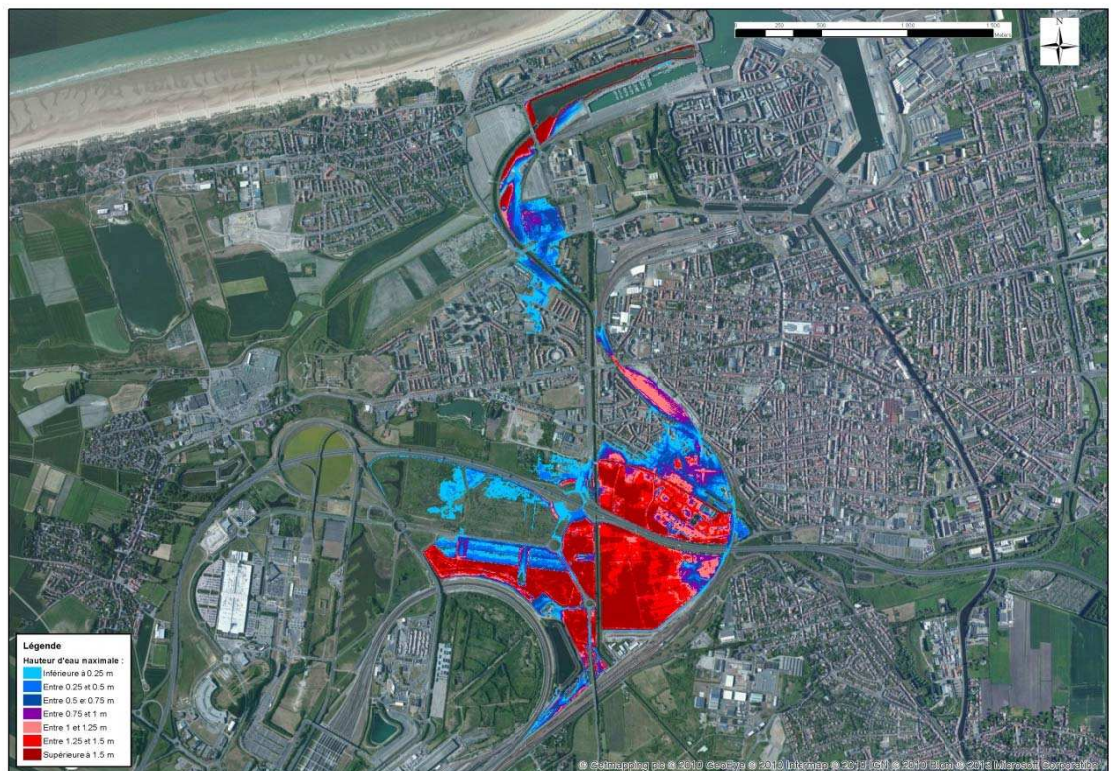


Figure 8-140 : Calais - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal

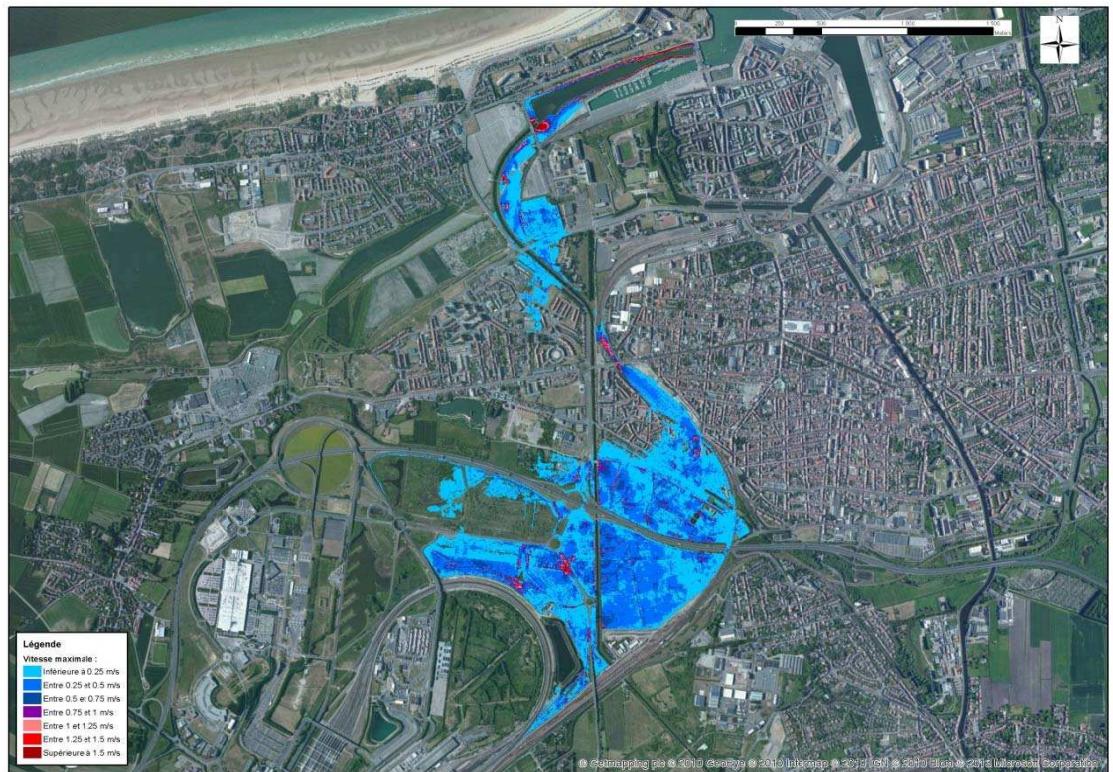


Figure 8-141 : Calais - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal

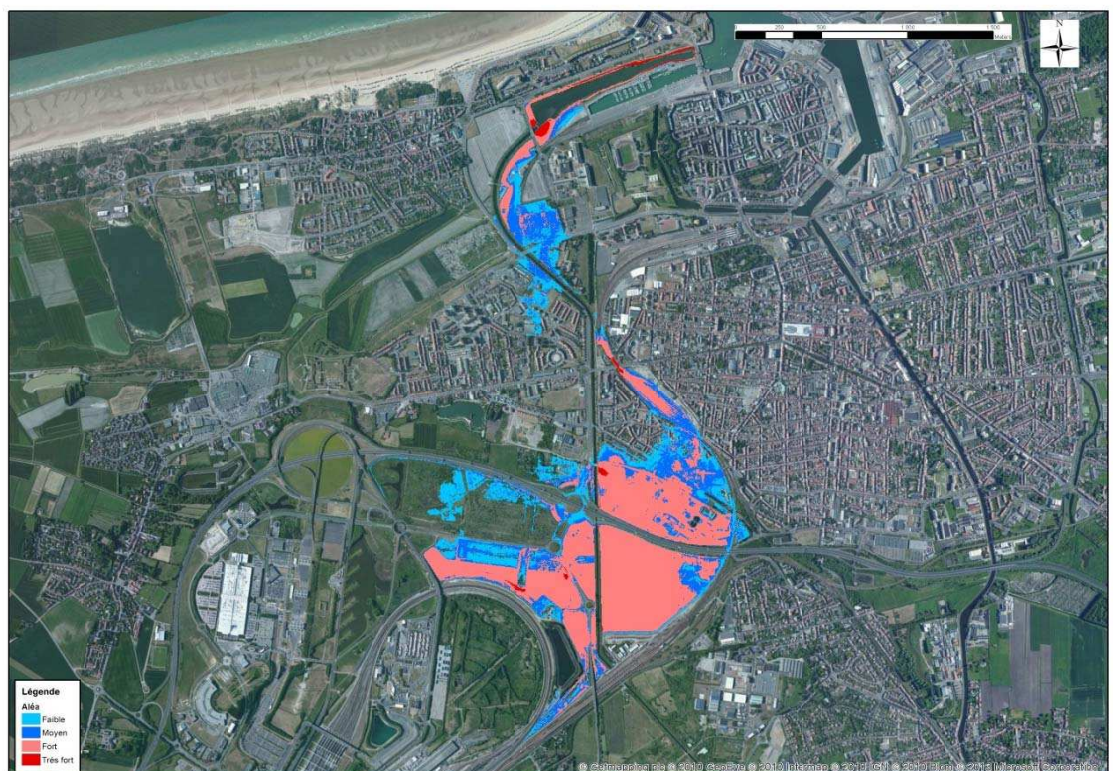


Figure 8-142 : Calais - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal

Cartographie des aléas 100 ans à l'échéance 2100, écluse fermée



Figure 8-143 : Calais - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100



Figure 8-144 : Calais - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100



Figure 8-145 : Calais – Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100

Cartographie des aléas 100 ans à l'échéance 2100, écluse ouverte

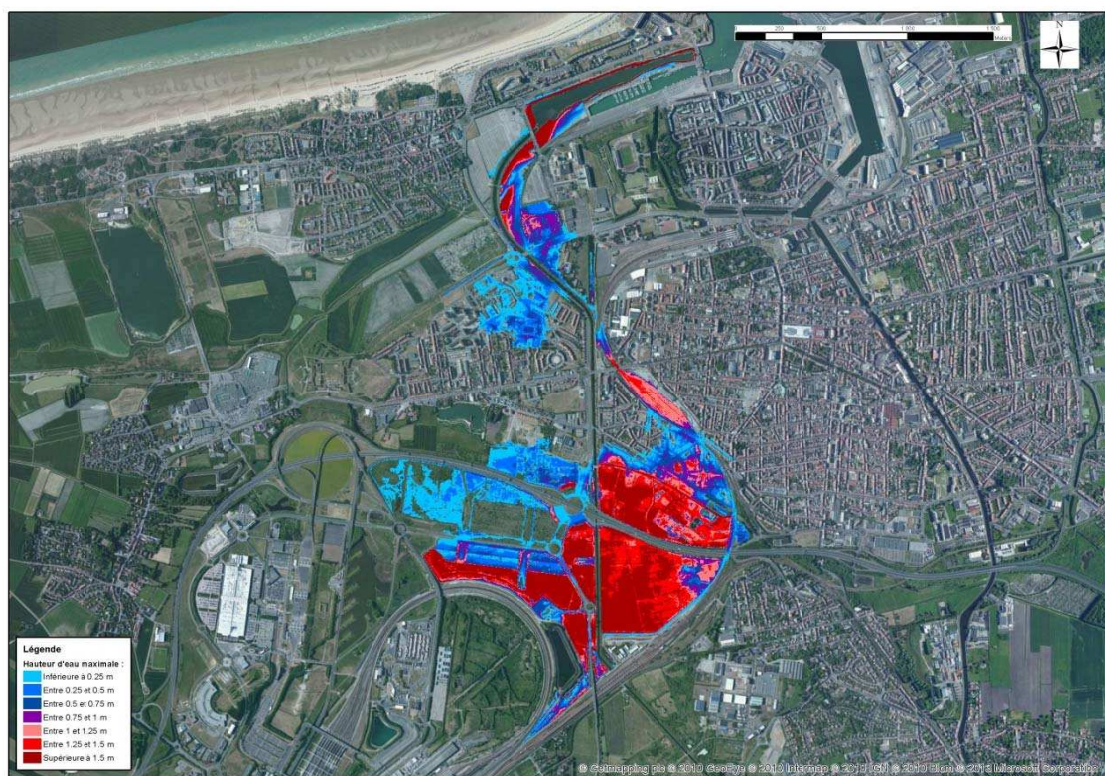


Figure 8-146 : Calais - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

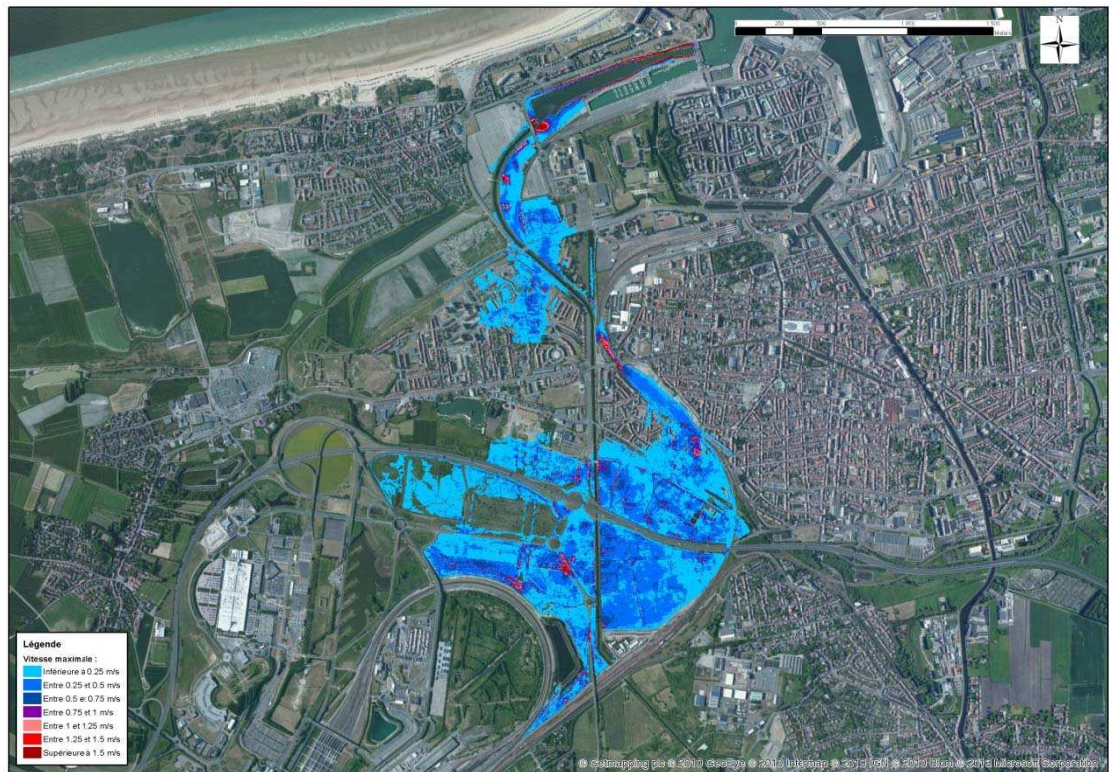


Figure 8-147 : Calais - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

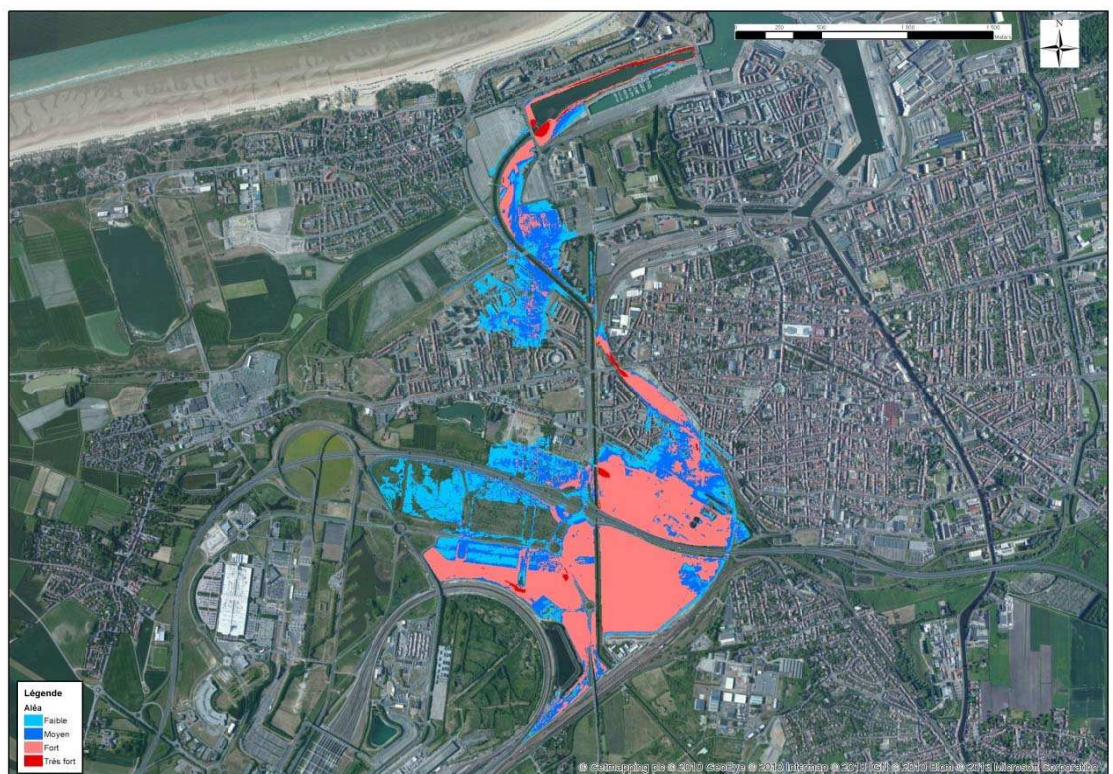


Figure 8-148 : Calais – Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100

8.8 Blériot-Plage - rupture du cordon dunaire

8.8.1 Hypothèses

Les niveaux marins statiques extrêmes retenus

Les niveaux marins extrêmes à Blériot-Plage ont été extraits des cartes du SHOM 2008 et 2012 pour les périodes de retour décennale et centennale (cf. paragraphe 4.3.1).



Figure 8-149 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement décennal est celui du SHOM 2012, plus fort que celui du SHOM 2008 sur le site de Blériot-Plage.



Figure 8-150 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement centennal est celui du SHOM 2012, plus pénalisant.

Tableau 8-33 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Blériot-Plage

	Niveau extrême de pleine-mer
T10	4,80
T100	5,10

Les niveaux marins totaux retenus

Une élévation du niveau marin lié au réchauffement climatique pris en compte en 2013 de 0,20m a été ajoutée au niveau de pleine-mer centennal. Pour la modélisation de l'évènement centennal incluant le changement climatique à l'horizon 2100, une surcote supplémentaire de 0,40 m a été ajoutée afin d'obtenir une élévation moyenne de 0,60 m conforme au scénario pessimiste établi par l'ONERC.

Le calcul de la surcote de déferlement liée aux niveaux marins précédemment exposés est effectué par propagation de la houle au travers d'un modèle 1D (cf. paragraphe 4.5).

L'incertitude sur les hypothèses de calcul de la surcote de déferlement est de plus intégrée aux niveaux marins finaux (cf. paragraphe 4.3.3).

Tableau 8-34 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement

		Surcote de déferlement	Incetitude sur le calcul du set up
Niveau marin décennal	Hypothèses originales	0,23	0,07
	Hypothèses combinées	0,30	
Niveau marin centennal 2013	Hypothèses originales	0,11	0,06
	Hypothèses combinées	0,17	
Niveau marin centennal 2100	Hypothèses originales	0,03	0,05
	Hypothèses combinées	0,08	

Les niveaux marins totaux s'établissent ainsi :

Tableau 8-35 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus à Blériot-Plage

	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incetitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total retenu
T10	4,80	-	0,23	0,07	5,10
T100	5,10	0,20	0,11	0,06	5,47
T100 à l'horizon 2100	5,10	0,60	0,03	0,05	5,78

Les signaux de marée ont été modifiés pour atteindre ces niveaux extrêmes de pleine-mer, comme présenté figure suivante.

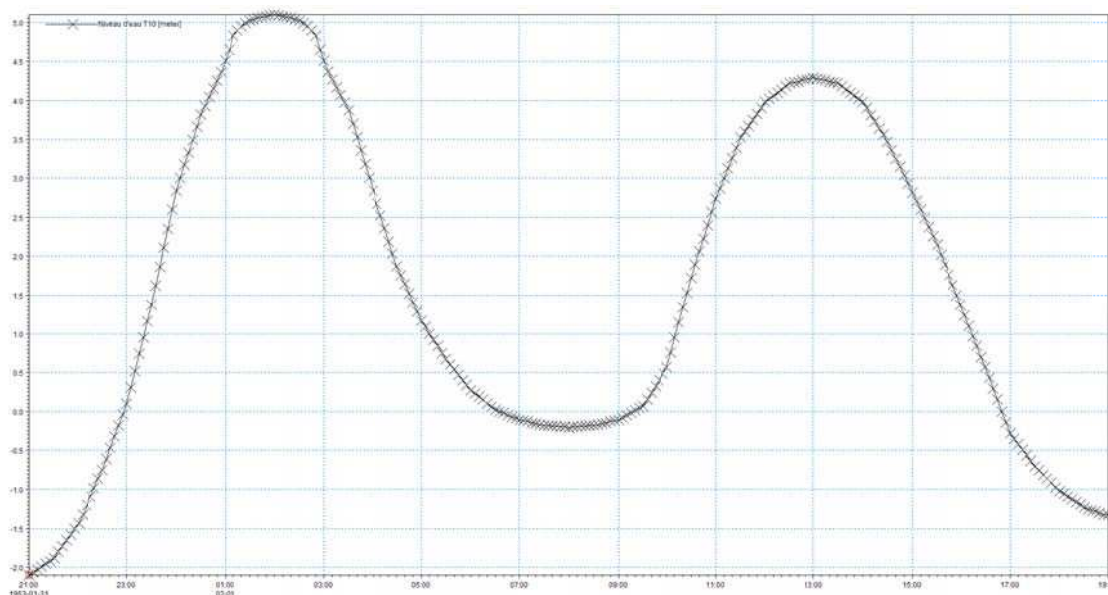


Figure 8-151 : Marégramme utilisé pour T10

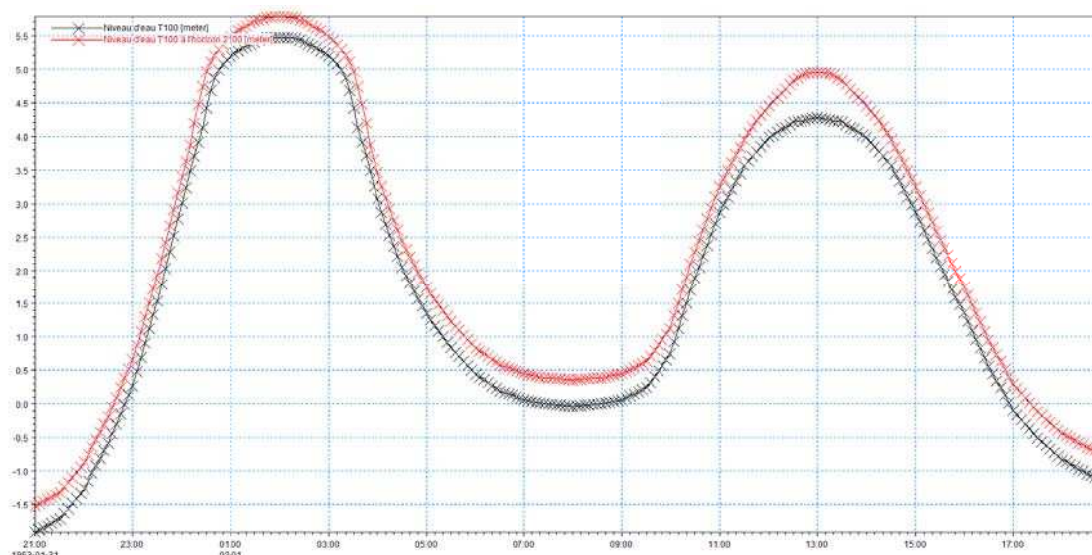


Figure 8-152 : Marégrammes utilisés pour T100 et T100 à l'horizon 2100

Les caractéristiques de la brèche

La brèche simulée dans le cordon dunaire de Blériot-Plage est d'une longueur de 100m. La cote de la crête de la dune s'effondre de 6,51m à 5,19m IGN 69, cote du terrain naturel à l'arrière, en 15 minutes à partir d'une heure avant la pleine-mer.

Le marégramme injecté dans cette brèche est le niveau d'eau calculé à Blériot-Plage. Il atteint donc un niveau de 5,47m IGN69 pour le scénario d'occurrence centennale et 5,78m IGN 69 pour celui incluant le changement climatique.

Les niveaux calculés pour la période de retour T10 sont inférieurs à la cote d'ase de la brèche modélisée pour T100. La morphologie du cordon dunaire ne permet pas de formuler une hypothèse de brèche pour T10 qui serait paradoxalement plus défavorable que celle retenue pour T100. Aucune submersion n'est donc retenue pour T10 sur ce site.



Figure 8-153 : Position de la brèche simulée à Blériot-Plage

8.8.2 Dynamique de submersion

Dans le cas du scénario d'occurrence centennale, l'inondation s'étend à partir du parking situé à l'extrémité de la rue de la mer. Elle se propage par le côté Ouest jusqu'à la rue du Fort Lapin, et par le côté Est où elle surverse par-dessus la D940 1h45 après la rupture du cordon dunaire et se propage sur le parking en rive gauche du canal des Pierrettes. L'inondation se propage également vers le sud jusqu'à l'encontre du remblai formé par la digue Mouron, les écoulements se font alors vers l'Ouest juste en dessous des quartiers Sud et vers le Sud le long de la digue. Les aléas sont globalement faibles sur toute l'emprise de l'inondation, exceptés sur le parking et les zones basses à l'Ouest de la digue Mouron.

Pour le scénario incluant le changement climatique, l'inondation s'écoule dans un premier temps librement en suivant les points bas de la topographie. Elle atteint la limite Sud de la commune où elle est contrainte par la digue Mouron 1h après l'ouverture de la brèche dans le cordon dunaire. L'eau suit ensuite cette digue vers l'Ouest jusqu'au chemin de la Française qu'elle vient surverser 2h30 après l'ouverture de la brèche et se stocke dans le bassin. A l'Est, l'inondation traverse la rue de Verdun pour submerger une partie des quais situés rive gauche du canal des Pierrettes. D'importantes hauteurs d'eau sont stockées le long de la digue Mouron, d'où un aléa fort sur tout le pourtour du terrain entouré de remblai.

8.8.3 Cartographie

Le risque identifié d'apparition de brèche dans la dune est limité au secteur où la dune est nettement plus étroite et plus basse, ce qui crée un passage naturel. La bande de 100 m est donc également limitée à ce secteur. Dans le sens parallèle à la côte, la bande couvre ce passage naturel, et s'étend ensuite de 100 m de chaque côté.

Cartographie des aléas 10 ans
Aucune submersion n'est retenue pour T10.

Cartographie des aléas 100 ans

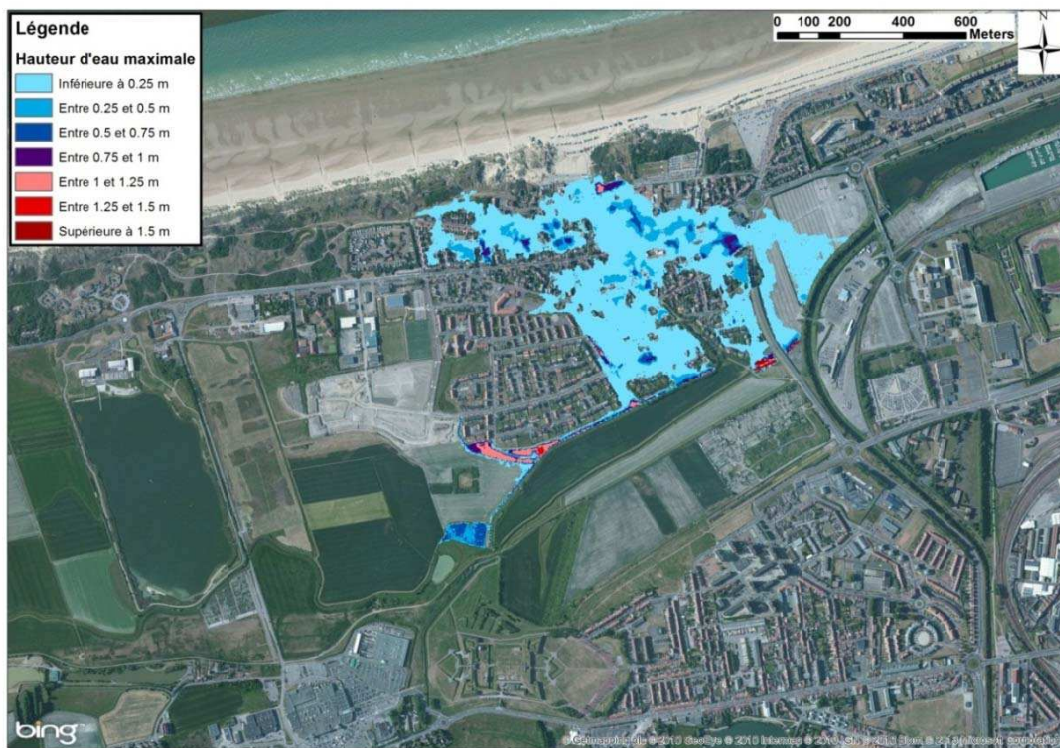


Figure 8-154 : Blériot Plage - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal

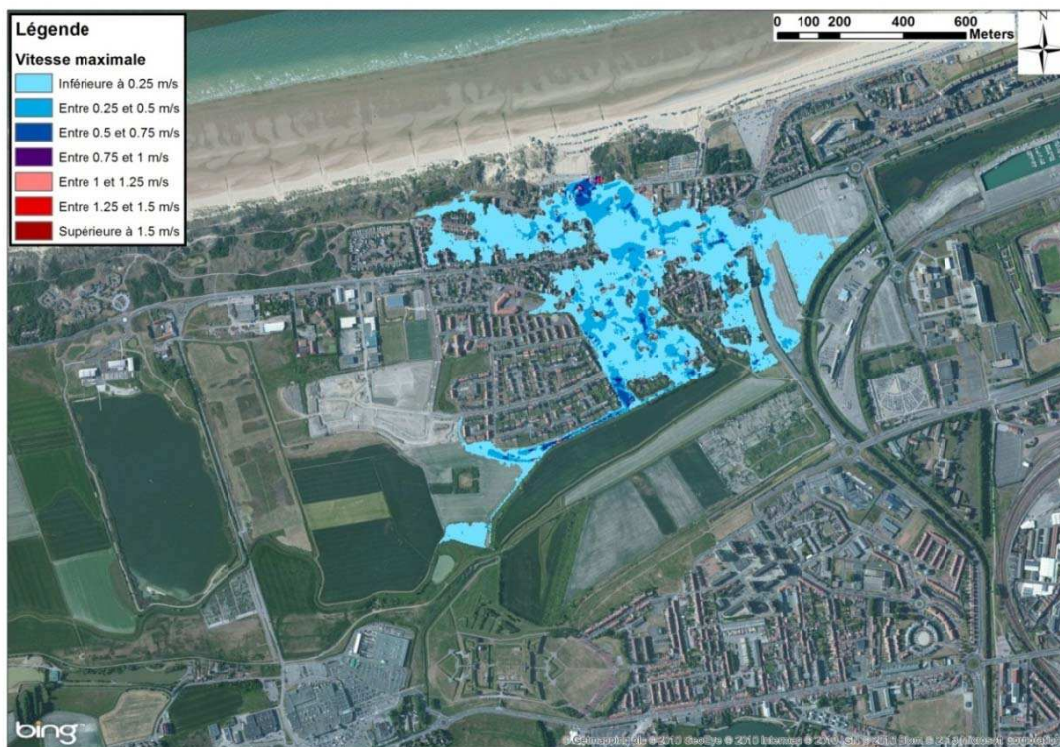


Figure 8-155 : Blériot Plage - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal

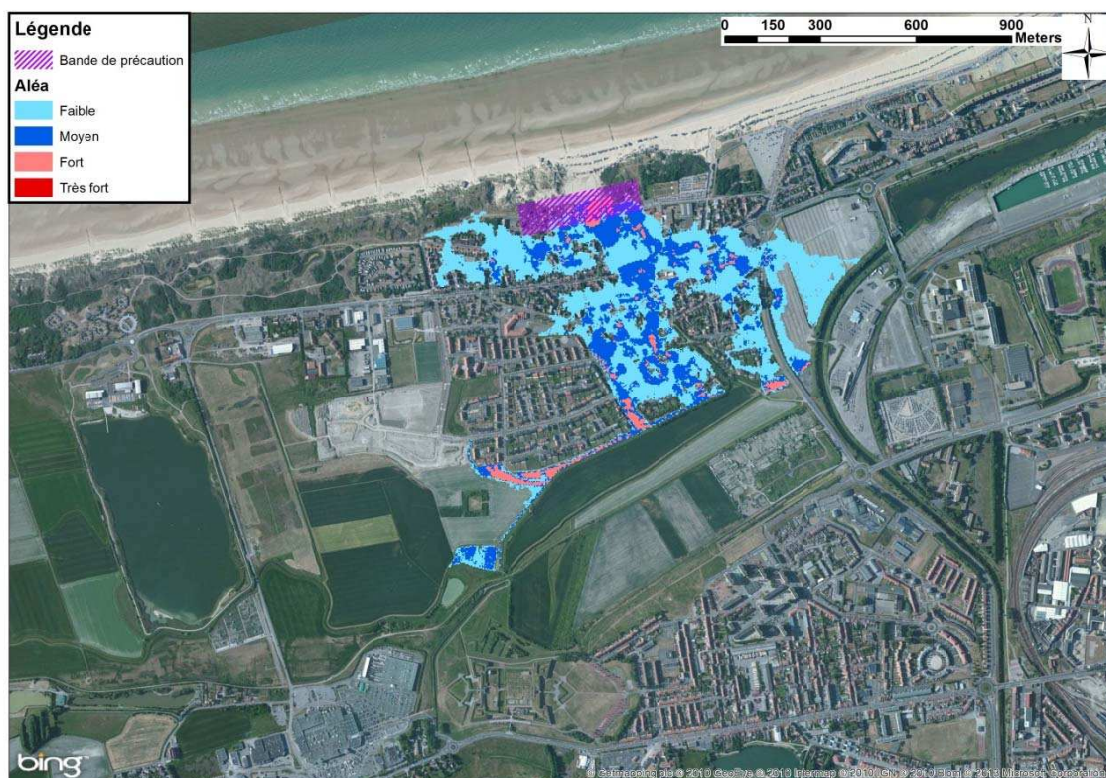


Figure 8-156 : Blériot Plage - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal

Cartographie des aléas 100 ans à l'échéance 2100

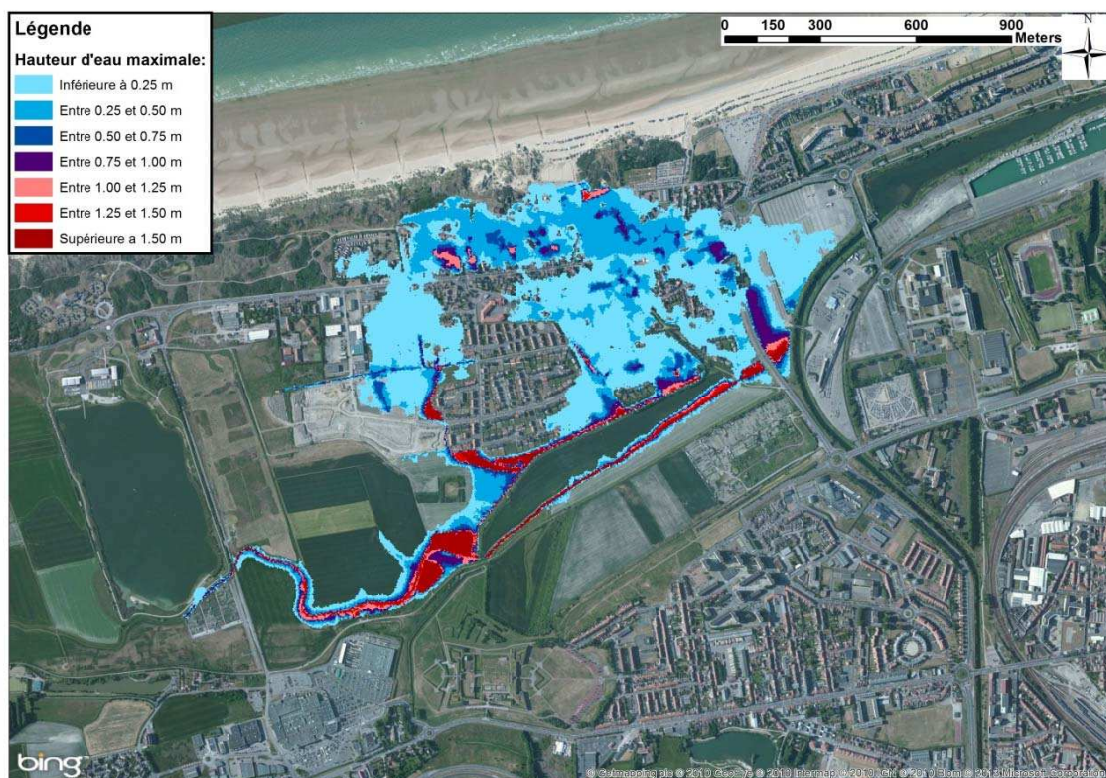


Figure 8-157 : Blériot Plage - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

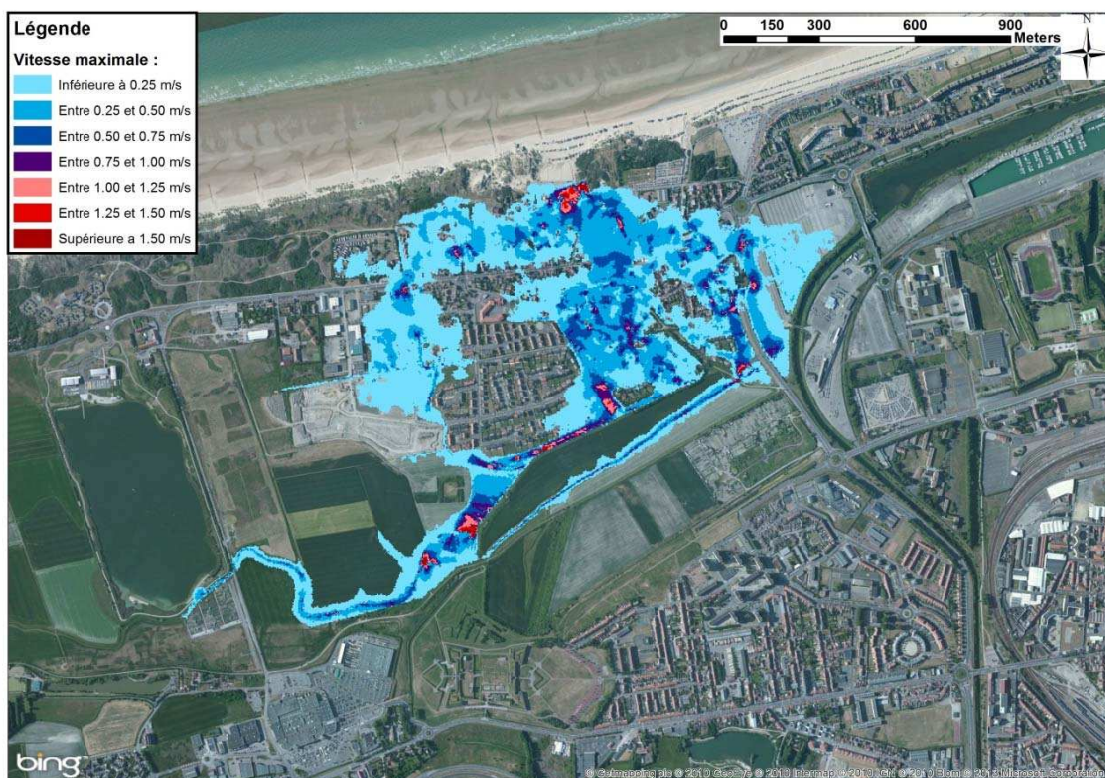


Figure 8-158 : Blériot Plage - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

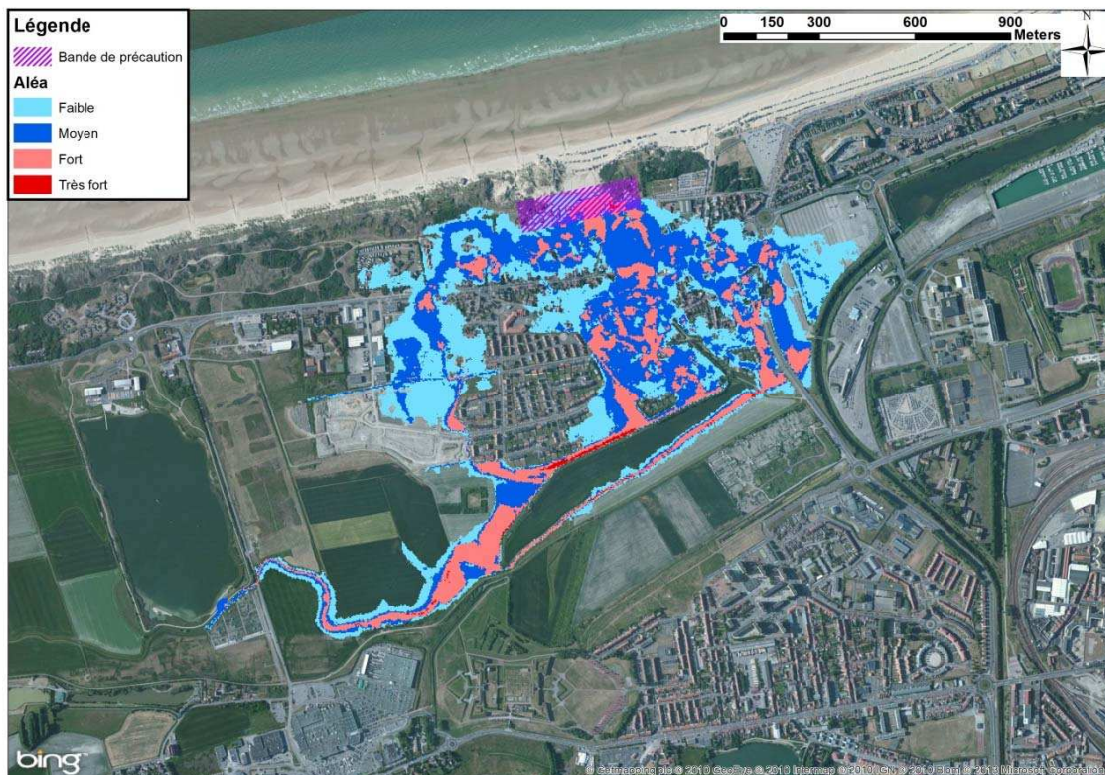


Figure 8-159 : Blériot Plage - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100

8.9 Sangatte – ruptures d'ouvrages

8.9.1 Hypothèses

Les niveaux marins statiques extrêmes retenus

Les niveaux marins extrêmes à Sangatte ont été extraits des cartes du SHOM 2008 et 2012 pour les périodes de retour décennale et centennale (cf. paragraphe 4.3.1).



Figure 8-160 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement décennal est celui du SHOM 2012, plus pénalisant.

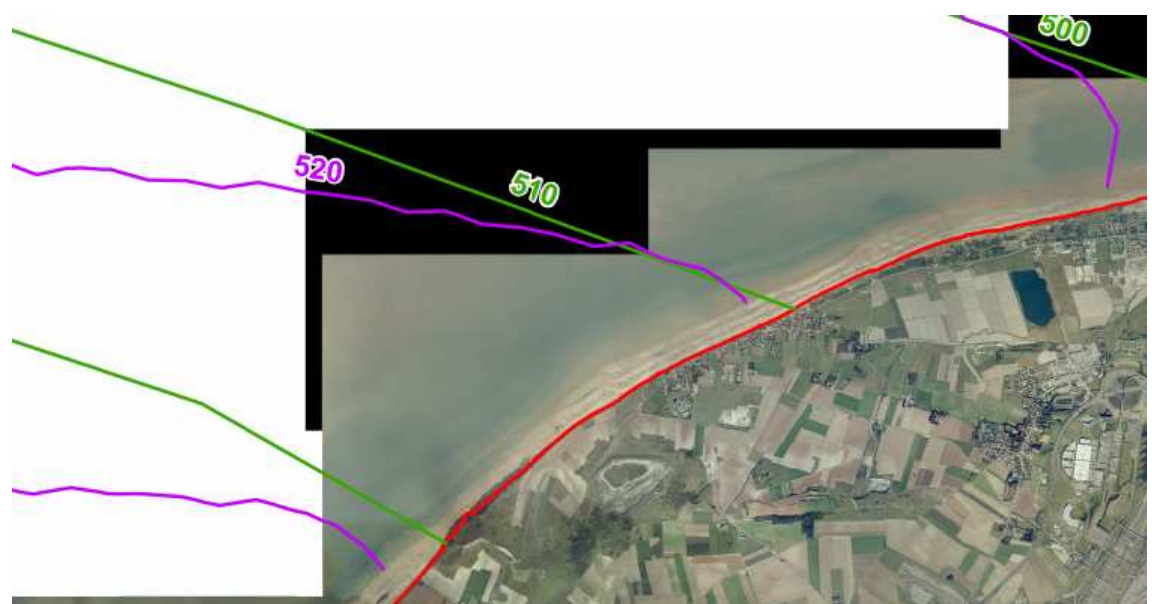


Figure 8-161 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement d'occurrence centennale est celui du SHOM 2012, plus pénalisant.

Tableau 8-36 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Sangatte

	Niveau extrême de pleine-mer
T10	4,90
T100	5,20

Estimation de la surcote de déferlement

Du fait de la nature des ouvrages de protection littoral, le site de Sangatte a été divisé en deux, la partie dune et la partie digue. Du fait de leur géométrie et de leur nature différentes, la surcote de déferlement est elle-aussi différente selon l'ouvrage présent.

La surcote de déferlement a pu être déterminée grâce au logiciel LITPACK (cf. paragraphe 4.5).

Les niveaux marins totaux retenus

Une élévation du niveau marin lié au réchauffement climatique pris en compte en 2013 de 0,20m a été ajoutée au niveau de pleine-mer centennal. Pour la modélisation de l'évènement centennal incluant le changement climatique à l'horizon 2100, une surcote supplémentaire de 0,40 m a été ajoutée afin d'obtenir une élévation moyenne de 0,60 m conforme au scénario pessimiste établi par l'ONERC.

L'incertitude sur les hypothèses de calcul de la surcote de déferlement est de plus intégrée aux niveaux marins finaux (cf. paragraphe 4.3.3).

Tableau 8-37 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement

Sangatte - Digue		Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul du set up
Niveau marin décennal	Hypothèses originales	0,36	0,05
	Hypothèses combinées	0,41	
Niveau marin centennal 2013	Hypothèses originales	0,20	0,05
	Hypothèses combinées	0,25	
Niveau marin centennal 2100	Hypothèses originales	0,09	0,05
	Hypothèses combinées	0,14	

Tableau 8-38 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement

Sangatte - Dune		Surcote de déferlement	Incertainitude sur le calcul du set up
Niveau marin décennal	Hypothèses originales	0,27	0,05
	Hypothèses combinées	0,32	
Niveau marin centennal 2013	Hypothèses originales	0,14	0,05
	Hypothèses combinées	0,19	
Niveau marin centennal 2100	Hypothèses originales	0,04	0,05
	Hypothèses combinées	0,09	

Tableau 8-39 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus à Sangatte

Partie Digue	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total retenu
T10	4,90	-	0,36	0,05	5,31
T100	5,20	0,20	0,20	0,05	5,65
T100 à l'horizon 2100	5,20	0,60	0,09	0,05	5,94

Partie Dune	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total retenu
T10	4,90	-	0,27	0,05	5,22
T100	5,20	0,20	0,14	0,05	5,59
T100 à l'horizon 2100	5,20	0,60	0,04	0,05	5,89

Les signaux de marée ont été modifiés pour atteindre ces niveaux extrêmes de pleine-mer, comme présenté figure suivante.

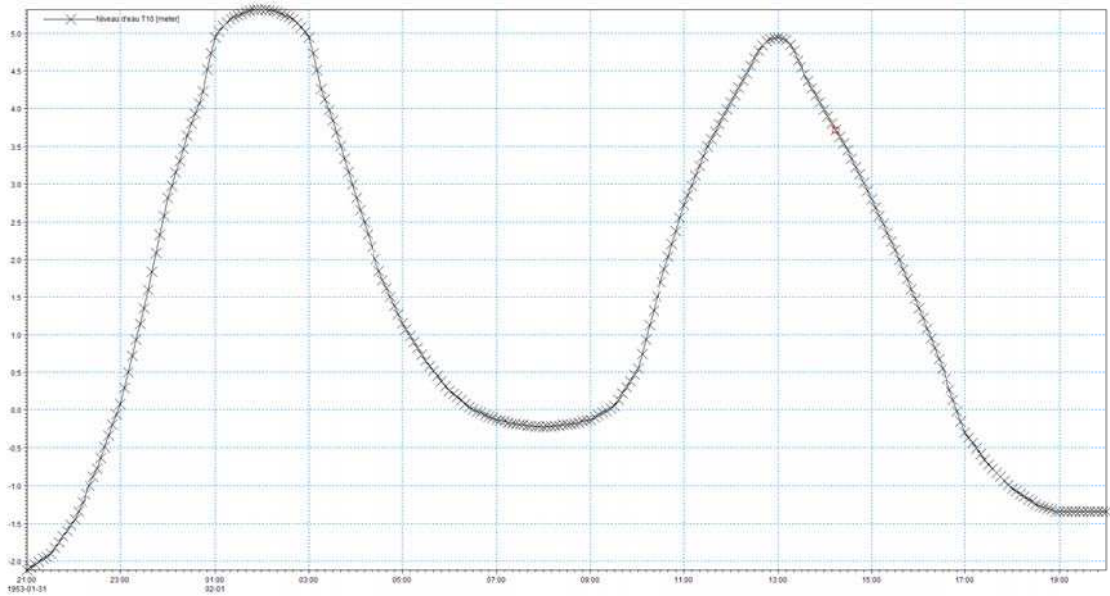


Figure 8-162 : Marégramme utilisé pour T10 sur la partie Digue

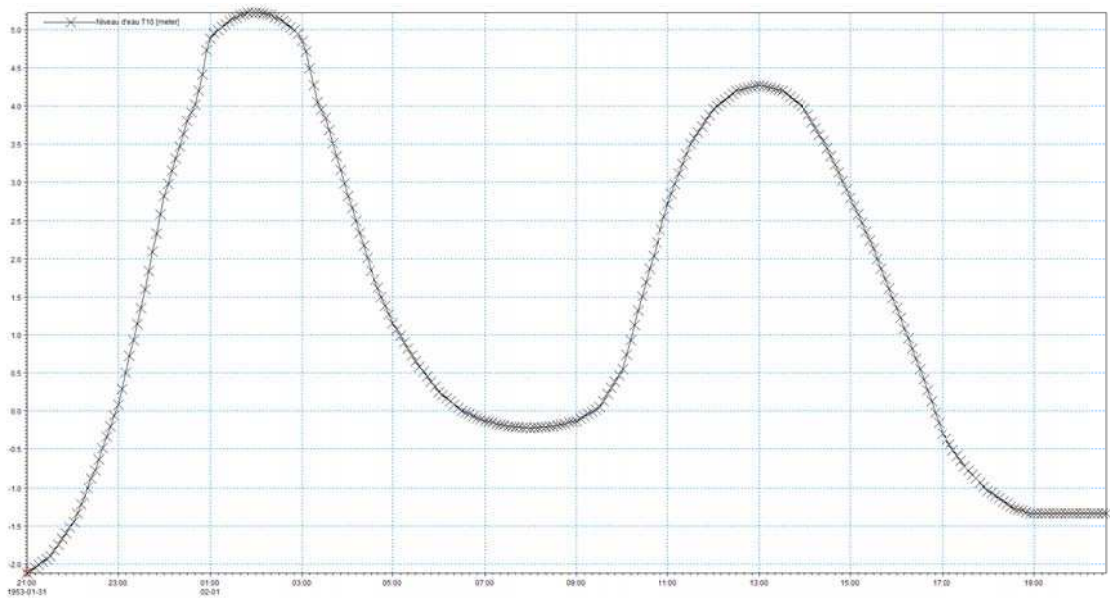


Figure 8-163 : Marégramme utilisé pour T10 sur la partie Dune

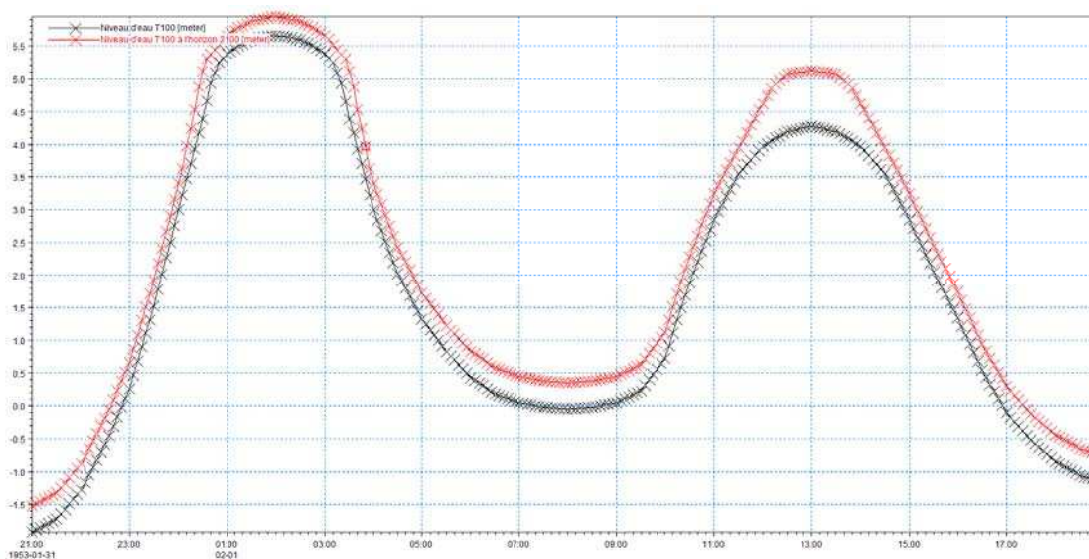


Figure 8-164 : Marégrammes utilisés pour T100 et T100 à l'horizon 2100 sur la partie Digue

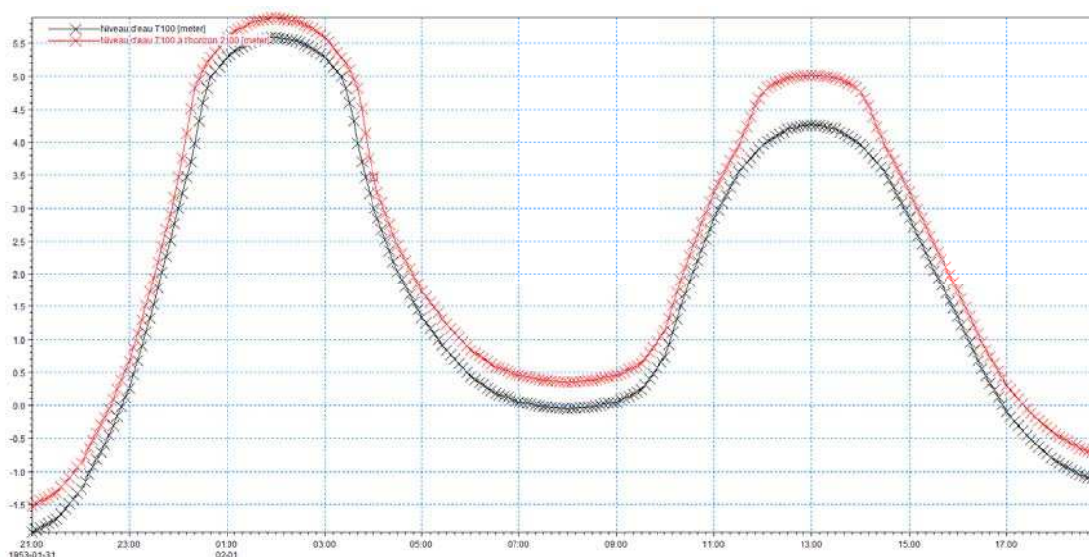


Figure 8-165 : Marégrammes utilisés pour T100 et T100 à l'horizon 2100 sur la partie Dune

Les caractéristiques de la brèche

Les différentes brèches simulées dans la digue de Sangatte ainsi que dans le cordon dunaire sont toutes d'une longueur de 100m.

La cote de la crête de la digue étant constante, pour chaque brèche la cote de la crête passe de 6,11m à 3,5m IGN 69 en 15 minutes à partir d'1h avant la pleine-mer (cf. Paragraphe 6.2.2).



Figure 8-166 : Position des trois brèches simulées sur la partie Digue de Sangatte



Figure 8-167 : Position de la brèche simulée sur la partie Dune de Sangatte

L'inondation se propageant jusqu'au canal des Pierrettes (à l'Ouest de Calais), le modèle a été réalisé sur la base d'un couplage 1D/2D latéral au niveau de ce canal. Ainsi en cas de débordement dans le canal des Pierrettes, la dynamique d'inondation dans le canal sera modélisée plus finement, et les échanges seront pris en compte avec une meilleure précision qu'avec un modèle 2D seul. En effet, les côtes de débordement dans le canal sont renseignées dans les profils en travers levés tous les 100 m à partir des données LIDAR (cf. modèle de Calais, paragraphe 8.7.1). Le modèle 1D du canal

prendrait donc en charge la propagation de l'inondation dans le canal et éventuellement les restitutions vers les terrains modélisés en 2D aux points bas. Le niveau initial du canal des Pierrettes est fixé à -0,755 m IGN69, (communication orale de l'Institution Interdépartementale des Wateringues).

8.9.2 Dynamique de submersion

Rupture du Cordon dunaire

La propagation de l'inondation pour l'événement centennal est limitée par la présence de la digue Royale au Sud. L'eau s'écoule alors en partie en direction de l'étang situé à l'Est de la brèche. Suite à l'ouverture de la brèche (et principalement son extrémité Ouest), une partie des écoulements se fait à l'Ouest de la digue de Camin, et se propage sur les terrains au Nord de la partie Est de la rue Rolls avec une hauteur très faible (centimétrique). L'aléa est faible à moyen, hormis aux abords de la brèche du fait des fortes vitesses d'écoulement.

Pour l'événement T100 à l'horizon 2100, l'inondation provoquée par la brèche du côté Ouest de la digue de Camin se propage davantage vers le Sud que pour l'événement T100. Elle longe la digue de Camin vers le Sud et se propage vers l'Ouest par le biais du Watergang de Sangatte. Du côté Est de la digue de Camin, l'emprise de l'inondation est toujours contrôlée par la digue Royale au Sud, mais se propage davantage vers l'Est jusqu'à la rive gauche du canal des Pierrettes via le petit canal au Sud de la digue Mouron. L'aléa est faible à moyen sur l'ensemble de l'emprise de l'inondation hormis près de la brèche et aux abords de la digue de Camin où les hauteurs d'eau stockées sont importantes.

Rupture de digue

Pour rappel, trois positions de brèches distinctes ont été étudiées pour la digue de Sangatte. Ces diverses positions permettent de tenir compte de la variabilité des inondations en fonction de l'emplacement des brèches, dans la mesure où les brèches peuvent apparaître en des points quelconques de la digue. Les résultats sont alors obtenus séparément pour les trois positions de brèches. Les cartographies présentées par la suite sont les hauteurs, vitesses et aléa maximum obtenus quelle que soit la position de la brèche considérée.

Les deux figures ci-dessous présentent à titre d'exemple la dynamique de submersion observées pour la rupture de brèche sur la partie Est de la digue pour l'aléa T100.

Dans un premier temps l'inondation se propage librement en suivant la topographie du site, sans rencontrer d'obstacle majeur. 45 minutes après l'apparition de la brèche, l'extension de l'inondation est contrainte par la digue Camin, et est déjà proche de l'extension maximale sur le secteur compris entre la mer et la digue.

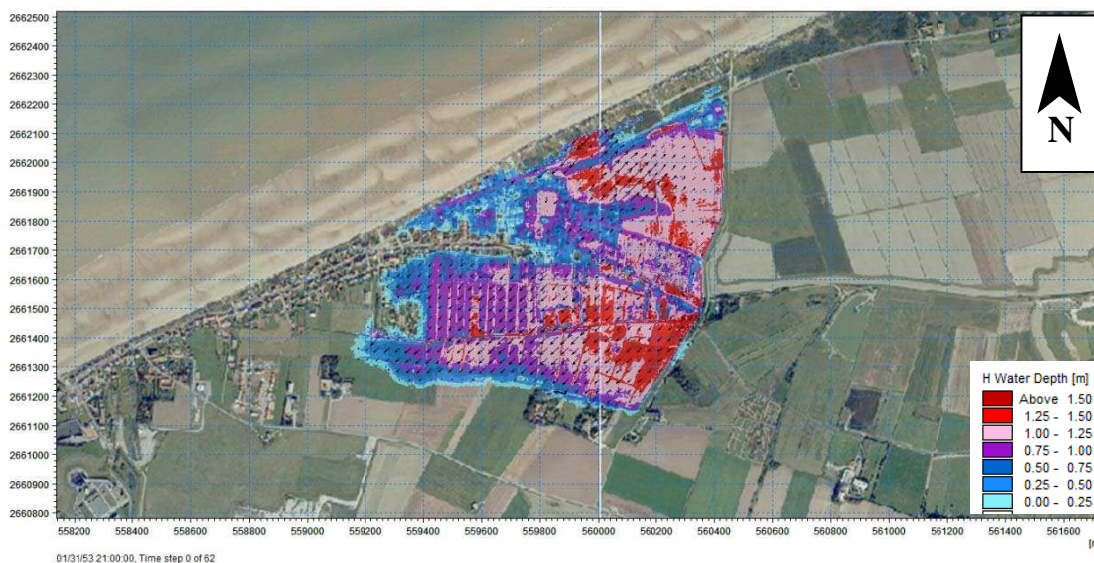


Figure 8-168: Etat des inondations 45min après l'apparition de la brèche côté Est, aléa T100

Les vitesses d'écoulement près de la digue deviennent temporairement faibles du fait de la présence de la digue, et le niveau d'eau monte de manière continue durant 30 minutes. 1h15 après l'apparition de la brèche, l'eau commence alors à s'écouler par-dessus la digue, comme présenté sur la figure suivante pour l'évènement centennal.

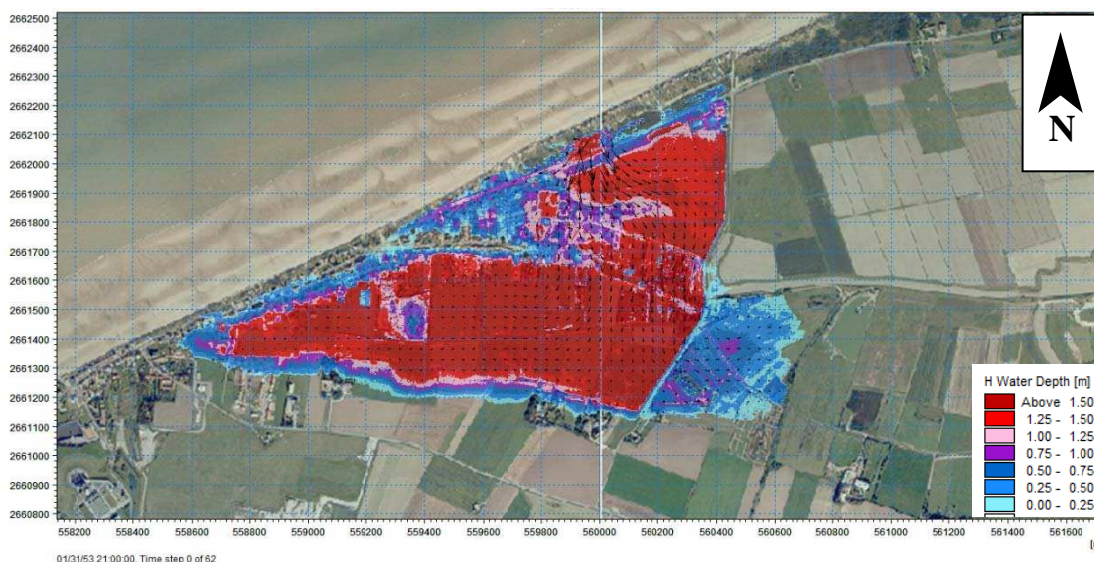


Figure 8-169: Etat des inondations 1h15min après l'apparition de la brèche côté Est, aléa T100

Dès lors, le niveau d'eau entre la digue et la mer évolue peu, mais l'inondation s'étend désormais progressivement en direction de Coquelles. Sa propagation est néanmoins légèrement ralentie par la présence d'une seconde digue au-delà de la digue Camin. L'inondation se propage alors en suivant les points bas topographiques, et s'étend jusqu'à Coquelles où elle est stoppée par la digue artificielle formée par l'avenue Charles De Gaulle. Néanmoins il apparaît une surverse au-dessus de cette avenue plus au Nord, au niveau de la zone commerciale, inondant le secteur proche de l'autoroute et

les premiers quartiers Nord-Est de Coquelles. L'inondation se propage également au Sud-Est de la citadelle, avec de faibles hauteurs d'eau, et n'atteint pas la rue de Verdun. Les inondations au Nord continuent à se propager vers l'Est via les points bas au Sud de la digue Mouron jusqu'à atteindre les abords du canal des Pierrettes.

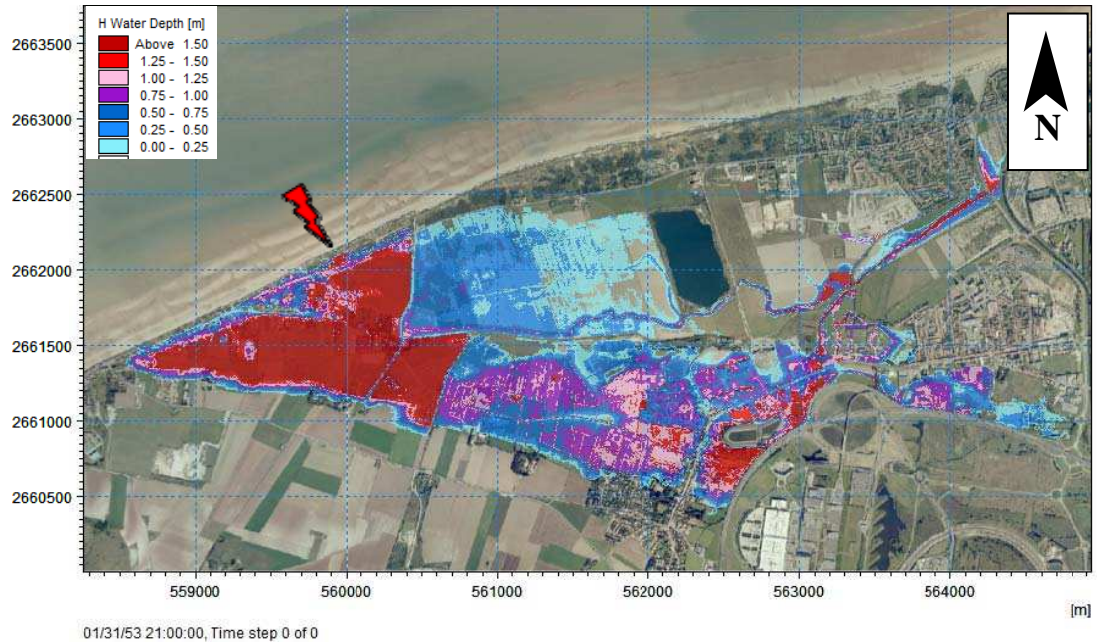


Figure 8-170: Hauteurs maximales de submersion issues d'une brèche située dans la partie Est de la digue, aléa T100

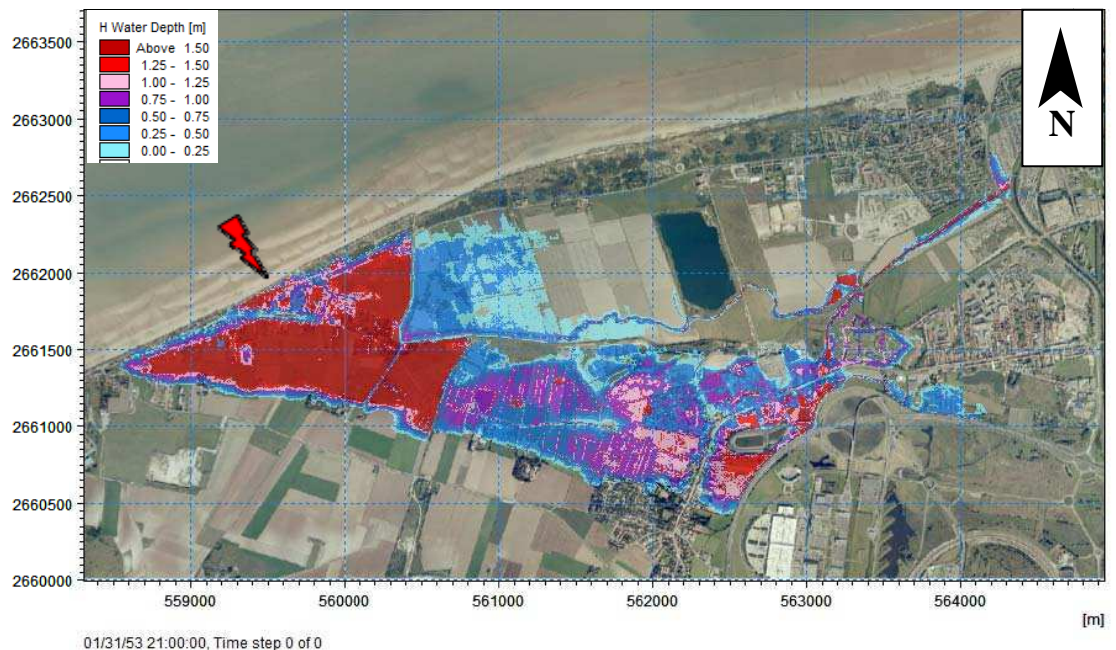


Figure 8-171: Hauteurs maximales de submersion issues d'une brèche située dans la partie centrale de la digue, aléa T100

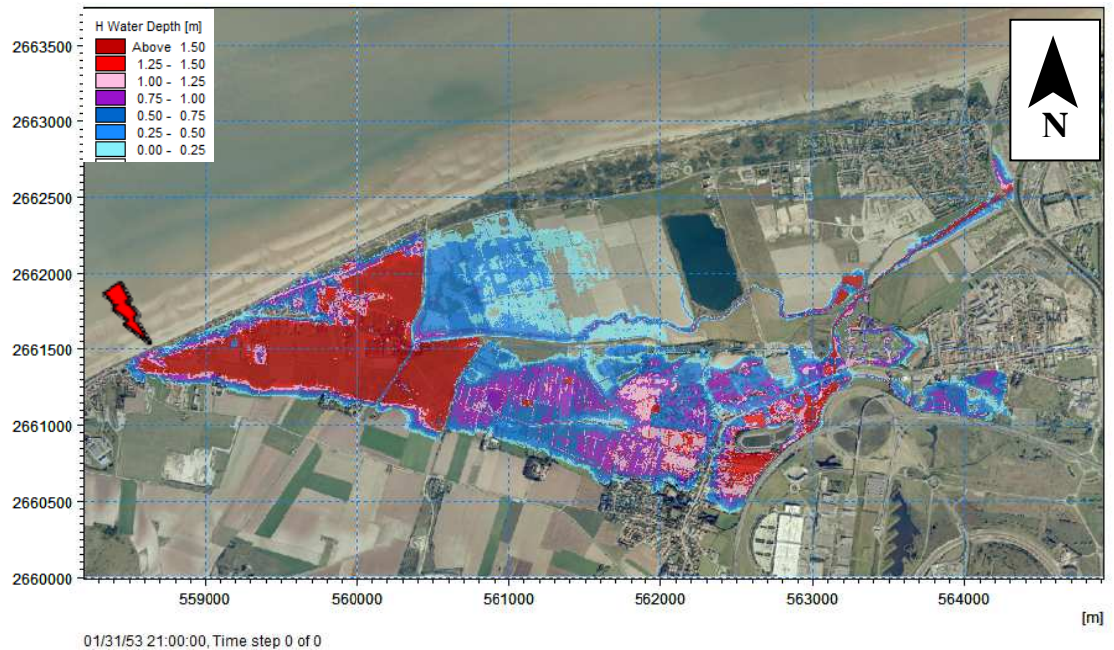


Figure 8-172 : Hauteurs maximales de submersion issues d'une brèche située dans la partie Ouest de la digue, aléa T100

Pour l'aléa T100 à l'horizon 2100, l'inondation à l'Est de la digue Camin recouvre les terres à l'Ouest du bassin. Elle se propage au Sud-Est de la citadelle jusqu'à atteindre le rond-point sous l'A16, qui permet alors les écoulements sur les terrains au Sud de cette route. La propagation vers l'Est des écoulements près du rond-point provoque une entrée d'eau dans le canal des Pierrettes, en volumes faibles devant la capacité de stockage du canal avant débordement comme en attestent les deux figures ci-dessous, issues du résultat du modèle 1D de la simulation avec brèche à l'Est de la digue.

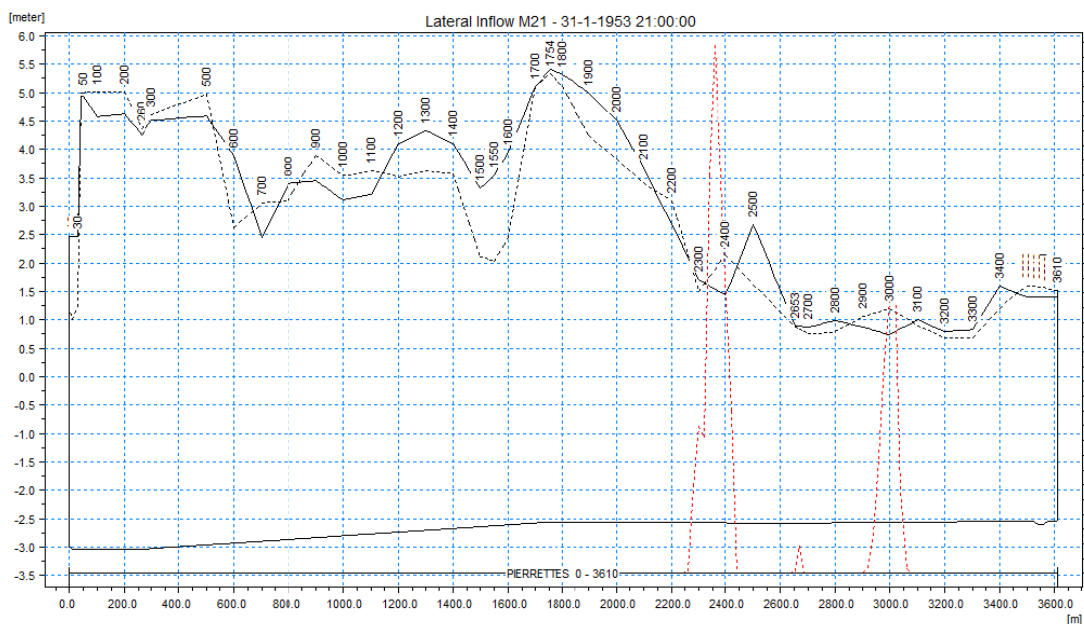


Figure 8-173 : Profil en long du canal des Pierrettes, du bassin des Chasses au passage sous la voie ferrée, brèche à l'Est de la digue, aléa T100 à l'horizon 2100. RG en trait plein, RD en pointillés, en rouge débits introduits dans le canal via les terrains 2D en RG

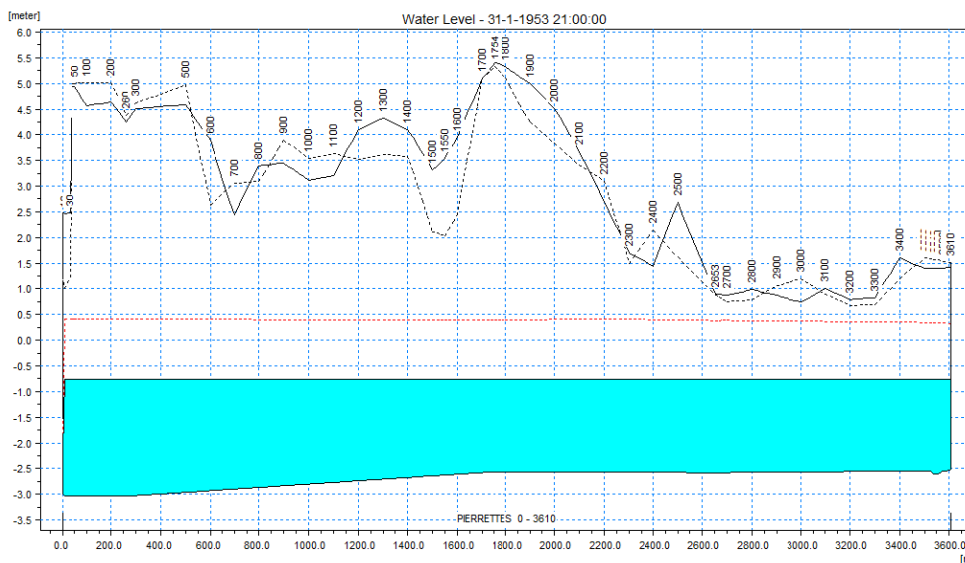


Figure 8-174 : Profil en long du canal des Pierrettes, du bassin des Chasses au passage sous la voie ferrée, brèche à l'Est de la digue, aléa T100 à l'horizon 2100. RG en trait plein, RD en pointillés, en bleu niveau d'eau initial et en rouge niveau d'eau maximal

8.9.3 Cartographie

La bande de 100 m à Sangatte couvre l'ensemble du linéaire de la digue. Elle couvre également une partie de la dune, sur le linéaire où celle-ci est relativement étroite. Ce secteur longeant la dune est délimité à l'Ouest par la digue Camin, et se prolonge à l'Est de 100 m à partir du point où la dune s'élargit.

Cartographie des aléas 10 ans pour une rupture du cordon dunaire



Figure 8-175 : Sangatte - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal

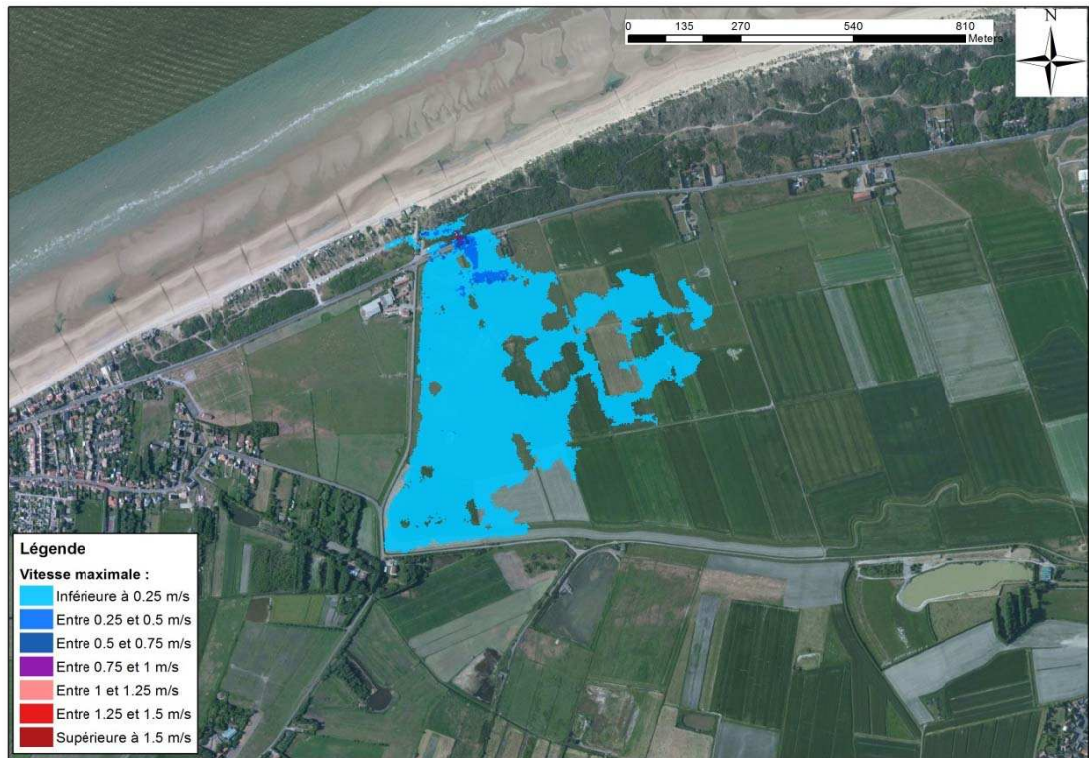


Figure 8-176 : Sangatte - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement décennal

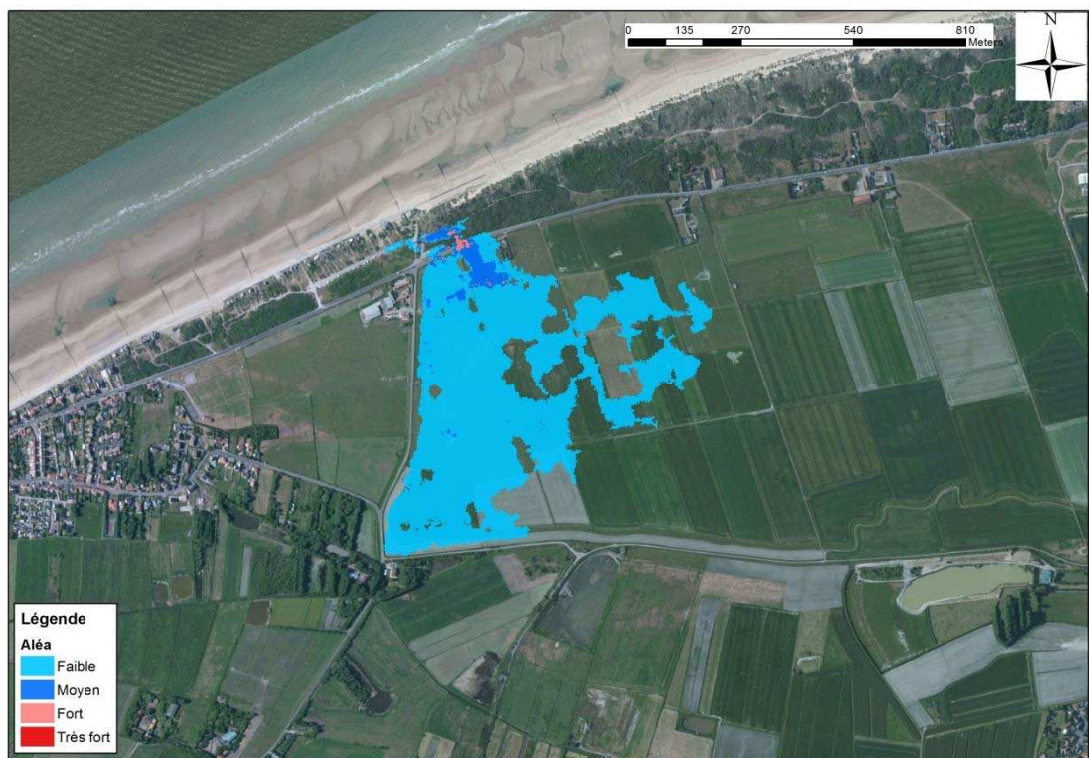


Figure 8-177 : Sangatte - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal

Cartographie des aléas 10 ans pour une rupture de la digue

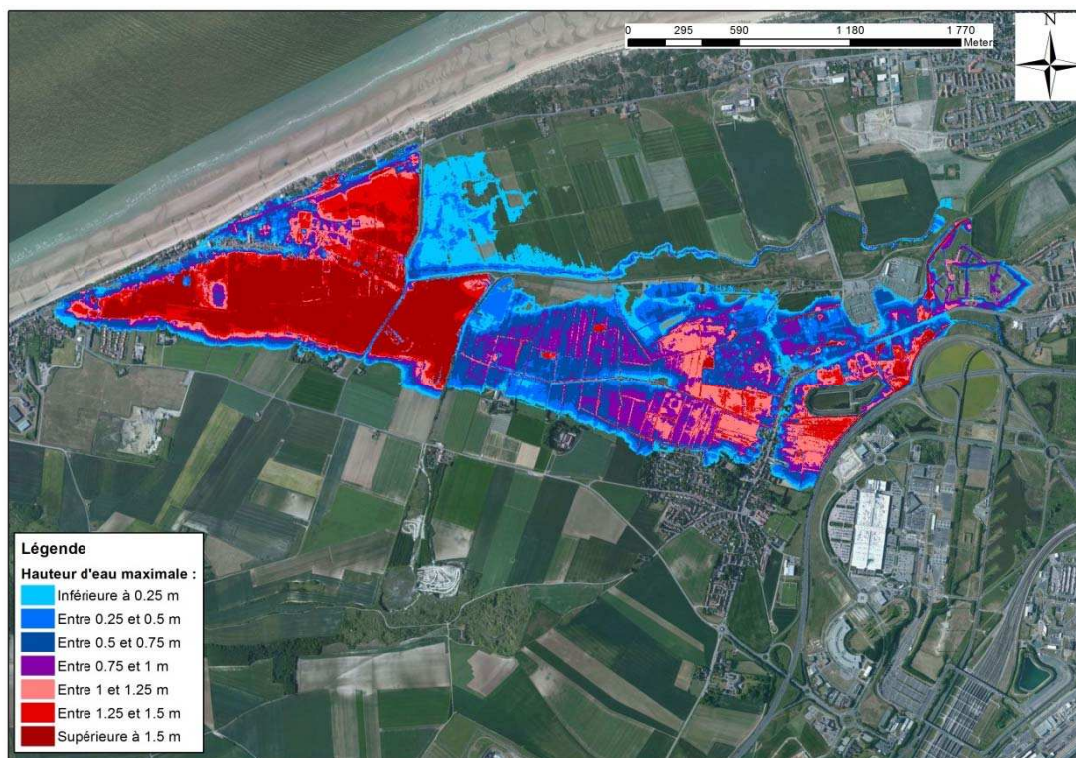


Figure 8-178 : Sangatte - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal

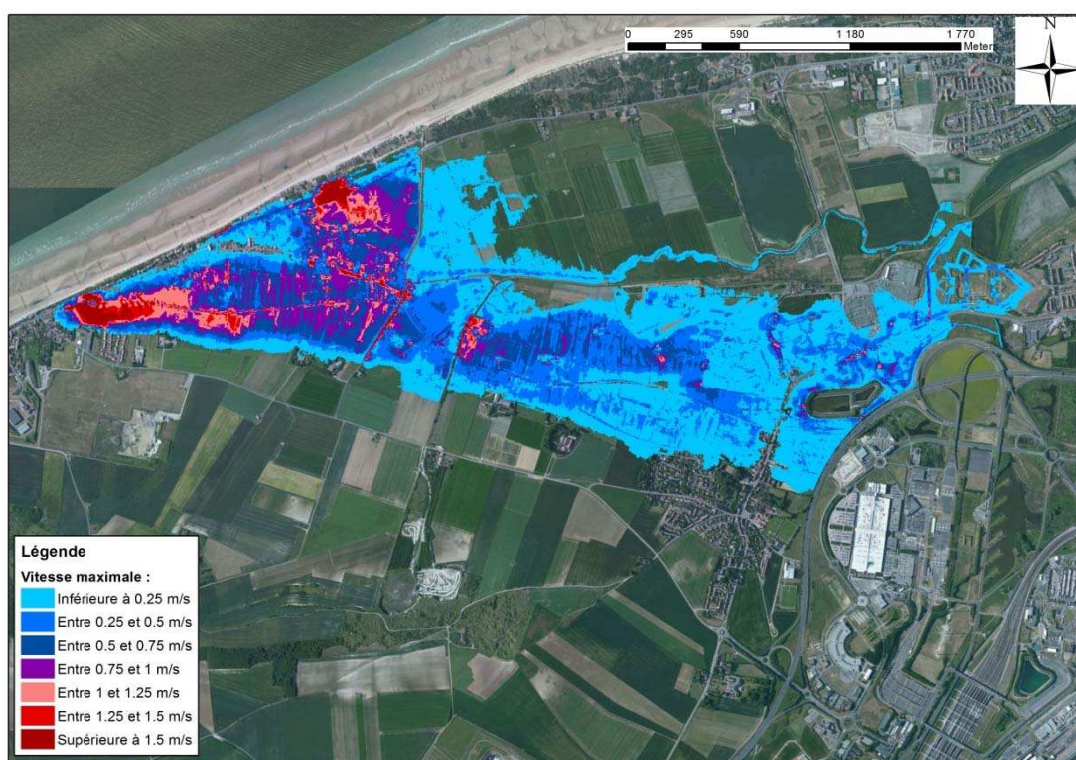


Figure 8-179 : Sangatte - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement décennal

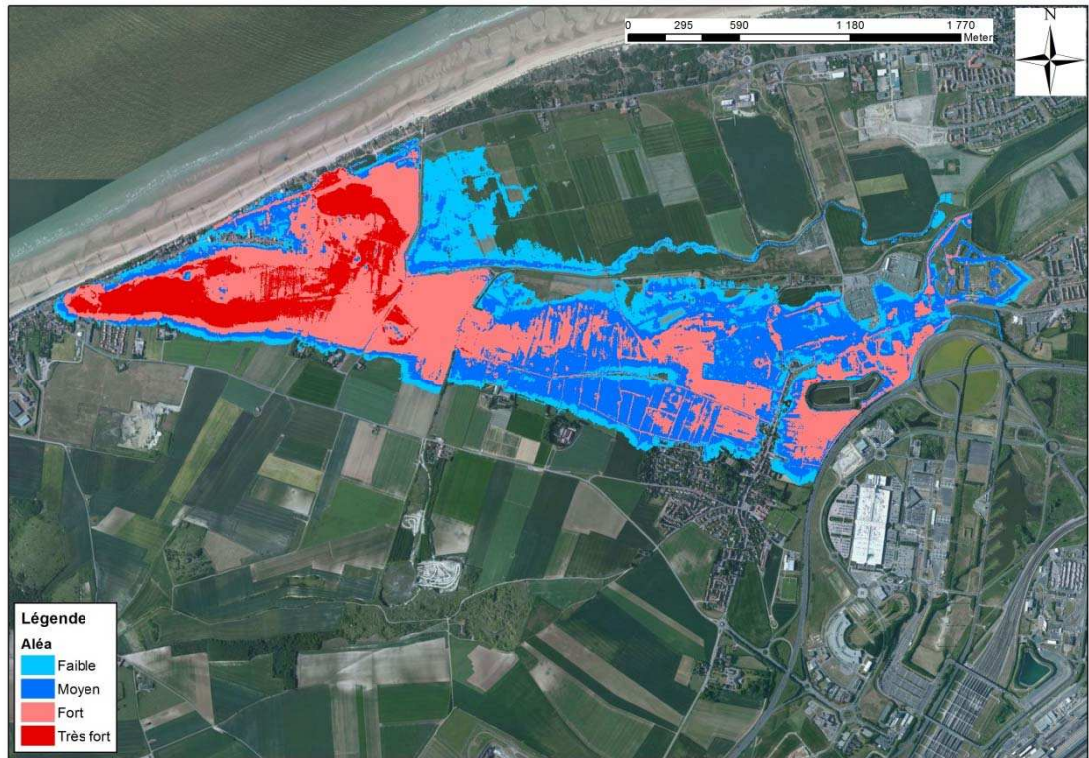


Figure 8-180 : Sangatte - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal

Cartographie des aléas 100 ans pour une rupture du cordon dunaire

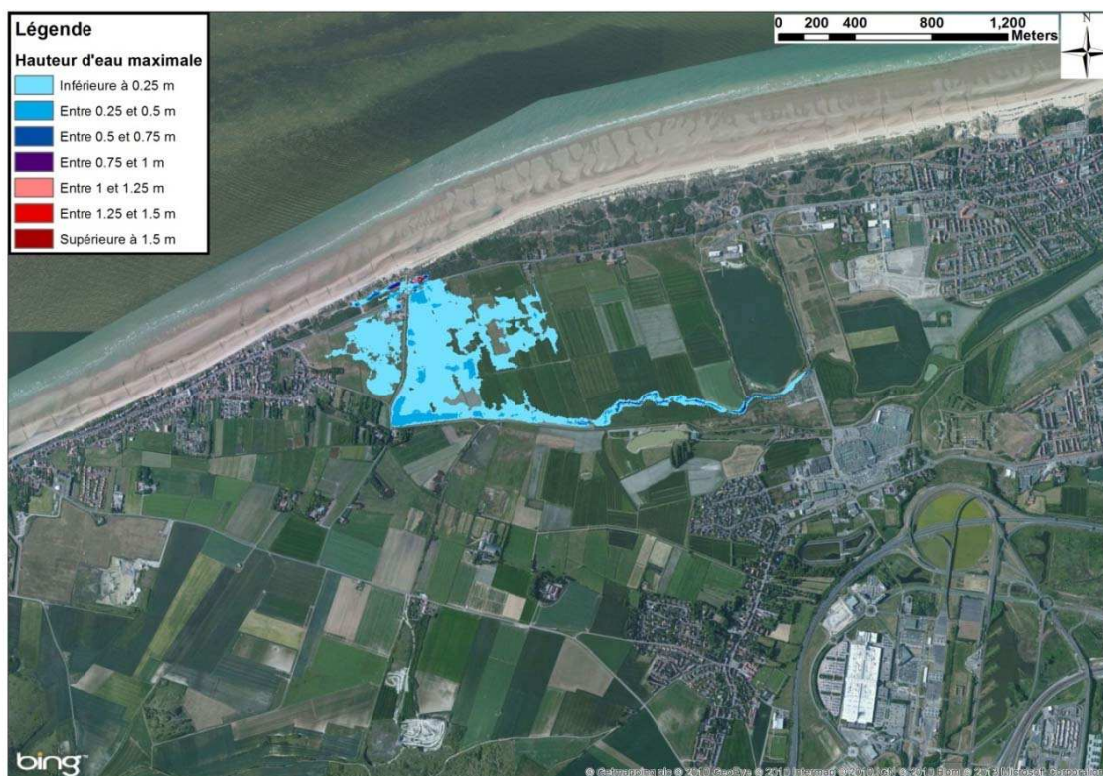


Figure 8-181 : Sangatte - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal

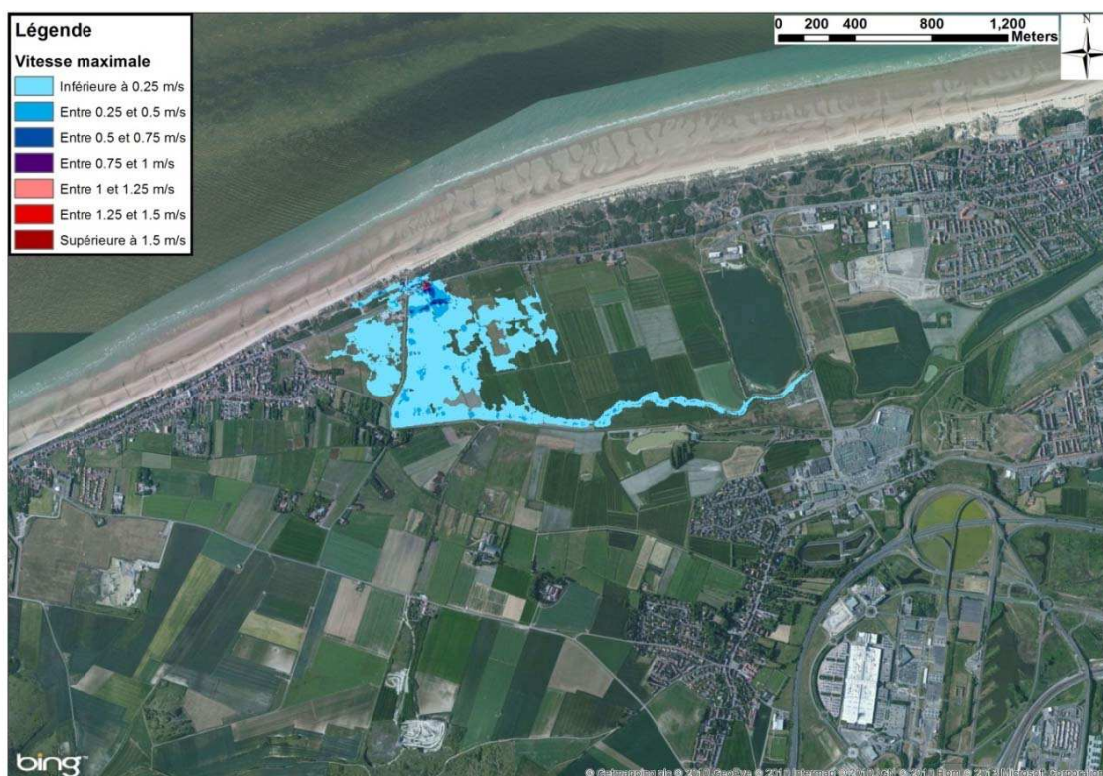


Figure 8-182 : Sangatte - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal

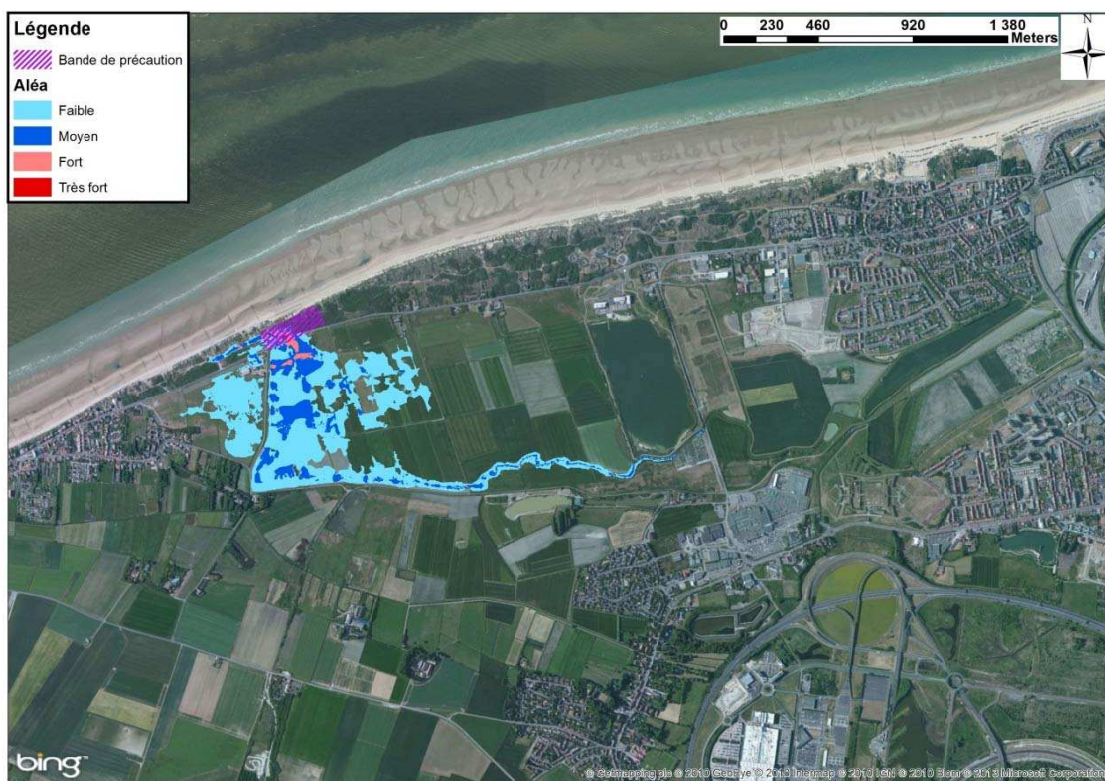


Figure 8-183 : Sangatte - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal

Cartographie des aléas 100 ans pour une rupture de la digue

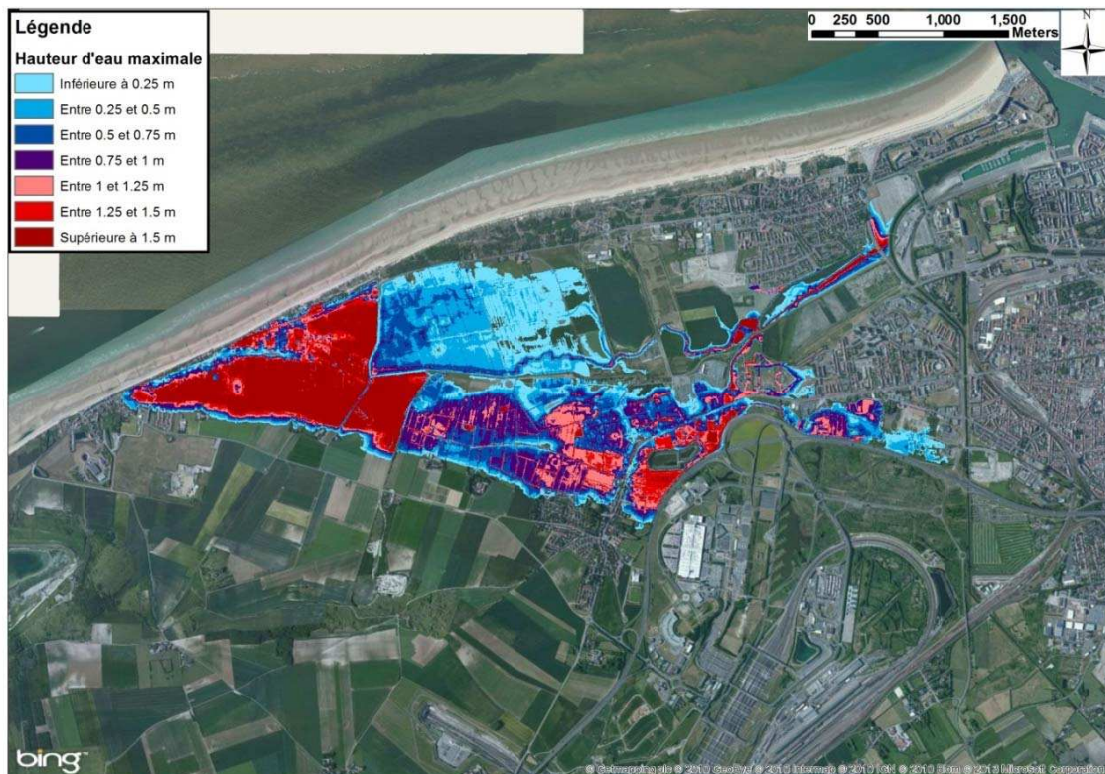


Figure 8-184 : Sangatte - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal

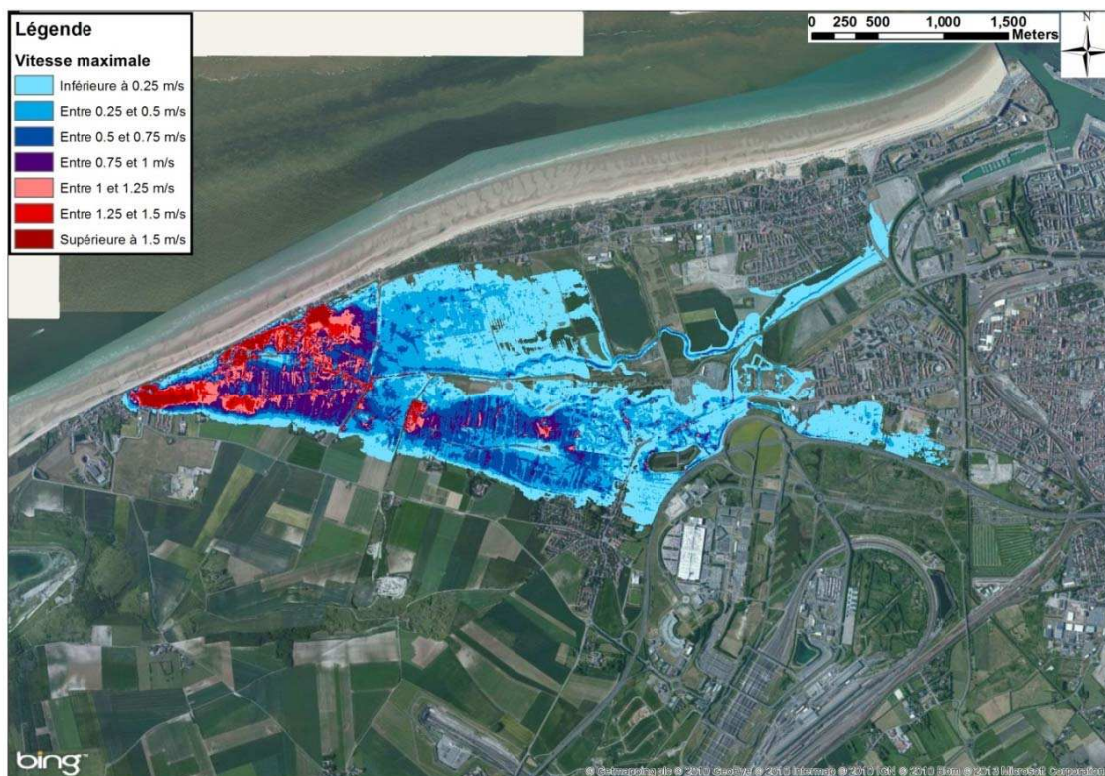


Figure 8-185 : Sangatte - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennial

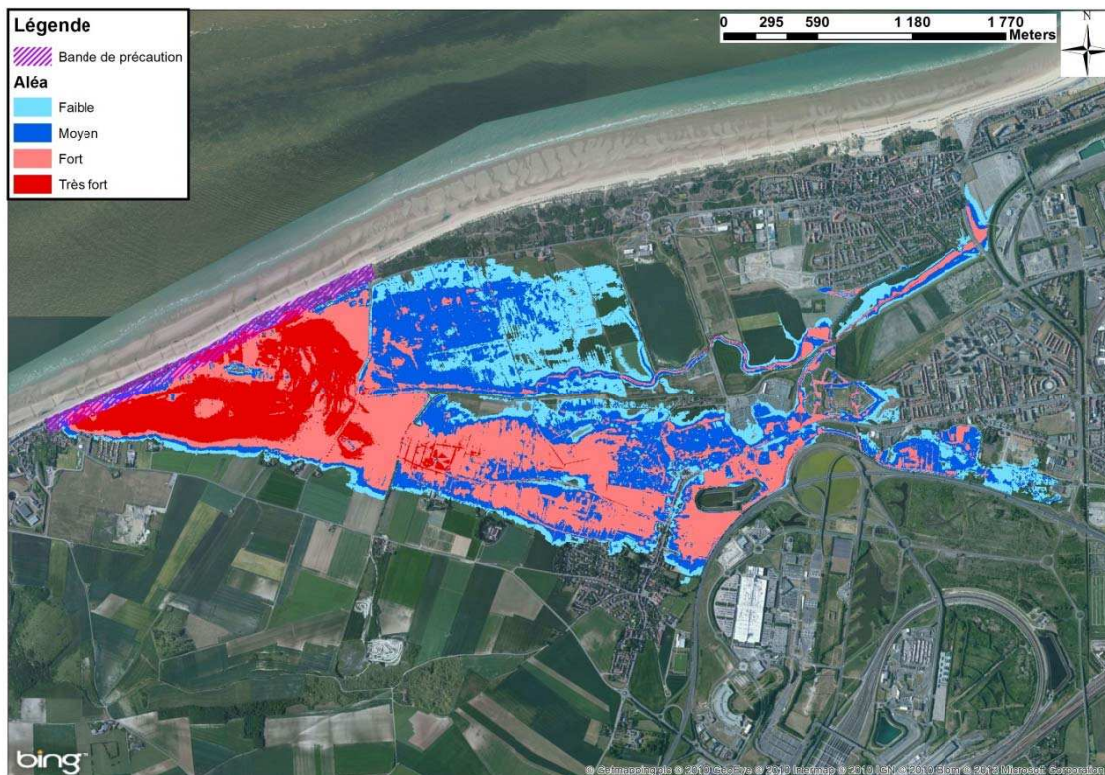


Figure 8-186 : Sangatte - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennial

Cartographie des aléas 100 ans à l'échéance 2100 pour une rupture du cordon du-naire

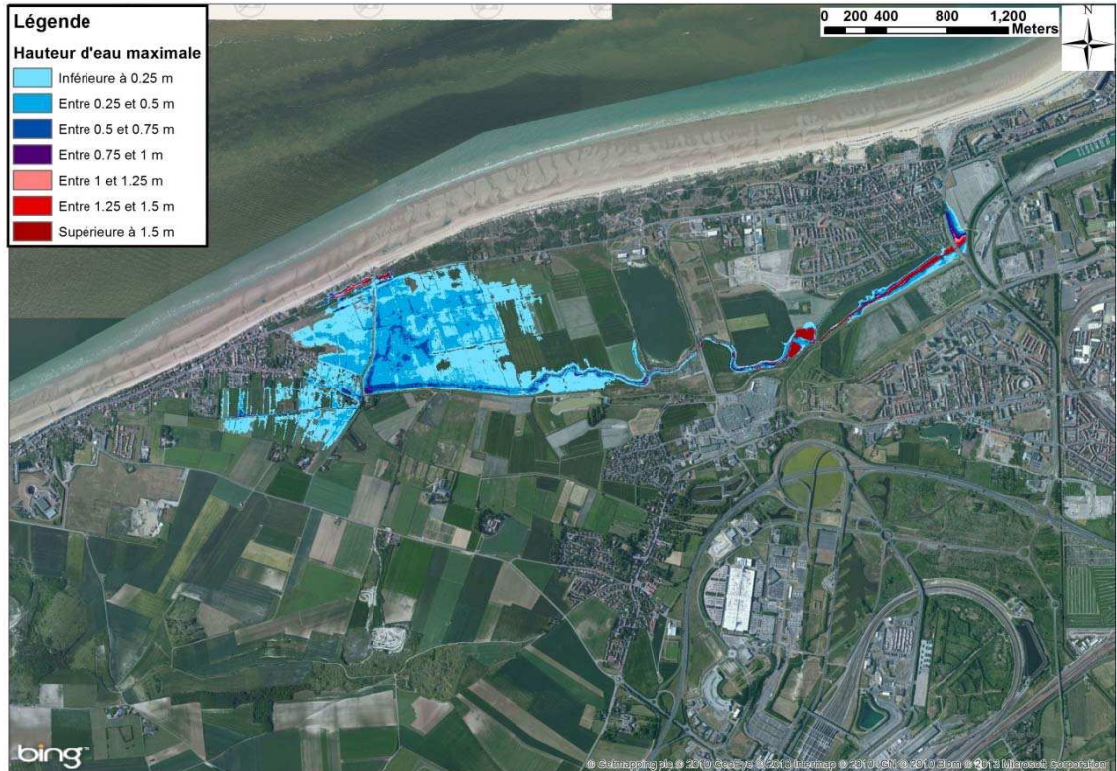


Figure 8-187 : Sangatte - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

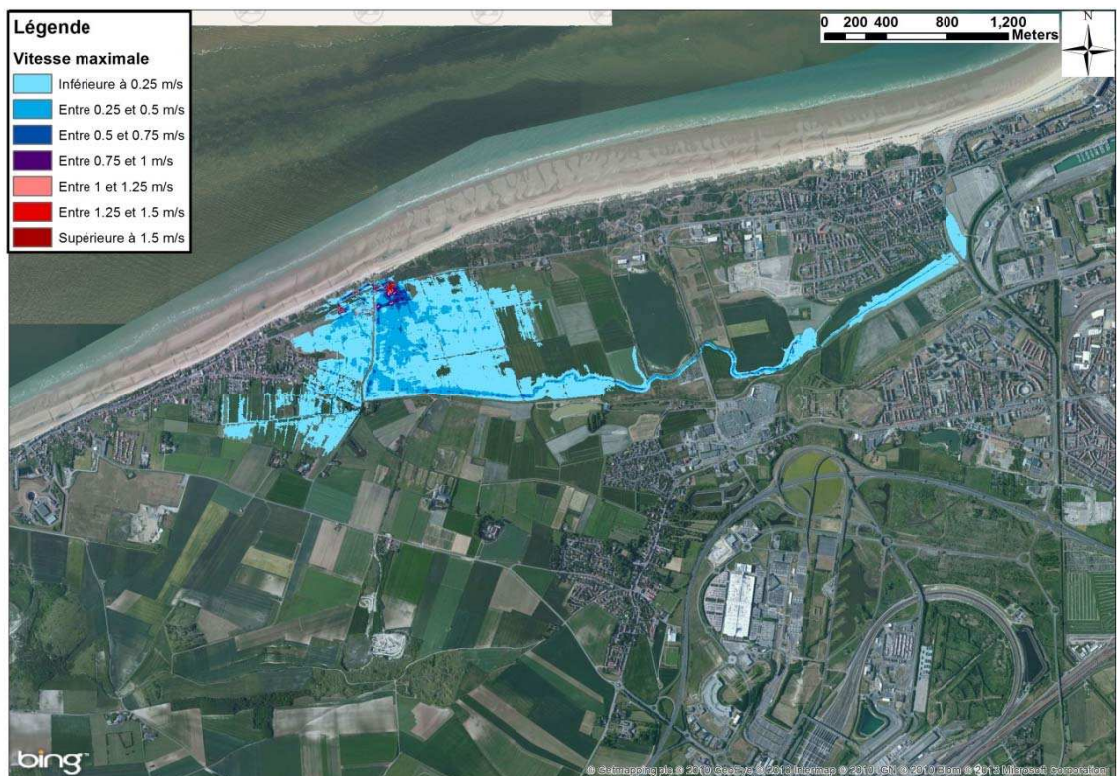


Figure 8-188 : Sangatte - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

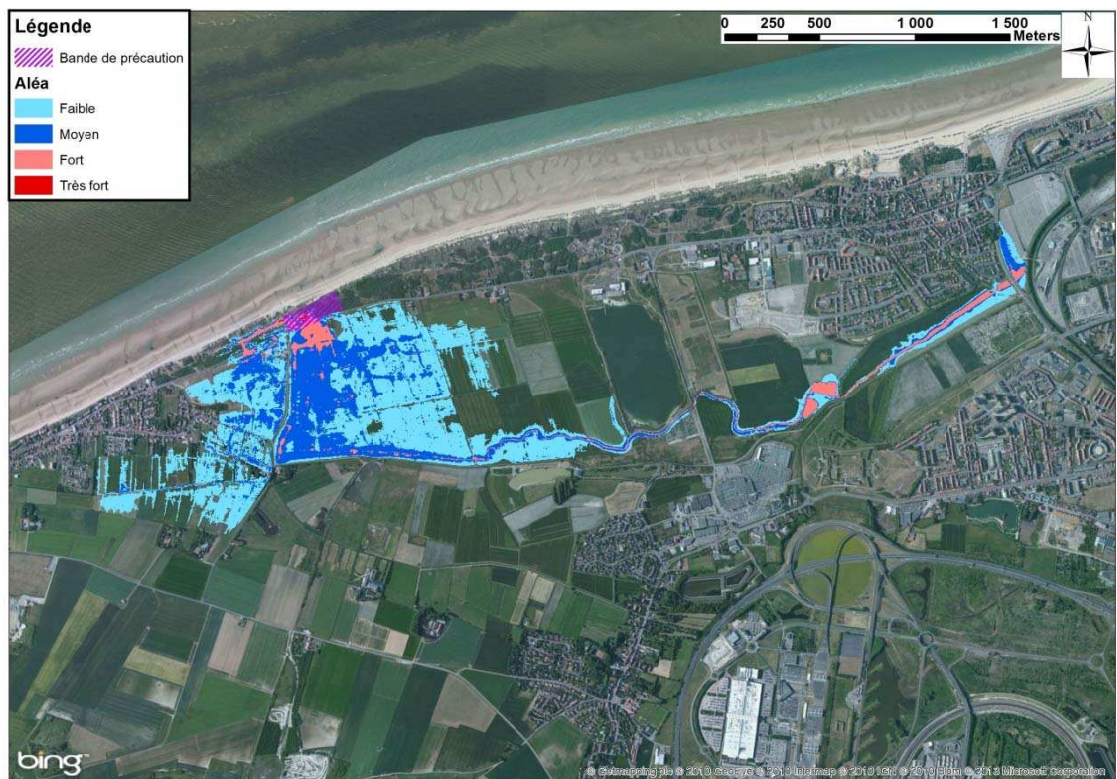


Figure 8-189 : Sangatte - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100

Cartographie des aléas 100 ans à l'échéance 2100 pour une rupture de la digue

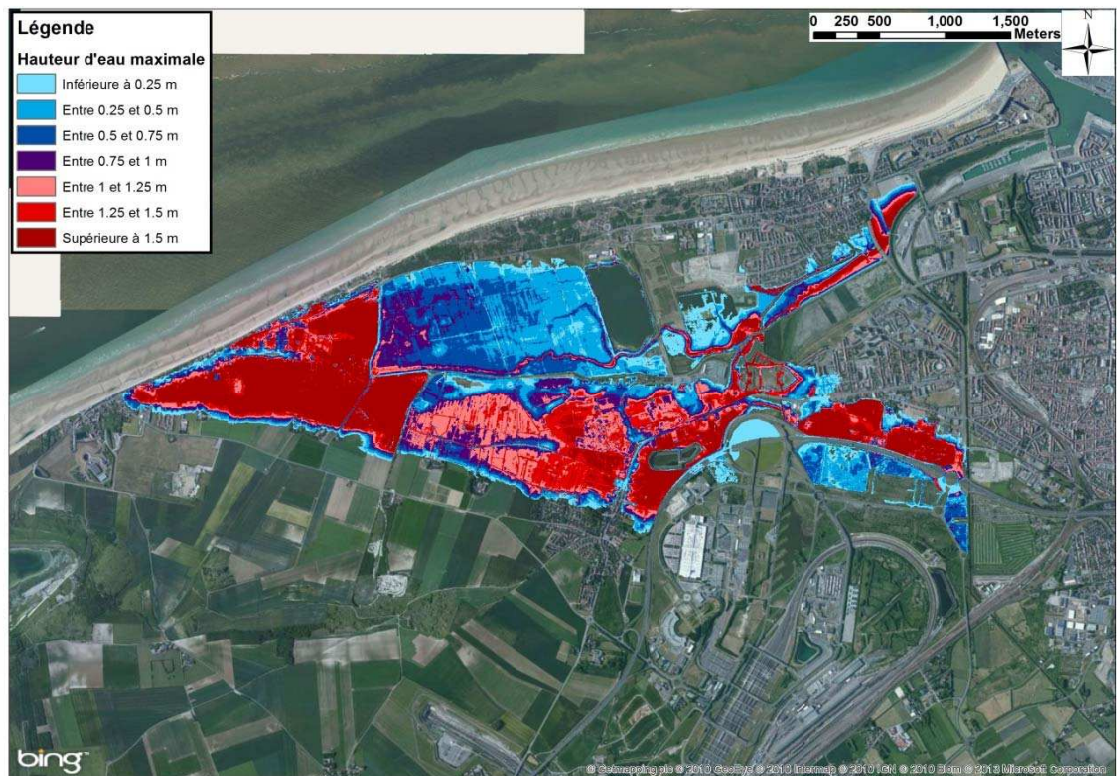


Figure 8-190 : Sangatte - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

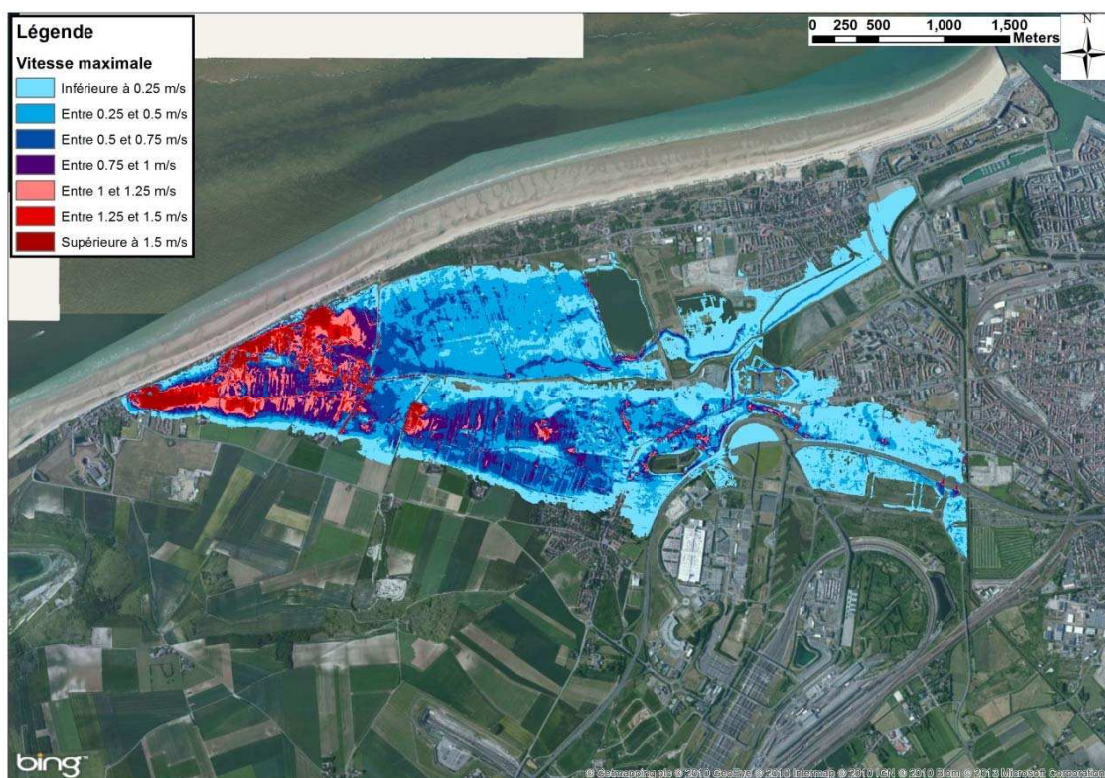


Figure 8-191 : Sangatte - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

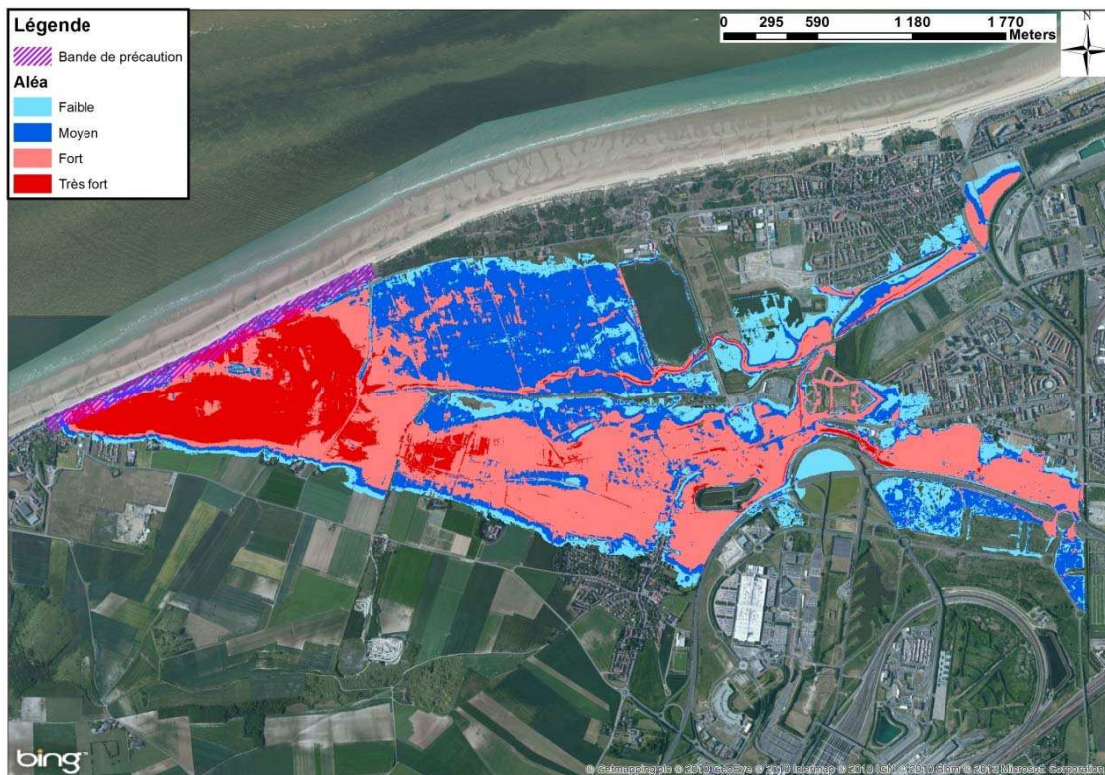


Figure 8-192 : Sangatte - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100

8.10 Wissant - franchissement de perré

8.10.1 Hypothèses

Caractéristiques de l'ouvrage et des profils

Le perré se divise en plusieurs parties. 40% du linéaire présente un perré entièrement en béton lisse, alors que 60% présente un revêtement fait d'enrochements. Cette différence influe les débits franchissant. Il a donc été décidé de calculer les débits franchissant sur deux profils transversaux de la plage, afin de tenir compte des variations de rugosité de l'ouvrage. Néanmoins le profil de plage utilisé reste le même pour les deux parties, seuls la cote du perré et les débits franchissant seront différents.

Les différents paramètres du profil utilisé sont précisés dans les figures suivantes.



Figure 8-193 : Position du profil retenu à Wissant



Figure 8-194 : Profil utilisé pour calculer le franchissement d'eau à Wissant

Tableau 8-40 : Paramètres du profil utilisé à Wissant

	Partie béton	Partie enrochements
Direction des houles (°N)	317	317
Cote du perré (m IGN 69)	6,5	8
Cote du pied d'ouvrage (m IGN 69)	1,75	1,75
Pente du perré (h / l)	1 / 1,5	1 / 1,5
Linéaire (m)	200	300

Conditions en mer et conditions au pied de l'ouvrage

Les niveaux marins extrêmes au large de Wissant ont été extraits des cartes du SHOM 2008 et 2012 pour les périodes de retour décennale et centennale (cf. paragraphe 4.3.1).

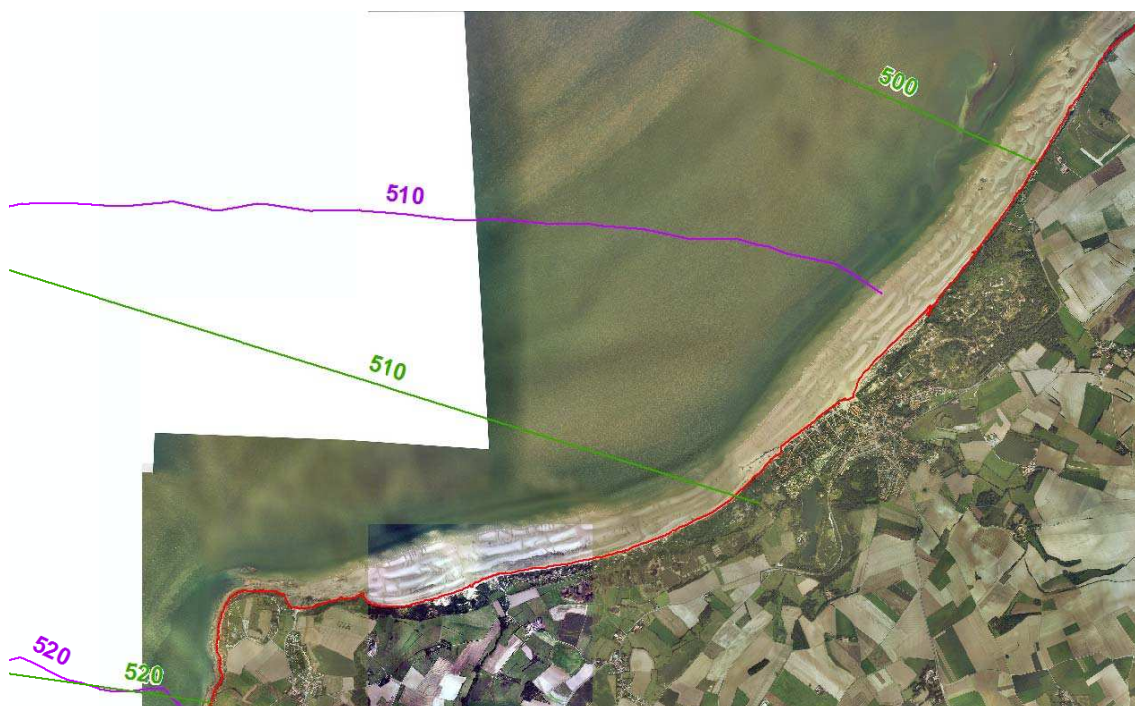


Figure 8-195 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement décennal est celui du SHOM 2012, plus pénalisant.



Figure 8-196 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement centennal est celui du SHOM 2012, plus pénalisant.

Tableau 8-41 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Wissant

	Niveau extrême de pleine-mer
T10	5,20
T100	5,40

Les niveaux marins totaux retenus

Une élévation du niveau marin lié au réchauffement climatique pris en compte en 2013 de 0,20m a été ajoutée au niveau de pleine-mer centennal. Pour la modélisation de l'évènement centennal incluant le changement climatique à l'horizon 2100, une surcote supplémentaire de 0,40 m a été ajoutée afin d'obtenir une élévation moyenne de 0,60 m conforme au scénario pessimiste établi par l'ONERC.

La propagation des conditions de mer au large au pied de l'ouvrage de Wissant a été effectuée en 1D le long des deux profils précédemment décrits grâce au logiciel LITPACK (cf. paragraphe 4.6).

L'incertitude sur les hypothèses de calcul de la surcote de déferlement est de plus intégrée aux niveaux marins finaux (cf. paragraphe 4.3.3).

Tableau 8-42 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement – profil 1

		Surcote de déferlement	Incetitude sur le calcul du set up
Niveau marin décennal	Hypothèses originales	0	0,03
	Hypothèses combinées	0,03	
Niveau marin centennal 2013	Hypothèses originales	0,09	0,06
	Hypothèses combinées	0,15	
Niveau marin centennal 2100	Hypothèses originales	0,06	0,06
	Hypothèses combinées	0,12	

Les niveaux marins totaux s'établissent ainsi :

Tableau 8-43 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) à Wissant

T10	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total au pied de l'ouvrage
Profil 1	5,20	-	0,00	0,03	5,23

T100	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total au pied de l'ouvrage
Profil 1	5,40	0,20	0,09	0,06	5,75

T100 à l'horizon 2100	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total au pied de l'ouvrage
Profil 1	5,40	0,60	0,06	0,06	6,12

Tableau 8-44 : Houles (en m) à Wissant

	Hauteur significative de la houle au large (m)	Période de la houle (s)	Hauteur significative de la houle au pied de l'ouvrage (m)
T10	2,15	8,28	2,54
T100	4,3	9	3,26
T100 à l'horizon 2100	4,3	9	3,51

Les signaux de marée utilisés comme conditions aux limites du modèle au large ont été modifiés pour atteindre les niveaux extrêmes de pleine-mer calculés, comme présenté figure suivante.

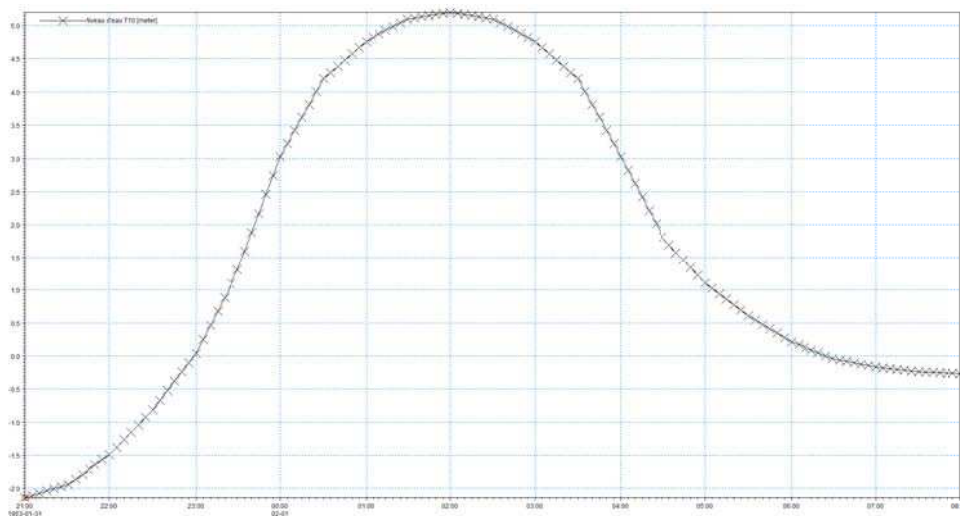


Figure 8-197 : Marégramme utilisé au large pour T10

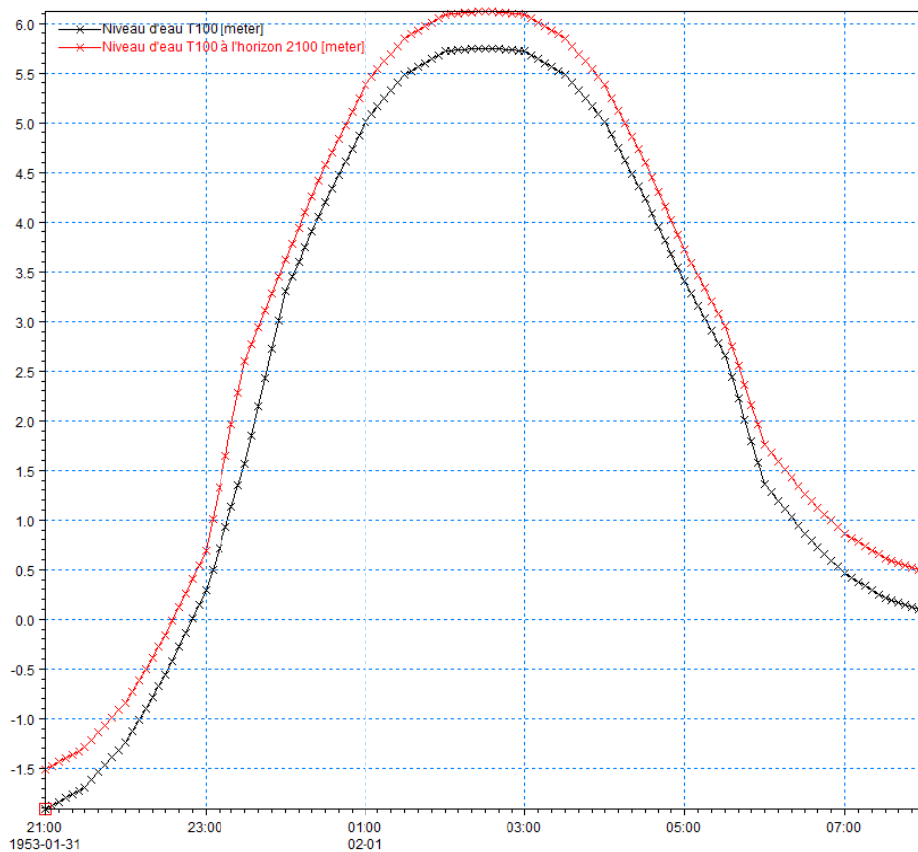


Figure 8-198 : Marégrammes utilisés au large pour T100 et T100 à l'horizon 2100

Seul un cycle de marée a été simulé puisque la seconde pleine-mer, plus basse, n'apporte aucun risque de franchissement.

Les débits injectés dans le modèle hydrodynamique terrestre

L'estimation des débits de franchissement a été effectuée à l'aide de la formule empirique proposée dans le « Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures - Assessment Manual ».

Tableau 8-45 : Calculs des débits linéiques injectés dans le modèle

		Partie béton	Partie enrochements
10 ans	Revanche au niveau de pleine-mer (m)	1,27	2,77
	Débit linéique maximal (l/s/m)	2207	776
100 ans	Revanche au niveau de pleine-mer (m)	0,75	2,25
	Débit linéique maximal (l/s/m)	4280	1932
100 ans à l'horizon 2100	Revanche au niveau de pleine-mer (m)	0,38	1,88
	Débit linéique maximal (l/s/m)	5350	2573

Un seul hydrogramme a été créé pour les deux différents revêtements. Ce débit total est égal à la somme du débit calculé sur 60% du linéaire du perré présentant des enrochements et du débit calculé sur 40% du linéaire présentant un revêtement en béton lisse.

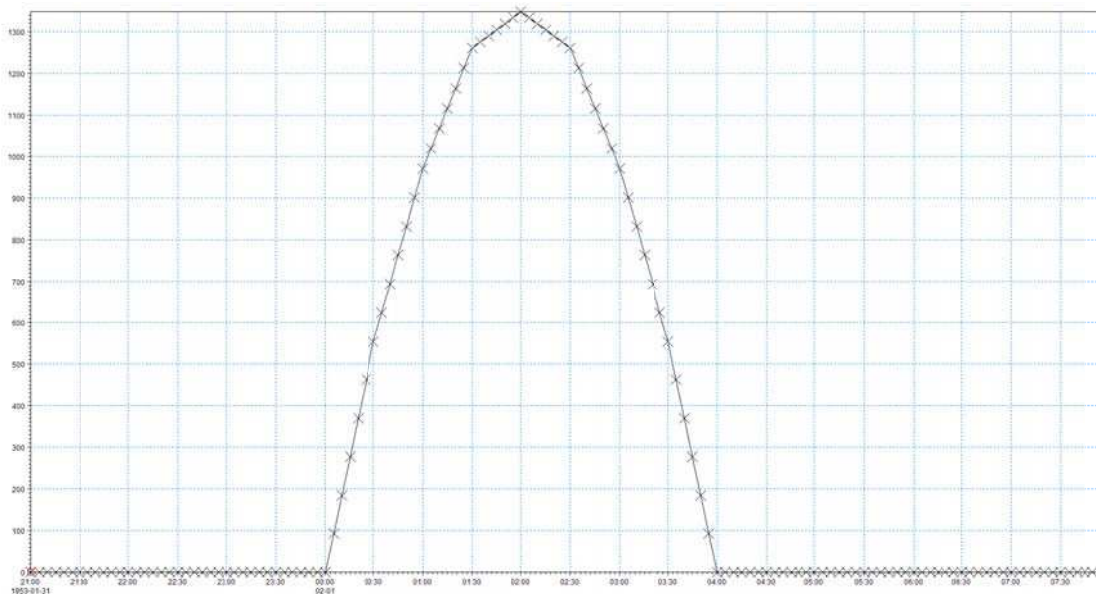


Figure 8-199 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))

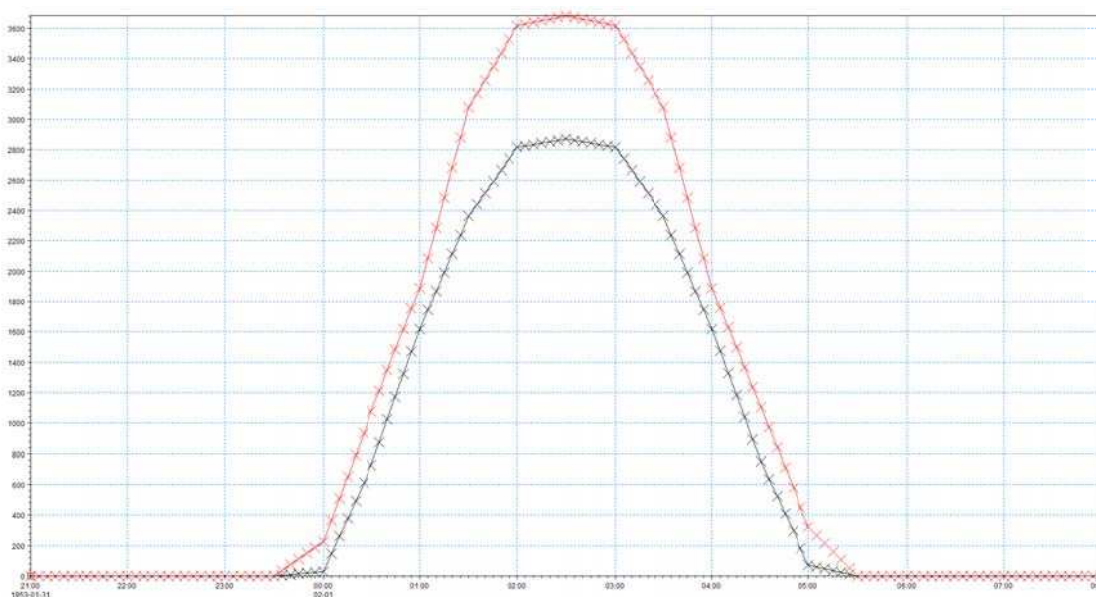


Figure 8-200 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))

8.10.2 Dynamique de submersion

La partie en béton lisse du perré de Wissant est relativement basse en comparaison des niveaux marins extrêmes locaux, puisqu'il n'est situé que 75 cm au-dessus du niveau centennal et 38 cm au-dessus du niveau centennal incluant le changement climatique. Ceci explique l'important débit calculé pour le franchissement du perré.

Une partie de ce débit de franchissement retourne néanmoins rapidement vers la mer en suivant la topographie du perré. Seule une partie de ce débit se propage donc au-delà du perré, en direction du plan d'eau, comme illustré ci-après pour l'événement centennal. L'ampleur de l'inondation présente peu de différences entre les deux aléas simulés, l'eau se propageant sur les terrains est stockée dans le plan d'eau.

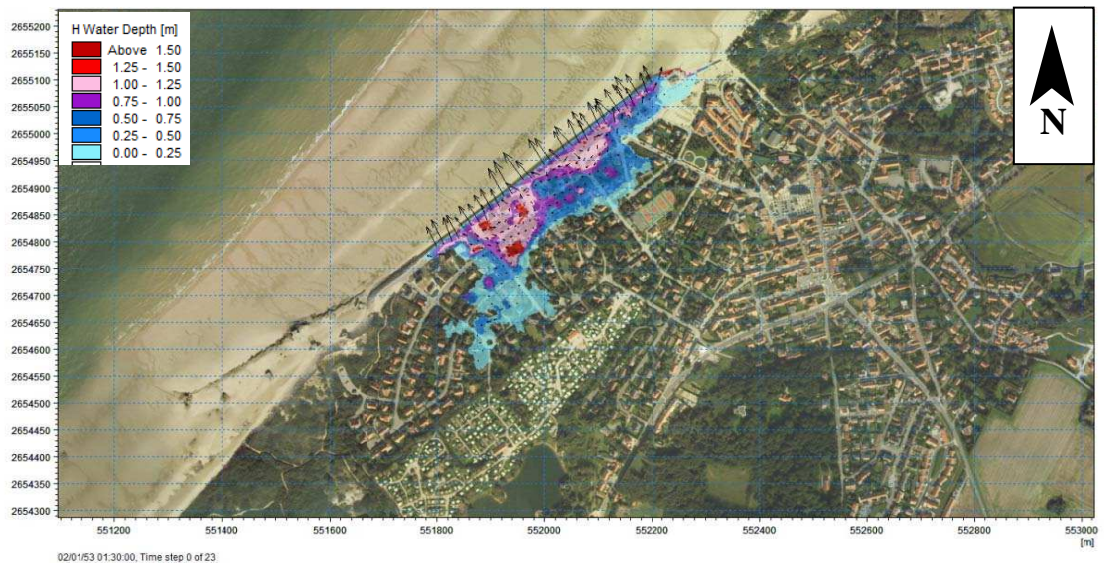


Figure 8-201: Propagation de l'inondation 1h avant la pleine mer, vers l'étang au Sud, et écoulement vers la mer sur le perré, aléa T100

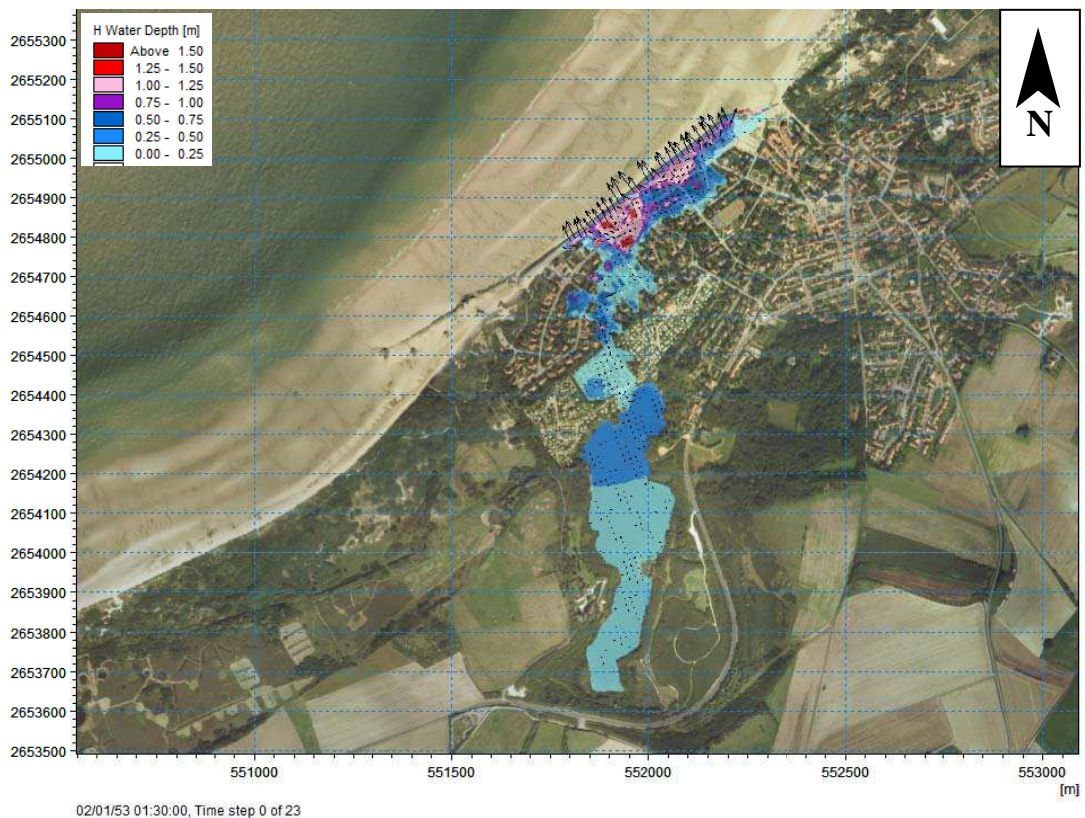


Figure 8-202 : Propagation de l'inondation 1h après la pleine mer, stockage de l'eau dans l'étang, aléa T100

8.10.3 Cartographie

La bande de 100 m s'étend au Nord-Est jusqu'à l'extrémité du perré. Le trait de côte est ensuite constitué de dunes non exposées au franchissement. Au Sud-Ouest, la bande de

100 m ne se poursuit pas jusqu'à l'extrémité du perré car celui-ci s'élève significativement. La délimitation est effectuée par calcul sur différents profils de plage et d'ouvrage, permettant d'identifier une limite non franchissable.

Cartographie des aléas 10 ans

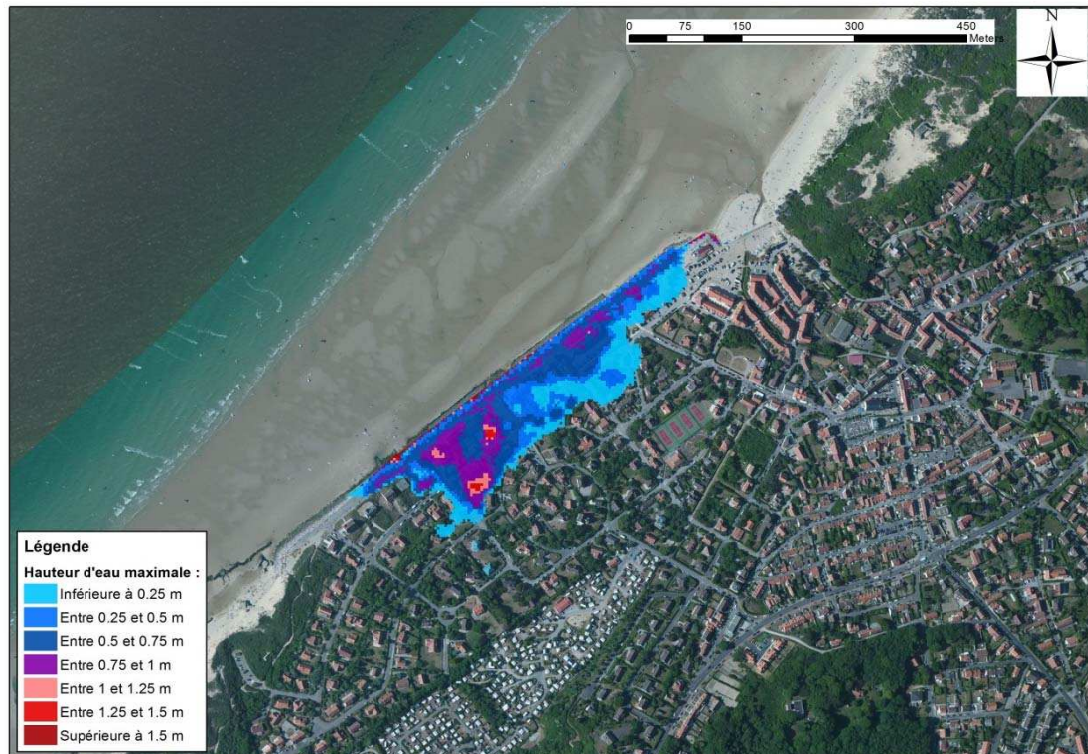


Figure 8-203 : Wissant - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal

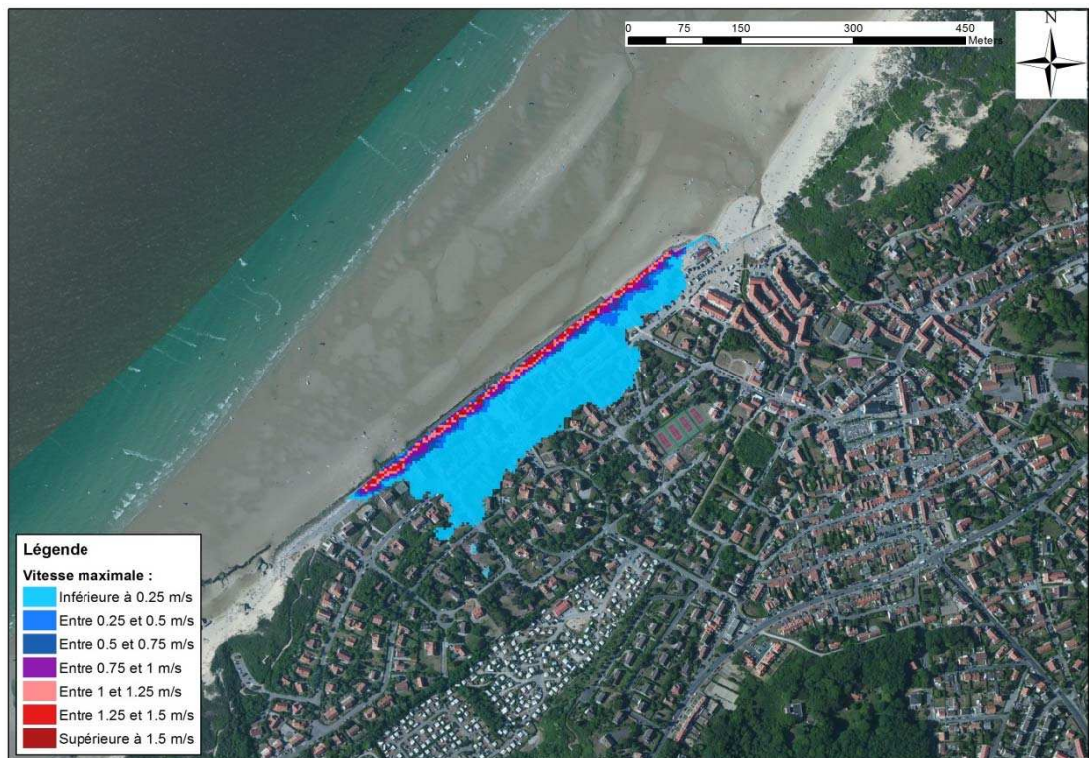


Figure 8-204 : Wissant - Cartographie de la vitesse de submersion modélisée pour un événement décennal



Figure 8-205 : Wissant - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal

Cartographie des aléas 100 ans

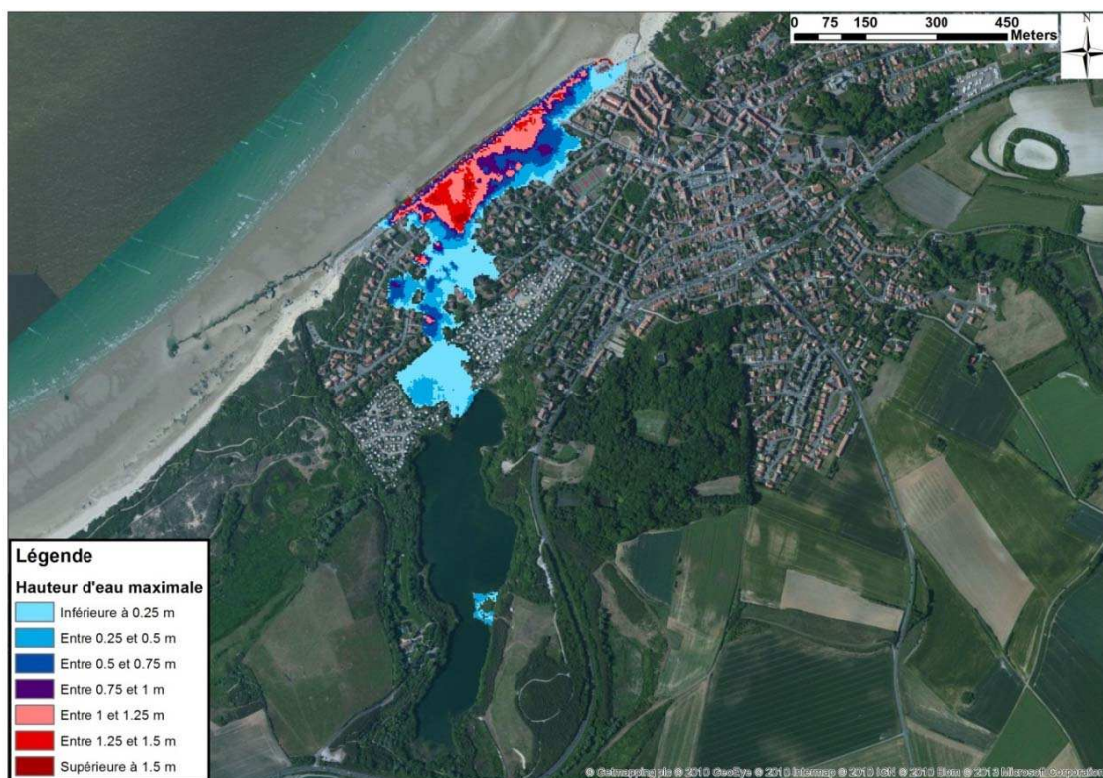


Figure 8-206 : Wissant - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal

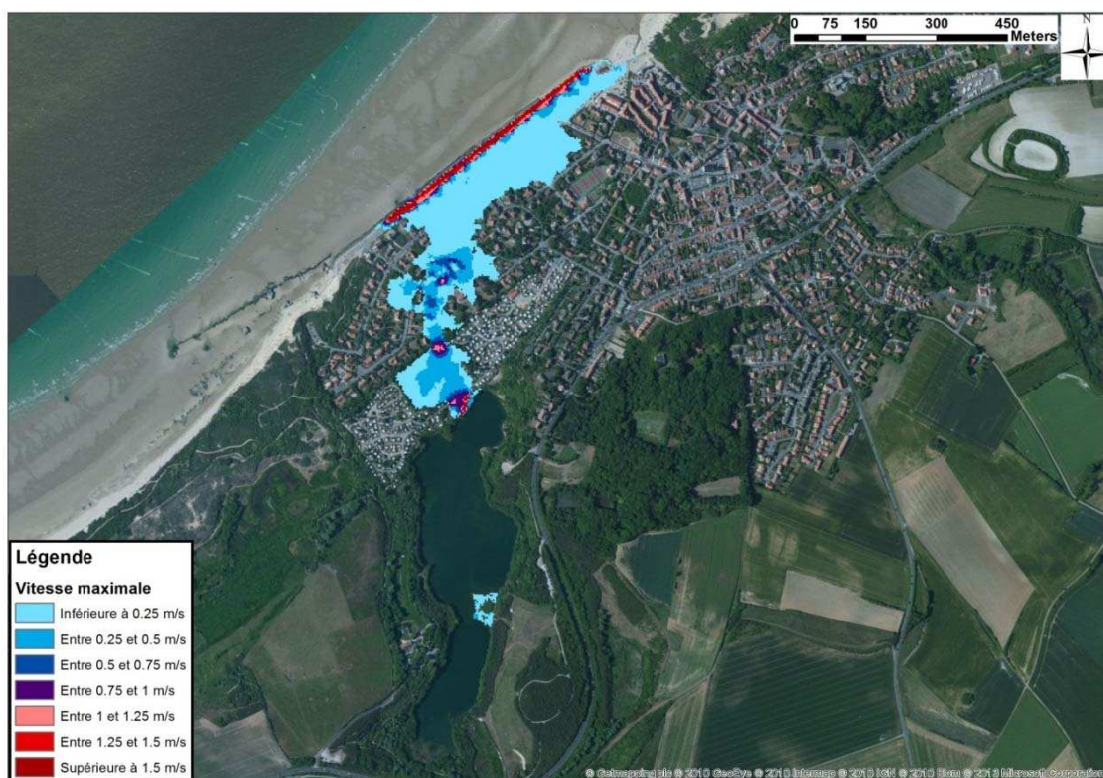


Figure 8-207 : Wissant - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal

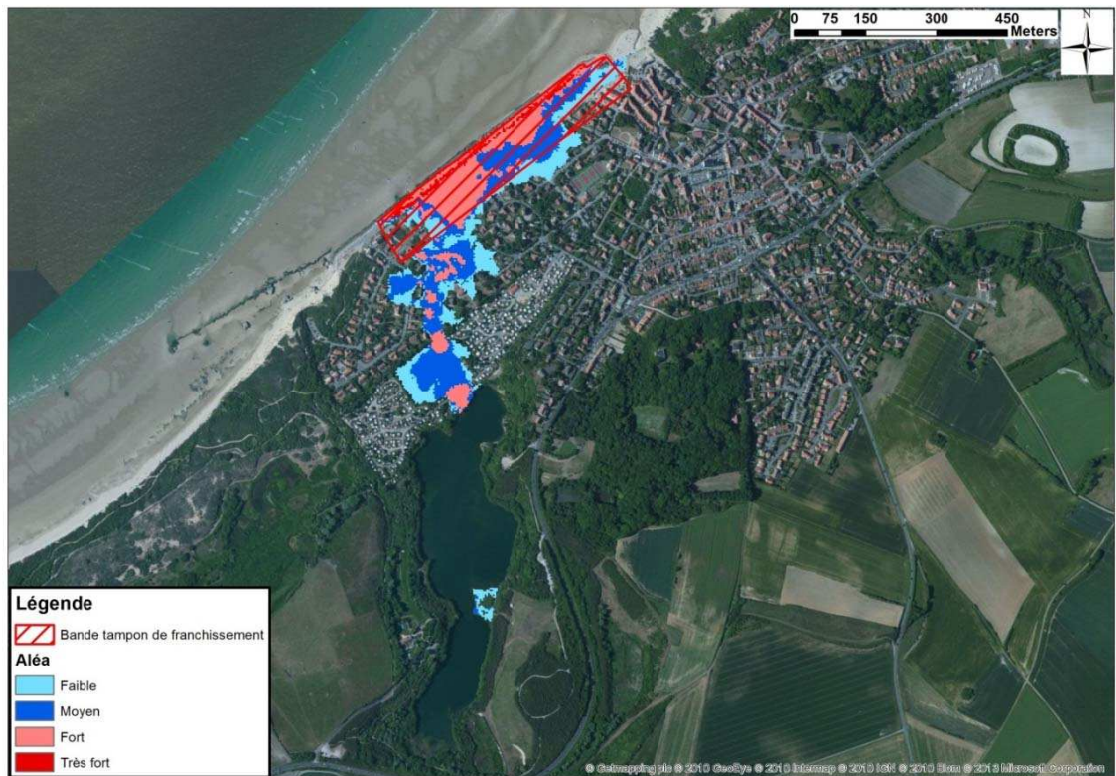


Figure 8-208 : Wissant - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal

Cartographie des aléas 100 ans à l'échéance 2100

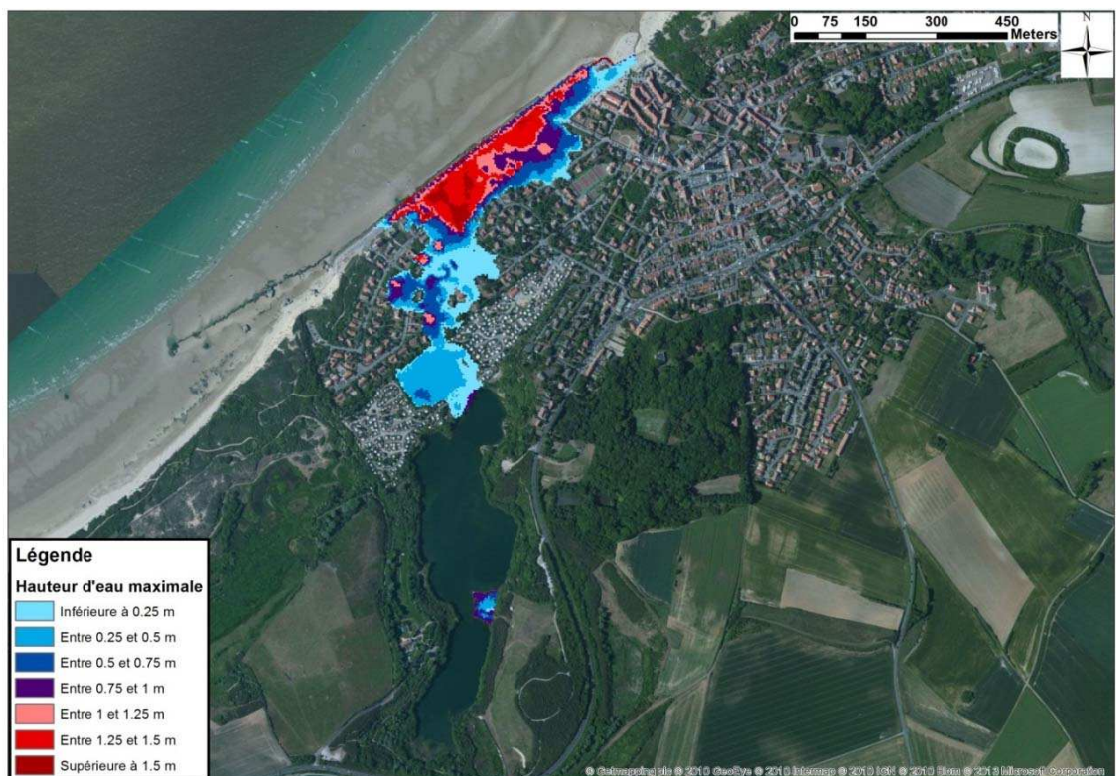


Figure 8-209 : Wissant - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

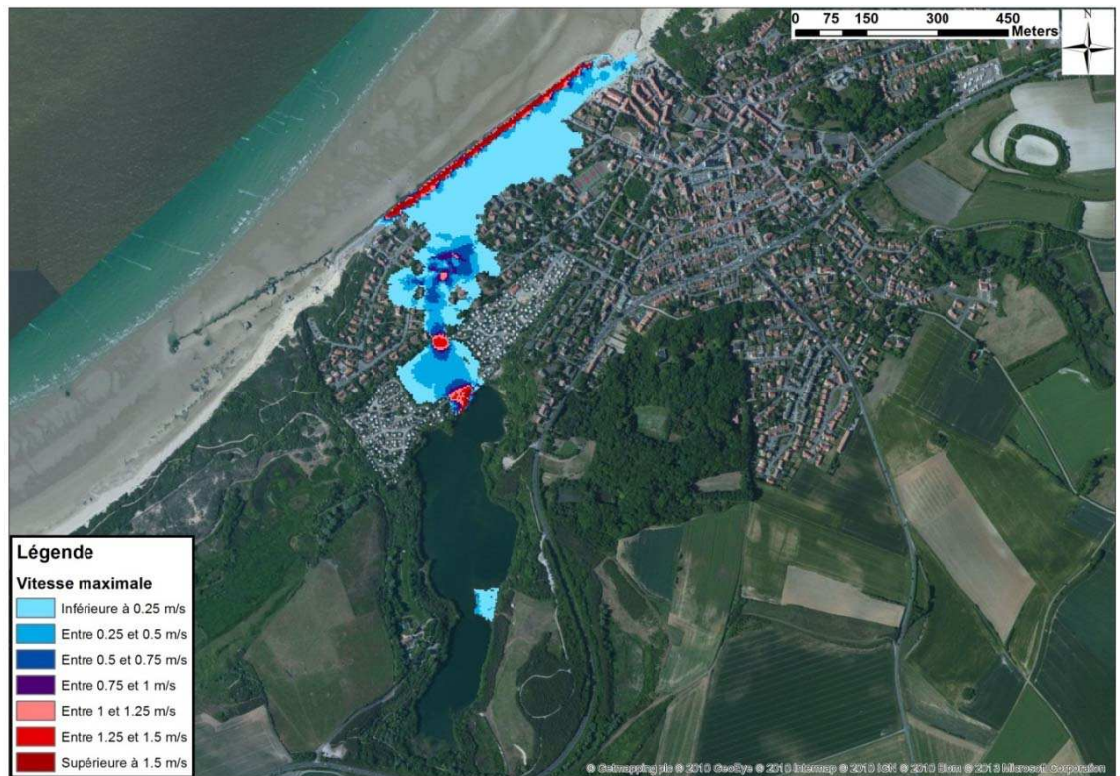


Figure 8-210 : Wissant - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

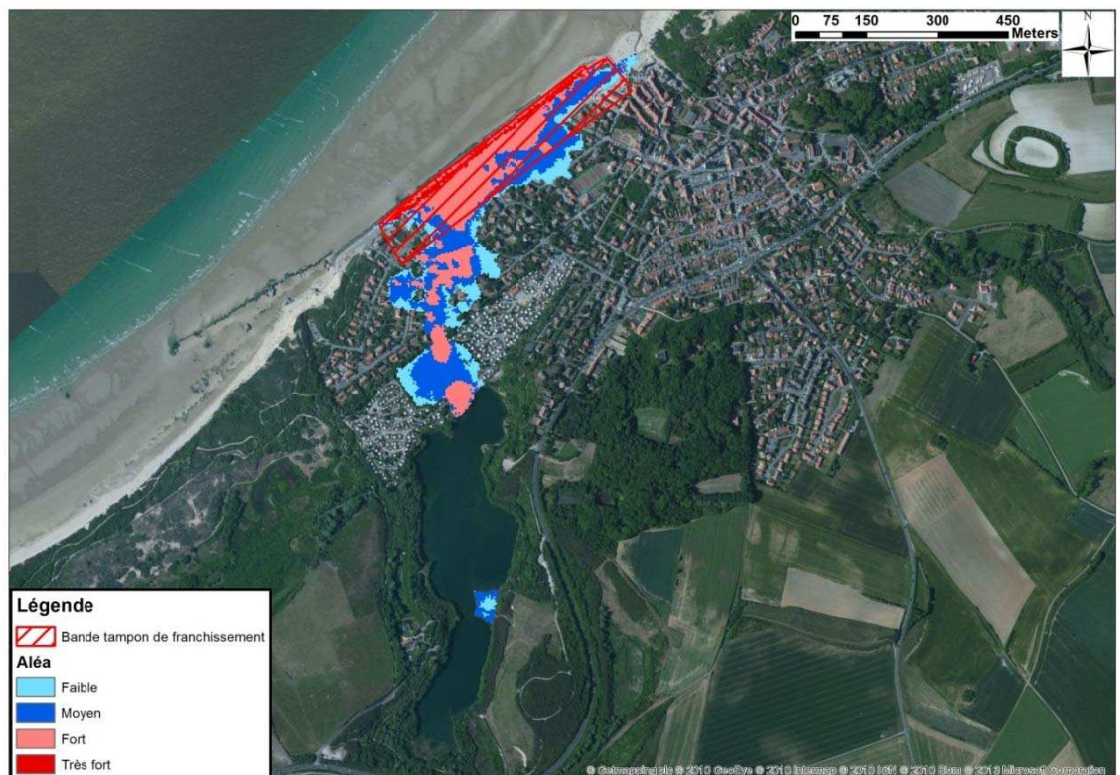


Figure 8-211 : Wissant - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100

8.11 Tardinghen - rupture du cordon dunaire et débordement

8.11.1 Hypothèses

Les niveaux marins statiques extrêmes retenus

Les niveaux marins extrêmes à Tardinghen ont été extraits des cartes du SHOM 2008 et 2012 pour les périodes de retour décennale et centennale (cf. paragraphe 4.3.1).



Figure 8-212 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement décennal est celui du SHOM 2008 identique à celui du SHOM 2012.



Figure 8-213 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement centennal est celui du SHOM 2008 identique à celui du SHOM 2012.

Tableau 8-46 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Tardinghen

	Niveau extrême de pleine-mer
T10	5,10
T100	5,40

Les niveaux marins totaux retenus

Une élévation du niveau marin lié au réchauffement climatique pris en compte en 2013 de 0,20m a été ajoutée au niveau de pleine-mer centennal. Pour la modélisation de l'évènement centennal incluant le changement climatique à l'horizon 2100, une surcote supplémentaire de 0,40 m a été ajoutée afin d'obtenir une élévation moyenne de 0,60 m conforme au scénario pessimiste établi par l'ONERC.

Le calcul de la surcote de déferment liée aux niveaux marins précédemment exposés est effectué par propagation de la houle au travers d'un modèle 1D (cf. paragraphe 4.5).

L'incertitude sur les hypothèses de calcul de la surcote de déferlement est de plus intégrée aux niveaux marins finaux (cf. paragraphe 4.3.3).

Tableau 8-47 : calcul de l'incertitude liée aux hypothèses de détermination de la surcote de déferlement

		Surcote de déferlement	Incetitude sur le calcul du set up
Niveau marin décennal	Hypothèses originales	0,38	0,07
	Hypothèses combinées	0,45	
Niveau marin centennal 2013	Hypothèses originales	0,26	0,07
	Hypothèses combinées	0,33	
Niveau marin centennal 2100	Hypothèses originales	0,16	0,06
	Hypothèses combinées	0,22	

Les niveaux marins totaux s'établissent ainsi :

Tableau 8-48 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus à TARDINGHEN

	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incetitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total retenu
T10	5,10	-	0,38	0,07	5,55
T100	5,40	0,20	0,26	0,07	5,93
T100 à l'horizon 2100	5,40	0,60	0,16	0,06	6,22

Les signaux de marée ont été modifiés pour atteindre ces niveaux extrêmes de pleine-mer, comme présenté figure suivante.

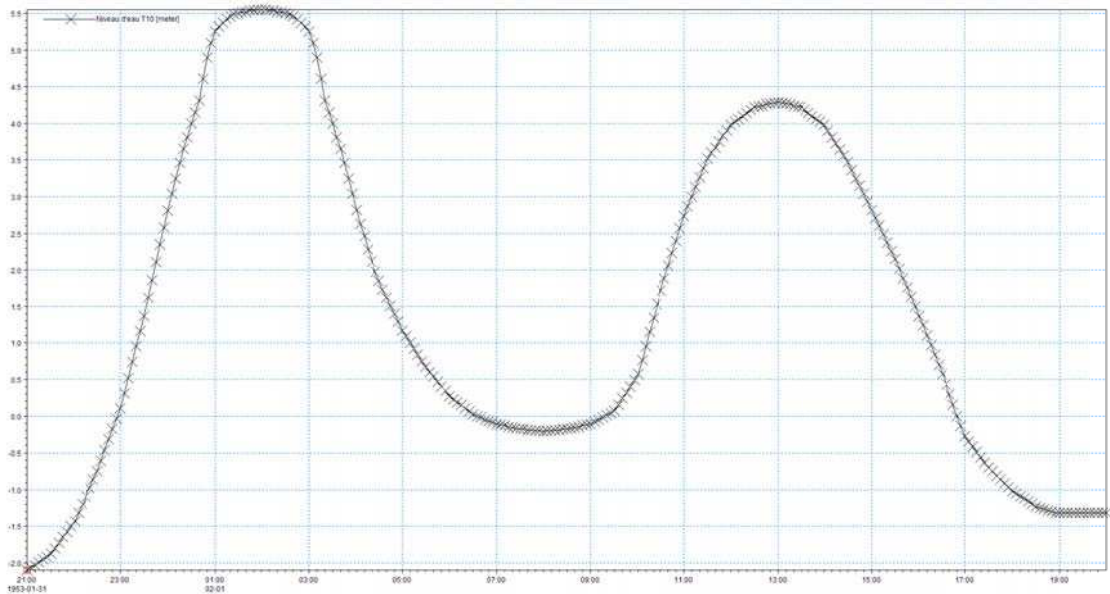


Figure 8-214 : Marégramme utilisé pour T10

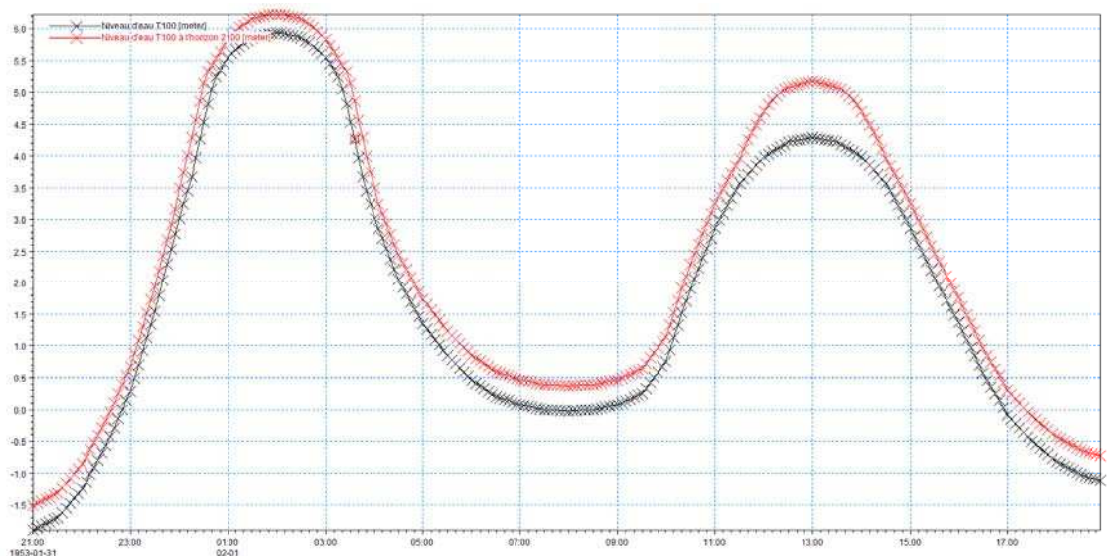


Figure 8-215 : Marégrammes utilisés pour T100 et T100 à l'horizon 2100

Les caractéristiques de la brèche

La brèche simulée dans la dune de Tardingen est d'une longueur de 100m. La cote de la crête du cordon dunaire s'abaisse de 6,41m à 3m IGN 69 en 15 minutes à partir d'une heure avant la pleine-mer (cf. Paragraphe 6.2.2).

L'hydrogramme injecté dans cette brèche est le niveau d'eau à Tardingen. Il atteint donc un niveau de 5,93m IGN69 pour le scénario d'occurrence centennale et 6,22 m IGN 69 pour celui incluant le changement climatique.



Figure 8-216 : Position de la brèche simulée à Tardinghen

8.11.2 Dynamique de submersion

La propagation de l'inondation dans les marais s'effectue de manière continue. L'eau progresse globalement d'Ouest en Est, et le secteur concerné par l'aléa fort est inondé en 1h après l'ouverture de la brèche dans le cordon dunaire, pour l'événement centennal. 2h après l'ouverture de la brèche, l'inondation a atteint le maximum de son emprise et les vitesses d'écoulement sont très faibles.

Les différences entre les deux aléas simulés résident dans les hauteurs d'eau maximales d'inondation (et donc dans les aléas) étant donnée la topographie du site en cuvette qui limite l'étalement de l'inondation. Les débordements par le cours d'eau à l'Ouest de la zone ne sont que locaux et isolés de la tâche d'inondation principale.

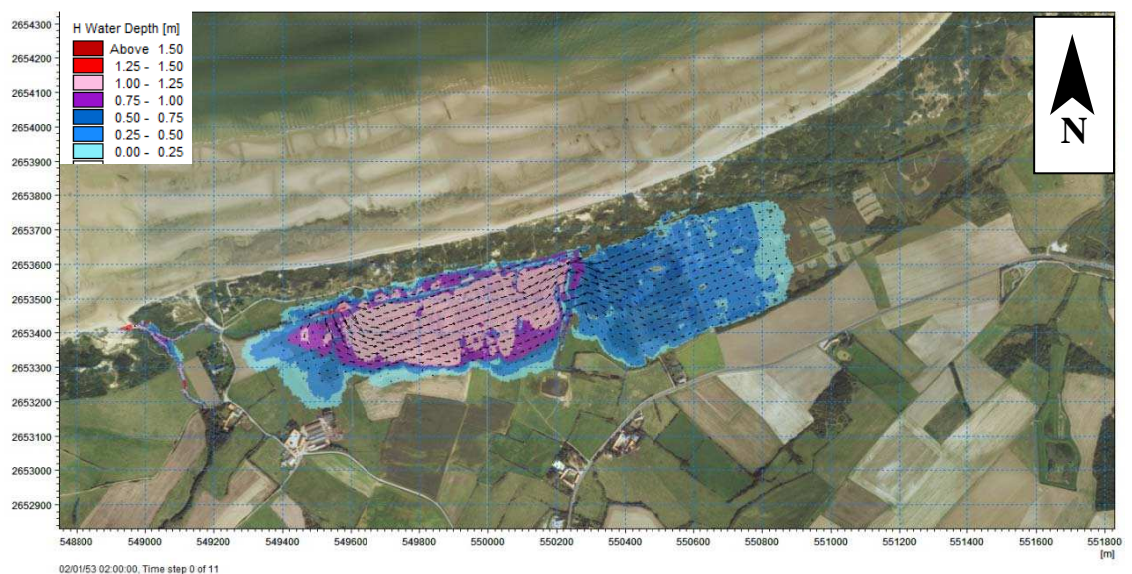


Figure 8-217: Etat des inondations 1h après l'apparition de la brèche, aléa T100

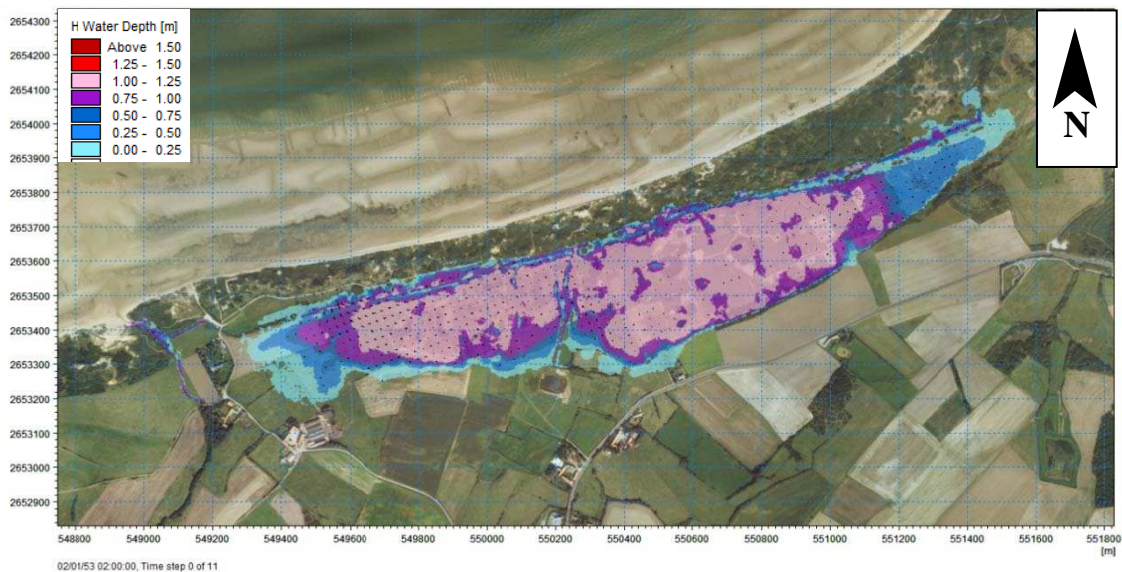


Figure 8-218 : Etat des inondations 2h après l'apparition de la brèche, aléa T100

8.11.3 Cartographie

La bande de 100 m longe la dune et s'étend à l'Ouest jusqu'à l'exutoire du ruisseau des Anguilles. A l'Est, il existe un point relativement bas dans la dune, à partir duquel celle-ci devient large et élevée, et ne présente donc plus de risque de rupture. La bande se prolonge ainsi uniquement de 100 m au-delà de ce point bas.

Cartographie des aléas 10 ans

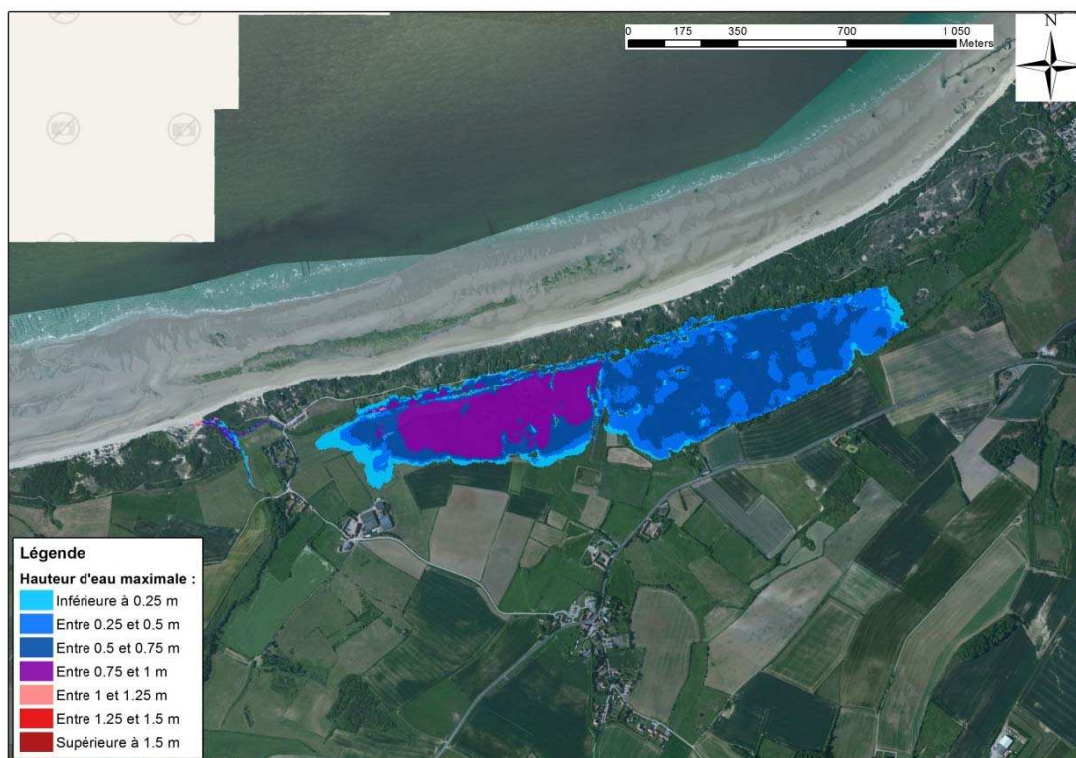


Figure 8-219 : Tardinghen - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal

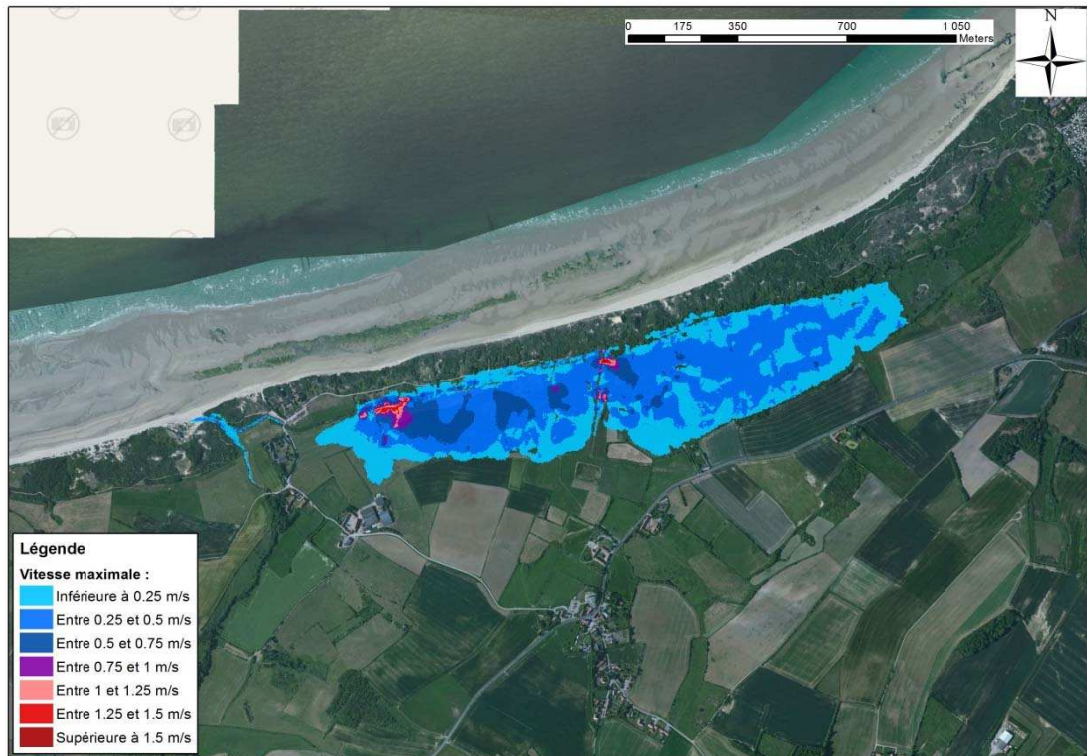


Figure 8-220 : Tardinghen - Cartographie de la vitesse de submersion modélisée pour un événement décennal

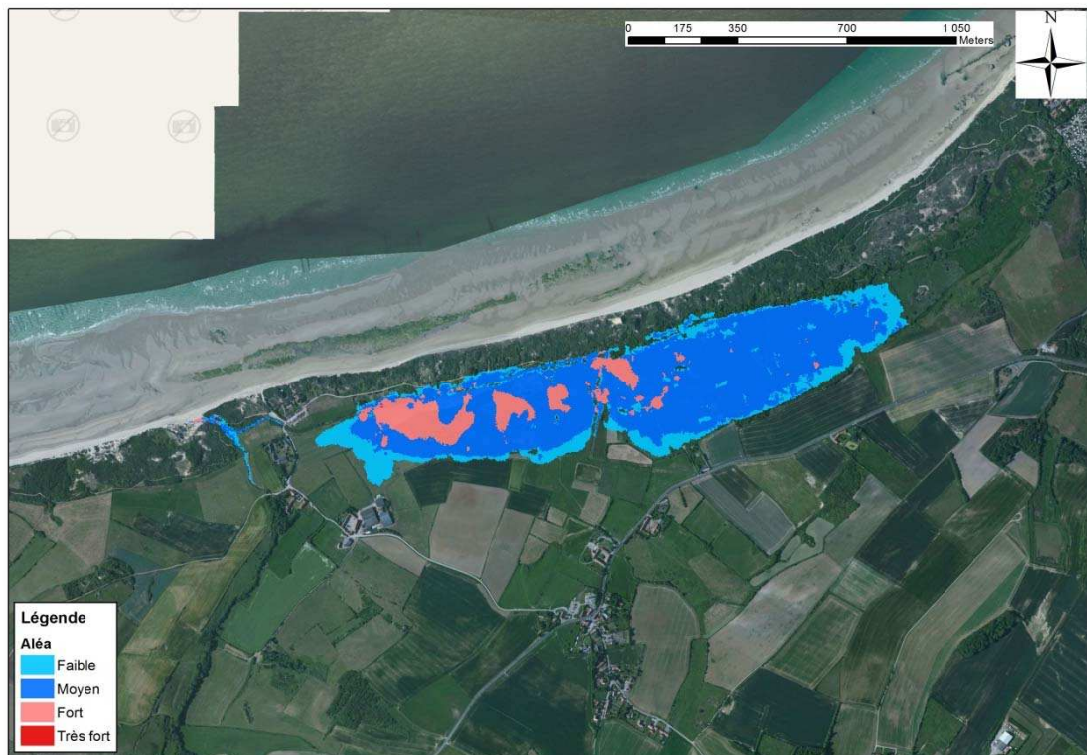


Figure 8-221 : Tardinghen - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal

Cartographie des aléas 100 ans

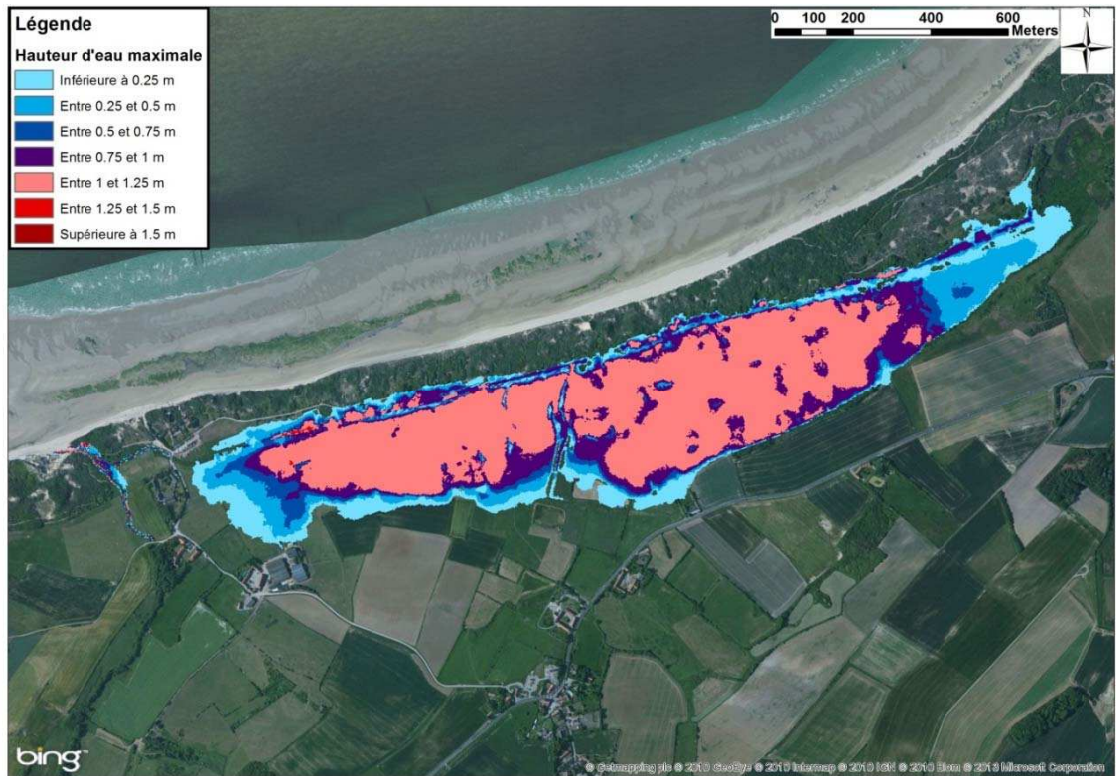


Figure 8-222 : Tardinghen - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal

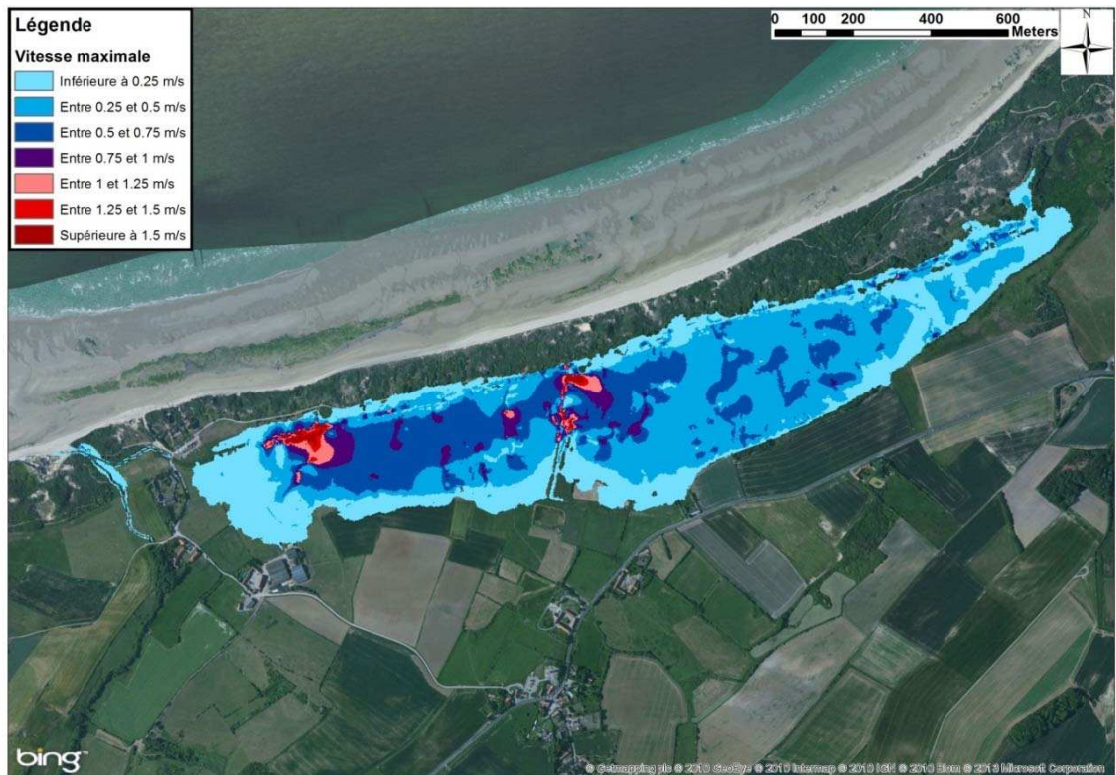


Figure 8-223 : Tardinghen - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal

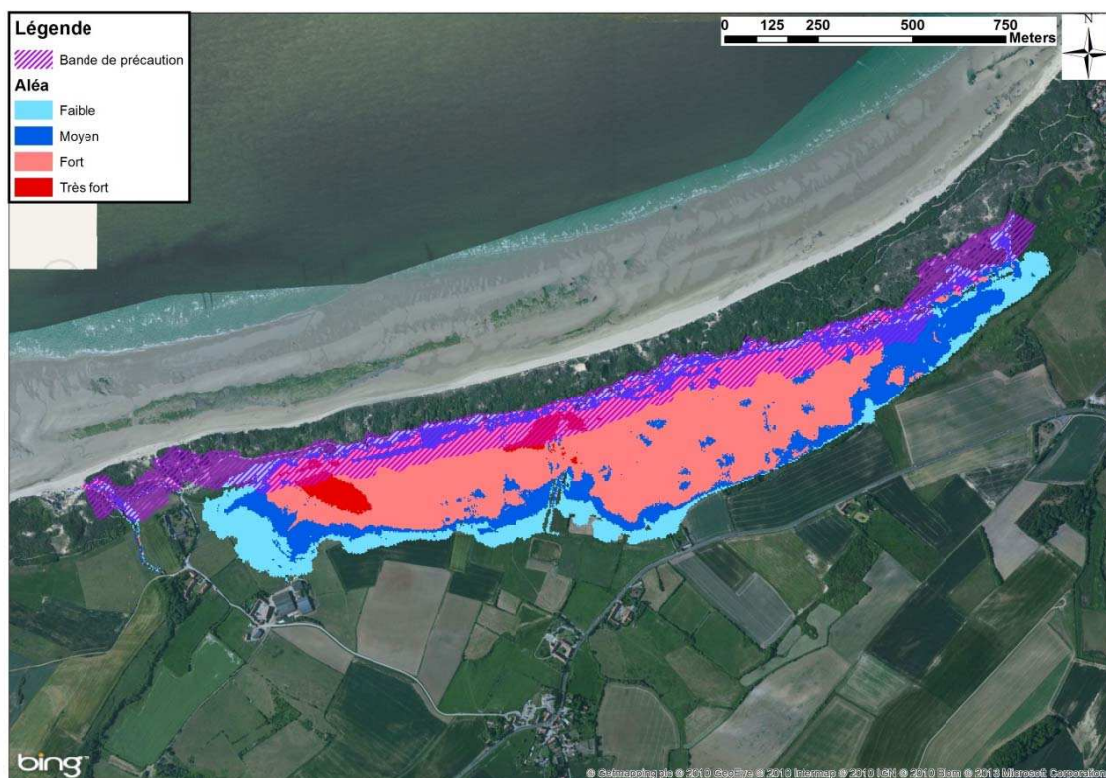


Figure 8-224 : Tardingen - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal

Cartographie des aléas 100 ans à l'échéance 2100

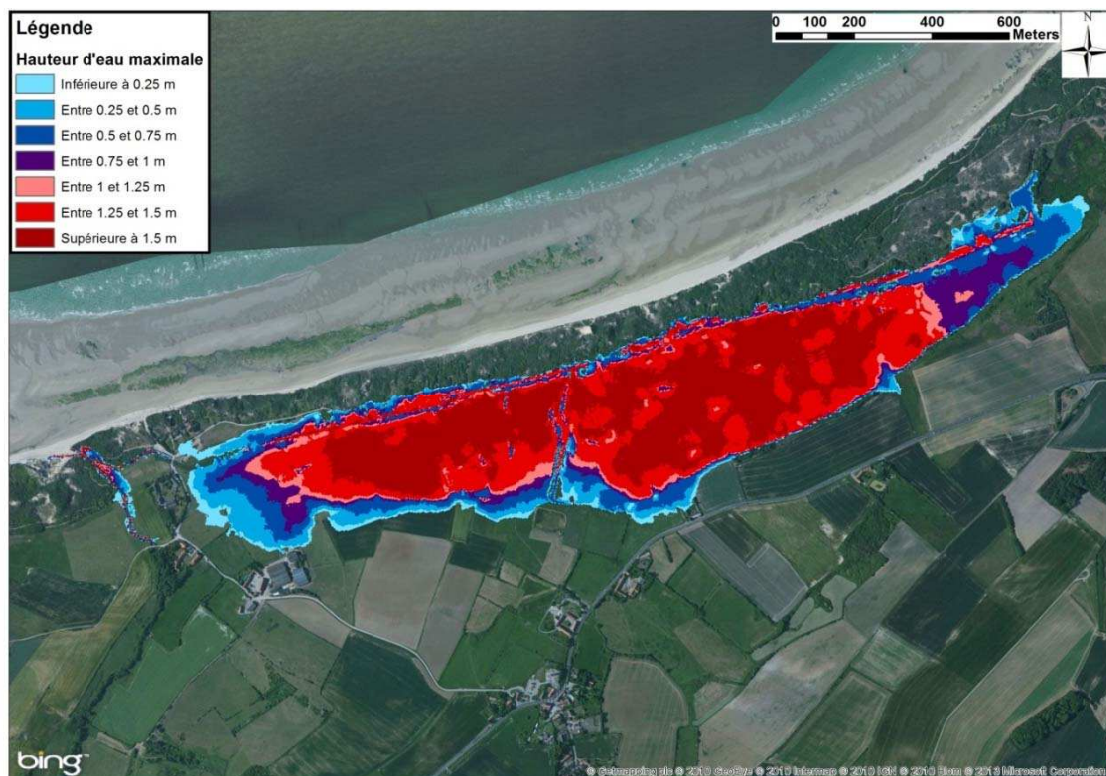


Figure 8-225 : Tardingen - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

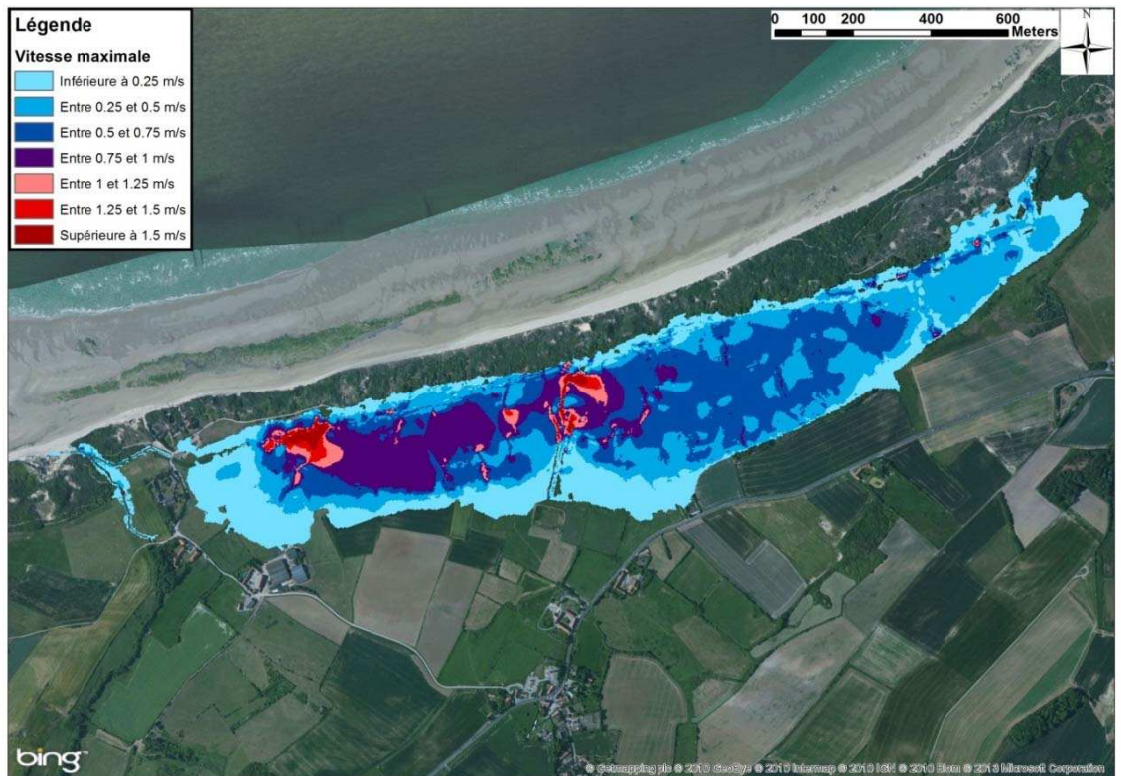


Figure 8-226 : Tardingen - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

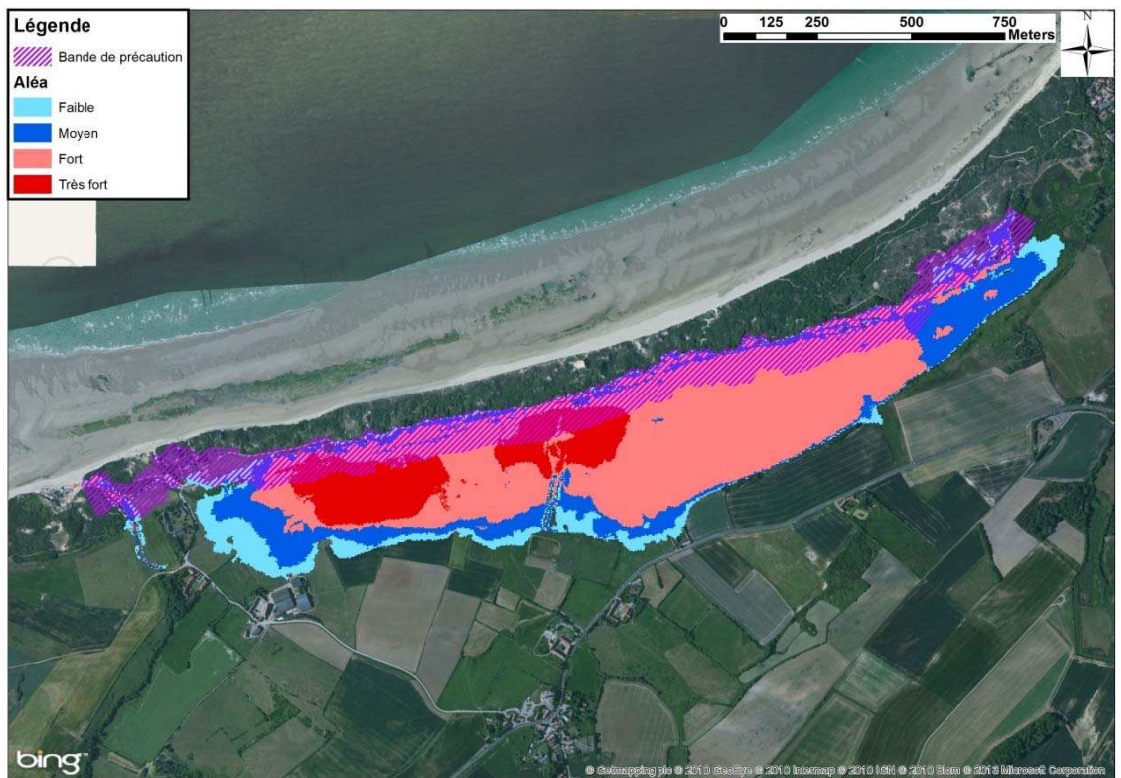


Figure 8-227 : Tardingen - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100

8.12 Audresselles - franchissement de perré

8.12.1 Hypothèses

Caractéristiques de l'ouvrage et des profils

Le calcul du débit franchissant le perré est effectué sur quatre profils transversaux de la plage, afin de tenir compte des variations de géométrie de l'ouvrage (hauteur et pente).

Les différents paramètres des quatre profils utilisés sont précisés dans les figures suivantes.



Figure 8-228 : Position des quatre profils retenus à Audresselles

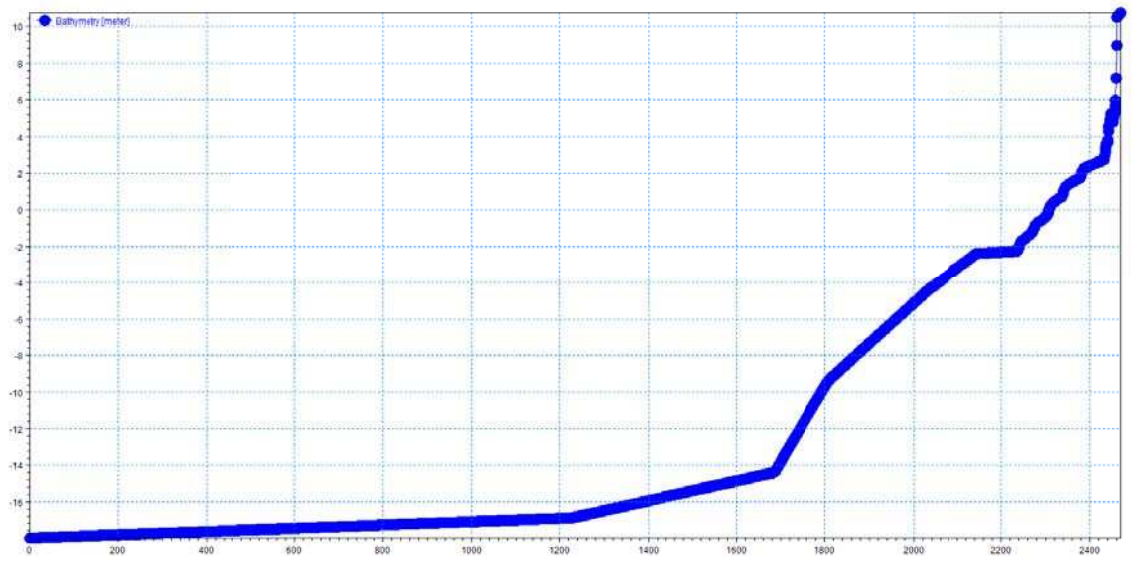


Figure 8-229 : Profil 1

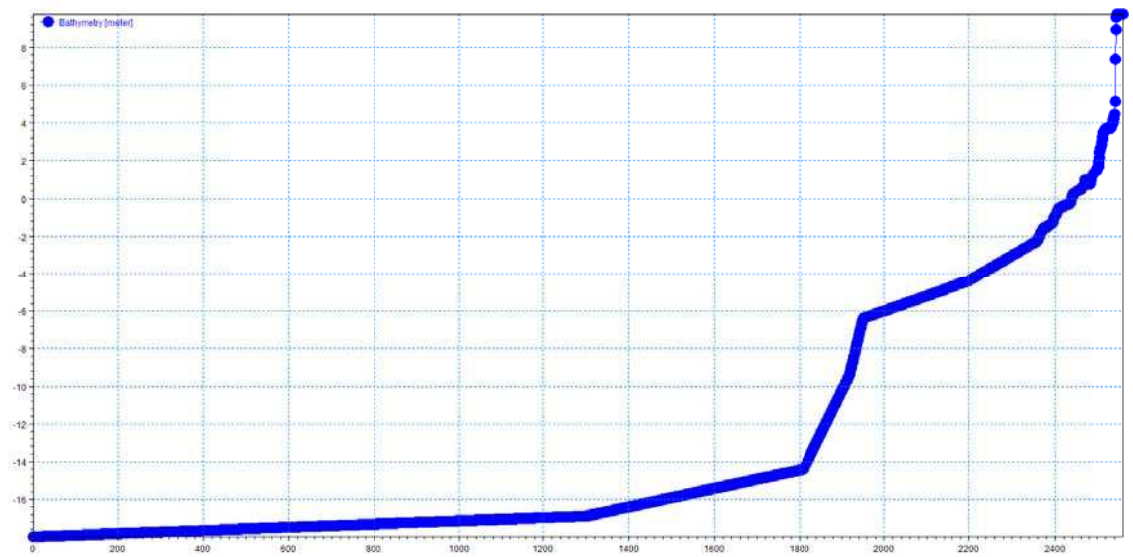


Figure 8-230 : Profil 2

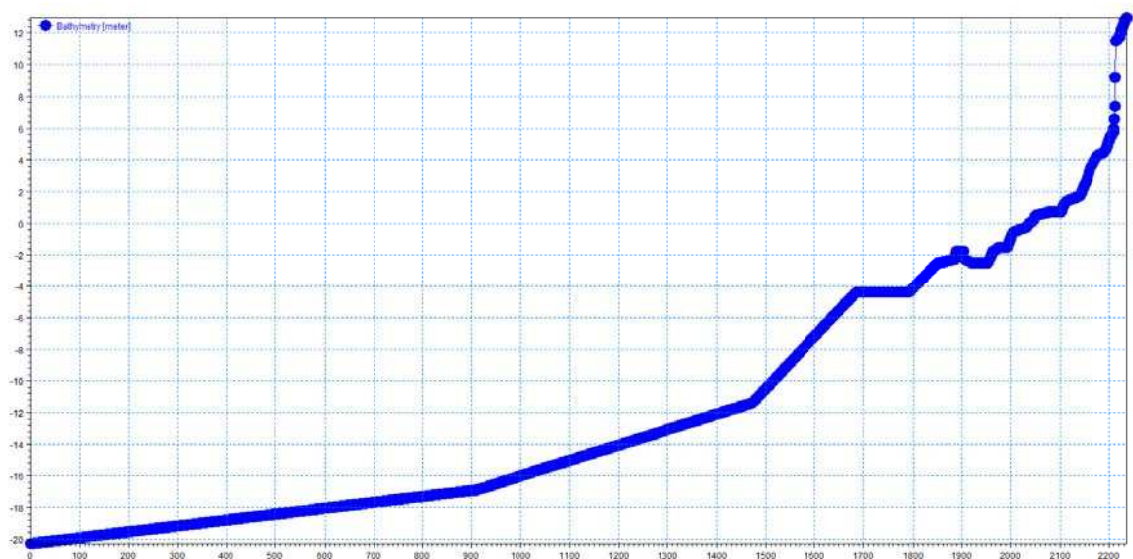


Figure 8-231 : Profil 3

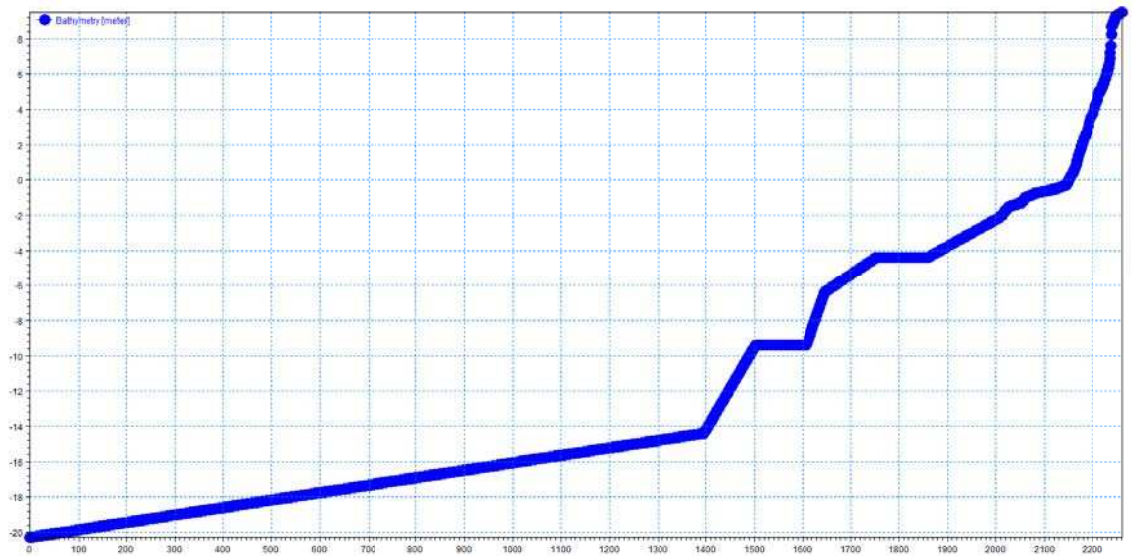


Figure 8-232 : Profil 4

Tableau 8-49 : Paramètres des quatre profils utilisés à Audresselles

	Profil 1	Profil 2	Profil 3		Profil 4
Direction des houles (°N)	265	254	251		251
Cote du pied d'ouvrage (m IGN 69)	5	6	5		4,50
Cote du perré (m IGN 69)	10	10	10		9,50
Pente du perré (h / l)	1 / 0,25	1 / 0,25	1 / 1	1/1 + mur vertical	1 / 1,5
Linéaire (m)	130	200	165		150

Conditions en mer et conditions au pied de l'ouvrage

Les niveaux marins extrêmes au large d'Audresselles ont été extraits des cartes du SHOM 2008 et 2012 pour les périodes de retour décennale et centennale (cf. paragraphe 4.3.1).



Figure 8-233 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement décennal est celui du SHOM 2008 identique à celui du SHOM 2012.

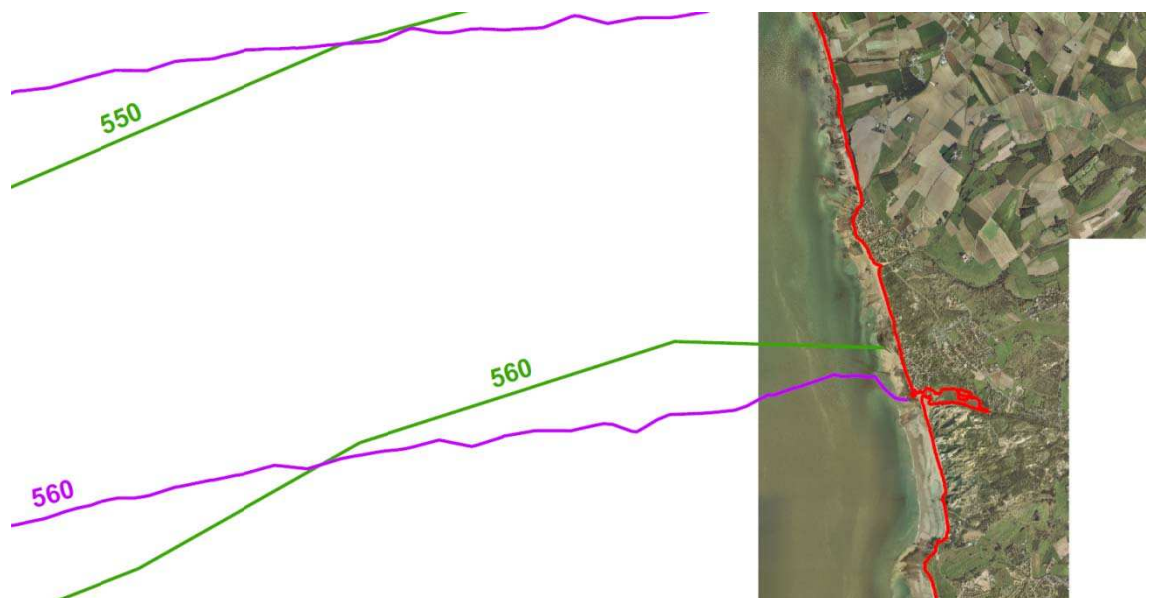


Figure 8-234 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Les deux livraisons du SHOM indiquent le même niveau à Audresselles pour l'évènement centennal.

Tableau 8-50 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Audresselles

	Niveau extrême de pleine-mer
T10	5,30
T100	5,60

La propagation des conditions de mer au large au pied de l'ouvrage d'Audresselles a été effectuée en 1D le long des profils précédemment décrits grâce au logiciel LITPACK (cf. paragraphe 4.6).

L'incertitude sur les hypothèses de calcul de la surcote de déferlement est de plus intégrée aux niveaux marins finaux (cf. paragraphe 4.3.3).

Tableau 8-51 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) à Audresselles

T10	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total au pied de l'ouvrage
Profil 1	5,30	-	0,43	0,03	5,76
Profil 2	5,30	-	-	0,05	- ¹
Profil 3	5,30	-	0,35	0	5,65
Profil 4	5,30	-	0,29	0,03	5,62

T100	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total au pied de l'ouvrage
Profil 1	5,60	0,20	0,39	0,04	6,23
Profil 2	5,60	0,20	0,38	0,06	6,24
Profil 3	5,60	0,20	0,32	0,02	6,14
Profil 4	5,60	0,20	0,27	0,03	6,10

T100 à l'horizon 2100	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total au pied de l'ouvrage
Profil 1	5,60	0,60	0,33	0,05	6,58

¹ Le niveau marin n'atteint pas le pied d'ouvrage.

Profil 2	5,60	0,60	0,44	0,06	6,70
Profil 3	5,60	0,60	0,27	0,03	6,50
Profil 4	5,60	0,60	0,22	0,04	6,46

Tableau 8-52 : Houles (en m) à Audresselles

	Hauteur significative de la houle au large (m)	Période de la houle (s)	Hauteur significative de la houle au pied de l'ouvrage (m)			
			Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4
T10	3,8	8,28	0,48	0	0,71	1,27
T100	4,2	9	0,91	0,97 ²	1,19	1,74
T100 à l'horizon 2100	4,2	9	1,24	1,33	1,55	2,09

Les signaux de marée utilisés comme conditions aux limites du modèle au large ont été modifiés pour atteindre les niveaux extrêmes de pleine-mer calculés, comme présenté figure suivante.

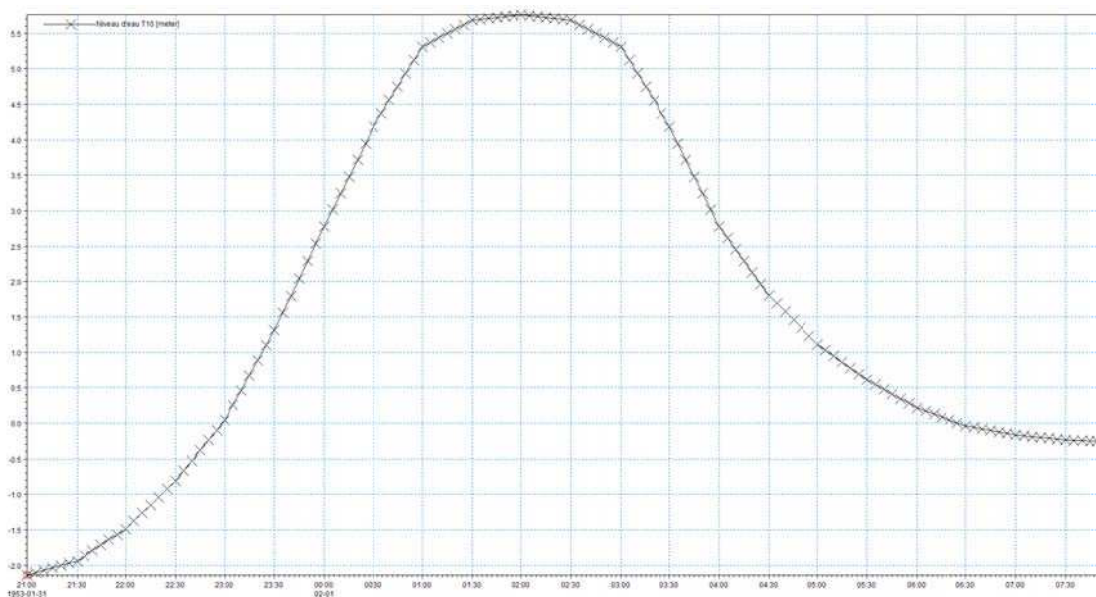


Figure 8-235 : Marégramme utilisé au large d'Audresselles pour T10

² La moitié de la hauteur significative de la houle est plus grande que la profondeur d'eau en pied d'ouvrage, découvrant au creux de la houle. La hauteur de houle considérée pour ce profil est nulle, il n'y a donc pas de franchissements par paquets de mer.



Figure 8-236 : Marégrammes utilisés au large d'Audresselles pour T100 et T100 à l'horizon 2100

Seul un cycle de marée a été simulé puisque la seconde pleine-mer, plus basse, n'apporte aucun risque de franchissement.

Les débits injectés dans le modèle hydrodynamique terrestre

L'estimation des débits de franchissement a été effectuée à l'aide de la formule empirique proposée dans le « Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures - Assessment Manual ».

Tableau 8-53 : Calculs des débits linéiques injectés dans le modèle

		Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4
10 ans	Revanche au niveau de pleine-mer (m)	4,24	-	4,34	3,91
	Débit linéique maximal (l/s/m)	0,4	-	0	107
100 ans	Revanche au niveau de pleine-mer (m)	3,77	-	3,86	3,43
	Débit linéique maximal (l/s/m)	12	-	4	454

100 à l'horizon 2100	Revanche au niveau de pleine-mer (m)	3,42	3,76	3,38	3,08
	Débit linéique maximal (l/s/m)	46	62	18	832

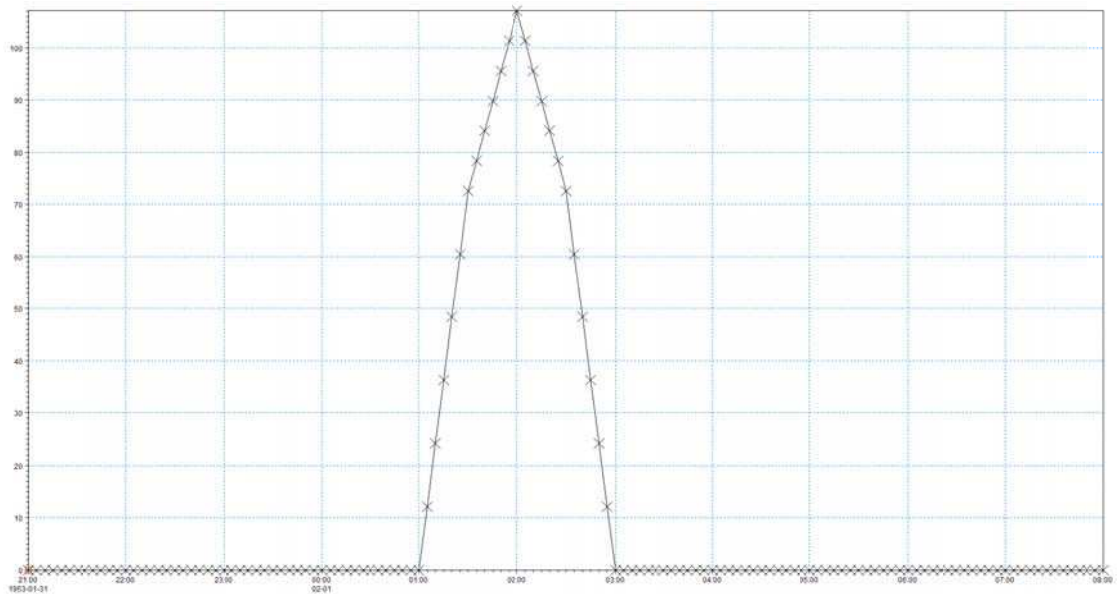


Figure 8-237 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 4 (10 ans)

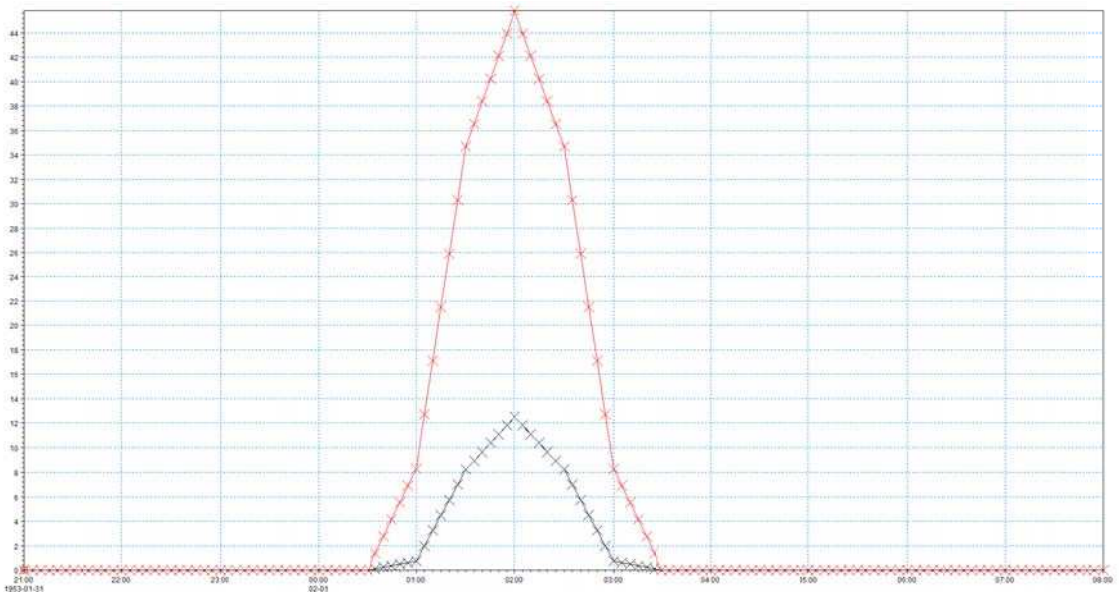


Figure 8-238 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 1 (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))

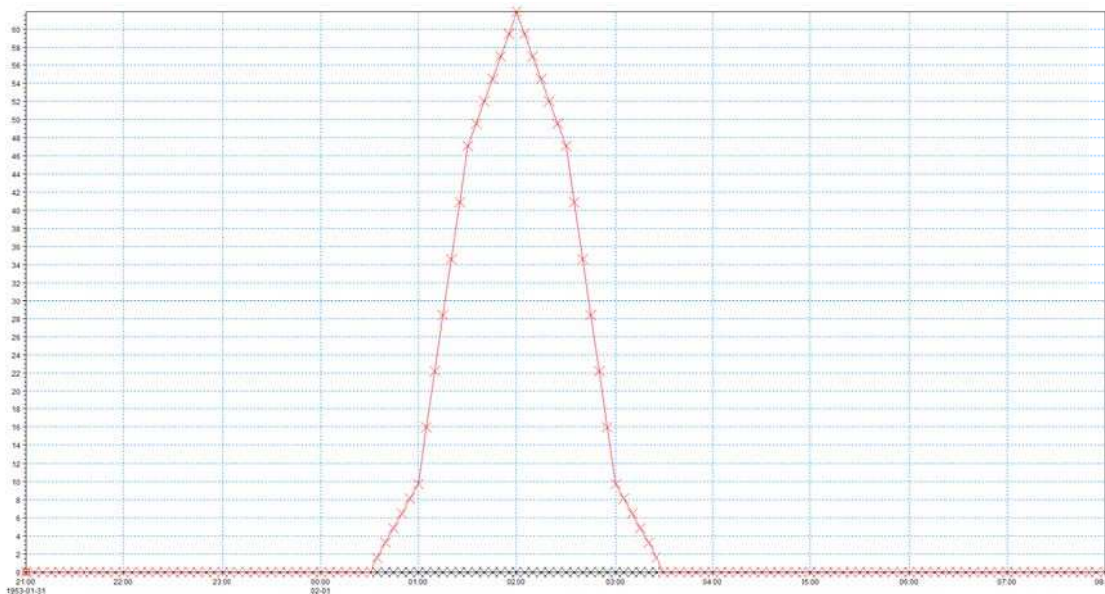


Figure 8-239 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 2 (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))

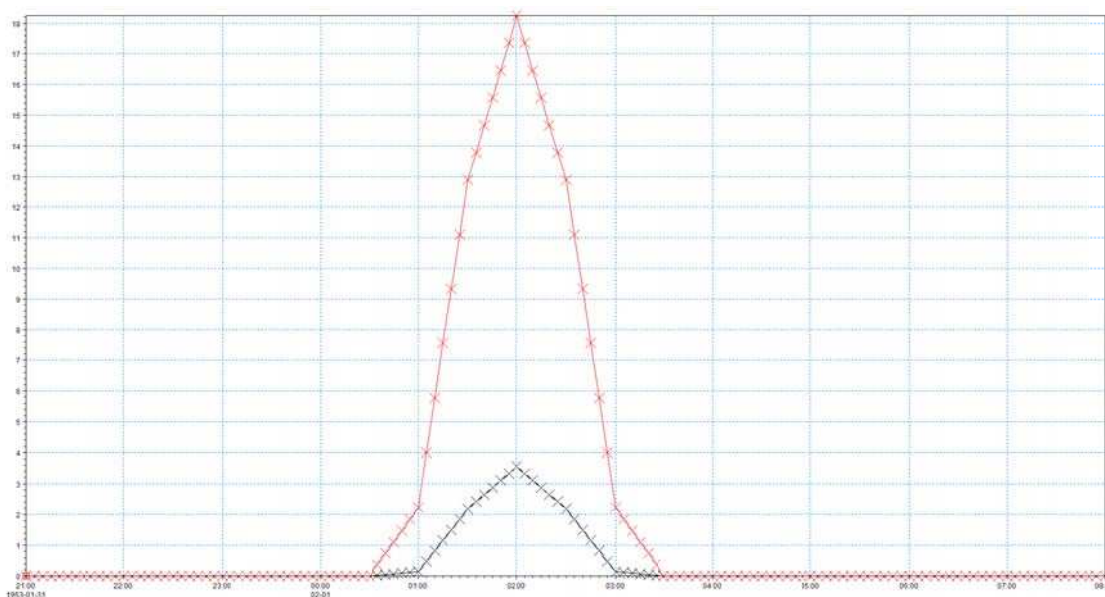


Figure 8-240 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 3 (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))

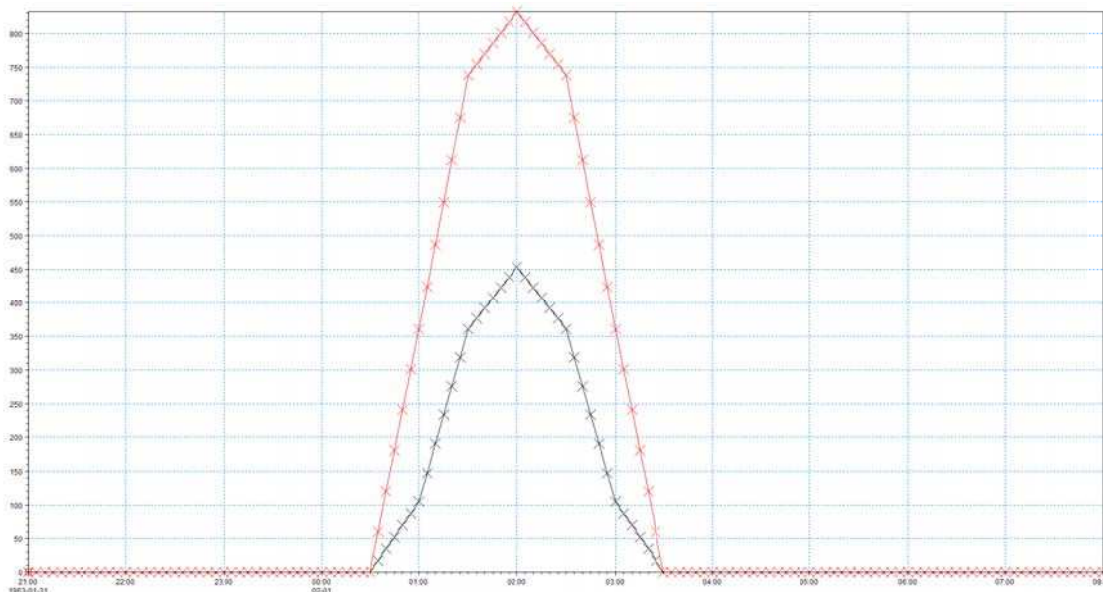


Figure 8-241 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 4 (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))

8.12.2 Dynamique de submersion

Les inondations sur la partie Nord de la zone urbanisée restent limitées au front de mer, l'écoulement est stoppé par la topographie plus élevée au niveau de la rue Gustave Danquin. Au Sud, les inondations se propagent au-delà du front de mer pour rejoindre le ruisseau de la Manchue.

Ces inondations sont uniquement dues au franchissement, et non au débordement depuis le lit du cours d'eau, comme en atteste la cartographie ci-après de l'événement centennal, sur laquelle les vecteurs indiquent les directions d'écoulement.

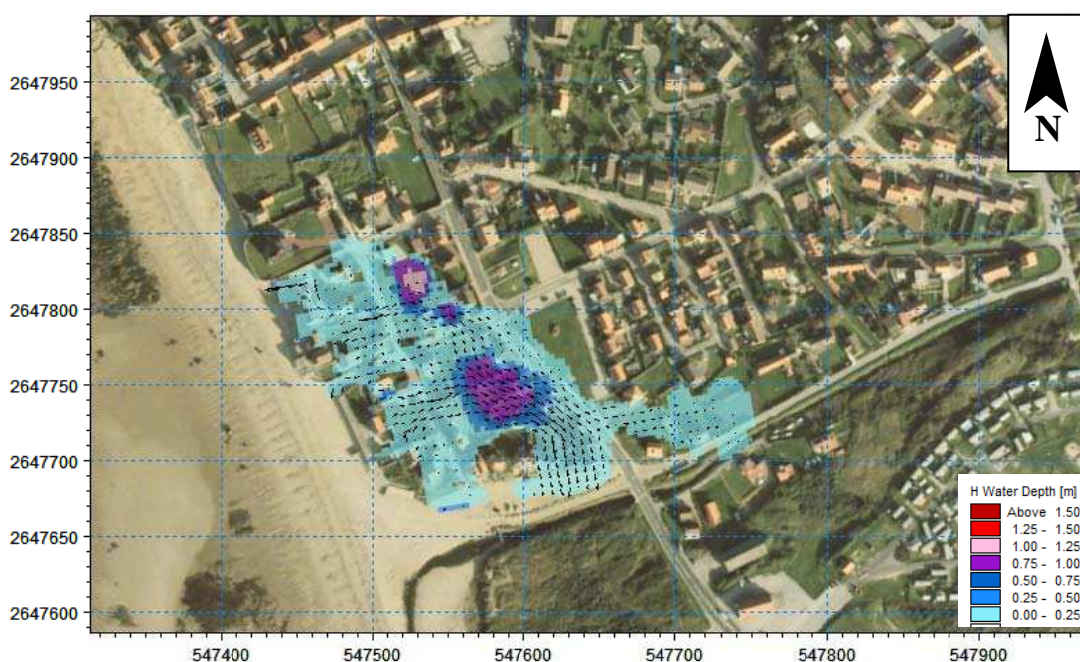


Figure 8-242: Propagation de l'inondation vers le lit du cours d'eau, aléa T100

8.12.3 Cartographie

La méthodologie pour la délimitation de la bande de 100 m à Audresselles est identique à celle employée pour Bray-Dunes. La bande de 100 m couvre donc l'ensemble du perré.

Cartographie des aléas 10 ans



Figure 8-243 : Audresselles - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal



Figure 8-244 : Audresselles - Cartographie de la vitesse de submersion modélisée pour un événement décennal



Figure 8-245 : Audresselles - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal

Cartographie des aléas 100 ans

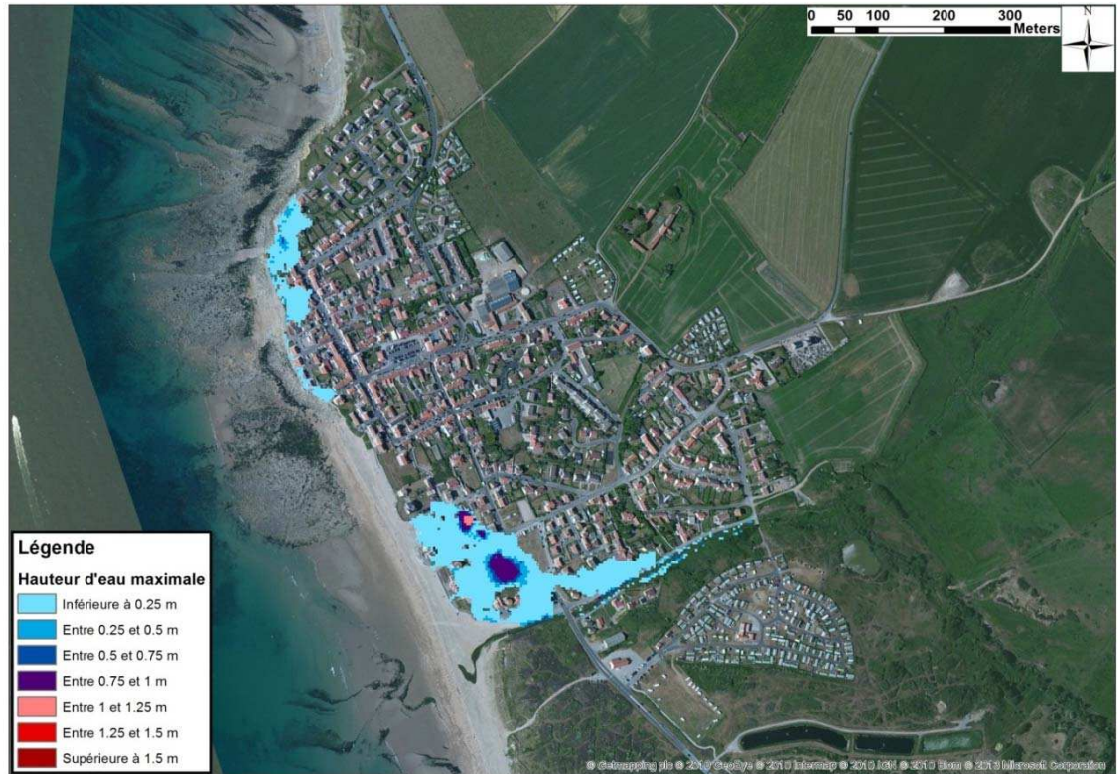


Figure 8-246 : Audresselles - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal



Figure 8-247 : Audresselles - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal

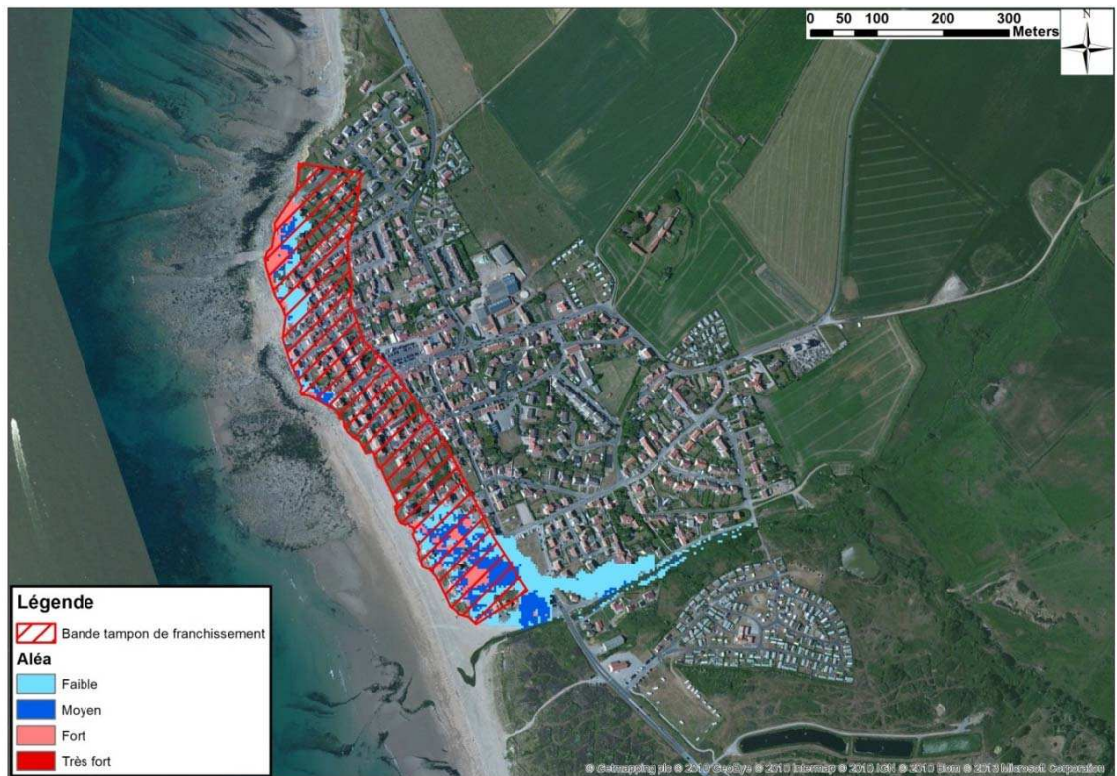


Figure 8-248 : Audresselles - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal

Cartographie des aléas 100 ans à l'échéance 2100



Figure 8-249 : Audresselles - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

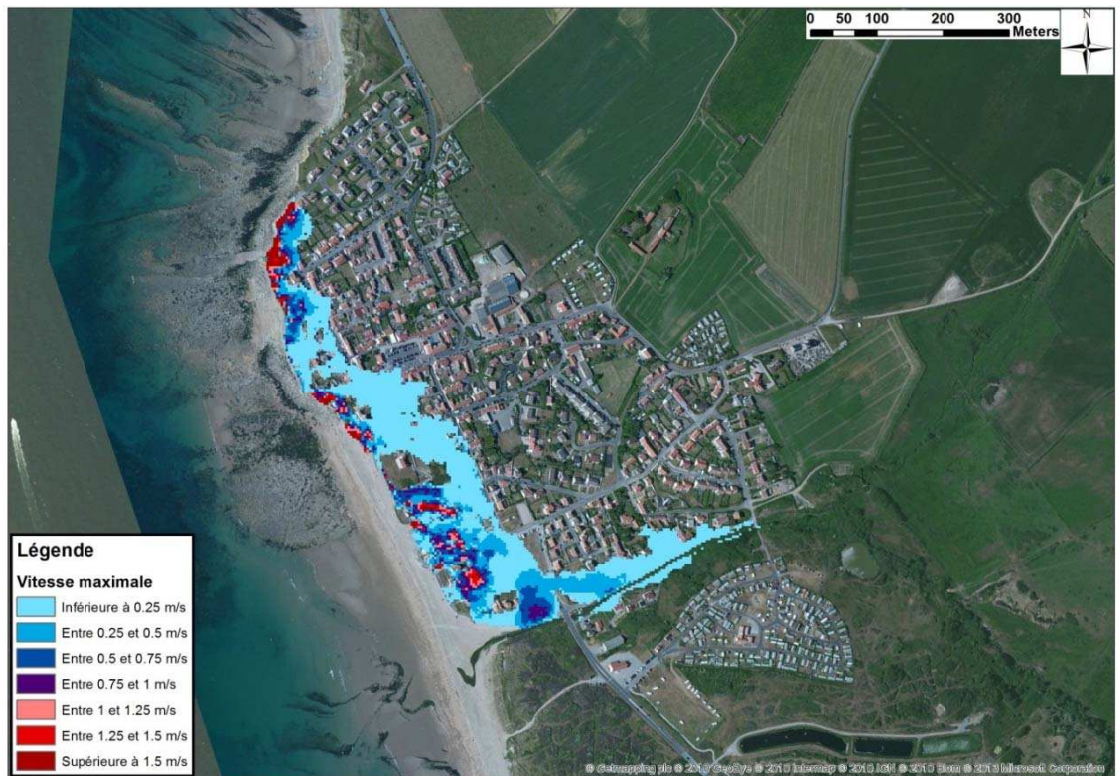


Figure 8-250 : Audresselles - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

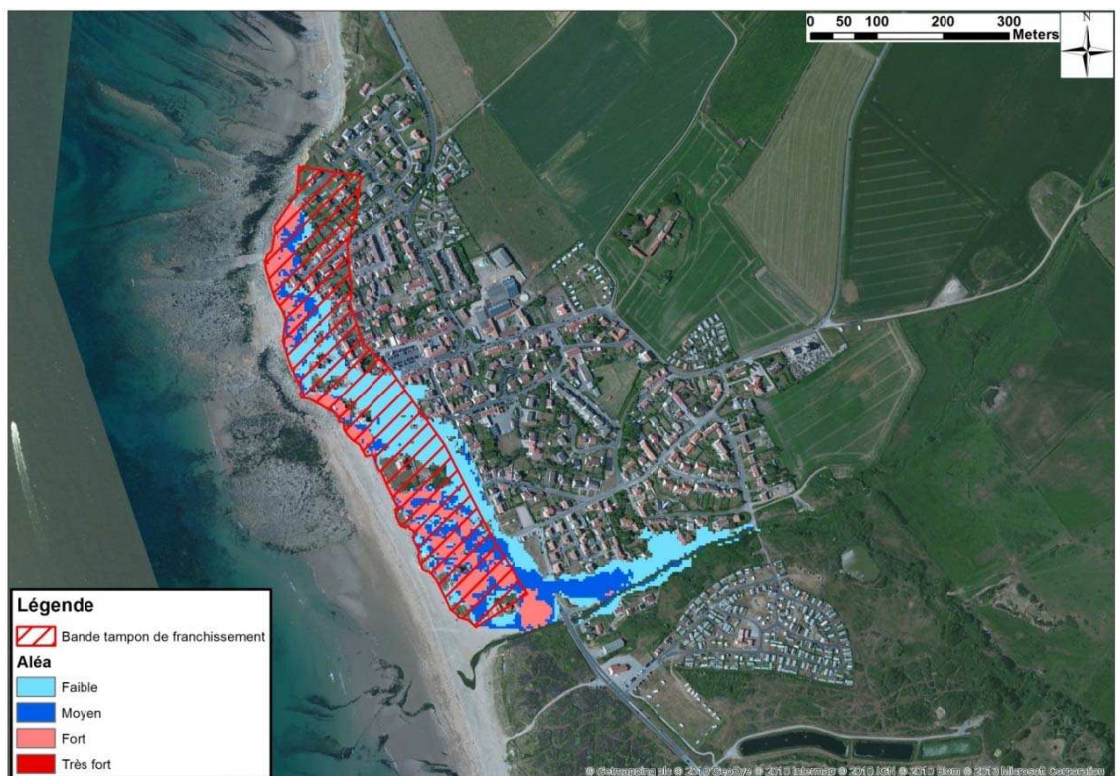


Figure 8-251 : Audresselles - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100

8.13 Ambleteuse - franchissement de perré

8.13.1 Hypothèses

Caractéristiques de l'ouvrage et des profils

Du fait de la variation de géométrie d'une extrémité à l'autre de ce perré, quatre profils transversaux distincts de la plage et de l'ouvrage ont été utilisés pour estimer le débit de franchissement.

Les différents paramètres des trois profils utilisés sont précisés dans les figures suivantes.



Figure 8-252 : Position des quatre profils retenus à Ambleteuse

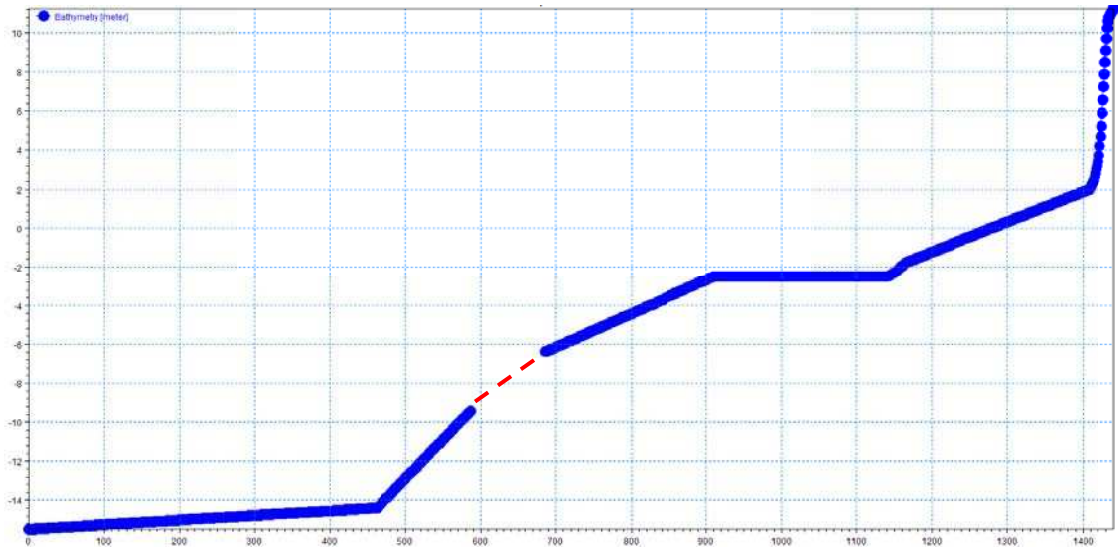


Figure 8-253 : Profil 1 (en rouge données incertaines sur le profil)

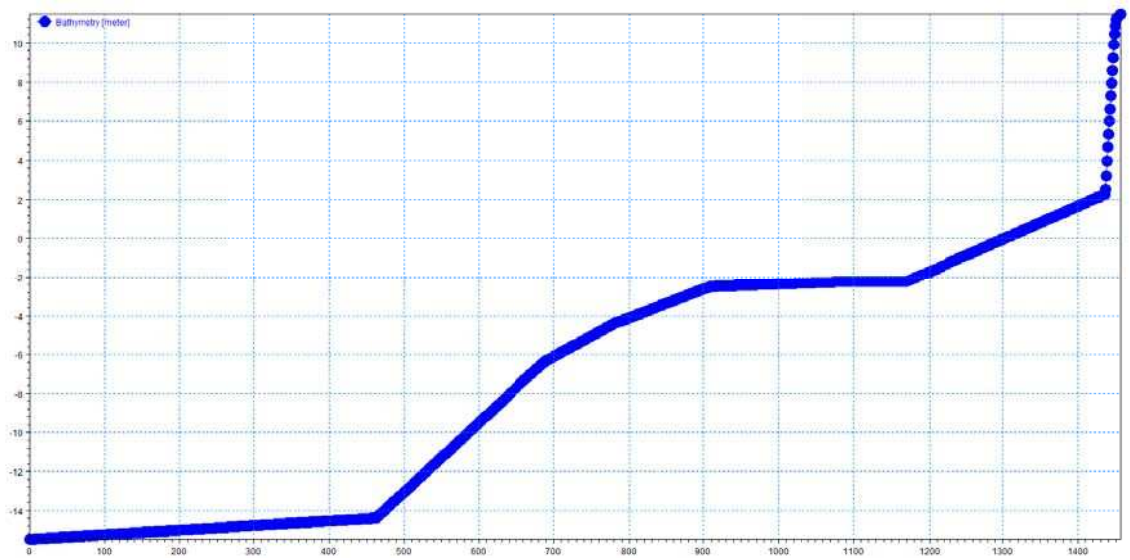


Figure 8-254 : Profil 2

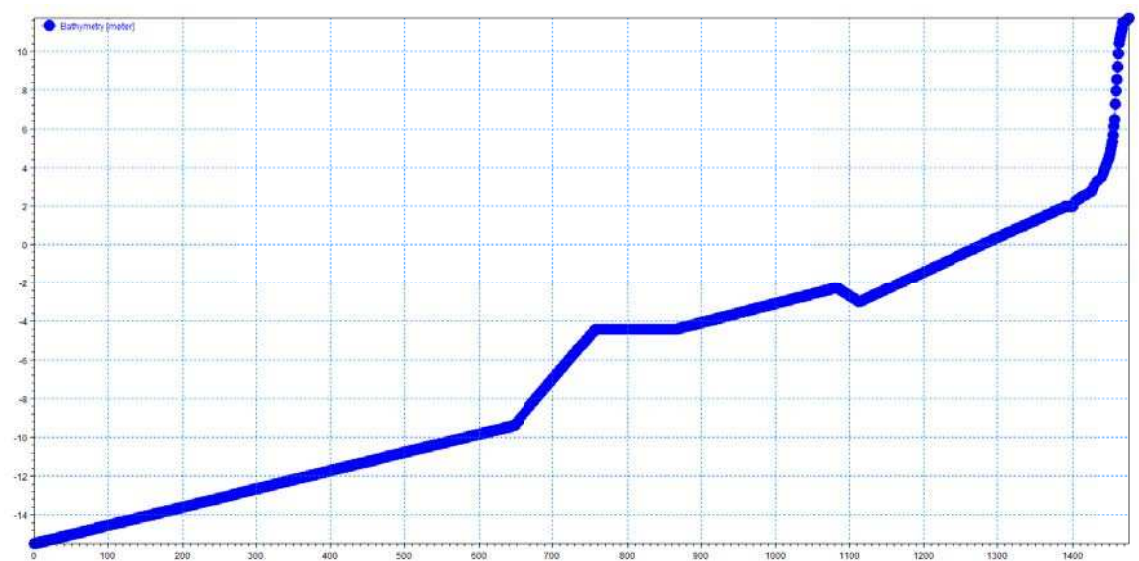


Figure 8-255 : Profil 3

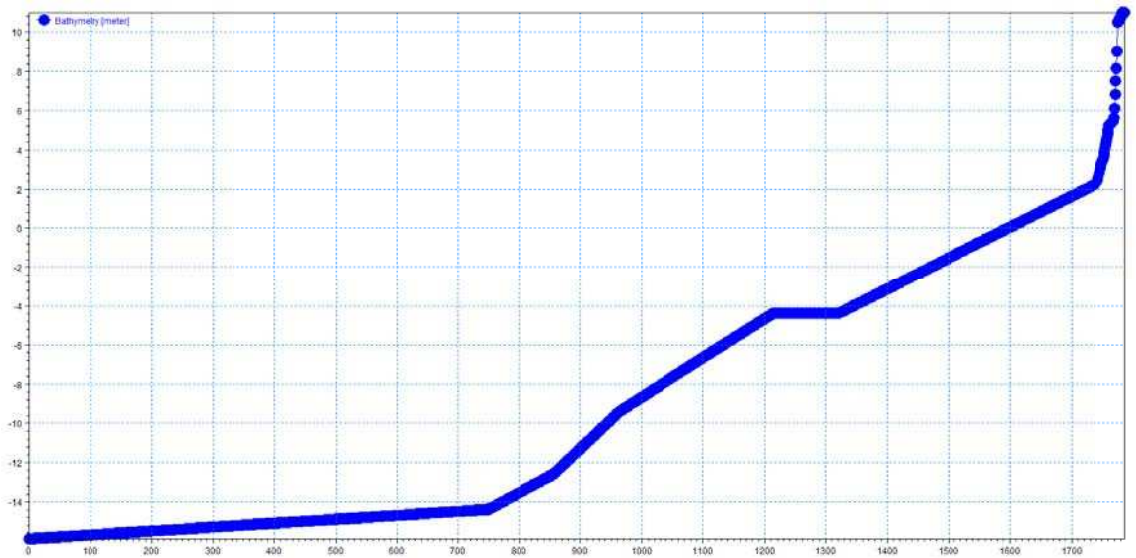


Figure 8-256 : Profil 4

A noter que la zone d'incertitude relevée sur le profil n°1, suffisamment éloignée de la côte, n'a aucune influence sur le calcul de la propagation de la houle et de l'estimation de ses impacts sur le littoral.

Tableau 8-54 : Paramètres des quatre profils utilisés à Ambleteuse

	Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4
Direction des houles (°N)	264	262	260	253
Cote du pied d'ouvrage (m IGN 69)	5	5	6	6
Cote du perré (m IGN 69)	11	11	10,50	10,50
Pente du perré (h / l)	1 / 1,53	1 / 1,53	1 / 1,11	1 / 1,11
Linéaire (m)	90	110	110	120

Conditions en mer et conditions au pied de l'ouvrage

Les niveaux marins extrêmes au large d'Ambleteuse ont été extraits des cartes du SHOM 2008 et 2012 pour les périodes de retour décennale et centennale (cf. paragraphe 4.3.1).



Figure 8-257 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement décennal est celui du SHOM 2008 identique à celui du SHOM 2012.

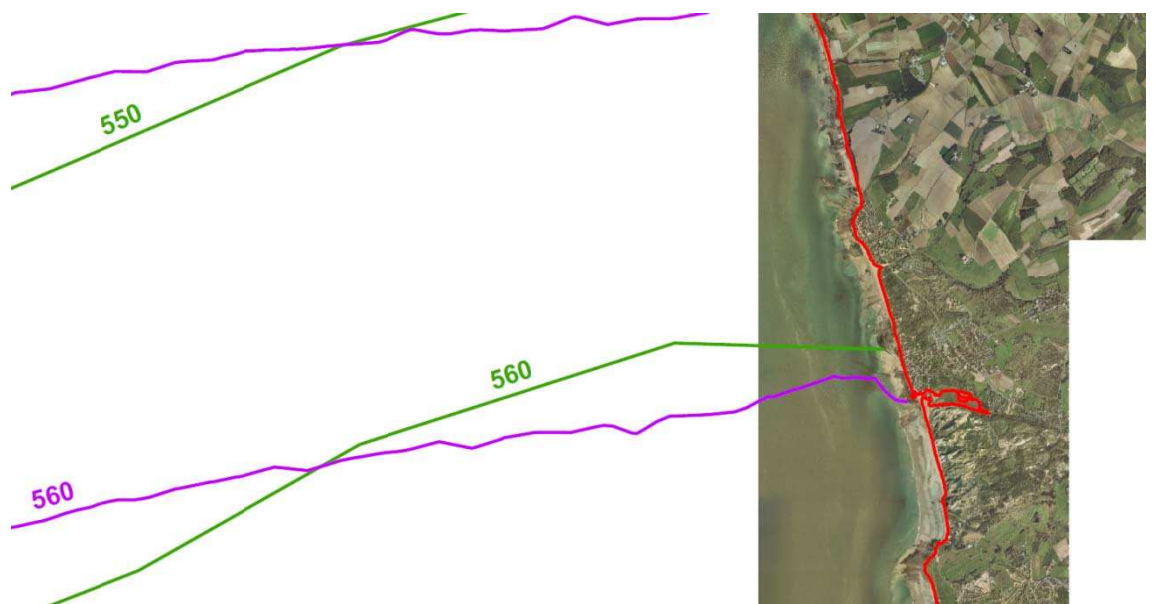


Figure 8-258 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Les deux livraisons du SHOM indiquent le même niveau à Ambleteuse pour l'évènement d'occurrence centennale.

Tableau 8-55 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Ambleteuse

	Niveau extrême de pleine-mer
T10	5,40
T100	5,60

La propagation des conditions de mer au large au pied de l'ouvrage d'Ambleteuse a été effectuée en 1D le long des profils précédemment décrits grâce au logiciel LITPACK (cf. paragraphe 4.6).

L'incertitude sur les hypothèses de calcul de la surcote de déferlement est de plus intégrée aux niveaux marins finaux (cf. paragraphe 4.3.3).

Tableau 8-56 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) à Ambleteuse

T10	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total au pied de l'ouvrage
Profil 1	5,40	-	0,40	0,06	5,86
Profil 2	5,40	-	0,27	0,06	5,73
Profil 3	5,40	-	-	0,04	- ³
Profil 4	5,40	-	-	0,03	- ⁴

T100	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total au pied de l'ouvrage
Profil 1	5,60	0,20	0,35	0,06	6,21
Profil 2	5,60	0,20	0,24	0,06	6,10

³ Le niveau marin n'atteint pas le pied d'ouvrage

⁴ Idem

Profil 3	5,60	0,20	0,48	0,04	6,32
Profil 4	5,60	0,20	0,46	0,03	6,29

T100 à l'horizon 2100	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total au pied de l'ouvrage
Profil 1	5,60	0,60	0,28	0,07	6,55
Profil 2	5,60	0,60	0,17	0,08	6,45
Profil 3	5,60	0,60	0,42	0,04	6,66
Profil 4	5,60	0,60	0,39	0,04	6,63

Tableau 8-57 : Houles (en m) à Ambleteuse

	Hauteur significative de la houle au large (m)	Période de la houle (s)	Hauteur significative de la houle au pied de l'ouvrage (m)			
			Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4
T10	3,7	8,28	1,02	1,51	0	0
T100	4,1	9	1,39	1,92	0,51	0,62 ⁵
T100 à l'horizon 2100	4,1	9	1,74	2,32	0,86	0,97

Les signaux de marée utilisés comme conditions aux limites du modèle au large ont été modifiés pour atteindre les niveaux extrêmes de pleine-mer calculés, comme présenté figure suivante.

⁵ : La moitié de la hauteur significative de la houle est plus grande que la profondeur d'eau en pied d'ouvrage, découvrant au creux de la houle. La hauteur de houle considérée pour ce profil est nulle, il n'y a donc pas de franchissements par paquets de mer.

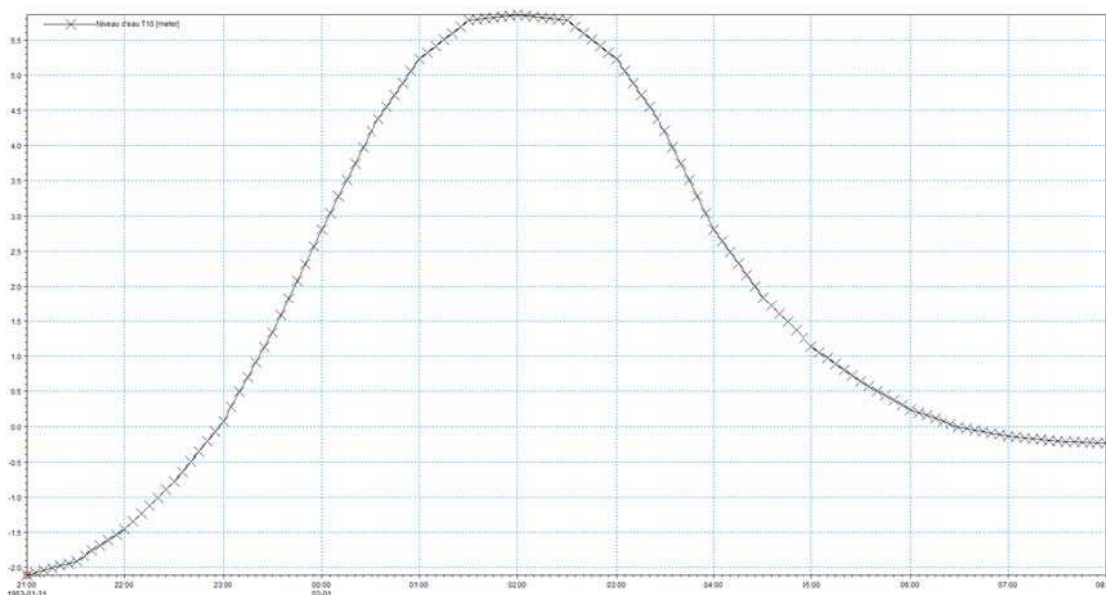


Figure 8-259 : Marégramme utilisé au large d'Ambleteuse pour T10

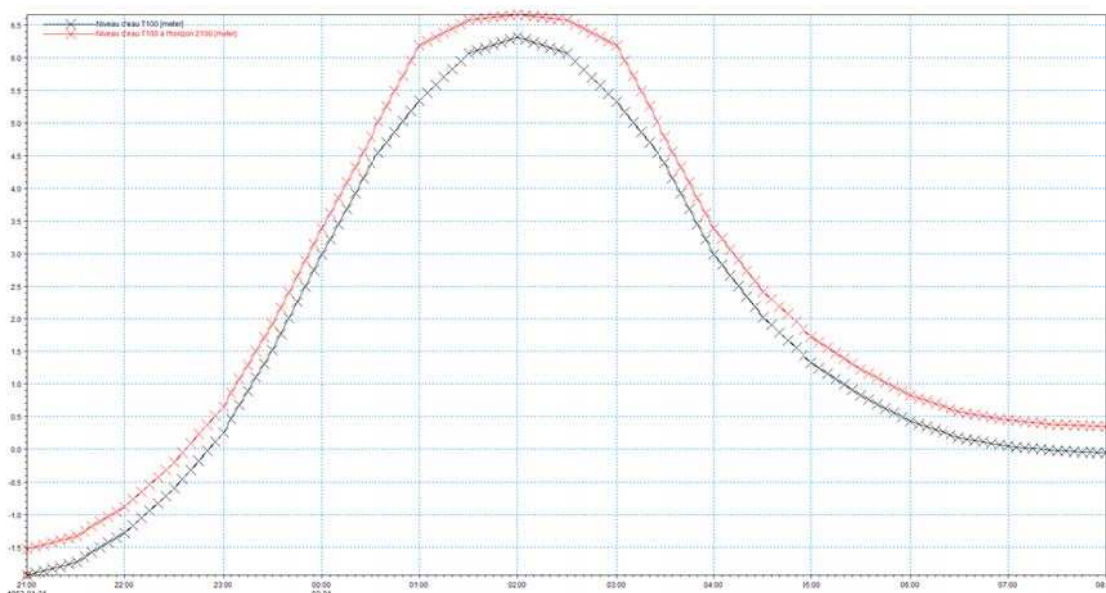


Figure 8-260 : Marégrammes utilisés au large d'Ambleteuse pour T100 et T100 à l'horizon 2100

Seul un cycle de marée a été simulé puisque la seconde pleine-mer, plus basse, n'apporte aucun risque de franchissement.

Les débits injectés dans le modèle hydrodynamique terrestre

L'estimation des débits de franchissement a été effectuée à l'aide de la formule empirique proposée dans le « Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures - Assessment Manual ».

Tableau 8-58 : Calculs des débits linéiques injectés dans le modèle

	Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4

10 ans	Revanche au niveau de pleine-mer (m)	5,14	5,27	-	-
	Débit linéique maximal (l/s/m)	0,1	0,3	-	-
100 ans	Revanche au niveau de pleine-mer (m)	4,79	4,90	4,18	-
	Débit linéique maximal (l/s/m)	89	269	0	-
100 ans à l'horizon 2100	Revanche au niveau de pleine-mer (m)	4,45	4,55	3,84	3,91
	Débit linéique maximal (l/s/m)	265	479	0	0

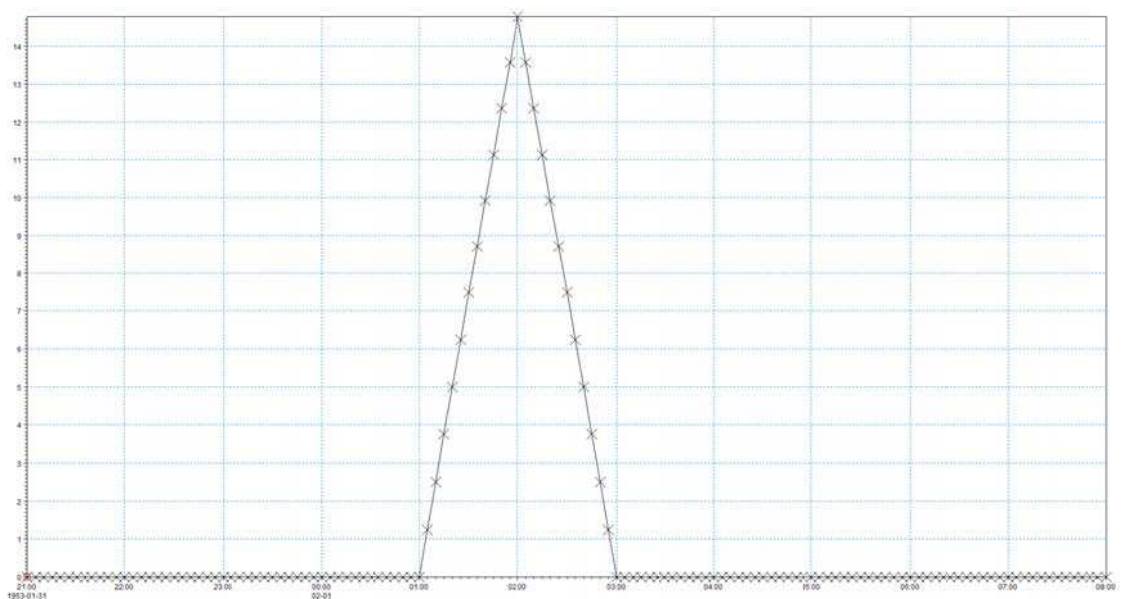


Figure 8-261 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 1 (10 ans)

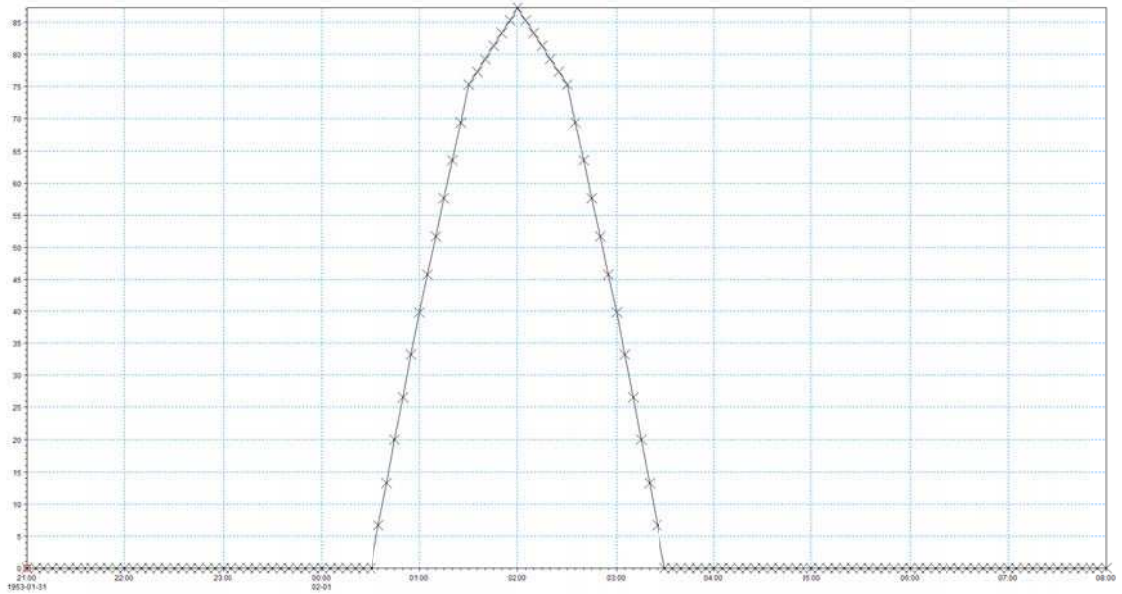


Figure 8-262 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 2 (10 ans)

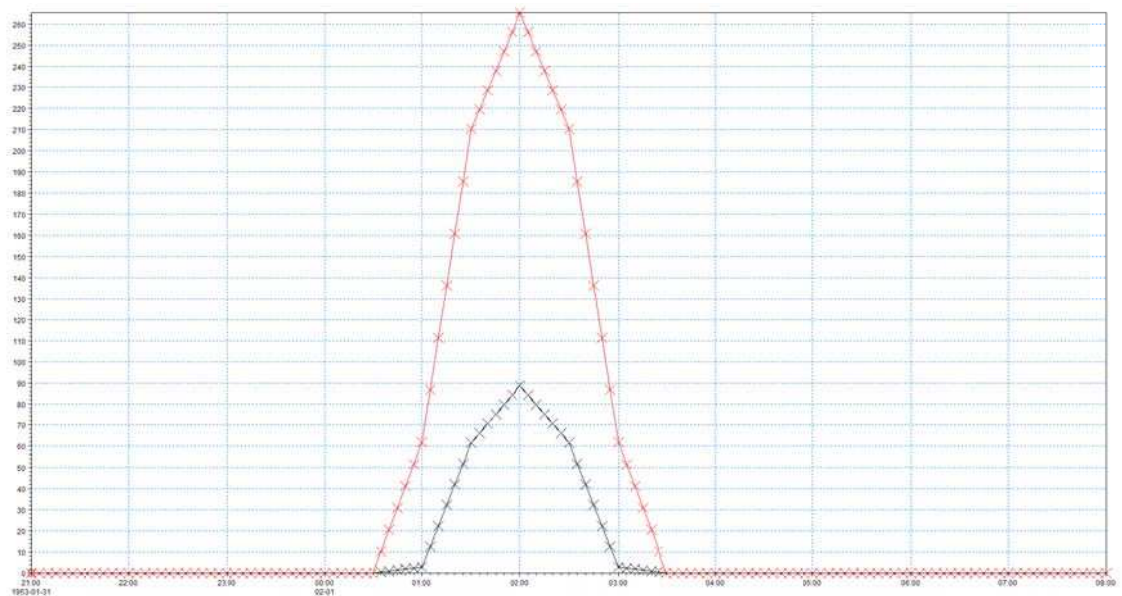


Figure 8-263 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 1 (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))

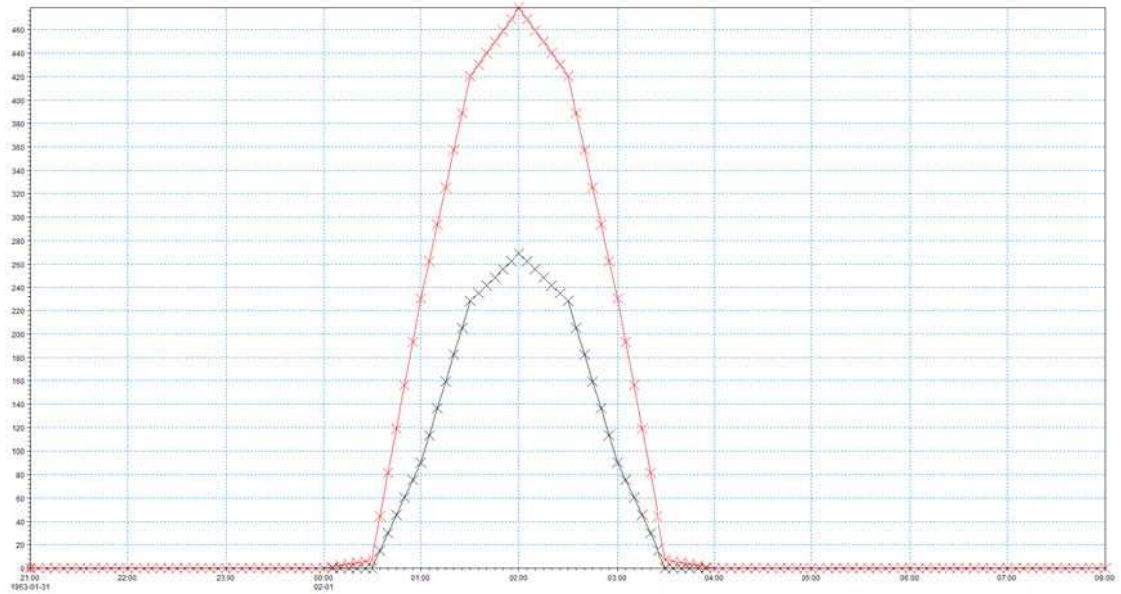


Figure 8-264 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 2 (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))

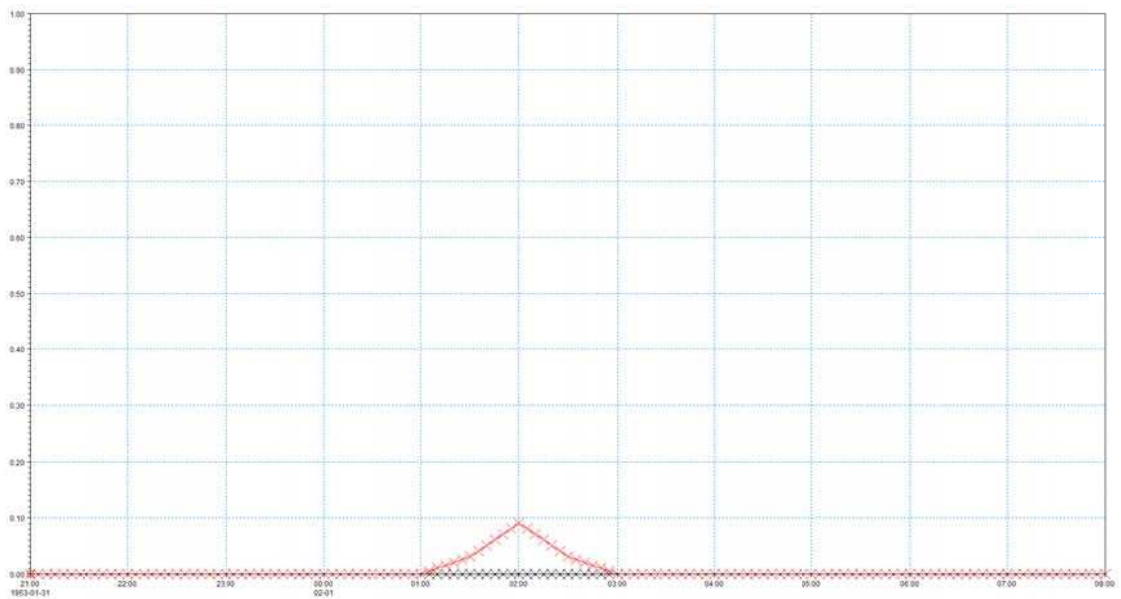


Figure 8-265 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 3 (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))

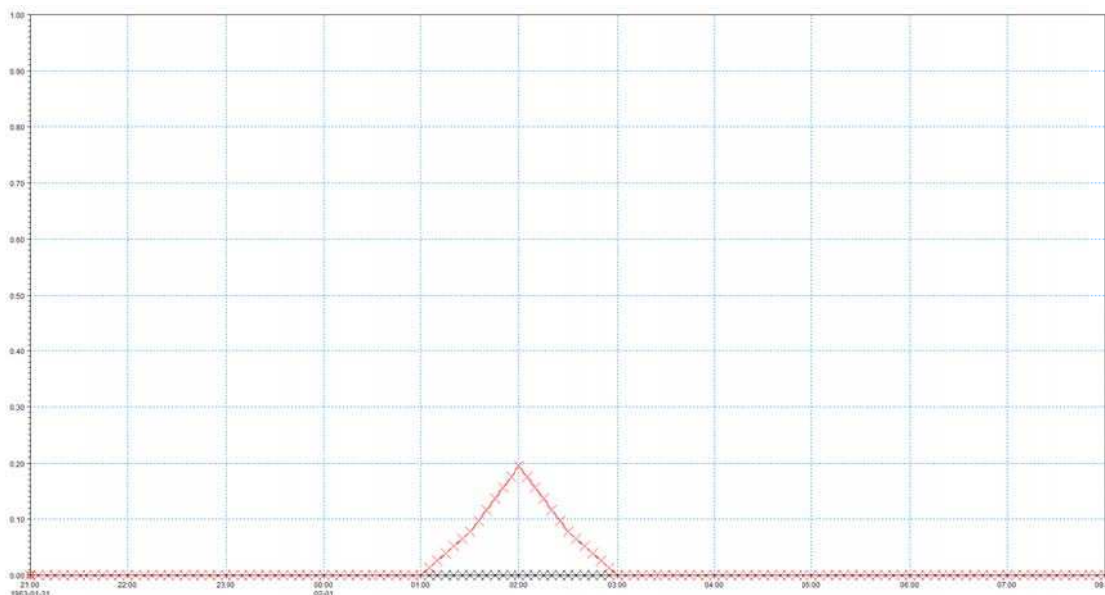


Figure 8-266 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre pour le profil 4 (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))

8.13.2 Dynamique de submersion

Sur le perré, les franchissements sont très faibles et ne provoquent pas d'inondation au-delà du front de mer, à part au Nord de la zone où les inondations affectent les premières rangées de maison au plus près de la digue et notamment le Hameau de la Plage. Les inondations dans le secteur proche de la Slack sont contrôlées par le débordement de la mer depuis le lit du cours d'eau. Certains de ces secteurs habités présentent en effet une topographie inférieure au niveau marin centennal, et peuvent donc être submergés par débordement.

Pour les deux scénarios simulés, les inondations provoquées par le débordement de la Slack restent limitées au Sud de la rue de Fort et de la rue de l'Ecluse.

8.13.3 Cartographie

La bande de 100 m couvre l'ensemble du perré.

Cartographie des aléas 10 ans

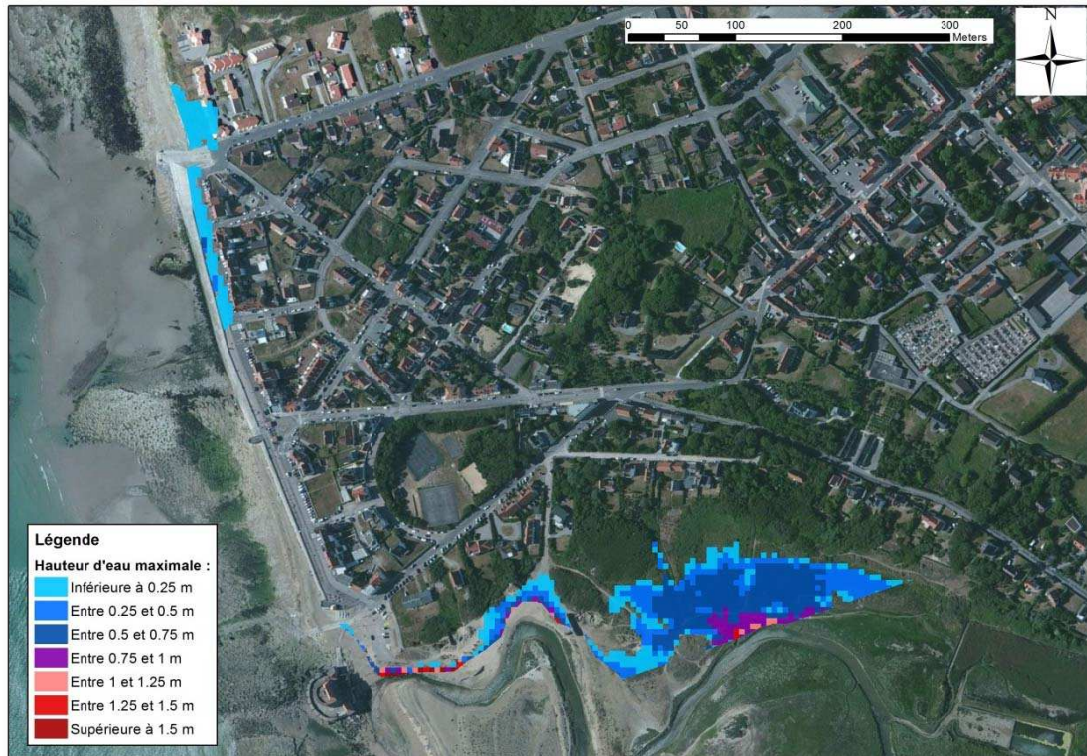


Figure 8-267 : Ambleteuse - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal

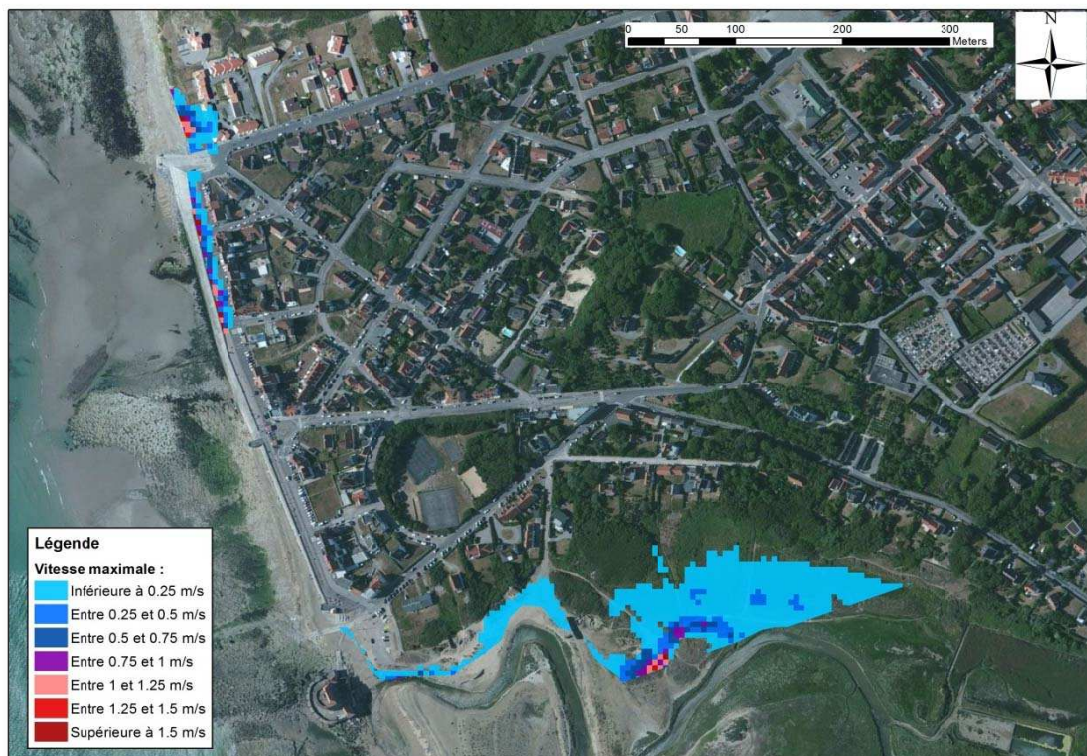


Figure 8-268 : Ambleteuse - Cartographie de la vitesse de submersion modélisée pour un événement décennal

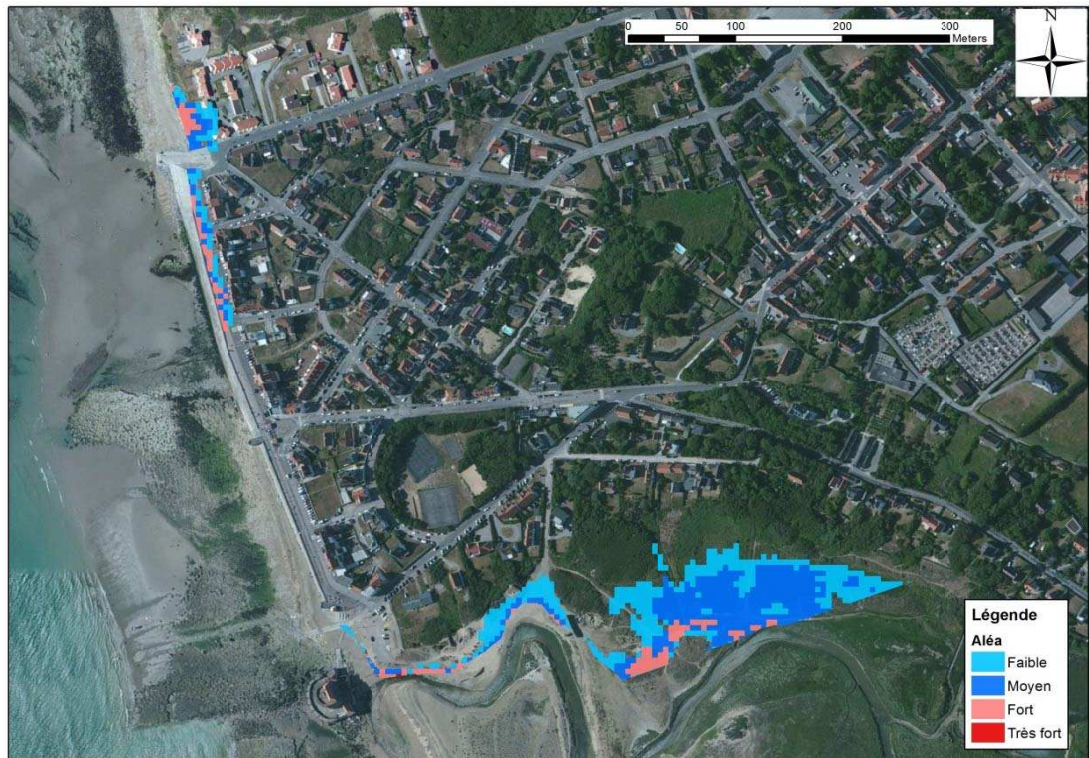


Figure 8-269 : Ambleteuse - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal

Cartographie des aléas 100 ans

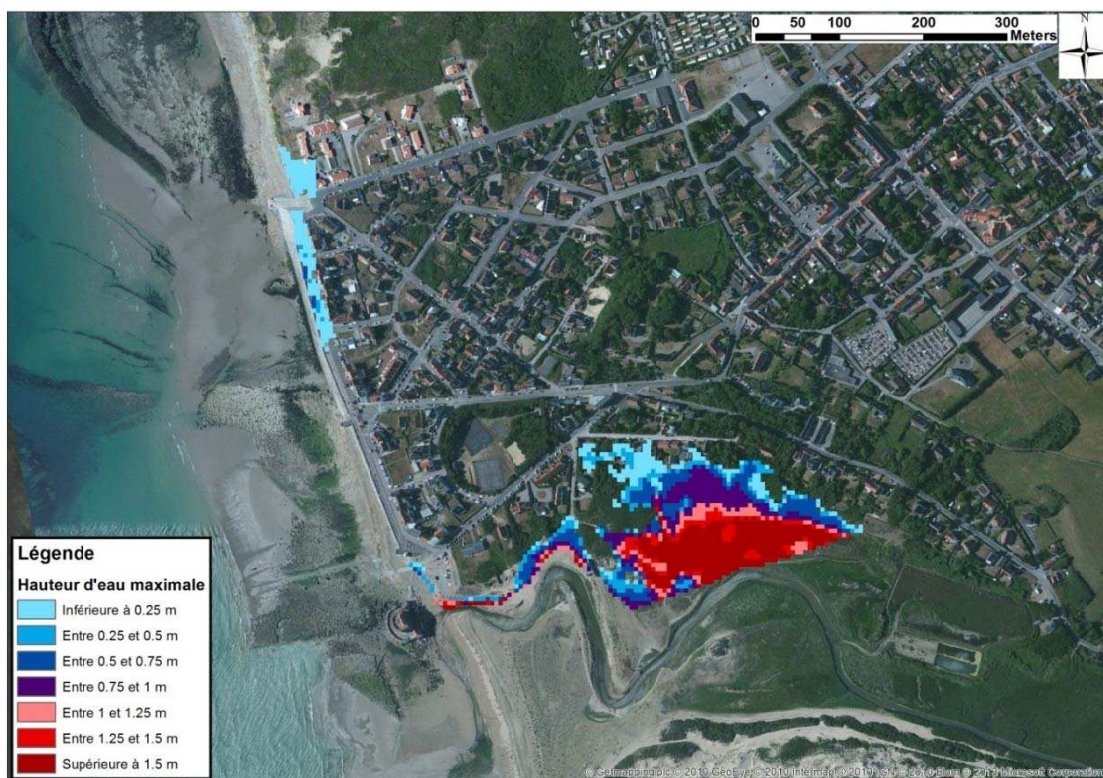


Figure 8-270 : Ambleteuse - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal



Figure 8-271 : Ambleteuse - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal

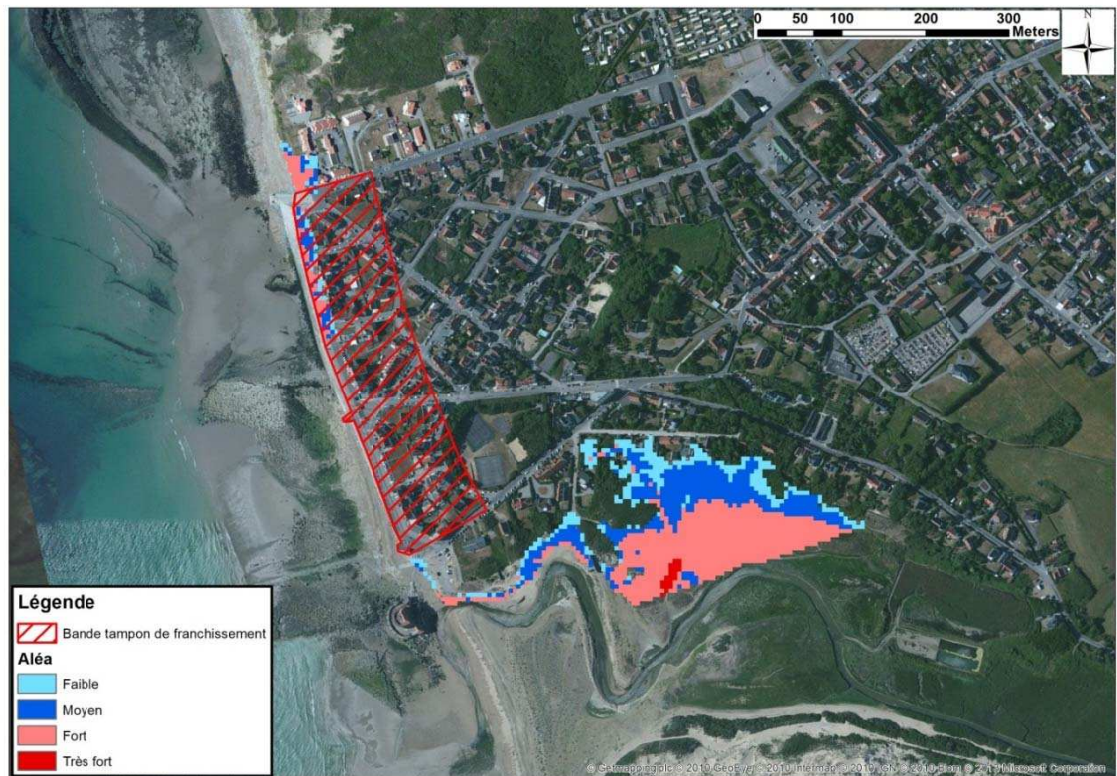


Figure 8-272 : Ambleuse - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal

Cartographie des aléas 100 ans à l'échéance 2100

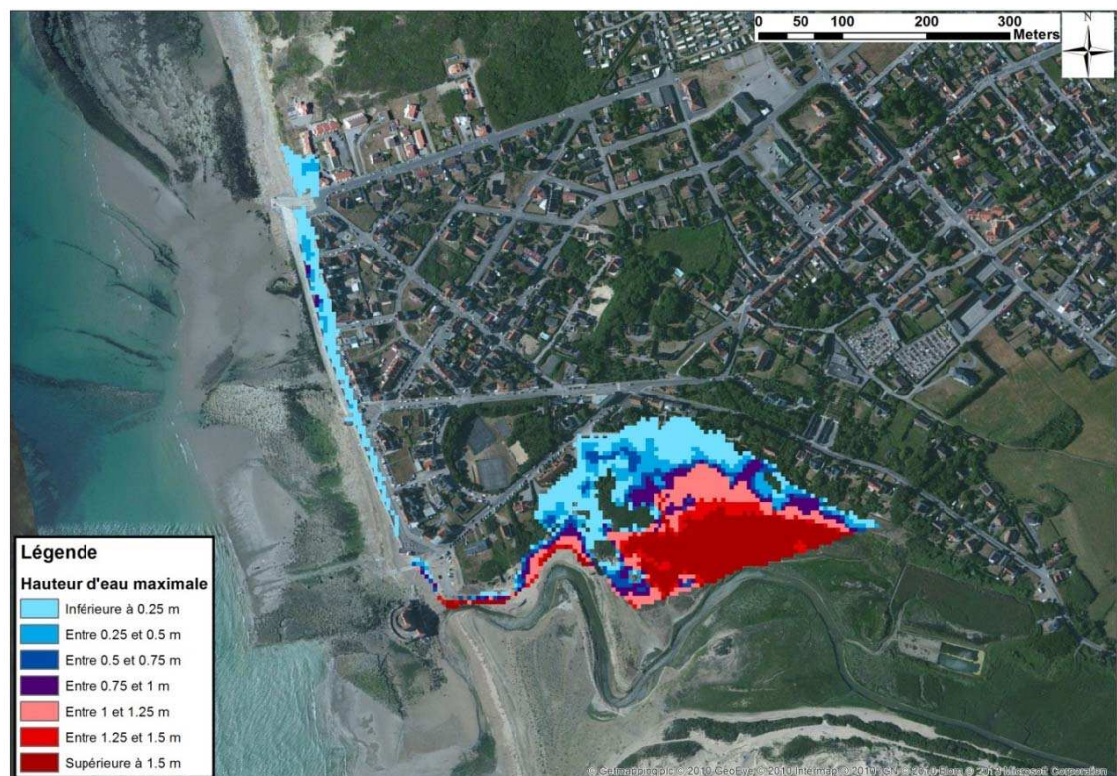


Figure 8-273 : Ambleuse - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100



Figure 8-274 : Ambleuse - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

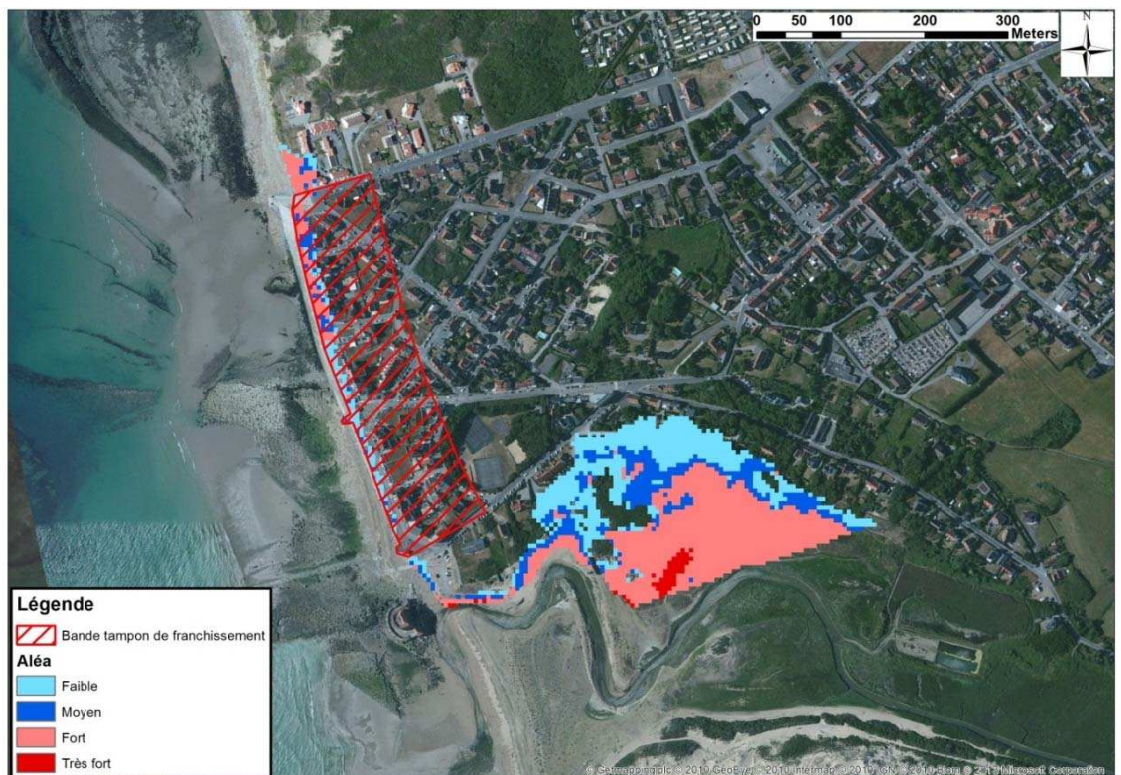


Figure 8-275 : Ambleuse - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100

8.14 Wimereux - franchissement de perré

8.14.1 Hypothèses

Caractéristiques de l'ouvrage et des profils

La géométrie de ce perré étant uniforme sur toute sa longueur, un unique profil transversal de la plage et de l'ouvrage a permis d'estimer le débit de franchissement.

Les différents paramètres de ce profil sont précisés dans les figures suivantes.

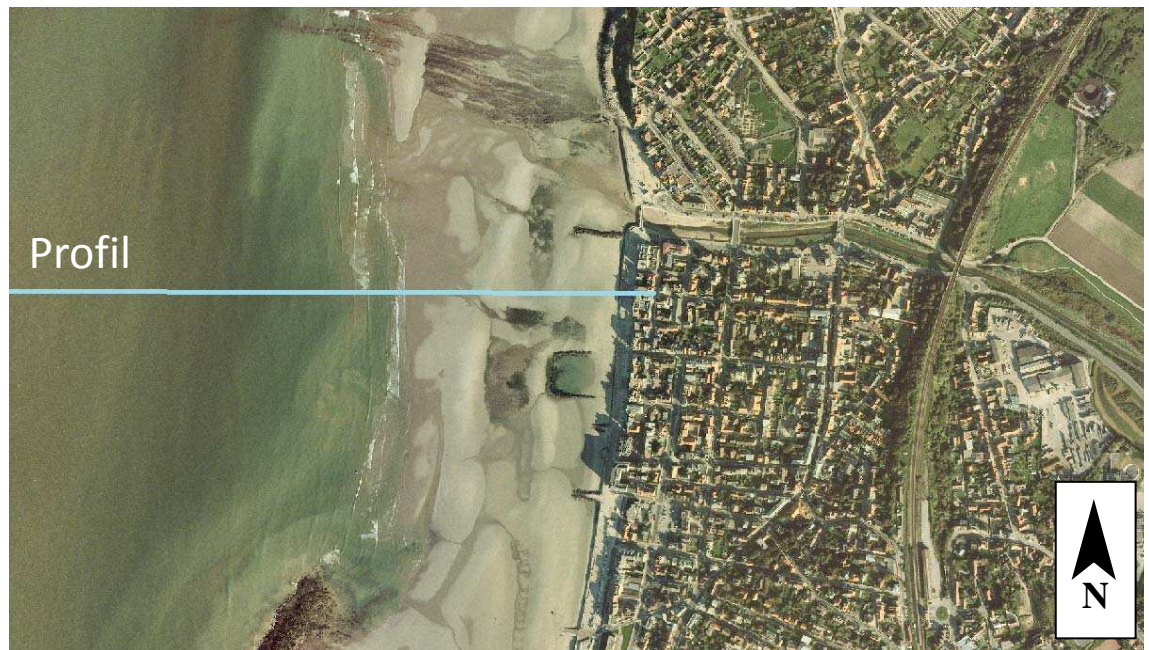


Figure 8-276 : Position du profil retenu à Wimereux



Figure 8-277 : Profil retenu à Wimereux

A noter que le couronnement du perré a été intégré au calcul des débits de franchissement.

Tableau 8-59 : Paramètre du profil utilisé pour calculer les franchissements à Wimereux

Direction des houles (°N)	273
Cote du perré (m IGN 69)	7,00
Cote du pied d'ouvrage (m IGN 69)	3,52
Pente du perré (h / l)	1 / 1,88
Linéaire (m)	475

Conditions en mer et conditions au pied de l'ouvrage

Les niveaux marins extrêmes au large de Wimereux ont été extraits des cartes du SHOM 2008 pour les périodes de retour décennale et centennale (cf. paragraphe 4.3.1).



Figure 8-278 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement décennal est celui du SHOM 2008 supérieur à celui du SHOM 2012.



Figure 8-279 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement d'occurrence centennale est celui du SHOM 2008 supérieur à celui du SHOM 2012 sur le site de Wimereux.

Tableau 8-60 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Wimereux

	Niveau extrême de pleine-mer
T10	5,40
T100	5,70

La propagation des conditions de mer au large au pied de l'ouvrage de Wimereux a été effectuée en 1D le long du profil précédemment décrit grâce au logiciel LITPACK (cf. paragraphe 4.6).

L'incertitude sur les hypothèses de calcul de la surcote de déferlement est de plus intégrée aux niveaux marins finaux (cf. paragraphe 4.3.3).

Tableau 8-61 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) à Wimereux

T10	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total au pied de l'ouvrage
Profil 1	5,40	-	0,11	0,05	5,56

T100	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total au pied de l'ouvrage
Profil 1	5,70	0,20	0,13	0,06	6,09

T100 à l'horizon 2100	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total au pied de l'ouvrage
Profil 1	5,70	0,60	0,11	0,06	6,47

Tableau 8-62 : Houles (en m) à Wimereux

	Hauteur significative de la houle au large (m)	Période de la houle (s)	Hauteur significative de la houle au pied de l'ouvrage (m)
T10	3,6	8,28	1,95
T100	4,3	9	1,48
T100 à l'horizon 2100	4,3	9	2,52

Les signaux de marée utilisés comme conditions aux limites du modèle au large ont été modifiés pour atteindre les niveaux extrêmes de pleine-mer calculés, comme présenté figure suivante.

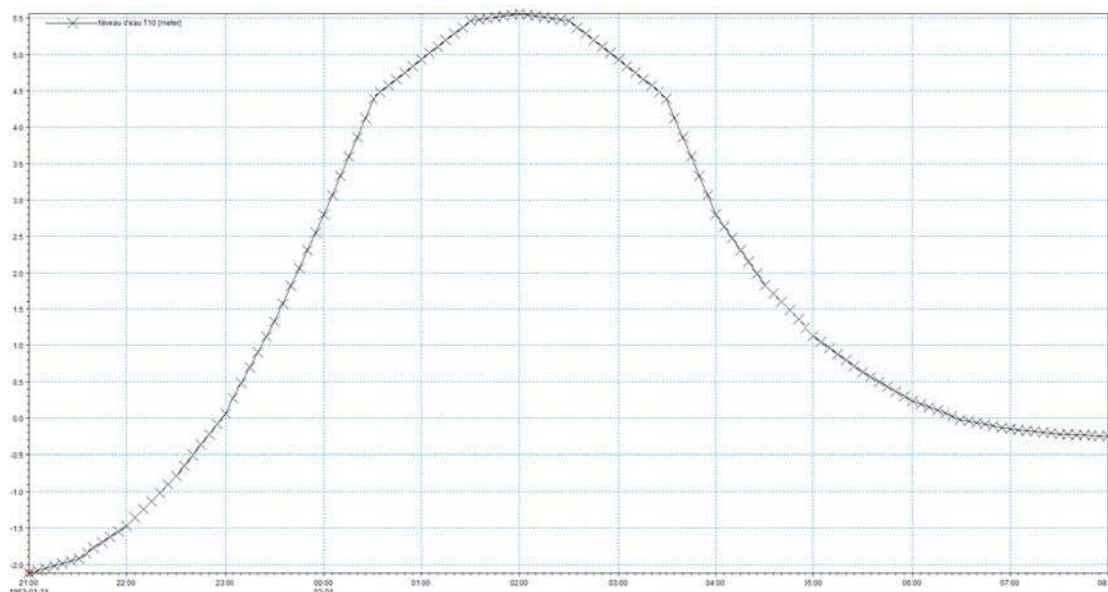


Figure 8-280 : Marégramme utilisé au large de Wimereux pour T10

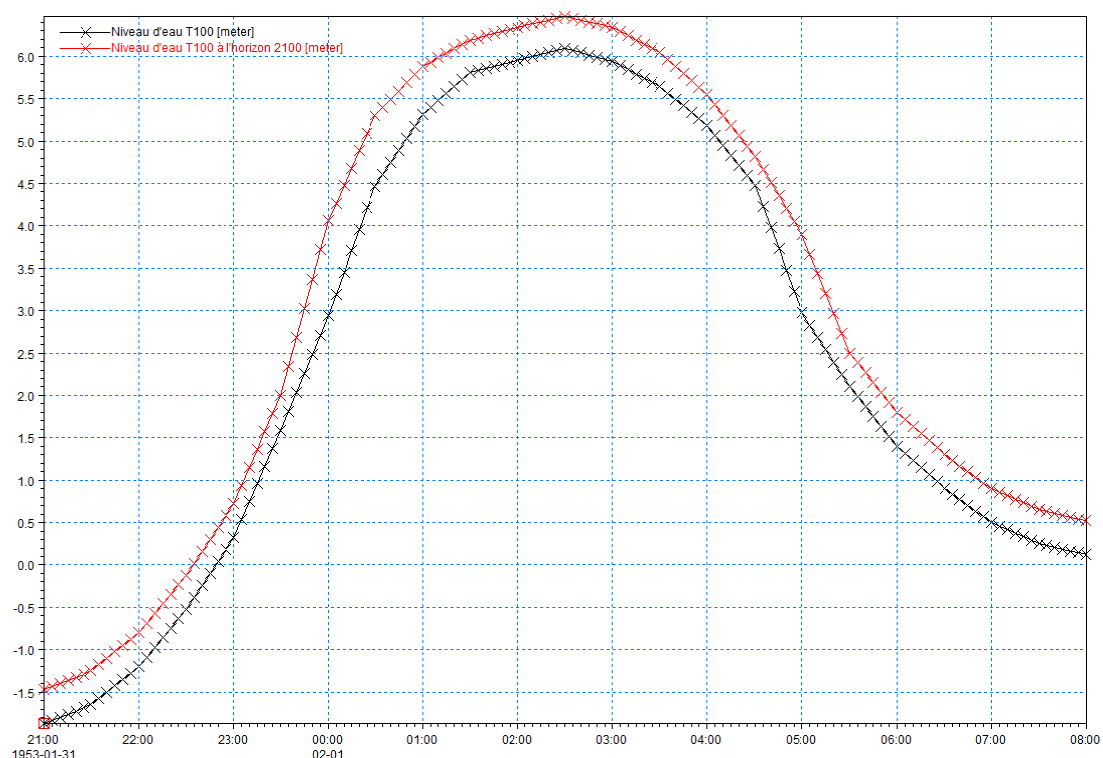


Figure 8-281 : Marégrammes utilisés au large de Wimereux pour T100 et T100 à l'horizon 2100

Les débits injectés dans le modèle hydrodynamique terrestre

L'estimation des débits de franchissement a été effectuée à l'aide de la formule empirique proposée dans le « Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures - Assessment Manual ».

Tableau 8-63 : Calculs des débits linéiques injectés dans le modèle

10 ans	Revanche au niveau de pleinem- mer (m)	1,46
	Débit linéique maximal (l/s/m)	1097
100 ans	Revanche au niveau de pleinem- mer (m)	0,94
	Débit linéique maximal (l/s/m)	1232
100 ans à l'horizon 2100	Revanche au niveau de pleinem- mer (m)	0,55
	Débit linéique maximal (l/s/m)	3004

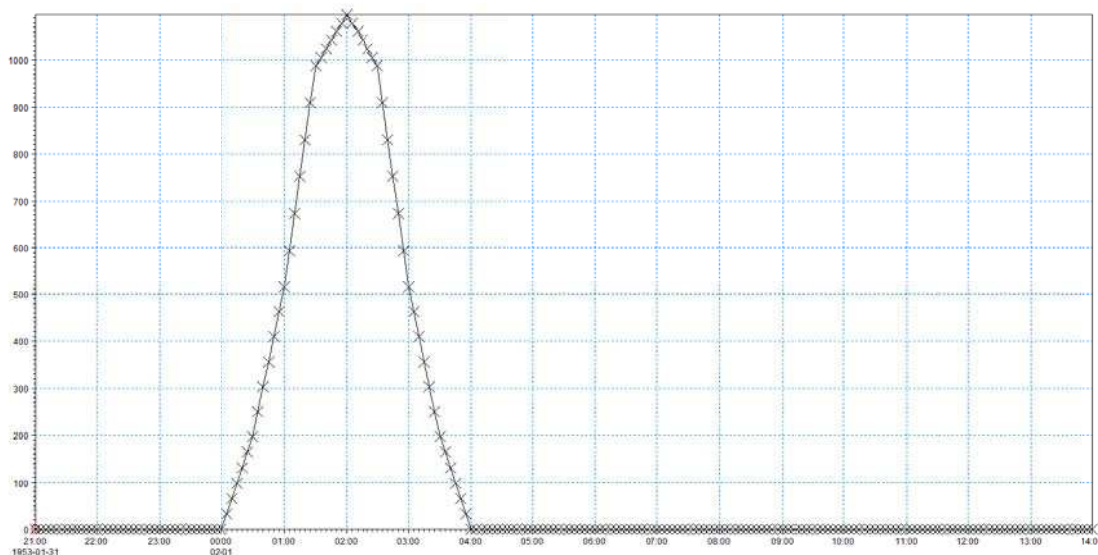


Figure 8-282 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre (10 ans)

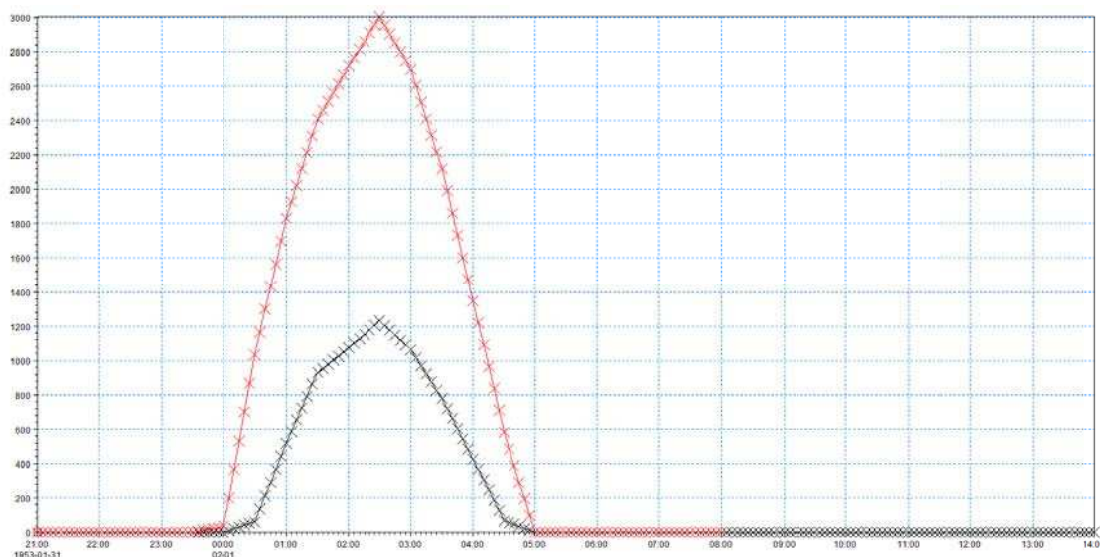


Figure 8-283 : Débits franchissant (en l/s/m) injectés dans le modèle terrestre (100 ans(en noir) et 100 ans horizon 2100 (en rouge))

8.14.2 Dynamique de submersion

Les inondations sur la partie Ouest de Wimereux sont majoritairement dues aux franchissements, qui n'affectent globalement que les premières rangées de maisons au plus près du front de mer.

Pour l'aléa T100 à l'horizon 2100, quelques débordements ont lieu depuis le lit du cours d'eau vers les quartiers à l'Ouest de la voie SNCF, comme le présente la cartographie suivante faisant figurer les directions d'écoulement. L'inondation sur les quartiers au Nord du cours d'eau pour l'aléa T100 à l'horizon 2100 est causée par le débordement du cours d'eau qui débute une heure avant la pleine-mer qui submerge principalement les points bas de la topographie comme le jardin de la Baie St-Jean.

Pour les deux aléas simulés, le niveau dans le cours d'eau est tel qu'il provoque un débordement sur les berges dans le secteur situé à l'Est de la voie SNCF. Pour l'aléa T100, l'inondation se limite globalement aux abords du lit majeur du cours d'eau. Pour l'aléa T100 à l'horizon 2100, les écoulements surversent la D233 (près de la voie ferrée et près du croisement avec la D433) et se propagent vers le Sud.

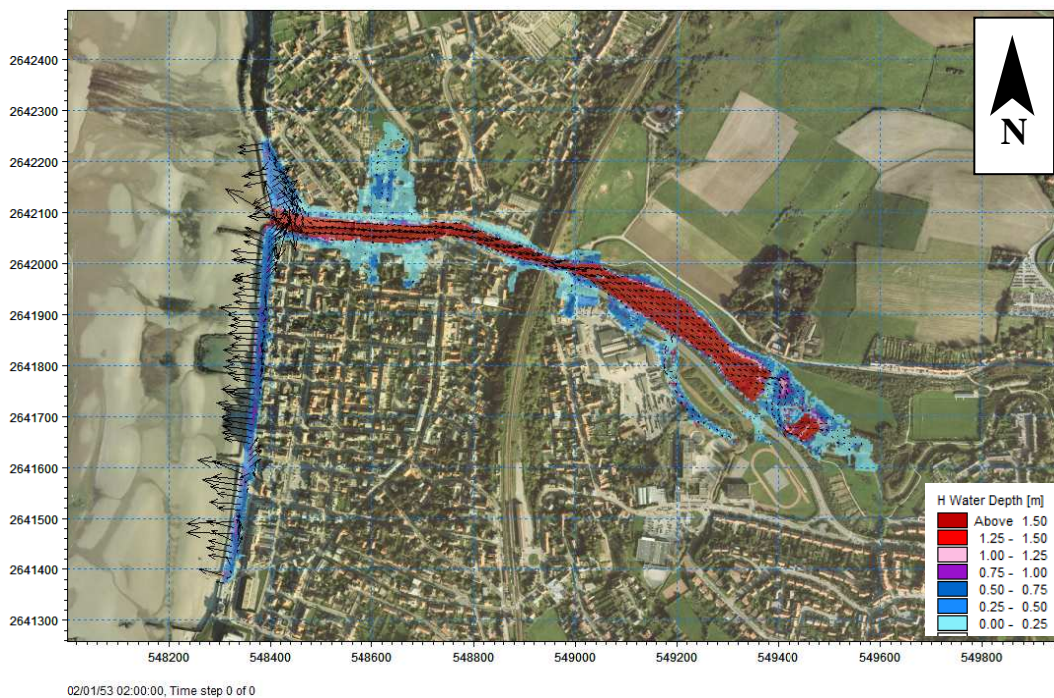


Figure 8-284 : Propagation de l'inondation pour l'aléa T100 à l'horizon 2100

8.14.3 Cartographie

La bande de 100 m couvre l'ensemble du perré.

Cartographie des aléas 10 ans

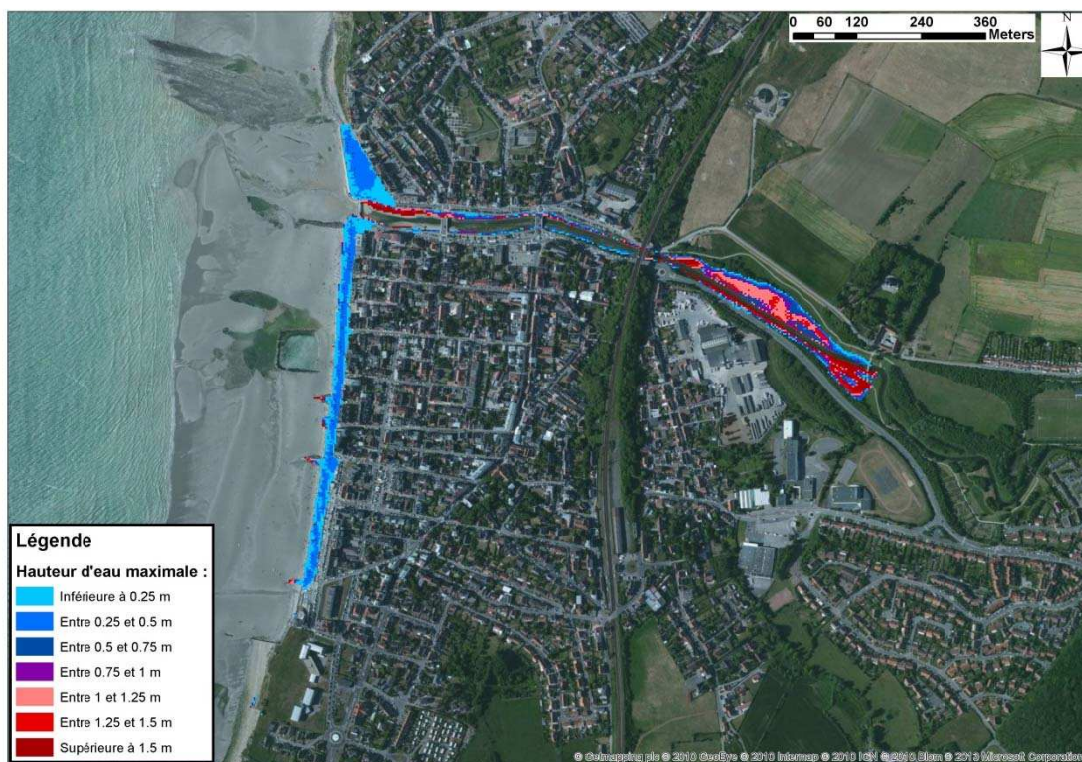


Figure 8-285 : Wimereux - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal

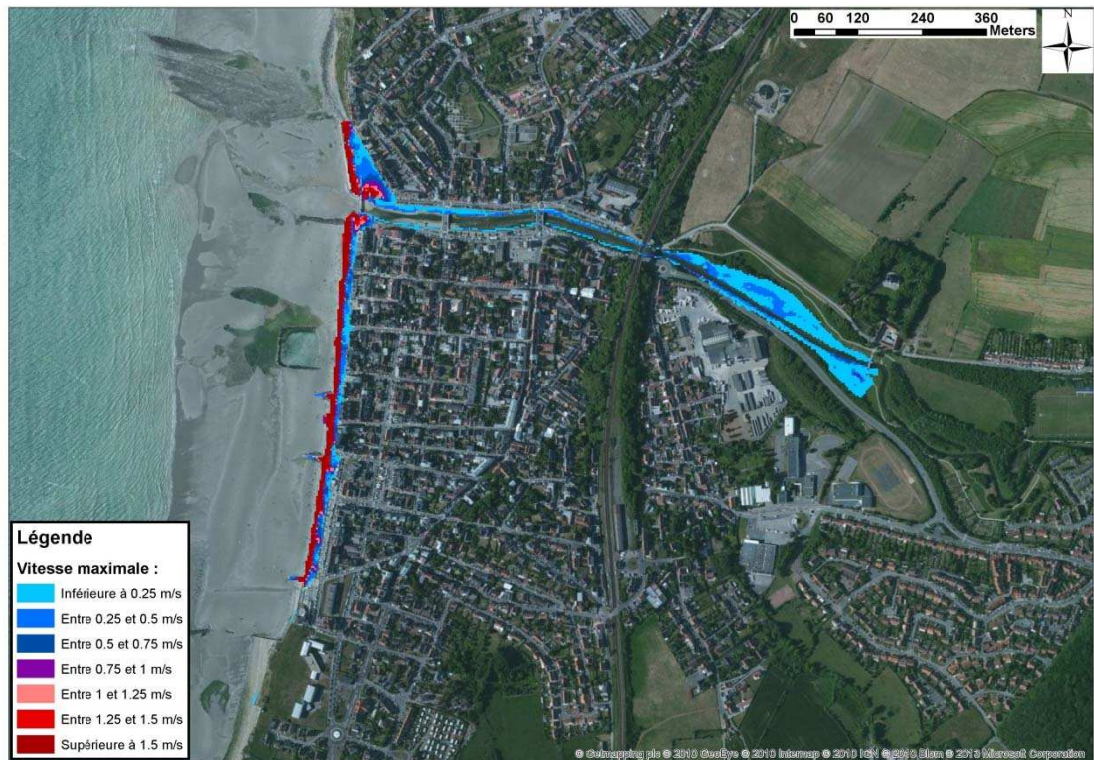


Figure 8-286 : Wimereux - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal

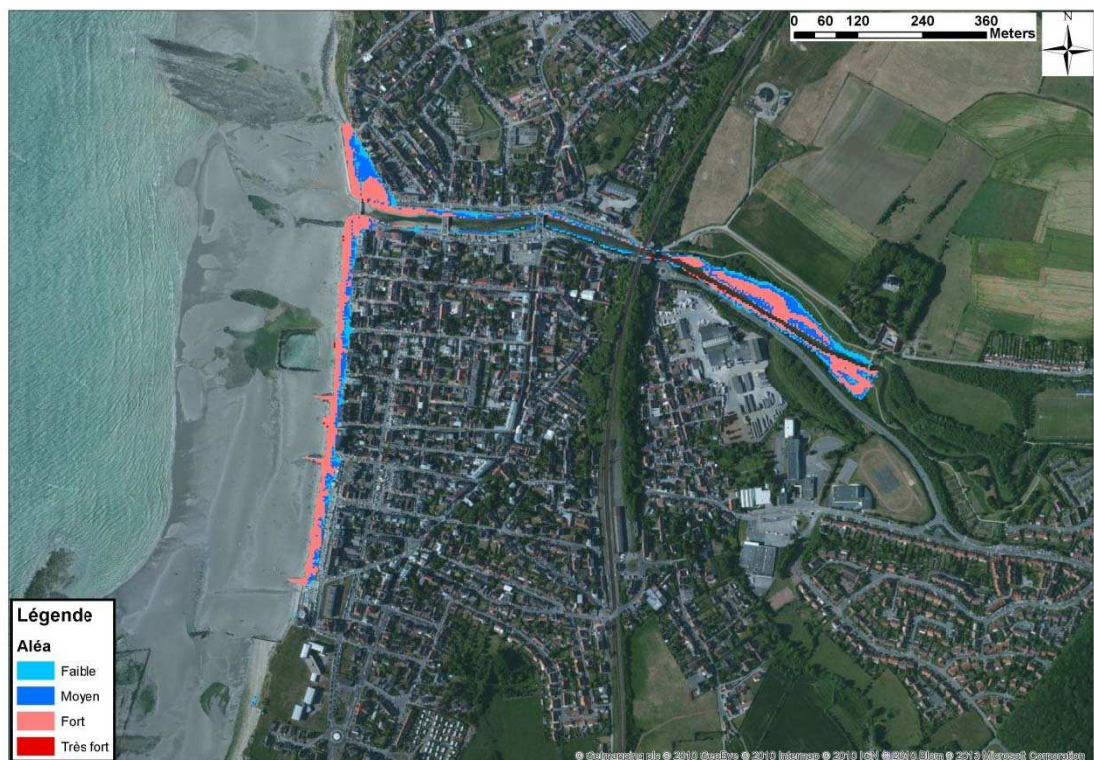


Figure 8-287 : Wimereux - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal

Cartographie des aléas 100 ans

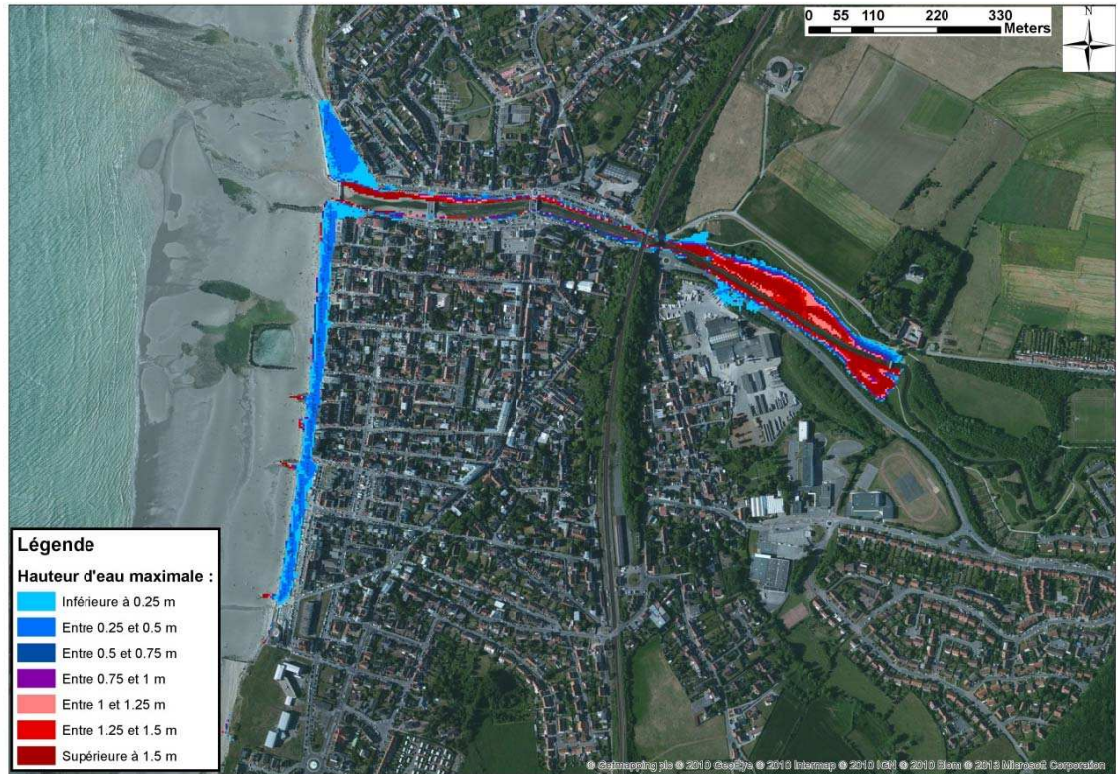


Figure 8-288 : Wimereux - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal

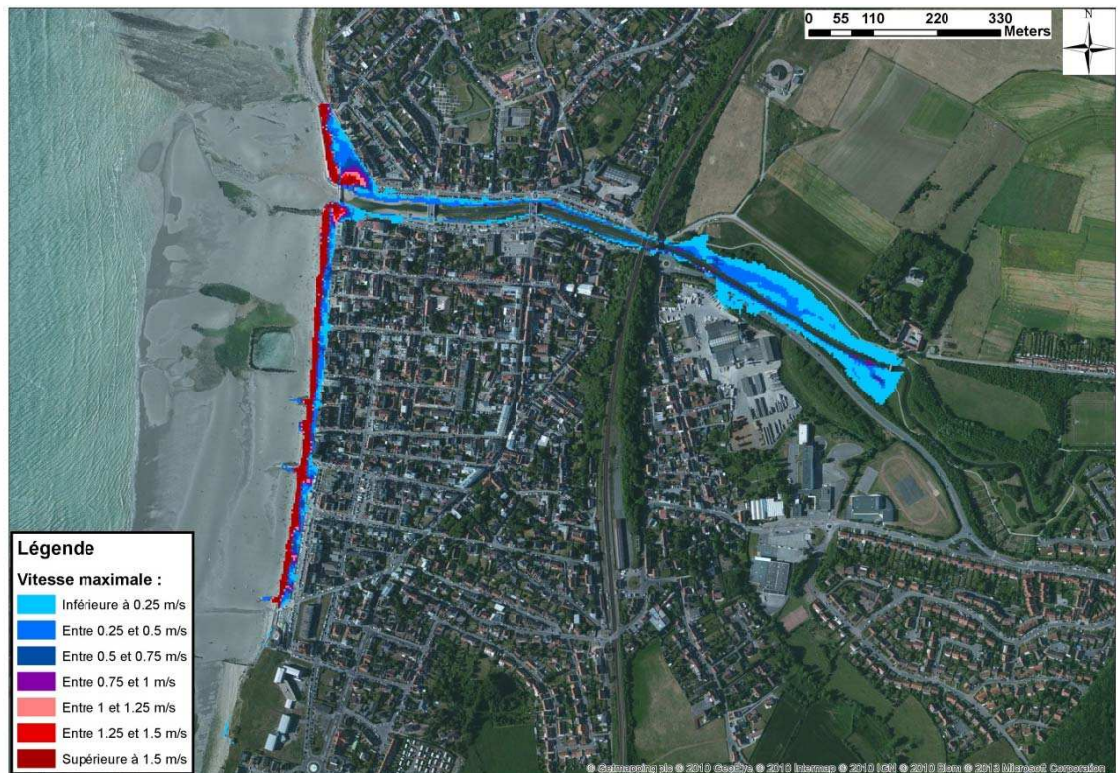


Figure 8-289 : Wimereux - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal

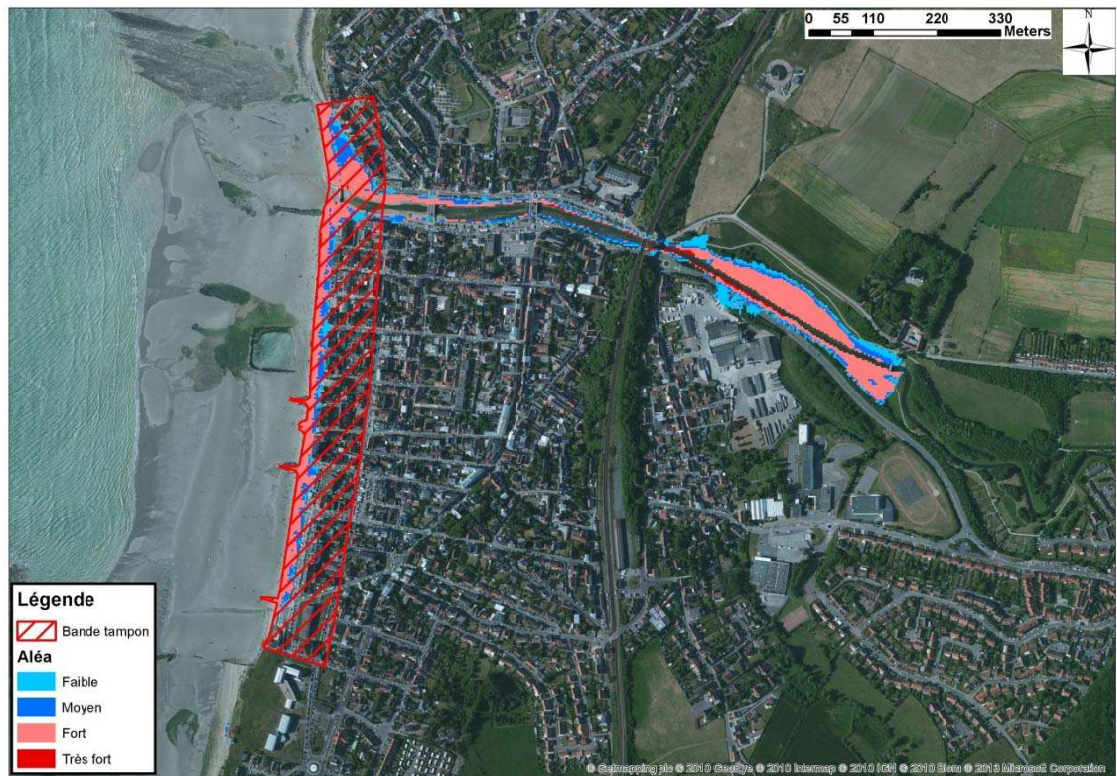


Figure 8-290 : Wimereux - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal

Cartographie des aléas 100 ans à l'échéance 2100

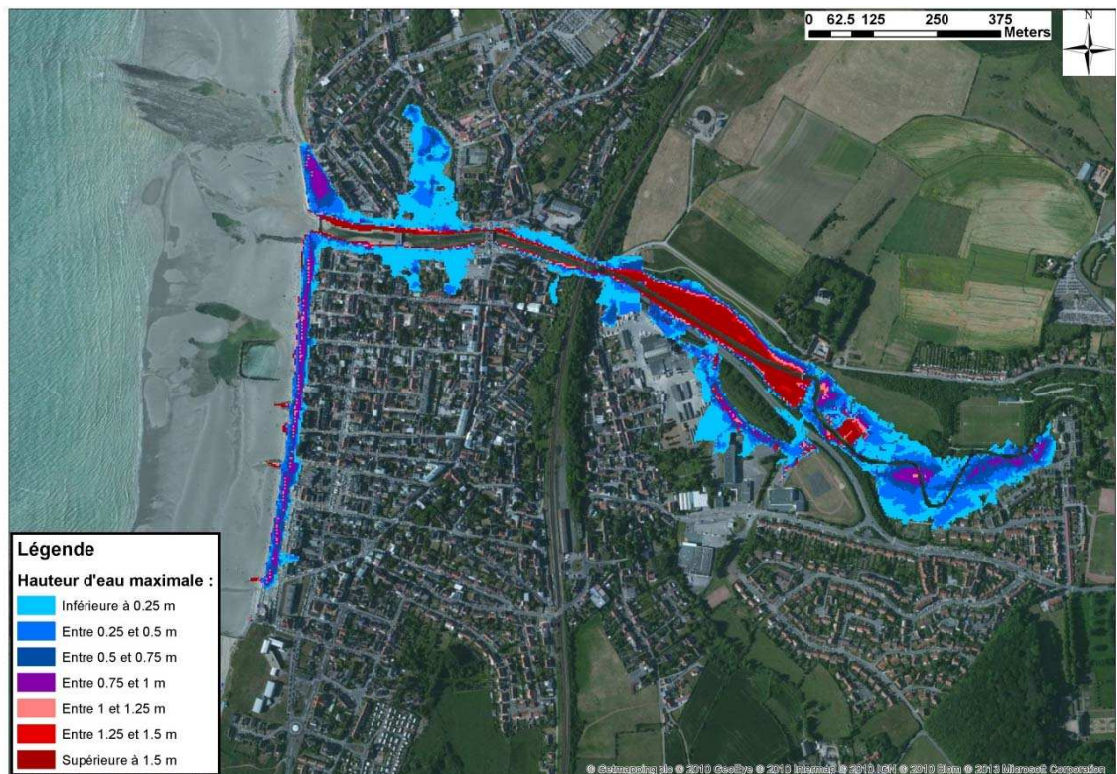


Figure 8-291 : Wimereux - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

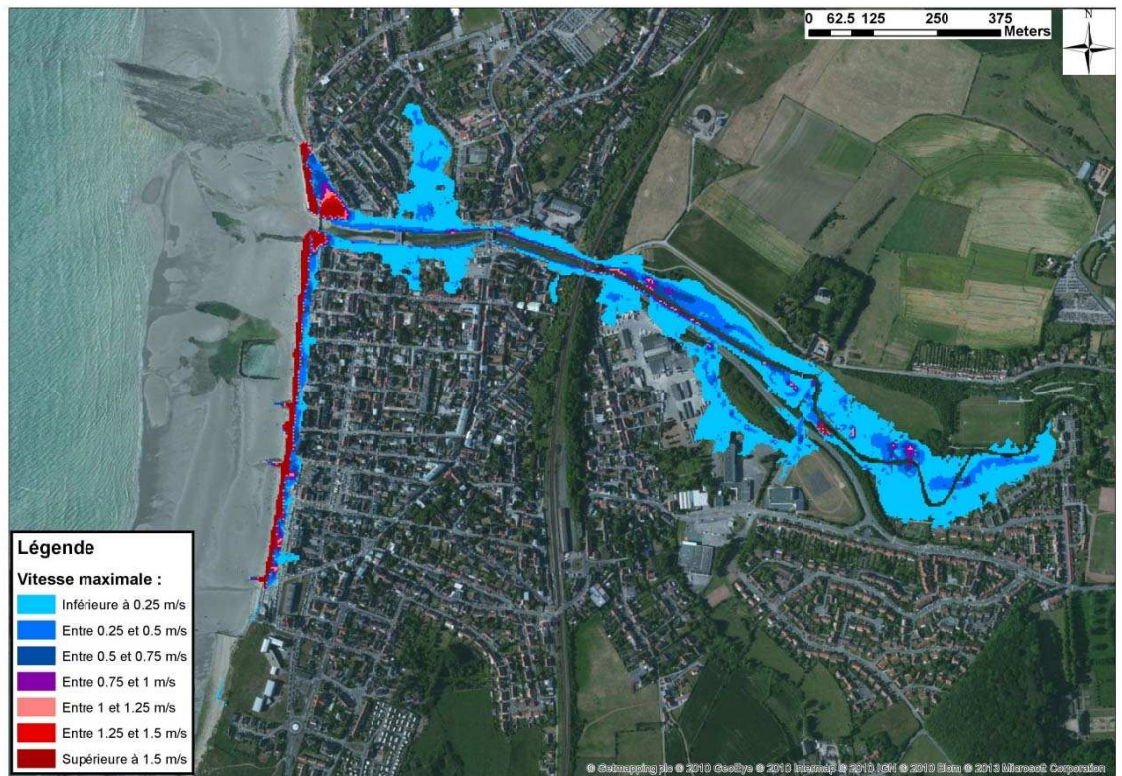


Figure 8-292 : Wimereux - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

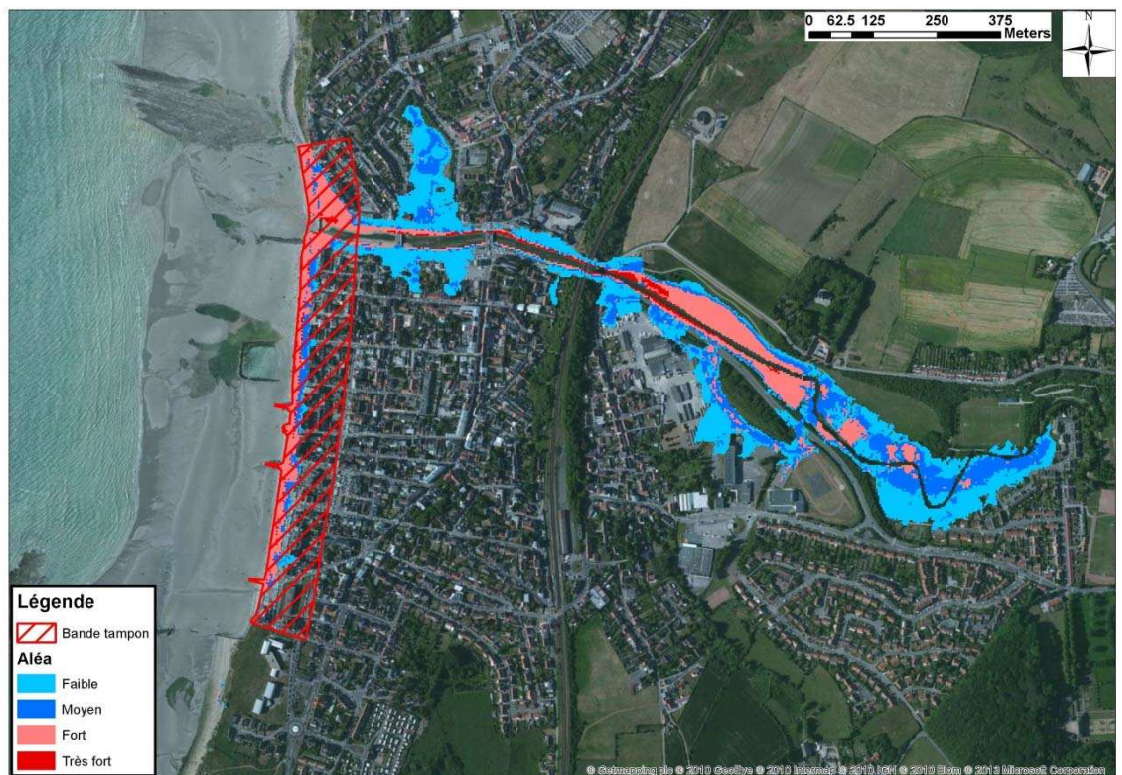


Figure 8-293 : Wimereux - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100

8.15 Etaples - débordement de berges

8.15.1 Hypothèses

Les niveaux marins statiques extrêmes retenus

Les niveaux marins extrêmes à dans l'estuaire de la Canche ont été extraits des cartes du SHOM 2008 et 2012 pour les périodes de retour décennale et centennale (cf. paragraphe 4.3.1).

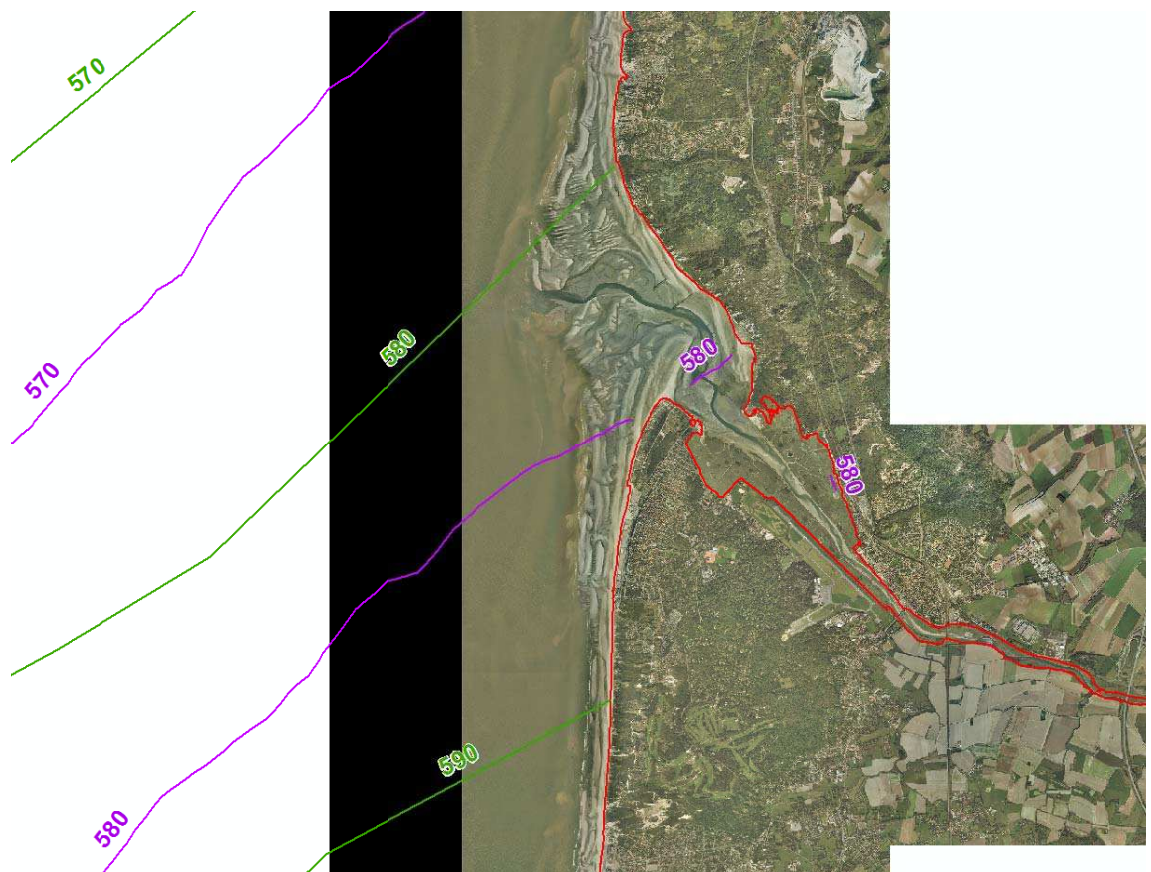


Figure 8-294 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement d'occurrence décennale est celui du SHOM 2008, plus pénalisant.



Figure 8-295 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement d'occurrence centennale est celui du SHOM 2008, plus pénalisant.

Tableau 8-64 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Etaples

	Niveau extrême de pleine-mer
T10	5,90
T100	6,10

Les niveaux marins totaux retenus

Une élévation du niveau marin lié au réchauffement climatique pris en compte en 2013 de 0,20m a été ajoutée au niveau de pleine-mer centennial. Pour la modélisation de l'évènement centennial incluant le changement climatique à l'horizon 2100, une surcote supplémentaire de 0,40 m a été ajoutée afin d'obtenir une élévation moyenne de 0,60 m conforme au scénario pessimiste établi par l'ONERC.

Ce site étant protégé de la houle du large, le niveau de la mer modélisé ne prend pas en compte la surcote de déferlement.

Tableau 8-65 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus à Etaples

	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total retenu
T10	5,90	-	-	-	5,90
T100	6,10	0,20	-	-	6,30
T100 à l'horizon 2100	6,10	0,60	-	-	6,70

Les signaux de marée ont été modifiés pour atteindre ces niveaux extrêmes de pleine-mer, comme présenté figure suivante.

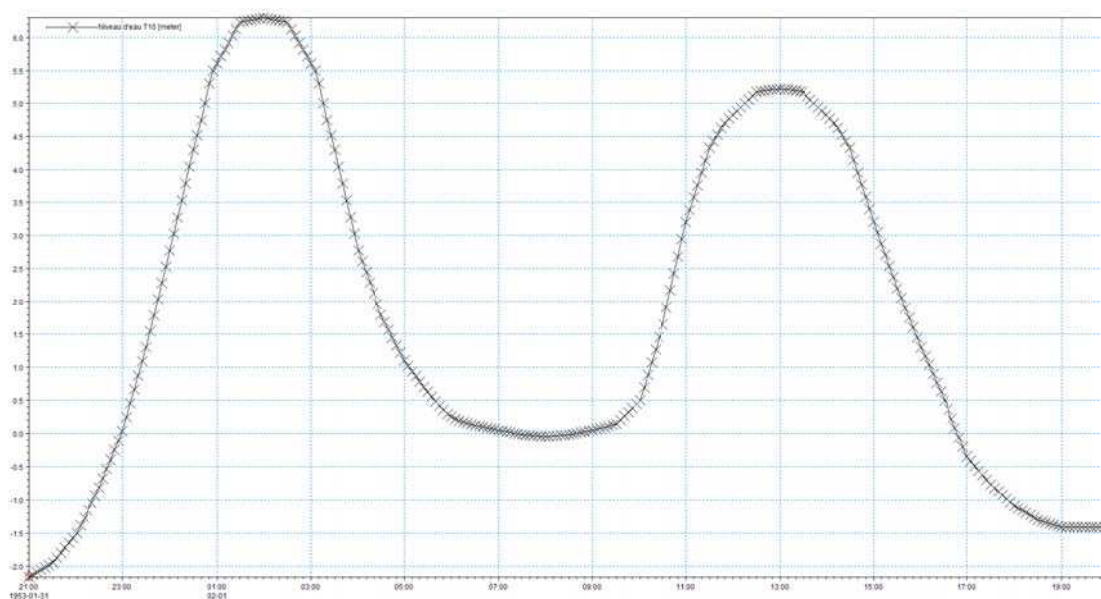


Figure 8-296 : Marégramme utilisé pour T10

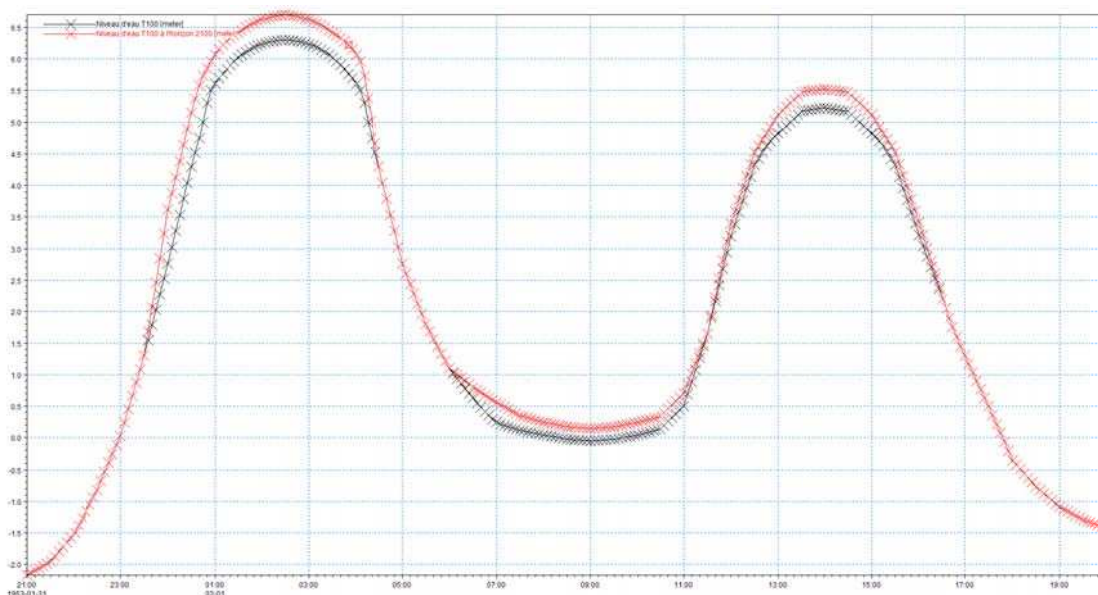


Figure 8-297 : Marégrammes utilisés pour T100 et T100 à l'horizon 2100

8.15.2 Dynamique de submersion

Les inondations à Etaples n'appellent pas de remarque particulière. L'eau se propage sans obstacle jusqu'à ce que le niveau d'eau baisse et que l'eau se retire. L'inondation atteint la voie ferrée au Nord-Ouest de la ville. Pour l'aléa T100, les débordements du lit majeur sont très limités, pour l'aléa T100 à l'horizon 2100, ils s'étendent davantage sur les quartiers au Nord du cours d'eau. A noter l'inondation pour les deux scénarios d'occurrence centennale l'inondation de la parcelle située sur la D939 entre l'usine et la ferme d'Hilbert.

8.15.3 Cartographie

Cartographie des aléas 10 ans

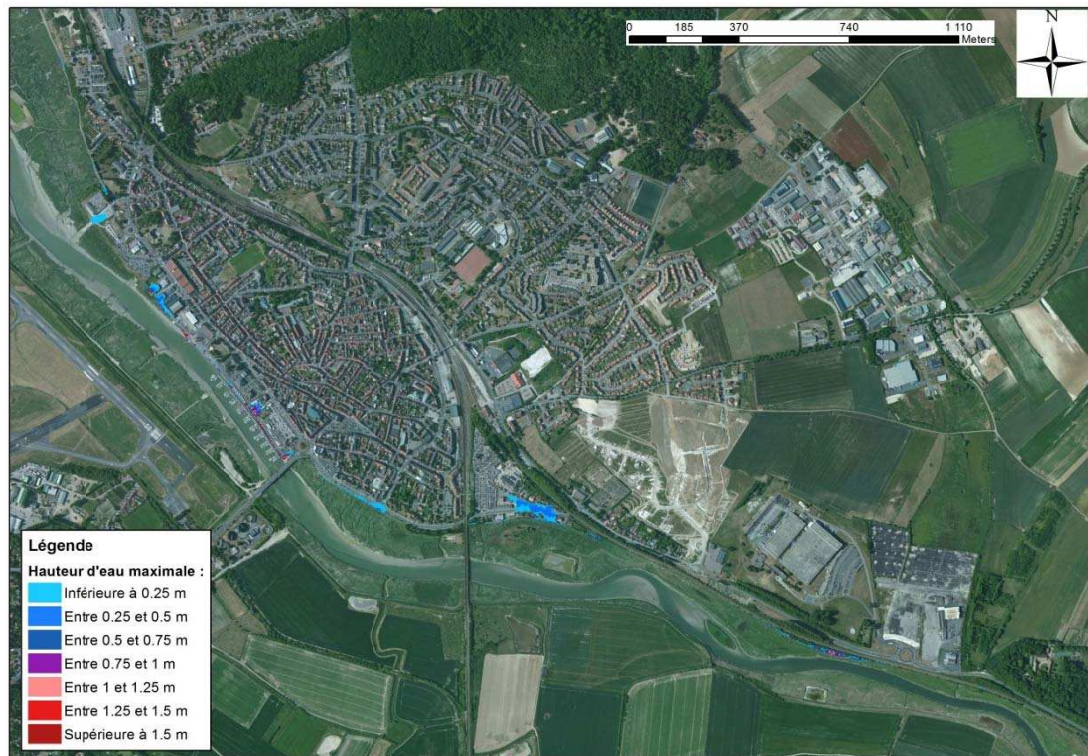


Figure 8-298 : Etaples - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal

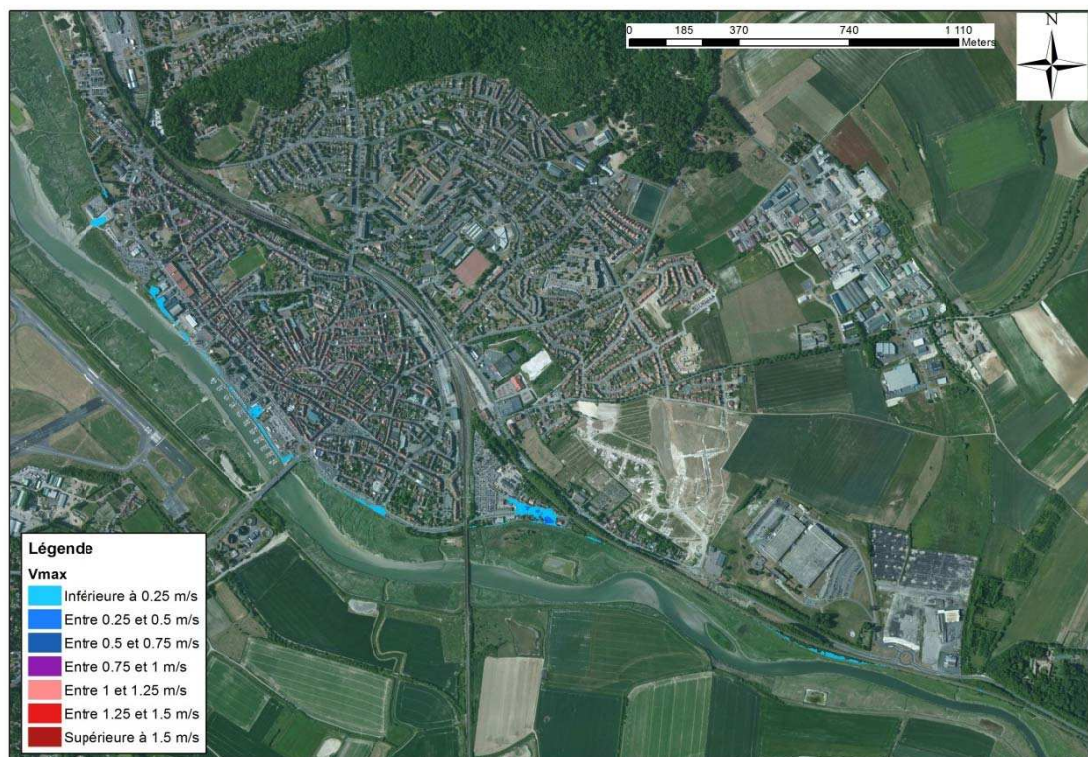


Figure 8-299 : Etaples - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement décennal

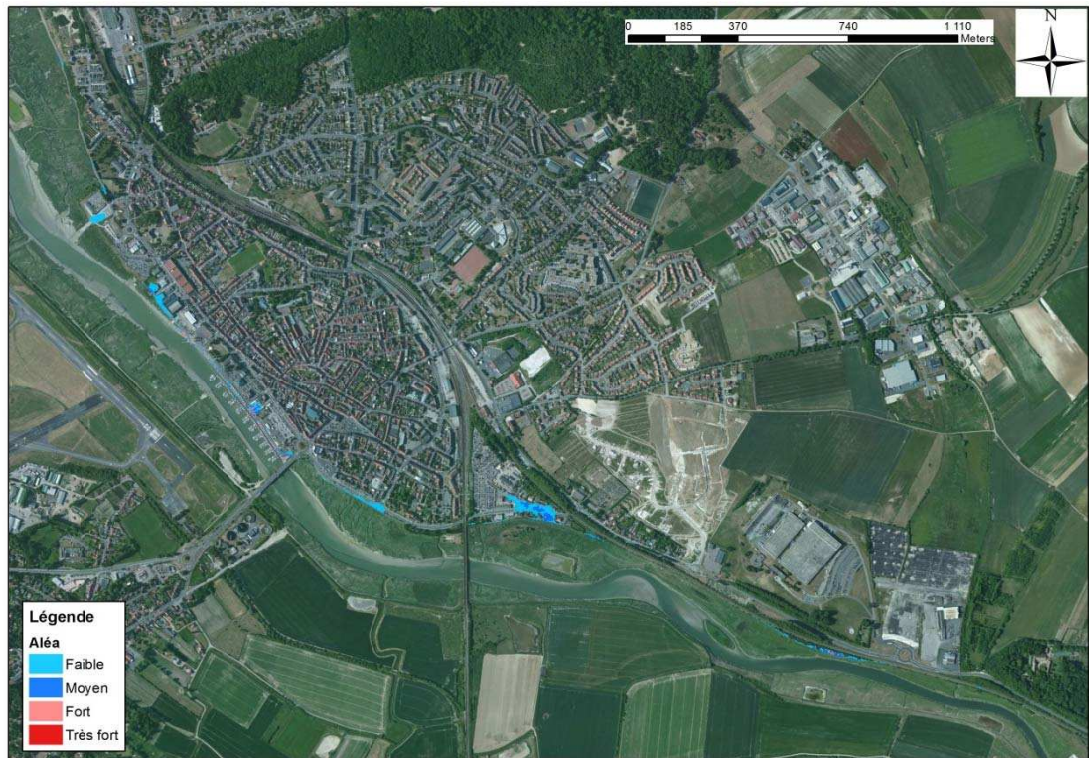


Figure 8-300 : Etaples - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal

Cartographie des aléas 100 ans

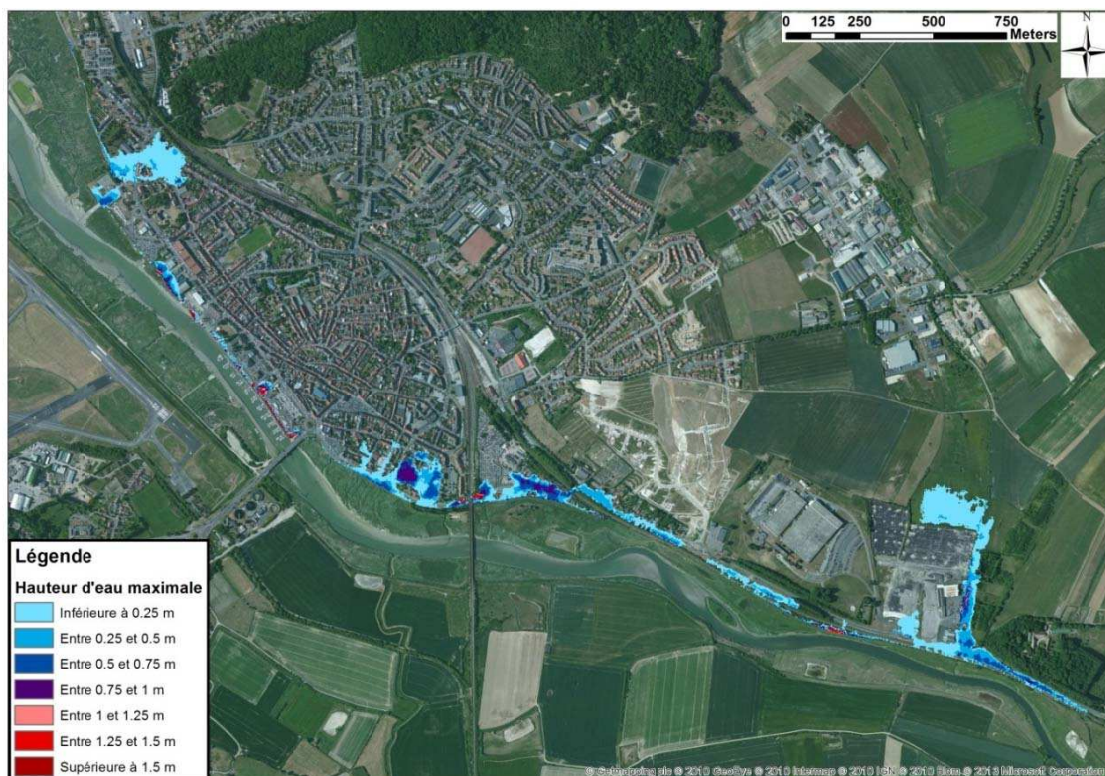


Figure 8-301 : Etaples - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal

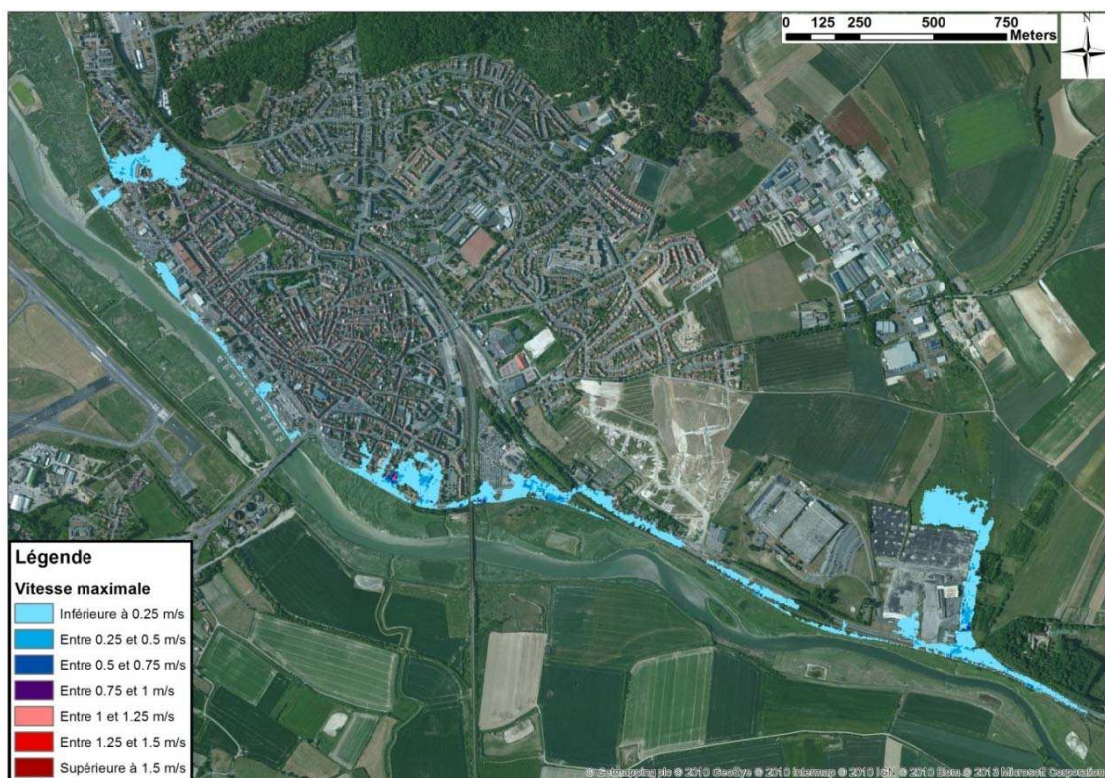


Figure 8-302 : Etaples - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal

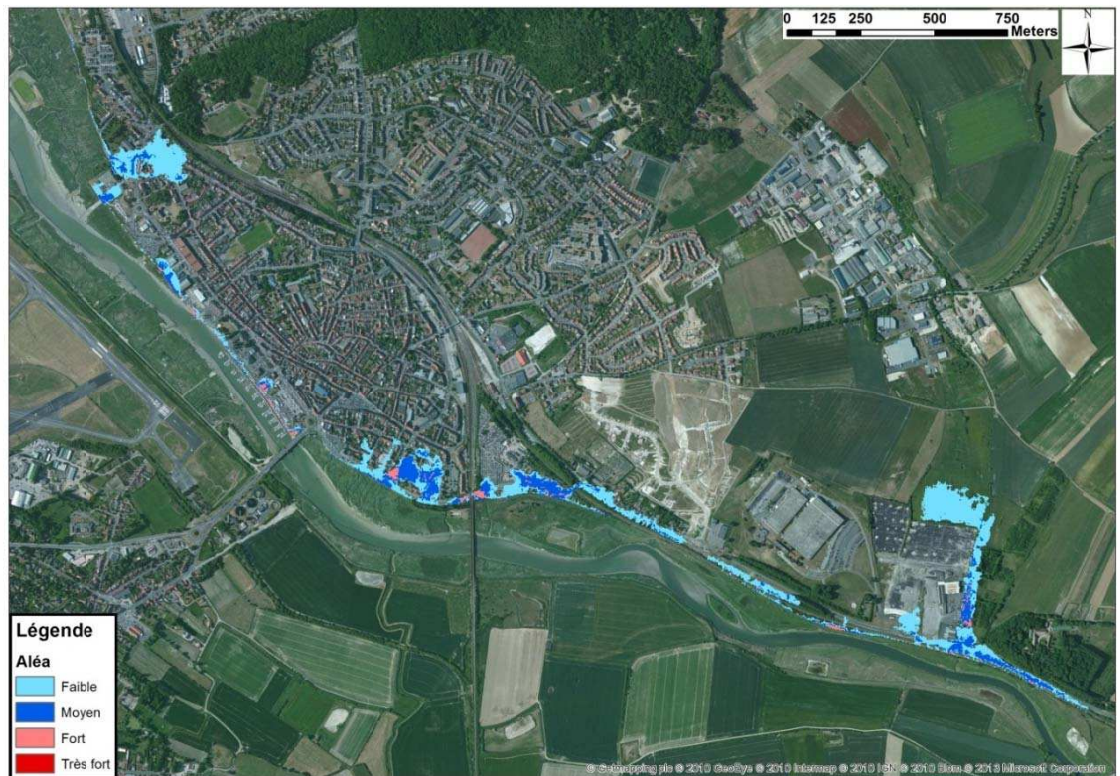


Figure 8-303 : Etaples - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal

Cartographie des aléas 100 ans à l'échéance 2100

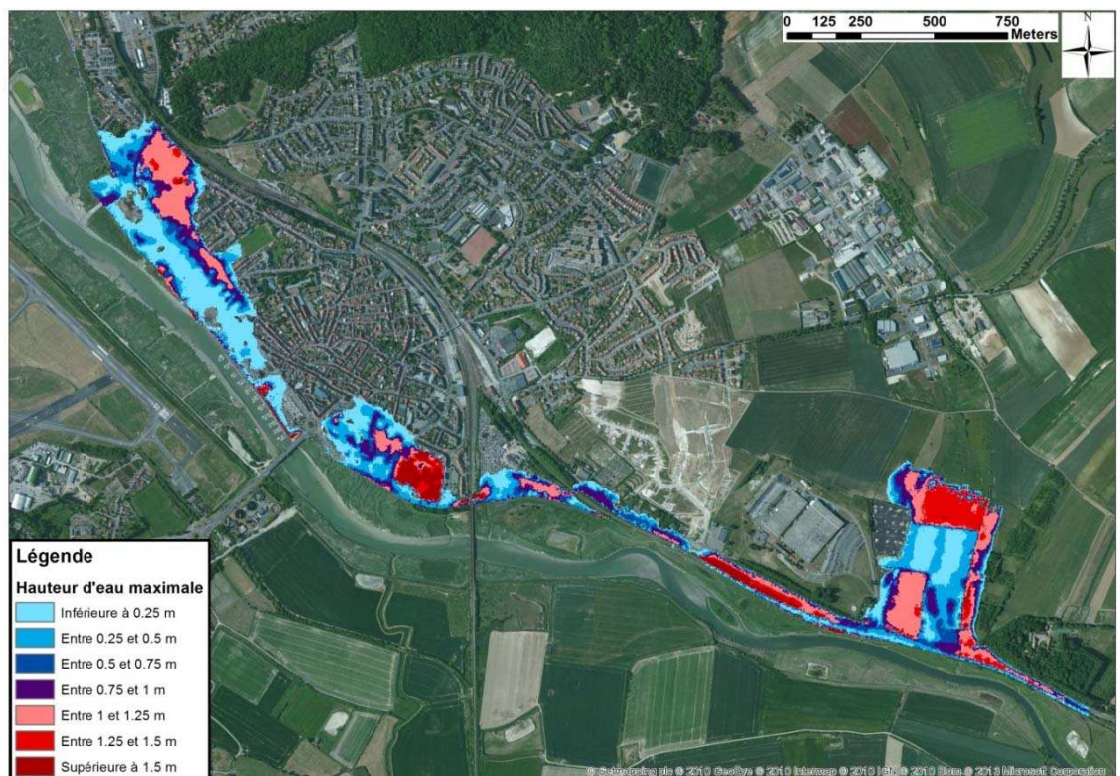


Figure 8-304 : Etaples - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

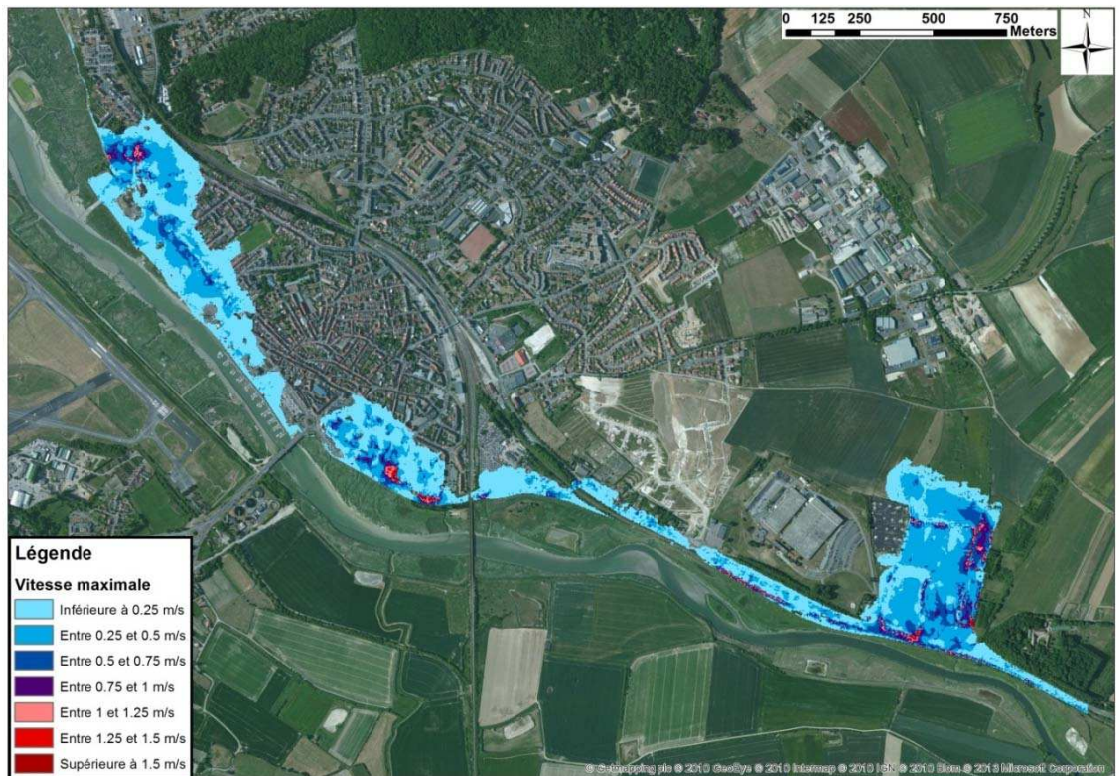


Figure 8-305 : Etaples - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

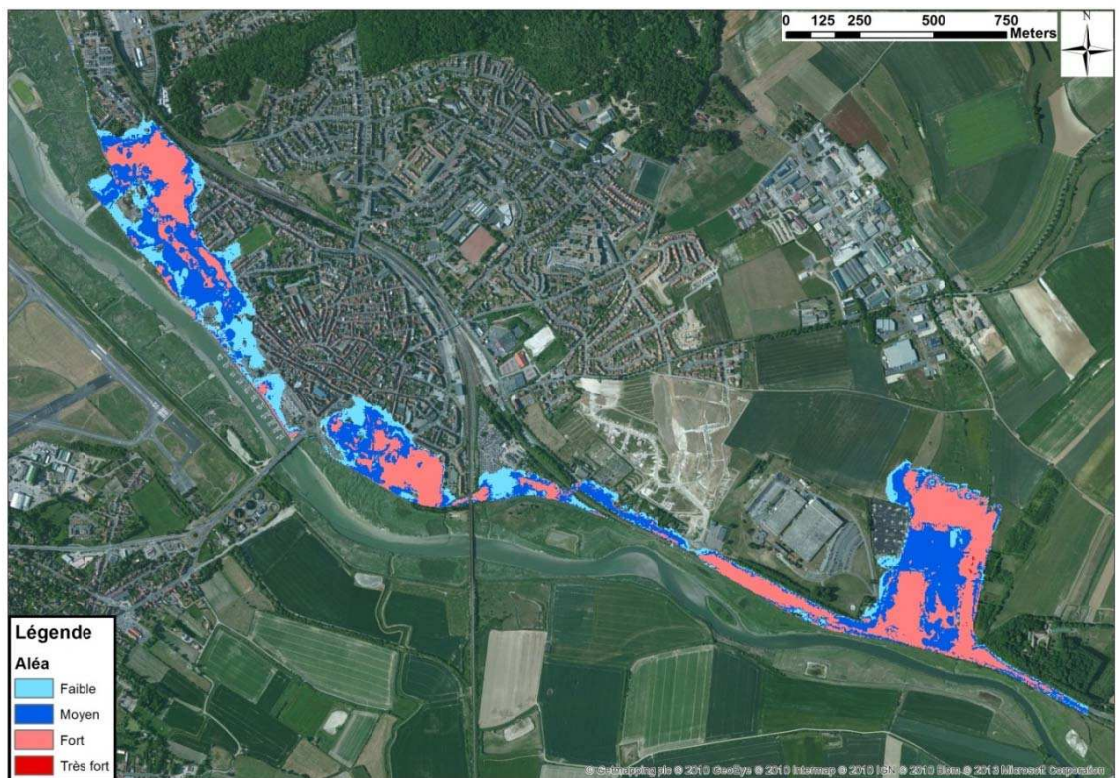


Figure 8-306 : Etaples - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100

8.16 Le Touquet - Paris-Plage – Saint-Josse - rupture et surverse de digue

8.16.1 Hypothèses

Les niveaux marins statiques extrêmes retenus

Les niveaux marins extrêmes dans l'estuaire de la Canche ont été extraits des cartes du SHOM 2008 et 2012 pour les périodes de retour décennale et centennale (cf. paragraphe 4.3.1).

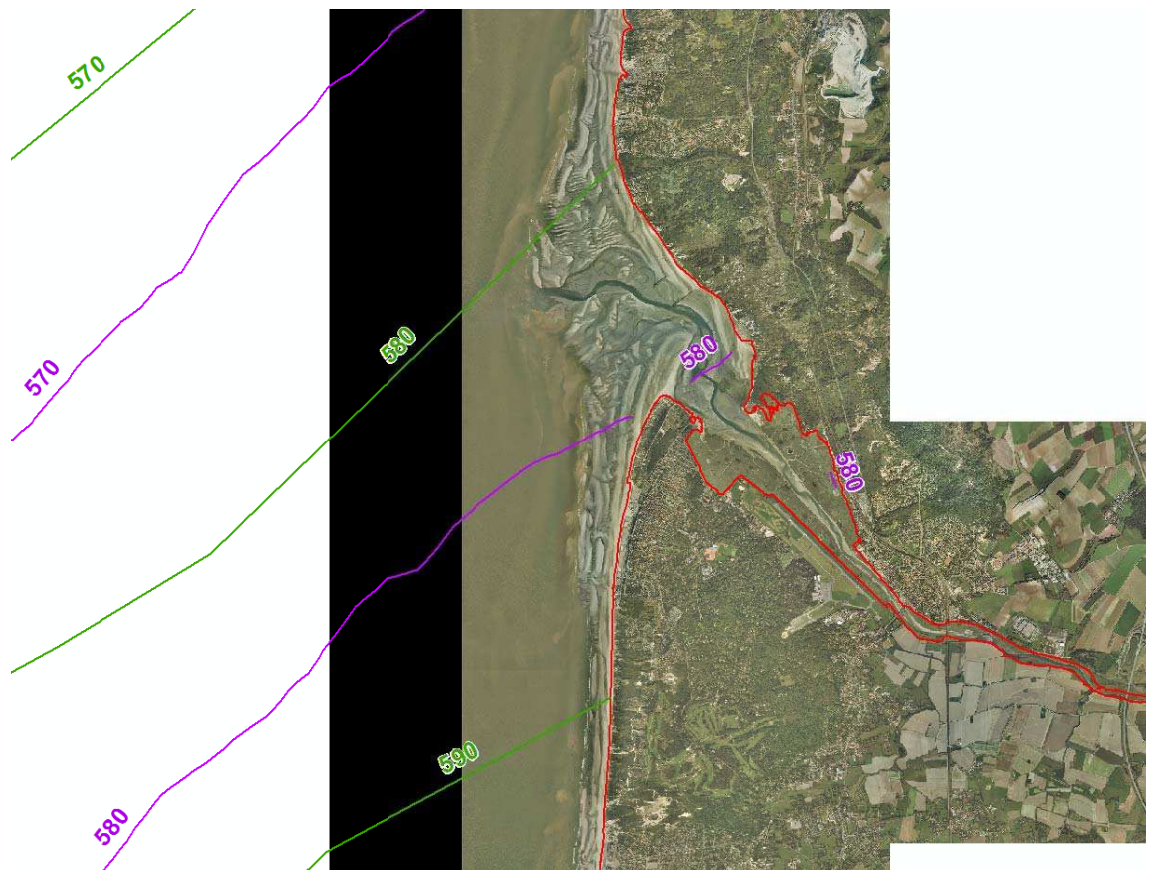


Figure 8-307 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement d'occurrence décennale est celui du SHOM 2008, plus pénalisant.



Figure 8-308 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement d'occurrence centennale est celui du SHOM 2008, plus pénalisant.

Tableau 8-66 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus au Touquet - Paris-Plage

	Niveau extrême de pleine-mer
T10	5,90
T100	6,10

Estimation de la surcote de déferlement

De par sa situation, ce site est relativement protégé de la houle, et le niveau de la mer à l'entrée de la brèche ne tient donc pas compte de la surcote de déferlement.

Les niveaux marins totaux retenus

Une élévation du niveau marin lié au réchauffement climatique pris en compte en 2013 de 0,20m a été ajoutée au niveau de pleine-mer centennal. Pour la modélisation de

l'évènement centennal incluant le changement climatique à l'horizon 2100, une surcote supplémentaire de 0,40 m a été ajoutée afin d'obtenir une élévation moyenne de 0,60 m conforme au scénario pessimiste établi par l'ONERC.

Tableau 8-67 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus au Touquet - Paris-Plage

	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total retenu
T10	5,90	-	-	-	5,90
T100	6,10	0,20	-	-	6,30
T100 à l'horizon 2100	6,10	0,60	-	-	6,70

Les signaux de marée ont été modifiés pour atteindre ces niveaux extrêmes de pleine-mer, comme présenté figure suivante.

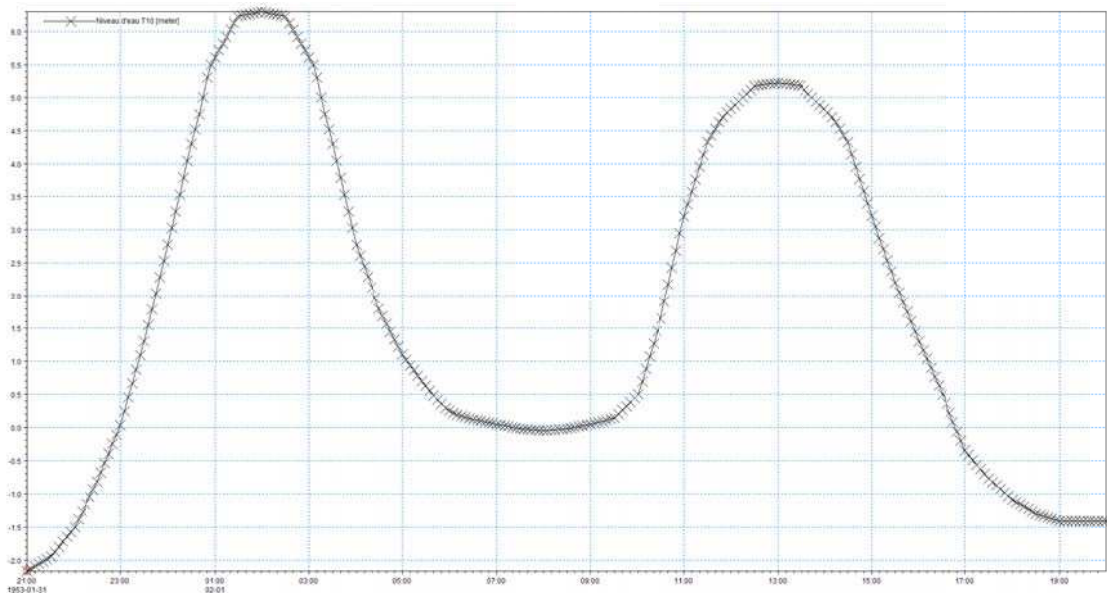


Figure 8-309 : Marégramme utilisé pour T10

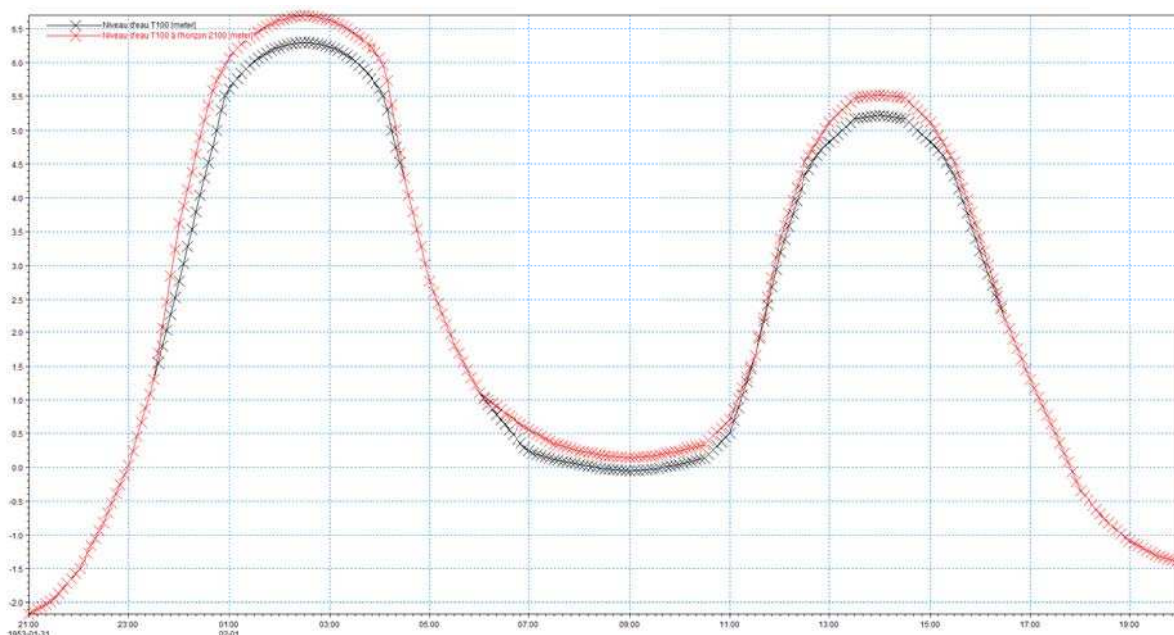


Figure 8-310 : Marégrammes utilisés pour T100 et T100 à l'horizon 2100

Les caractéristiques des brèches

Deux positions de brèches ont été simulées dans la digue du Touquet au niveau de l'aéroport. Ces deux brèches sont d'une longueur de 100 mètres. La cote de la crête de la digue étant constante, mais le terrain naturel étant d'altitude inégale, la première brèche verra la crête de la digue passer de 6,25 m à 4m IGN 69. La seconde brèche provoquera quant à elle un effondrement de la crête d'une altitude de 6,25m à 3,68m IGN 69. Ces ruptures de l'ouvrage se dérouleront en un quart d'heure, à partir d'1h avant la pleine-mer (cf. Paragraphe 6.2.2).

D'autre part, la modélisation de la rupture de l'ouvrage sur la rivière Grande Tringue est également effectuée, en considérant une brèche de la largeur de l'ouvrage, soit 12 m. L'ouvrage est arasé de 6,25m à 2,51m IGN 69. Ce phénomène se produit en 15 minutes une heure avant la pleine-mer.

Enfin, une brèche a aussi été simulée dans la digue à hauteur de Saint-Josse. Cette rupture de l'ouvrage provoque un affaissement de la crête de la digue de 6,21m à 4,5m IGN 69. Comme précisé au Paragraphe 6.2.2, la brèche se produit elle-aussi en 15 minutes à partir d'une heure avant la pleine-mer.



Figure 8-311 : Position des deux brèches simulées sur Le Touquet-Paris-Plage

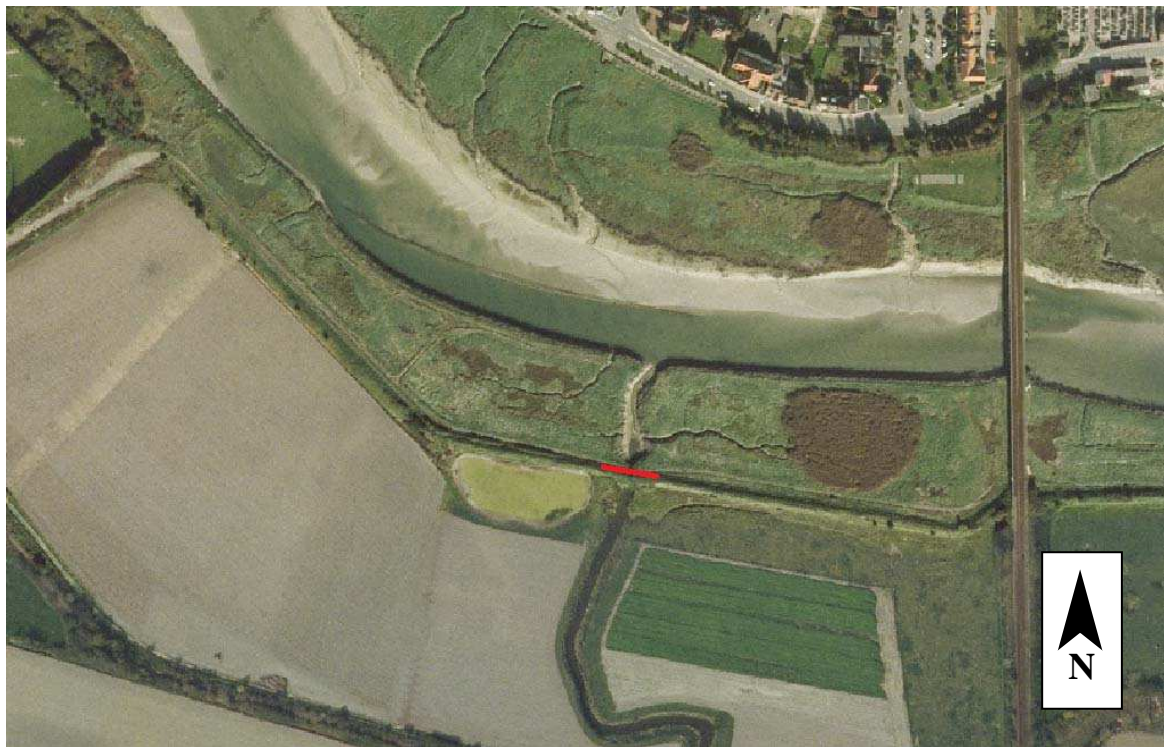


Figure 8-312 : Position de l'ouvrage sur la Grande Tringue



Figure 8-313 : Position de la brèche simulée à Saint-Josse

8.16.2 Dynamique de submersion

Ces diverses simulations sur ce site permettent de tenir compte de la variabilité des inondations en fonction de l'emplacement des brèches, dans la mesure où les brèches peuvent apparaître en des points quelconques de la digue. Les résultats sont alors obtenus séparément pour toutes les positions de brèches simulées. Les cartographies présentées dans la suite sont les hauteurs, vitesses et aléa maximum obtenus quelle que soit la position de la brèche considérée.

L'inondation se propage du lit de la Canche vers le Sud. Le secteur concerné par l'aléa fort, qui inclue l'aéroport et le quartier Bellevue, est inondé en 1h après l'ouverture de la brèche dans la digue. La voie ferrée, qui forme une digue orientée Nord-Sud au milieu des champs, bloque les écoulements de part et d'autre, jusqu'au niveau de la D143 (des échanges Est-Ouest peuvent se faire au Sud lorsque les écoulements arrivent à ce niveau).

Sur la zone Est, les écoulements sont bloqués le long de la route des Estuaires, hormis en un point bas (deux pour l'aléa T100 à l'horizon 2100) au Nord où l'eau commence à passer 1h30 après l'ouverture des brèches, permettant l'inondation des premières parcelles de terrain à l'Est de cette route.

Pour le scénario incluant le changement climatique, l'emprise maximale de l'inondation créée par ces ruptures d'ouvrage s'étend davantage vers le Sud en direction des marais de Verton, suivant la topographie de la zone.

8.16.3 Cartographie

Sur Le Touquet, la bande de 100 m couvre l'ensemble du linéaire de la digue. Celle-ci est délimitée à l'Ouest par un terrain naturellement élevé et ne présentant pas de risque de rupture. A l'Est, la bande se prolonge jusqu'au remblai de la voie SNCF.

Plus à l'Est, sur le site de Saint-Josse, la bande de 100 m couvre l'ensemble du linéaire de la digue, compris entre la voie SNCF et celui de l'Autoroute A16.

A noter que les aléas déterminés au sud de la zone d'étude se basent sur les données PPIGE.

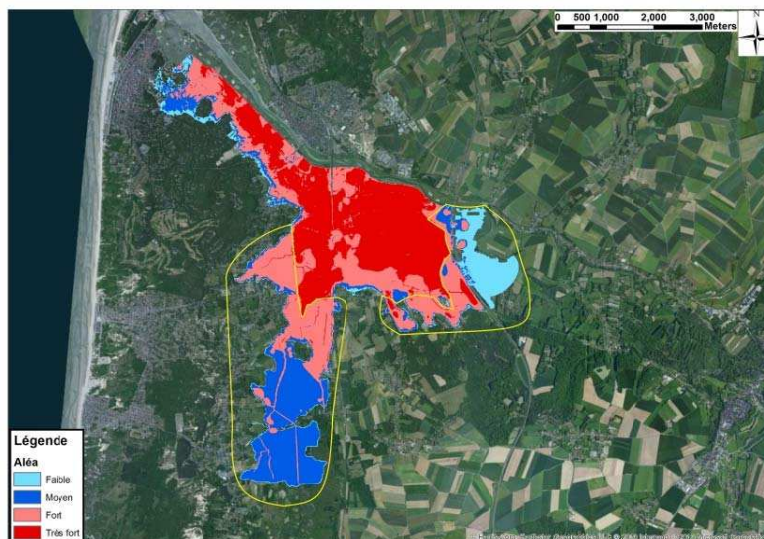


Figure 8-314 : Vue de l'aléa T100 à 2100 en jaune, secteurs couvert par la donnée PPIGE

Cartographie des aléas 10 ans

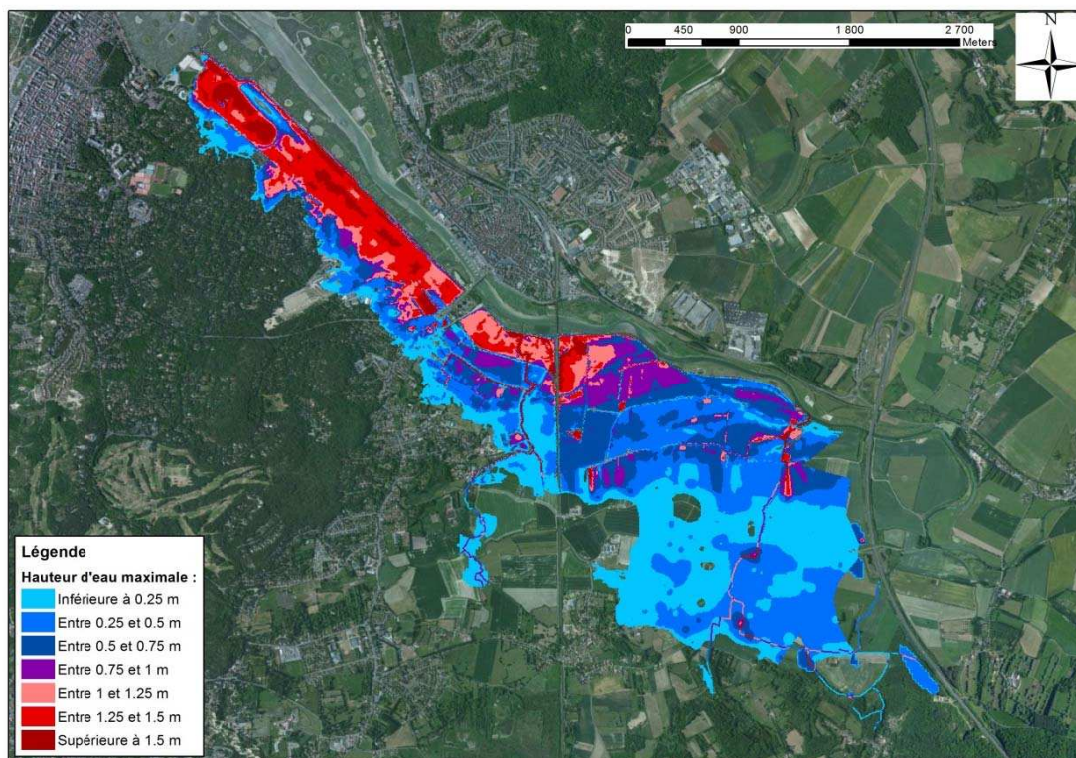


Figure 8-315 : Le Touquet/St Josse - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal

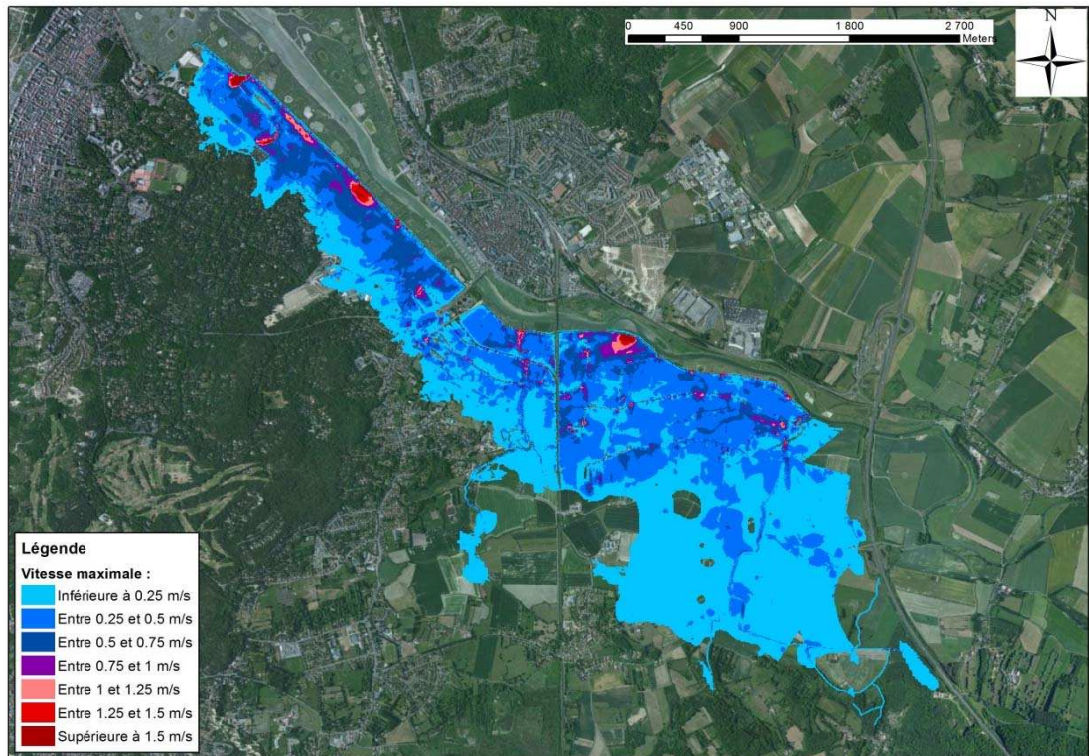


Figure 8-316 : Le Touquet/St Josse - Cartographie de la vitesse de submersion modélisée pour un événement décennal

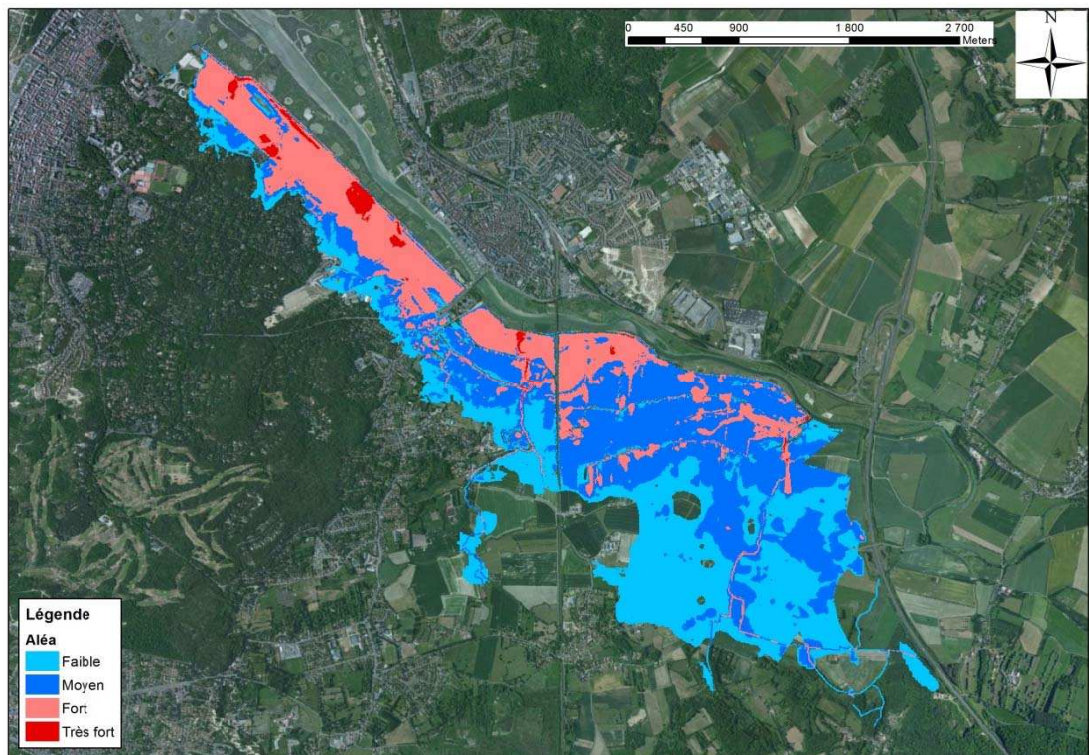


Figure 8-317 : Le Touquet/St Josse - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal

Cartographie des aléas 100 ans

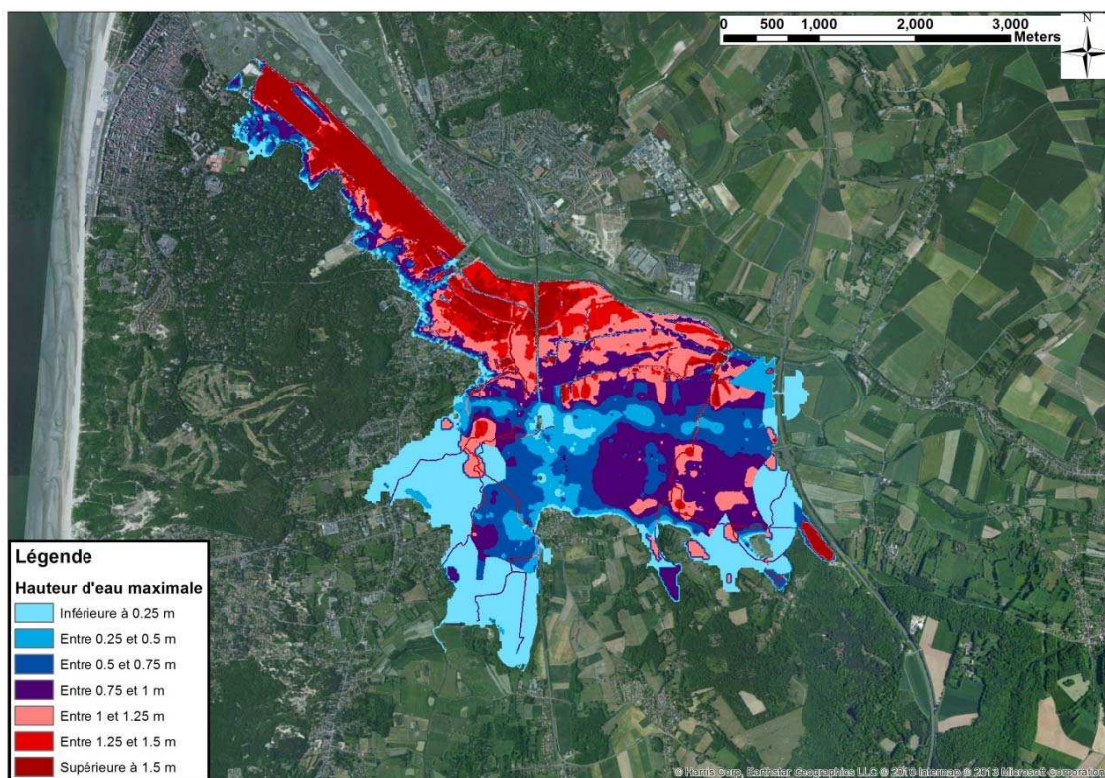


Figure 8-318. Le Touquet/St Josse - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal

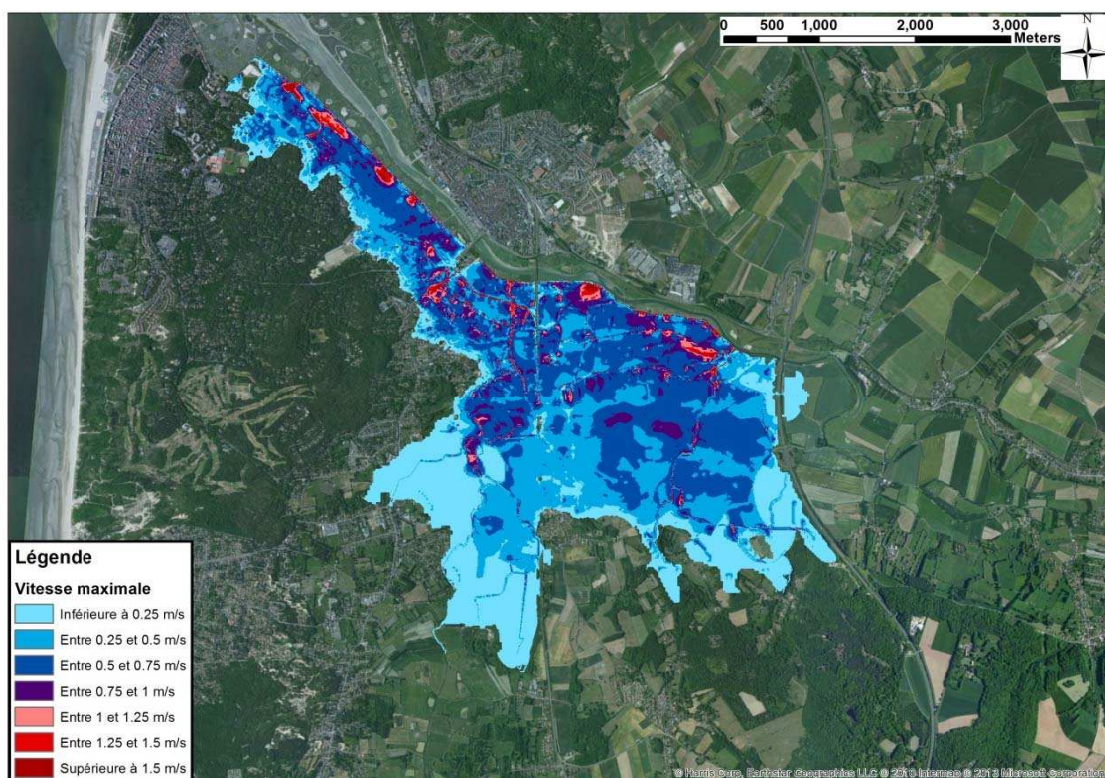


Figure 8-319. Le Touquet/St Josse - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal

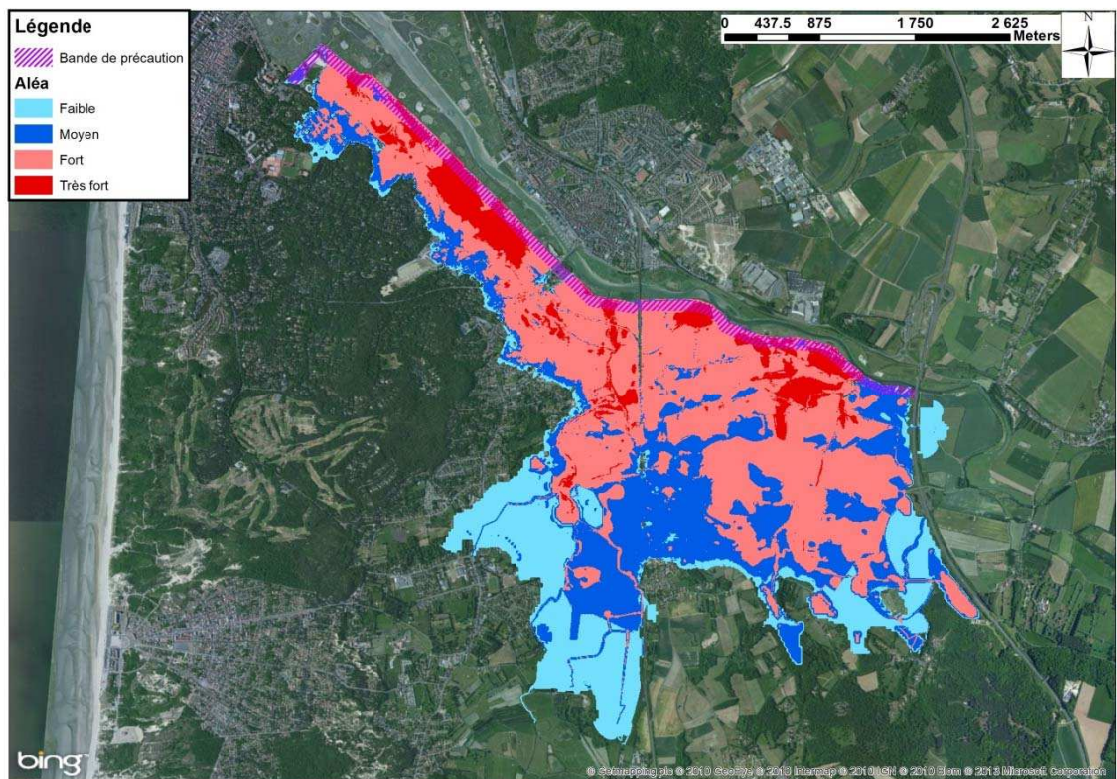


Figure 8-320. Le Touquet/St Josse - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal

Cartographie des aléas 100 ans à l'échéance 2100

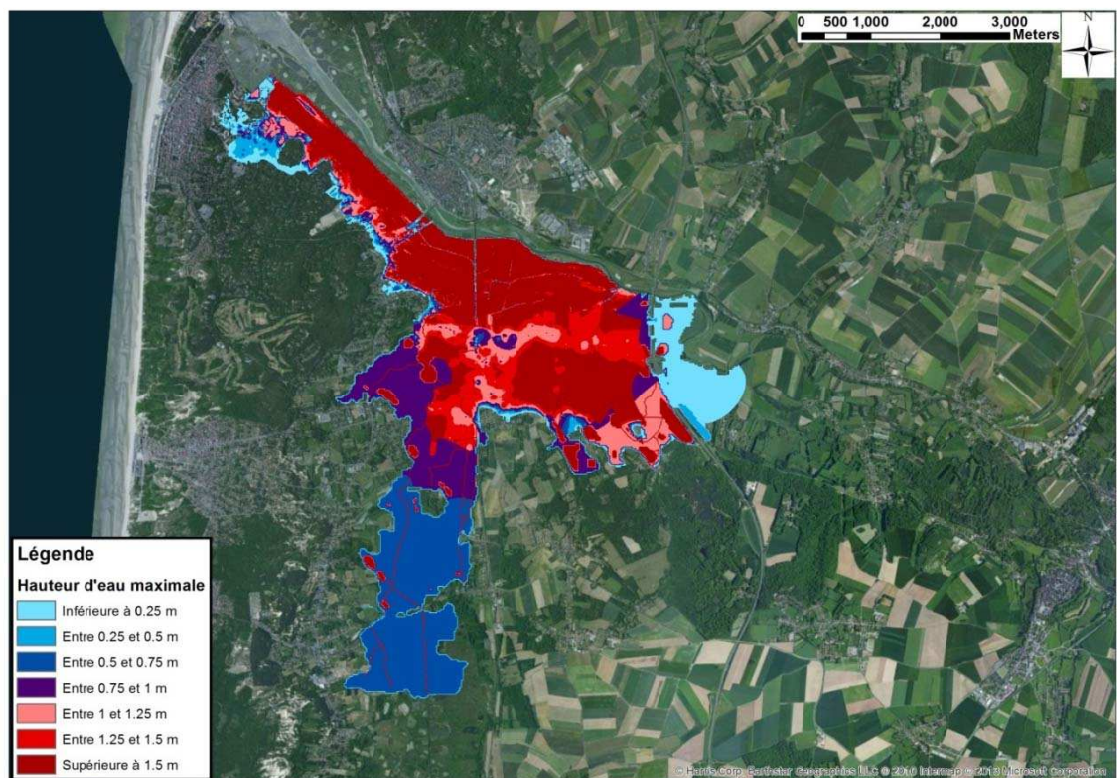


Figure 8-321. Le Touquet/St Josse - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

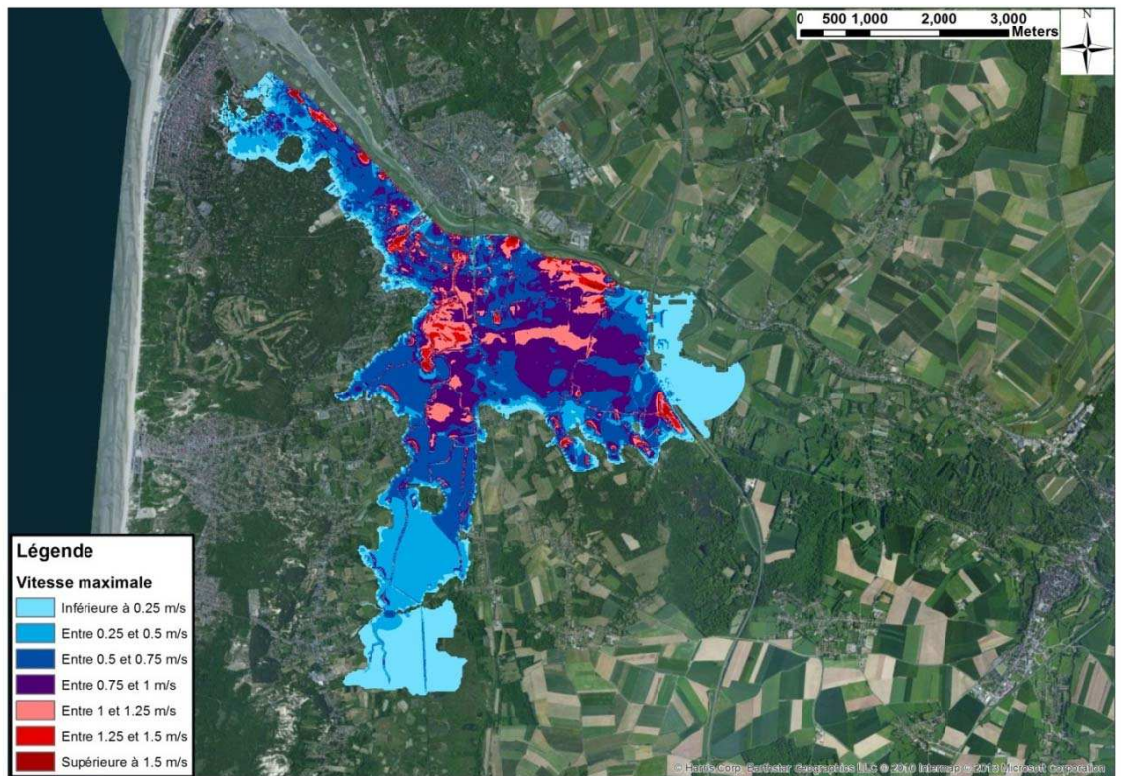


Figure 8-322. Le Touquet/St Josse - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

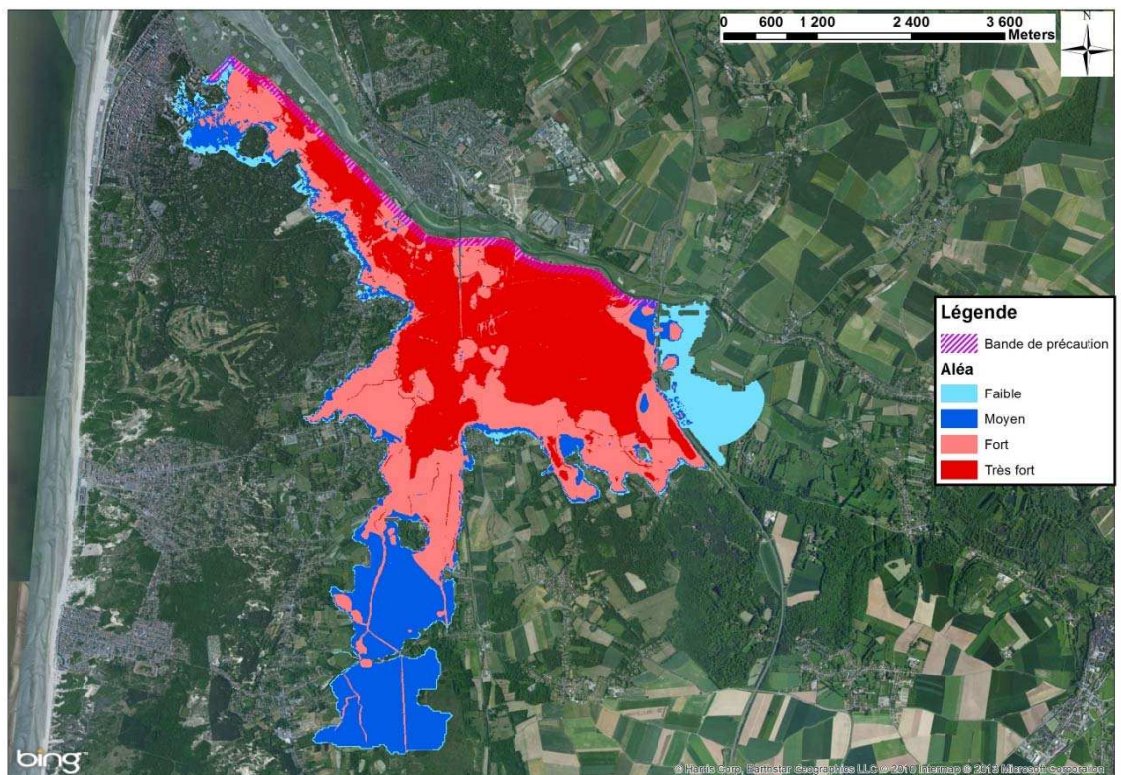


Figure 8-323. Le Touquet/St Josse - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100

8.17 Groffliers – ruptures d’ouvrage et surverse

8.17.1 Hypothèses

Les niveaux marins statiques extrêmes retenus

Les niveaux marins extrêmes à Groffliers ont été extraits des cartes du SHOM 2008 et 2012 pour les périodes de retour décennale et centennale (cf. paragraphe 4.3.1).

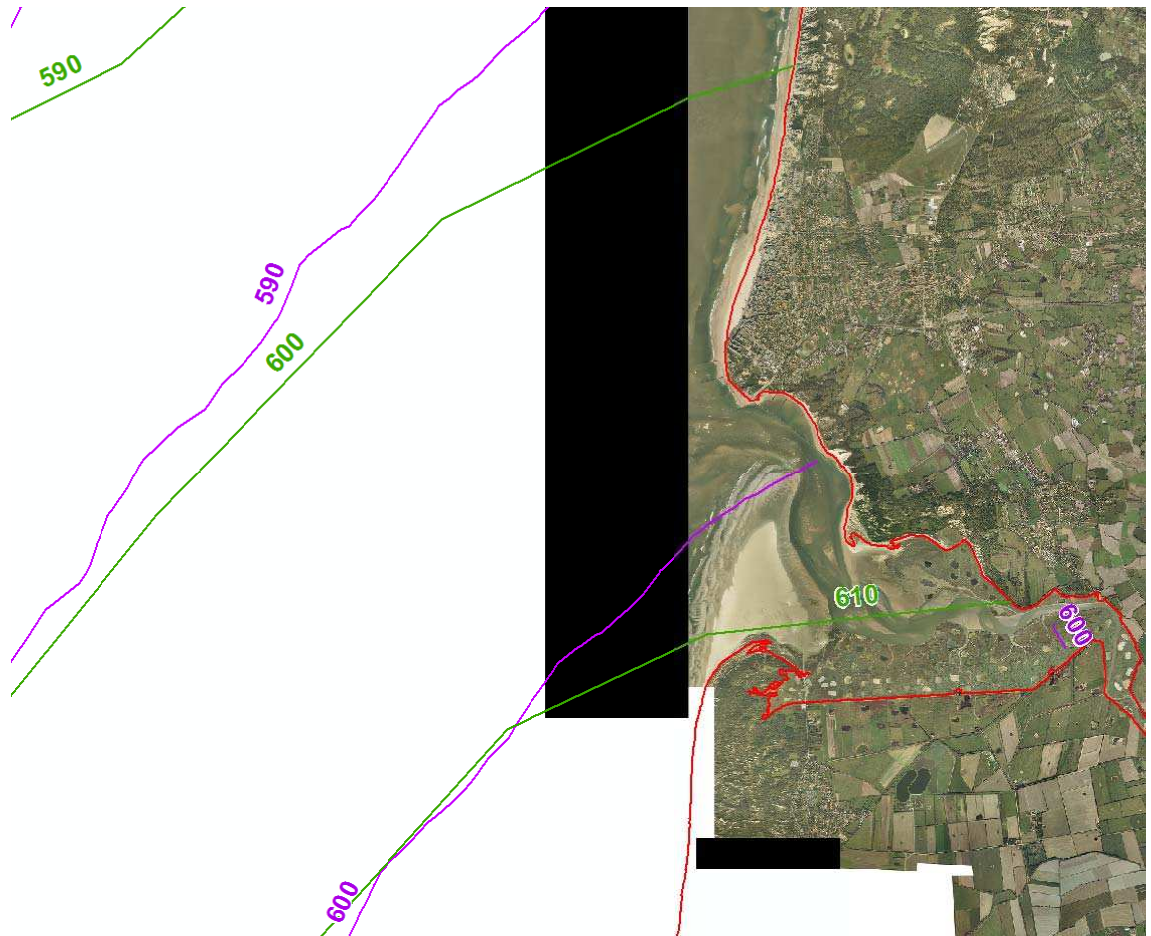


Figure 8-324 : Niveaux décennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l’évènement décennal est celui du SHOM 2008, plus pénalisant.

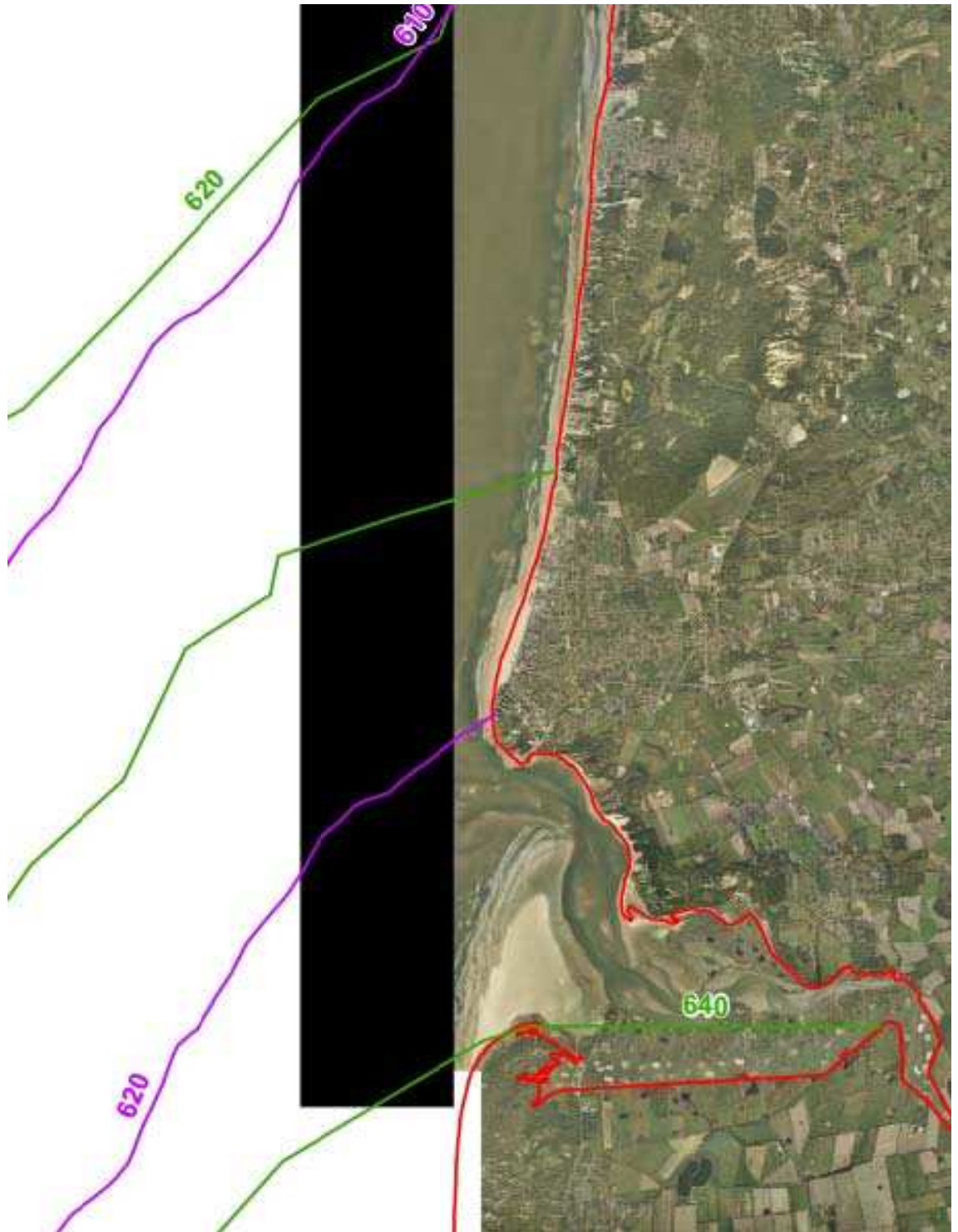


Figure 8-325 : Niveaux centennaux – 2008 en vert, 2012 en violet

Le niveau retenu pour l'évènement centennal est celui du SHOM 2008, plus pénalisant.

Tableau 8-68 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer (en m IGN 69) retenus à Groffliers

	Niveau extrême de pleine-mer
T10	6,10
T100	6,30

Estimation de la surcote de déferlement

Ce secteur étant relativement protégé de la houle dans l'estuaire de l'Authie, le niveau de la mer à l'entrée des brèches simulées ne tient donc pas compte de la surcote de déferlement.

Les niveaux marins totaux retenus

Une élévation du niveau marin lié au réchauffement climatique pris en compte en 2013 de 0,20m a été ajoutée au niveau de pleine-mer centennal. Pour la modélisation de l'évènement centennal incluant le changement climatique à l'horizon 2100, une surcote supplémentaire de 0,40 m a été ajoutée afin d'obtenir une élévation moyenne de 0,60 m conforme au scénario pessimiste établi par l'ONERC.

Tableau 8-69 : Niveaux marins extrêmes de pleine-mer totaux (en m IGN 69) retenus à Groffliers

	Niveau extrême de pleine-mer au large	Surcote climatique	Surcote de déferlement	Incertitude sur le calcul de la surcote de déferlement	Niveau extrême de pleine-mer total retenu
T10	6,10	-	-	-	6,10
T100	6,30	0,20	-	-	6,50
T100 à l'horizon 2100	6,30	0,60	-	-	6,90

Les signaux de marée ont été modifiés pour atteindre ces niveaux extrêmes de pleine-mer, comme présenté figure suivante.

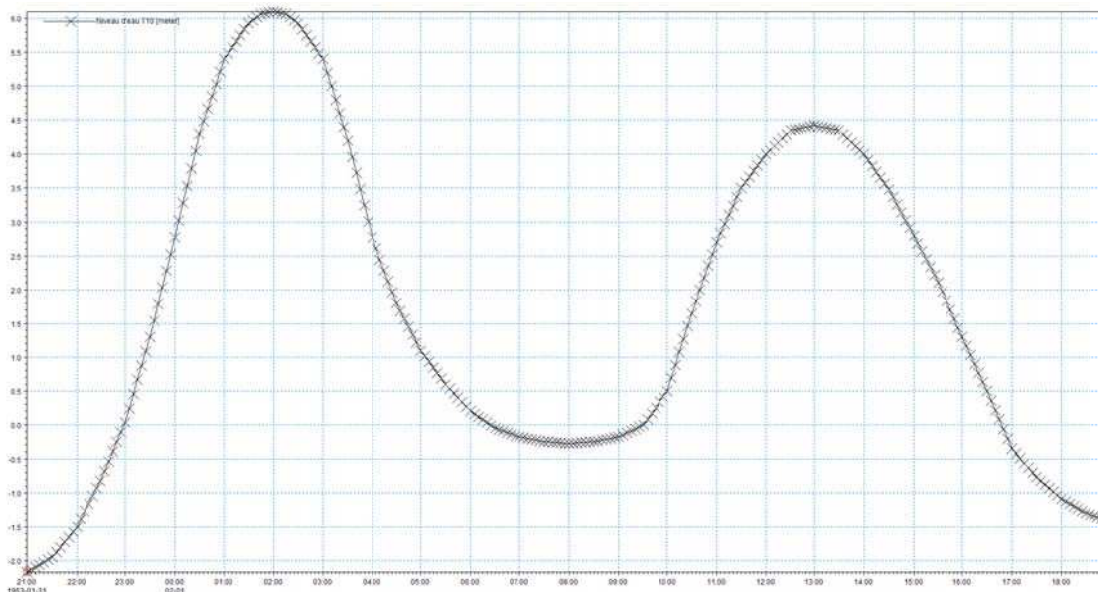


Figure 8-326 : Marégramme utilisé pour T10

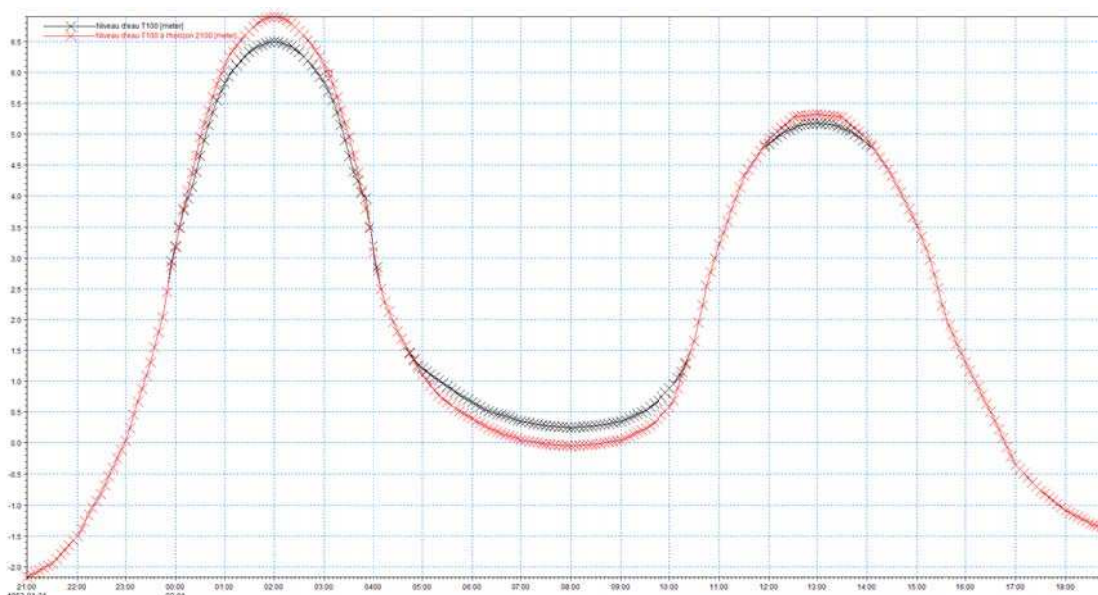


Figure 8-327 : Marégrammes utilisés pour T100 et T100 à l'horizon 2100

Conditions initiales

Les portes à la mer de l'ouvrage de la Madelon sont supposées ouvertes, l'eau s'engouffre donc dans le Fliers sans aucun obstacle.

Les caractéristiques de la brèche

La brèche simulée dans la dune à l'Ouest de Groffliers est d'une longueur de 100m. La cote de la crête du cordon dunaire la cote de la crête s'affaisse de 6,41m à 5,5m IGN 69 en 15 minutes une heure avant la pleine-mer (cf. Paragraphe 6.2.2).

La rupture du cordon dunaire au niveau du chemin Delesalle, qui est creusé au travers du cordon dunaire a une longueur de 10 mètres, le cordon dunaire ne présentant pas de risque de rupture à d'autres endroits. En 15 minutes la crête de la dune s'abaisse de 7m à 6,6m IGN 69. Le début de la rupture est fixé à une heure avant la pleine-mer.

L'hydrogramme injecté dans ces brèches est le marégramme calculé à Groffliers. Il atteint donc un niveau de 6,60m IGN69 pour le scénario d'occurrence centennale et 7,00 m IGN 69 pour celui incluant le changement climatique.



Figure 8-328: Localisation de l'ouvrage défailant de la Madelon à Groffliers



Figure 8-329: Position des deux brèches simulées sur la partie Dune et sur le chemin Delesalle à Groffliers

8.17.2 Dynamique de submersion

L'onde de submersion provenant de la rupture de l'ouvrage de la Madelon se propage relativement lentement vers le Nord, en remontant le cours du Fliers. Les figures ci-après présentent l'état des inondations à deux instants distincts, pour l'événement centennal.

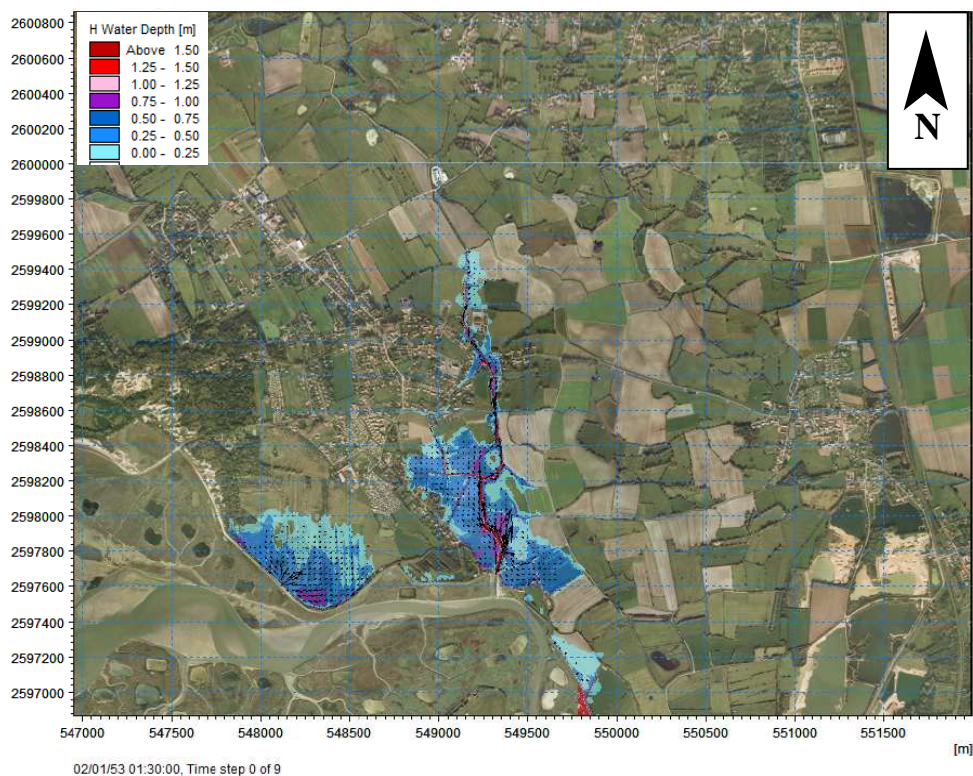


Figure 8-330: Apparition des premiers débordements (30 minutes avant la pleine-mer), aléa T100

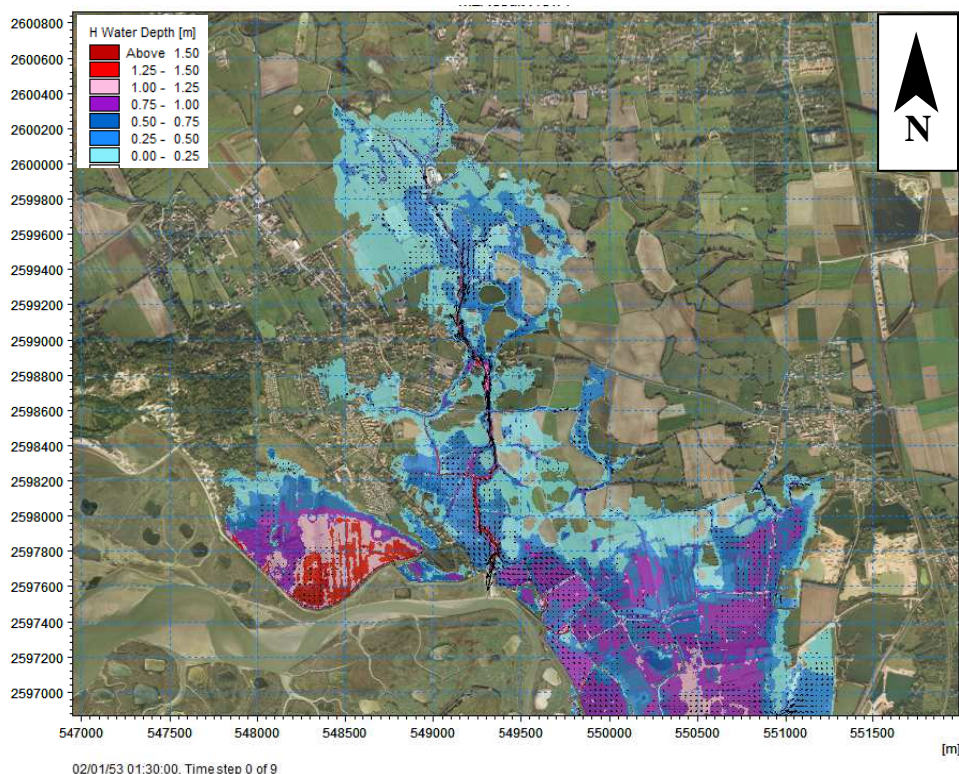


Figure 8-331: Propagation des inondations vers le Nord (1h30 après la pleine mer), aléa T100

L'emprise de l'inondation pour le scénario centennal est contenue à l'Est par la D940, jusqu'à Waben. Au Nord, dans un premier temps l'inondation se propage librement en fonction de la topographie du site. L'extension de l'inondation est limitée par la pénétrante Est de Berck. L'emprise de l'inondation côté Ouest reste contenue au Sud-Ouest du boulevard de Paris et la route d'Abbeville, au Sud de Berck.

Dans le cas du scénario incluant le changement climatique, les écoulements vers l'Est viennent se stocker dans les étangs au Sud de Waben et une légère surverse apparaît par-dessus la D940. Au Nord, l'inondation submerge la Pénétrante de Berck 3h45 après l'apparition de la brèche pour ensuite se propager à travers les quartiers plus au Nord, jusqu'à la route de Berck (D317), limite de l'inondation.

8.17.3 Cartographie

La bande couvrant le risque de rupture du cordon dunaire est limitée au secteur où la dune est nettement plus étroite et plus basse. Dans le sens parallèle à la côte, la bande couvre ce passage naturel, et s'étend ensuite de 100 m de chaque côté.

La bande relative à la digue concerne tout le linéaire de digue modélisé. A l'Ouest la bande s'étend donc jusqu'à la jonction de la digue avec la dune, tandis qu'à l'Est la bande s'arrête à la dernière parcelle touchée par les inondations lors de la modélisation, bien que la digue se poursuit plus en amont dans l'estuaire.

Cartographie des aléas 10 ans

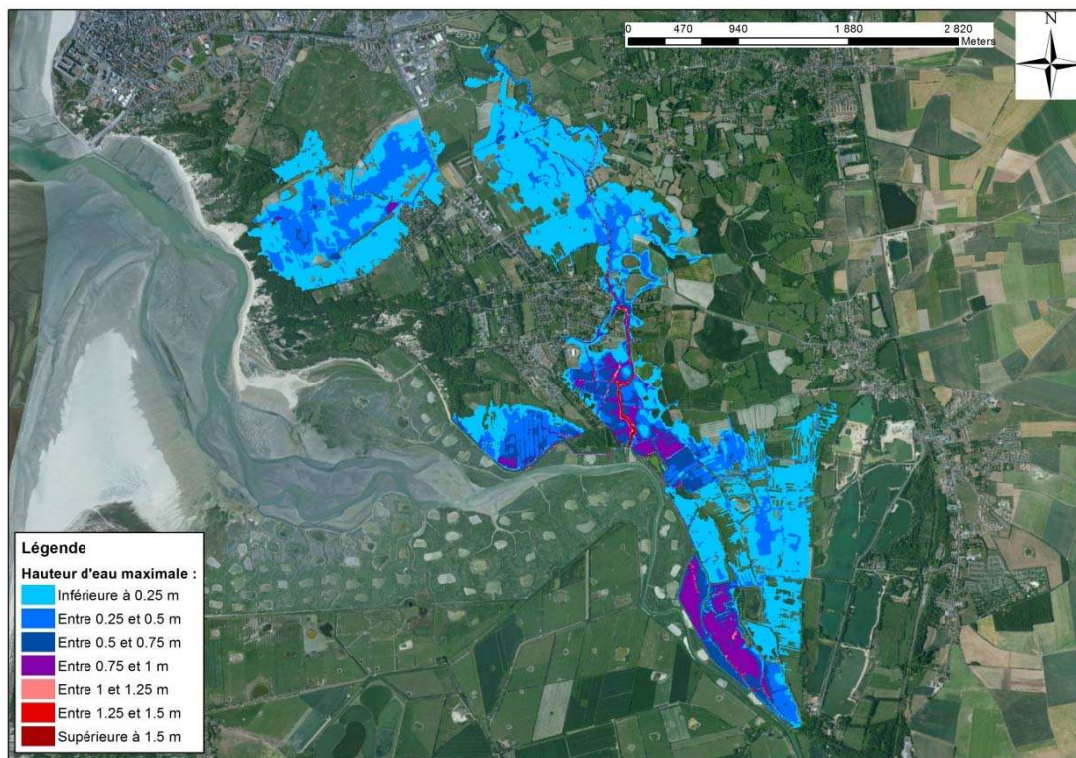


Figure 8-332 : Groffliers - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement décennal

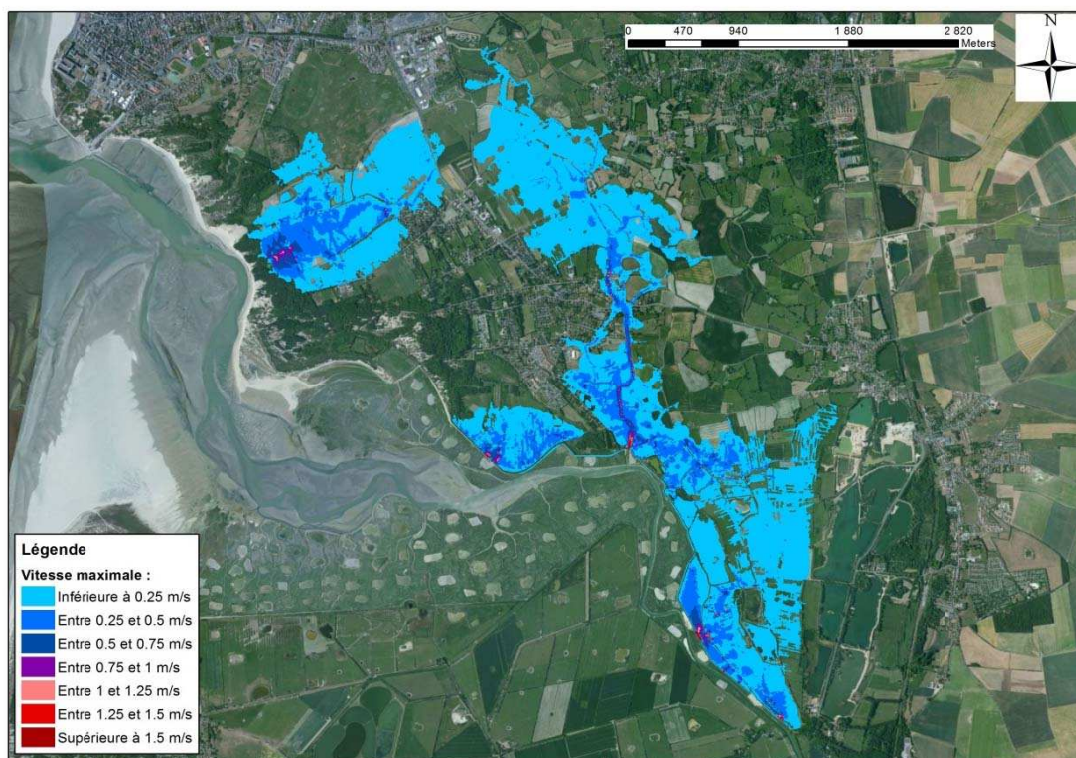


Figure 8-333 : Groffliers - Cartographie de la vitesse de submersion modélisée pour un événement décennal

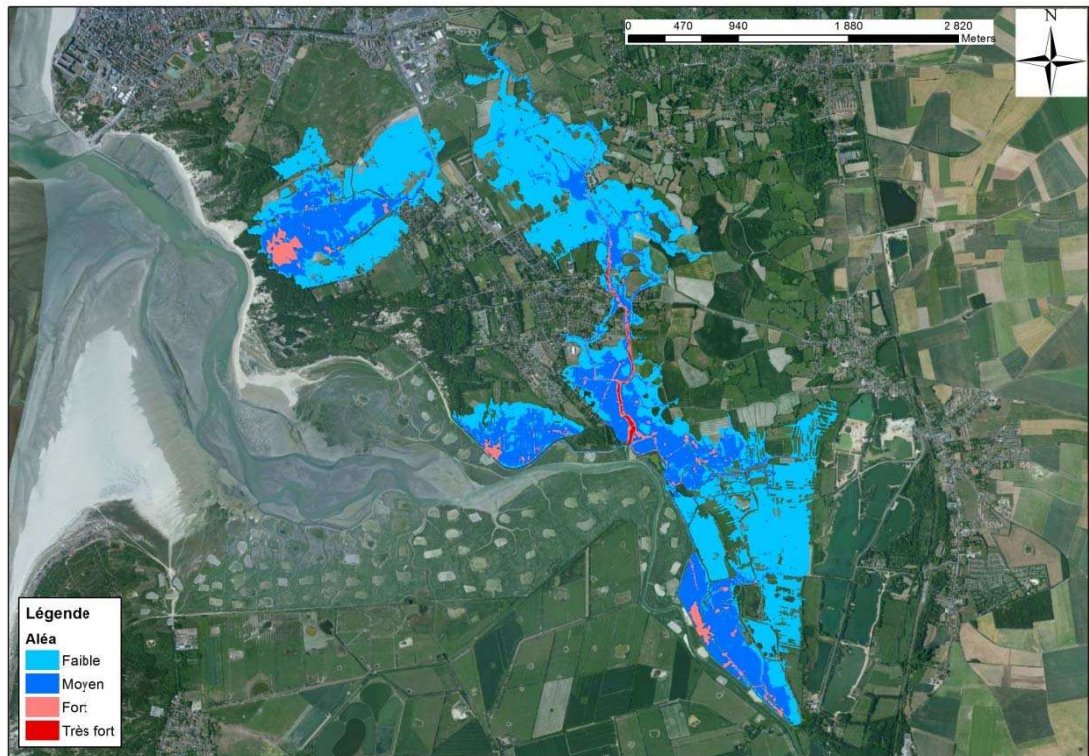


Figure 8-334 : Groffliers - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement décennal

Cartographie des aléas 100 ans

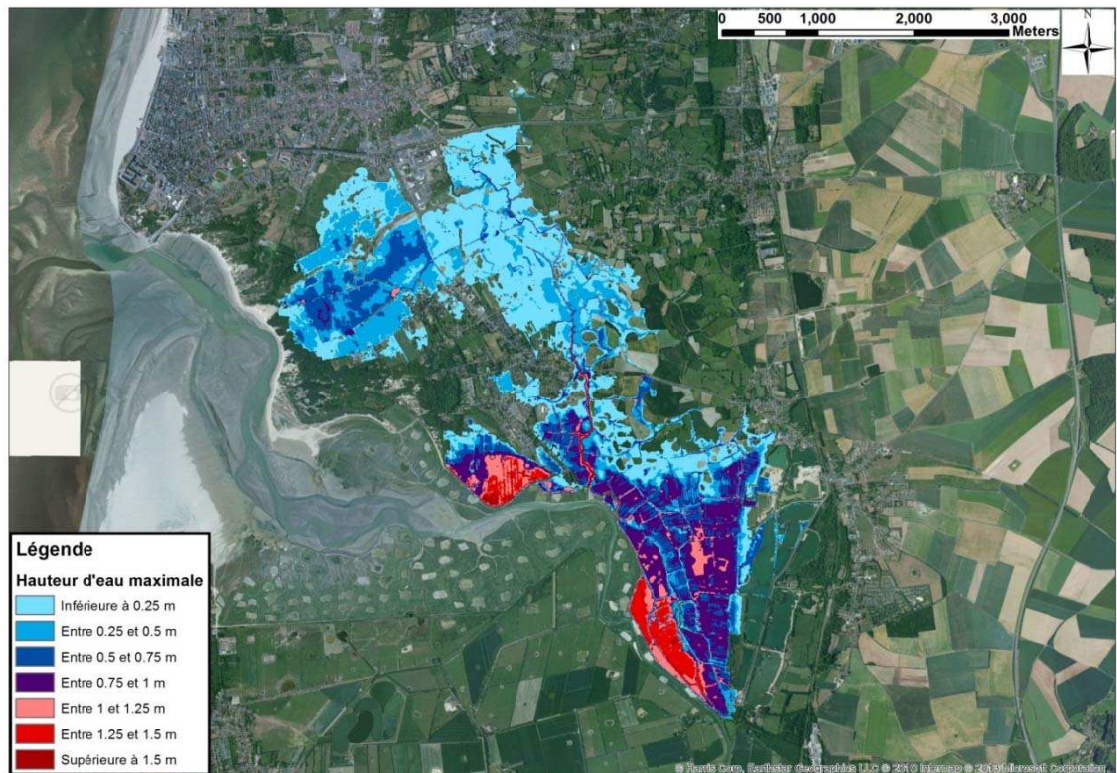


Figure 8-335. Groffliers - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal

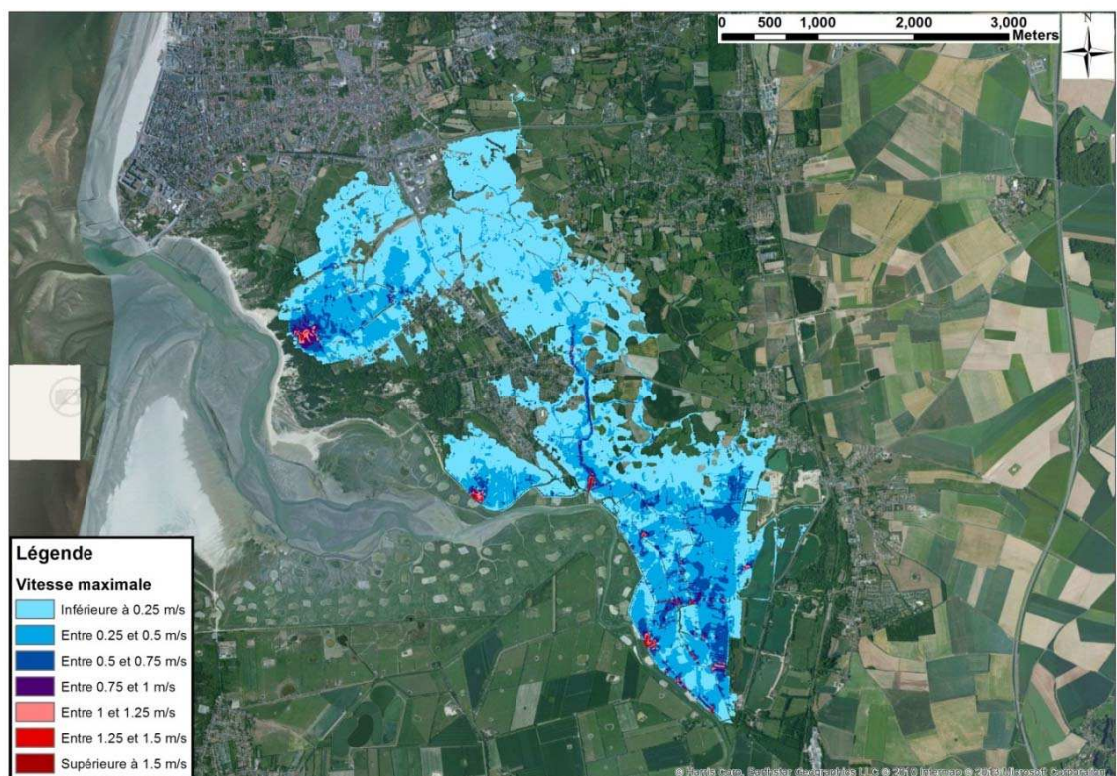


Figure 8-336. Groffliers - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal

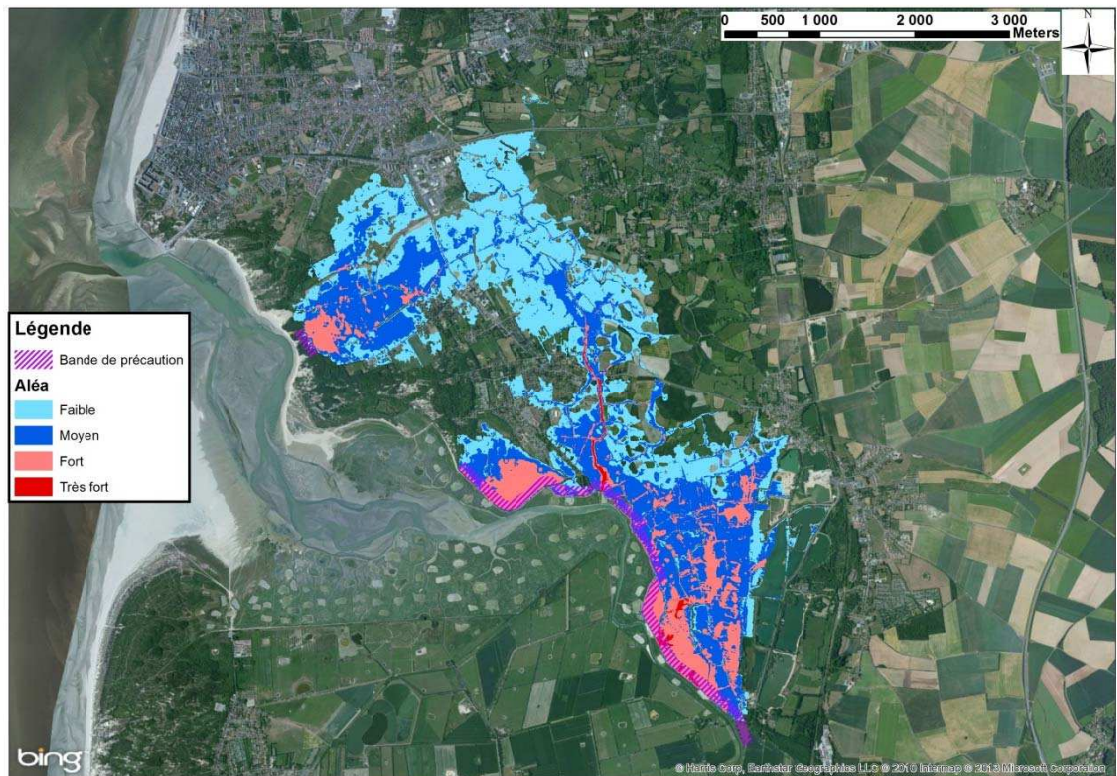


Figure 8-337. Groffliers - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal

Cartographie des aléas 100 ans à l'échéance 2100

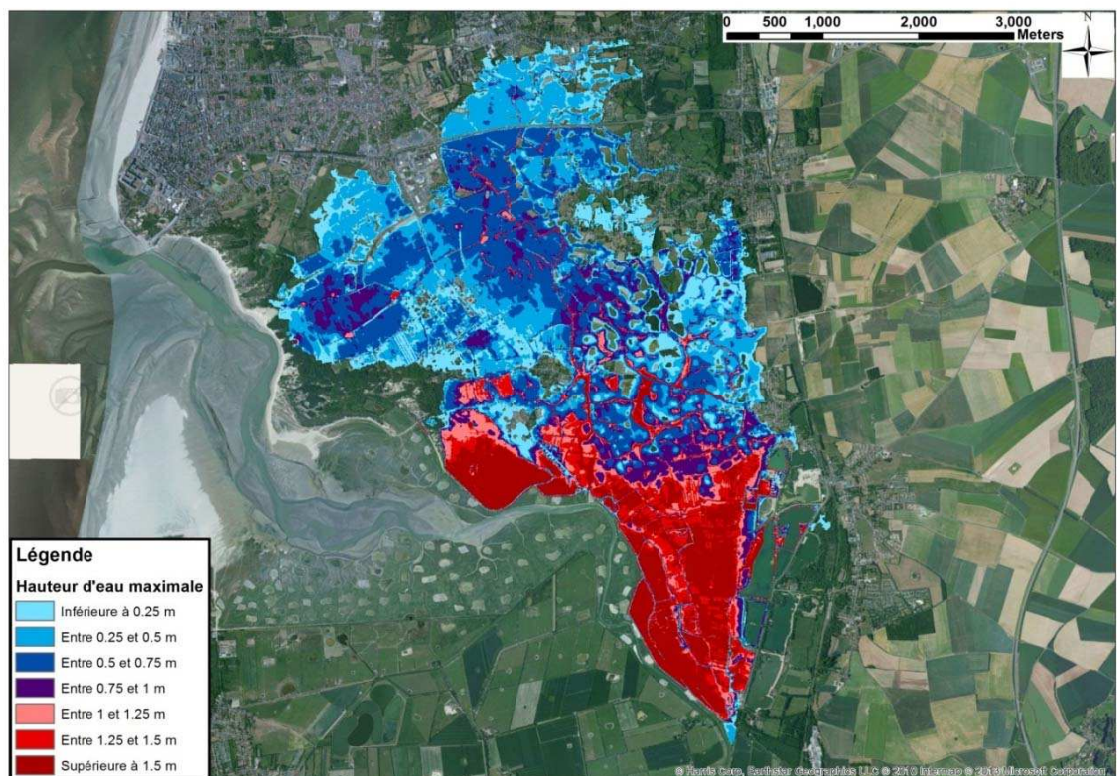


Figure 8-338. Groffliers - Cartographie de la hauteur de submersion modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

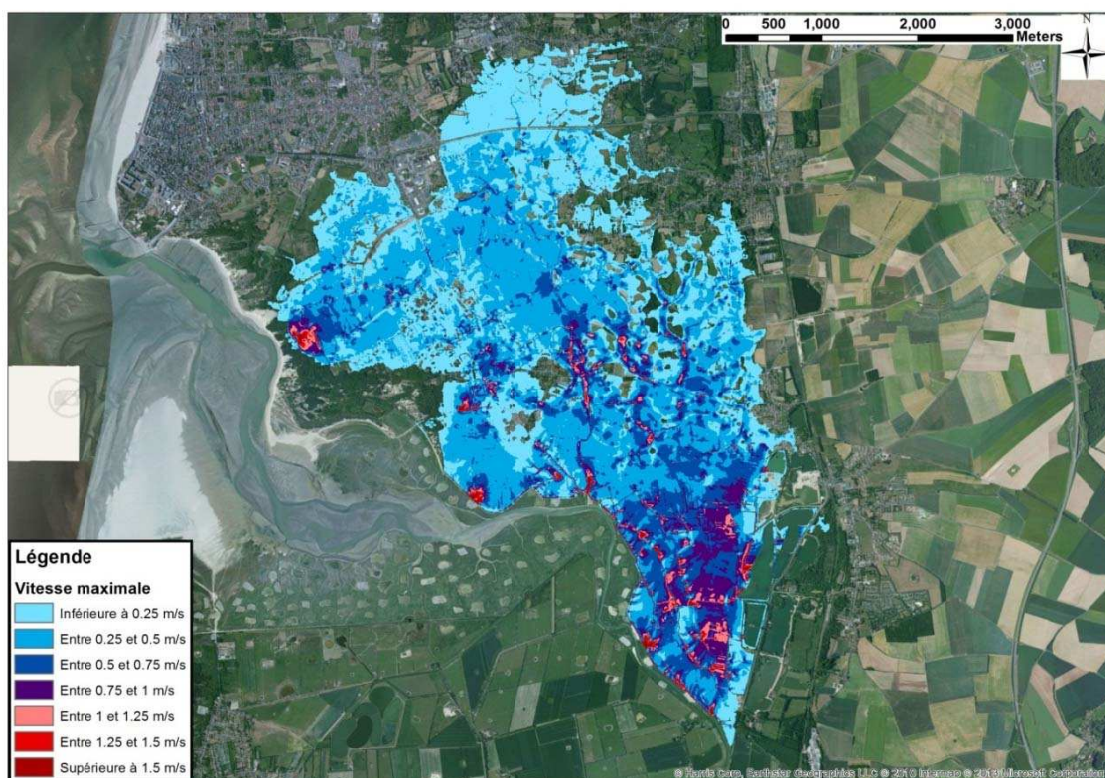


Figure 8-339. Groffliers - Cartographie de la vitesse d'écoulement modélisée pour un événement centennal à l'horizon 2100

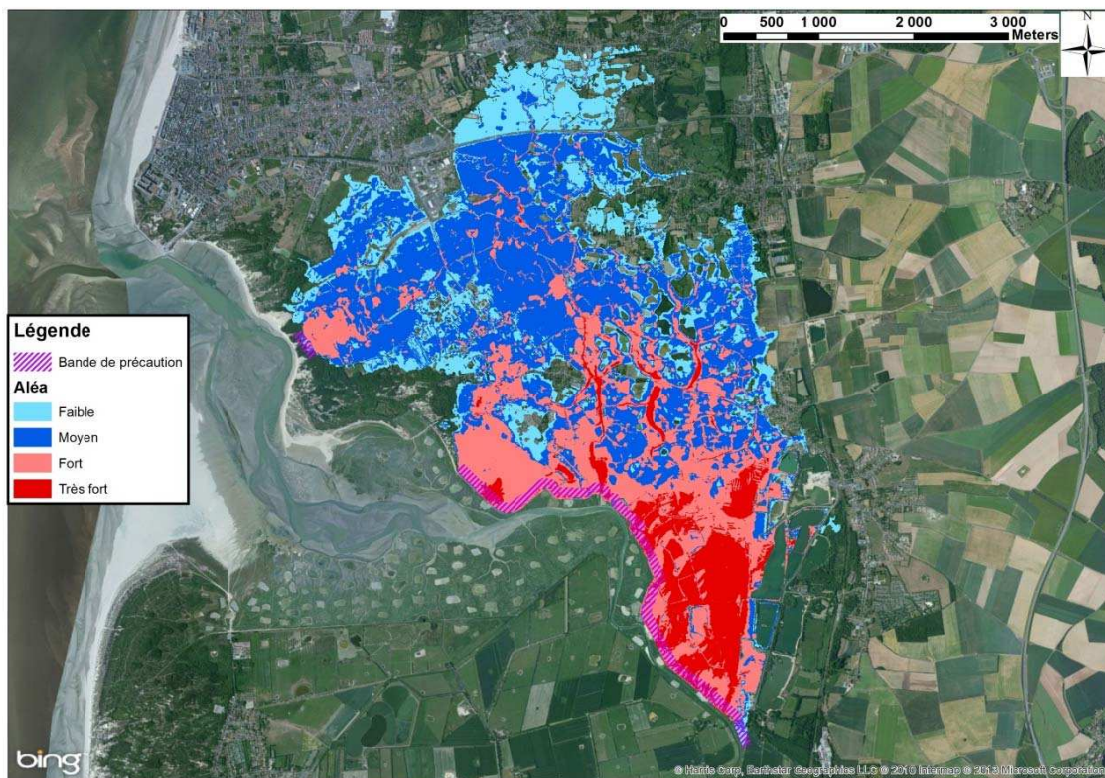


Figure 8-340. Groffliers - Cartographie de l'aléa submersion modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100

9 REFERENCES

MINISTERE DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT / MINISTERE DE L'EQUIPEMENT, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT (1997). Plans de prévention des risques littoraux (PPR), guide méthodologique. La Documentation Française.

CETMEF / SHOM (2008). Statistiques des niveaux marins extrêmes de pleine mer Manche et Atlantique.

CETE NORD PICARDIE (2007). Mission protection de la zone des polders contre les submersions marines. Application de la méthode VSC - littoral.

CIRIA (1996). Beach Management Manual.

CIRIA / CUR / CETMEF (2007). The rock manual.

DHI (2009). MIKE 21 Flow Model, Scientific Documentation.

A N N E X E S

A N N E X E A

Note méthodologique relative au produit « Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France » Edition 2012



CETMEF/DI/IE/IAR N° 13-005
SHOM/DOPS/MIP/HDC N° 9

Objet : Note méthodologique relative au produit « *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France* » Edition 2012

Pièces complémentaires en téléchargement sur le site du CETMEF et du SHOM :

- Cartes des niveaux marins centennaux maximums des produits 2008 et 2012
- carte à l'échelle des côtes de France (Manche et Atlantique)
 - cartes par secteur

Sommaire:

Résumé

1. Introduction
2. Présentation de la méthode
3. Limites de la méthode
4. Explication des différences observées entre les produits 2008 et 2012
5. Conseils pour l'utilisation des données
6. Pistes d'amélioration du produit
7. Annexe : éléments cartographiques complémentaires téléchargeables

Résumé

La connaissance des niveaux marins extrêmes est essentielle dans le cadre de la sécurité de la navigation, du dimensionnement des ouvrages et de la prévention des risques de submersion. Deux approches permettent d'apprécier les niveaux marins extrêmes : une approche empirique « historique » de recensement des niveaux atteints dans le passé ou une approche théorique déduisant les niveaux extrêmes d'une analyse statistique de mesures marégraphiques.

Cette dernière approche a été initiée en 1994 pour améliorer la délimitation du domaine public maritime. Depuis, et pour répondre à des problématiques plus larges, des rapports d'étude sont régulièrement publiés par le SHOM et le CETMEF sur les statistiques des niveaux marins extrêmes le long des côtes de la Manche et de l'Atlantique. L'étude des niveaux marins extrêmes de pleine mer y est réalisée par analyse statistique des mesures marégraphiques en plusieurs sites (dits "principaux" pour des points disposant de plus de 10 ans de mesure et dits "secondaires" pour des points disposant de moins de 10 ans de mesure), puis par interpolation géographique entre ces points, permettant ainsi la production de cartes de niveaux marins de période de retour donnée (10, 20, 50 et 100 ans).

Un produit résultant de ces études a été publié en 2008. Une réactualisation de ce produit a été diffusée en 2012. L'évolution des résultats entre ces deux éditions s'explique par l'évolution des jeux de données utilisés et par des évolutions méthodologiques. Les jeux de données ont pu bénéficier d'une période d'observation plus longue : la qualité des résultats obtenus pour l'ensemble des sites d'observations retenus pour l'étude 2012 (ports principaux et sites secondaires) est ainsi fortement améliorée. La principale différence méthodologique entre l'édition 2008 et l'édition 2012 concerne l'application de la méthode d'interpolation entre les points de mesure : l'amélioration du processus de sélection des sites secondaires retenus pour l'édition 2012 a permis l'utilisation d'une interpolation par plaque mince "exacte" plutôt que l'utilisation d'une interpolation par plaque mince "pondérée" utilisée en 2008. Les incertitudes associées aux différentes méthodes d'interpolation géographique n'ont toutefois pas encore été étudiées.

Des différences importantes, de l'ordre de plusieurs dizaines de centimètres, entre les niveaux marins centennaux de pleine mer des études de 2008 et de 2012 ont été constatées à distance des points de mesure. L'absence d'estimation des incertitudes liées à l'interpolation ne permet pas de quantifier la fiabilité des résultats en dehors des points de mesure. Dans le cadre d'une première approche de connaissance des niveaux marins extrêmes jusqu'à la période de retour centennale, les résultats des produits SHOM-CETMEF sur les niveaux marins extrêmes peuvent être considérés et utilisés en connaissance de leurs limites. Il est à ce jour conseillé de retenir aux points de mesure principaux les résultats du produit 2012, en retenant que l'estimation statistique est toujours associée à un intervalle de confiance, et, en dehors de ces points de mesure, le niveau marin maximal des produits de 2008 et de 2012 (cf. Figure 1). Ces résultats ne constituent toutefois qu'une première approche de l'estimation des niveaux marins extrêmes qu'il est recommandé d'approfondir systématiquement (recherche d'observations ou de mesures de niveaux hauts historiques, analyse des phénomènes composant le niveau marin...).

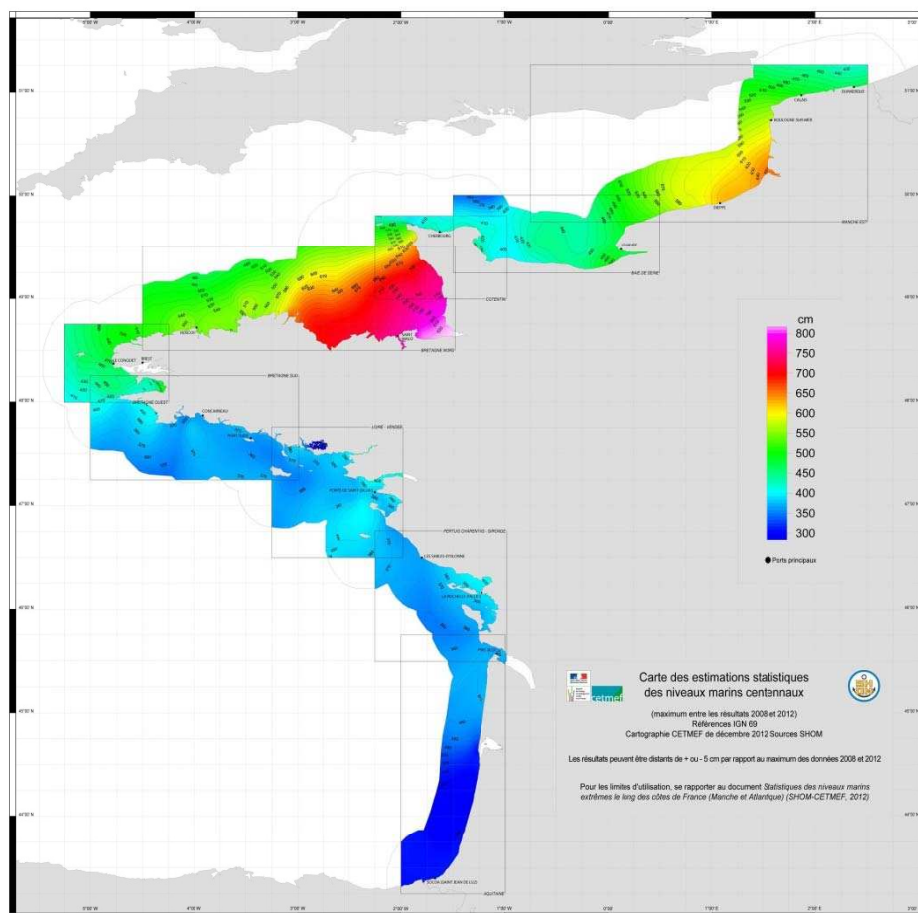


Figure 1 : Carte composite des niveaux marins centennaux maximums des produits 2008 et 2012. Les niveaux sont cotés par rapport à l'IGN69.

1 Introduction

Le niveau marin observé, à un instant donné, résulte de la combinaison de plusieurs composantes associées à différents phénomènes élémentaires. Ce niveau oscille autour du niveau moyen des mers en fonction de :

- la marée : ce phénomène est déterministe et prédictible. Il est directement lié aux mouvements des astres et à leurs variations saisonnières. Sa composante principale sur les côtes de l'Atlantique et de la Manche a une périodicité semi-diurne.
- les surcotes/décotes d'origine météorologique : ces phénomènes sont la manifestation des effets des paramètres atmosphériques que sont la pression (effet de baromètre inverse) et les vents (accumulation d'eau par friction à la surface de l'eau) lors du passage des perturbations atmosphériques. Ils sont sensibles localement à l'orientation des vents par rapport à la côte, et plus généralement à une configuration littorale (bathymétrie, trait de côte, nature des fonds marins). Une tempête peut générer des pics de surcotes pendant quelques heures à 2 ou 3 jours.
- la surcote liée aux vagues : surcote supplémentaire (wave set-up) à la côte générée par le déferlement des vagues.
- localement, dans certains environnements semi-fermés (baies, rades et bassins portuaires), des phénomènes oscillatoires locaux liés à la "mise en résonance" peuvent s'ajouter (phénomènes de seiches).

Par ailleurs, l'eustatisme est une variation lente du niveau moyen des mers, observable à l'échelle mondiale. Cette évolution, actuellement à la hausse, liée à la variation des niveaux des continents, est accentuée par les effets du changement climatique actuellement observés (fonte des glaces, dilatation, modification de la circulation océanique générale, ..).

Ces phénomènes élémentaires se produisent à des échelles de temps différentes. Le niveau marin observé subit ainsi des variations temporelles complexes. Les dépressions atmosphériques, engendrant des surcotes météorologiques, peuvent être à l'origine de niveaux marins particulièrement hauts. Afin d'estimer la probabilité que soient atteints ou dépassés ces niveaux hauts, et ainsi estimer leur période de retour, une analyse des observations disponibles est nécessaire. La période de retour est définie comme le temps moyen séparant deux réalisations d'un événement ; si cet événement est le dépassement par une variable d'un seuil donné, la période de retour désigne le temps moyen séparant deux dépassements successifs de seuil. Par contre elle ne fait pas référence à la périodicité d'un phénomène dans le temps. L'événement peut ainsi se produire deux fois de suite puis rester très longtemps sans se produire.

Les mesures marégraphiques sont parmi les principales sources d'information sur les niveaux marins à la côte. Ils permettent une estimation statistique des niveaux marins extrêmes aux points de mesure. Cependant, les marégraphes sont généralement situés dans les ports. Ils n'enregistrent donc pas l'ensemble des phénomènes côtiers qui peuvent intervenir en dehors de ces points de mesure spécifiques. En dehors des ports, les surcotes liées aux vagues peuvent être plus importantes. Aussi, les analyses menées à partir des seules mesures marégraphiques portuaires ne permettent qu'une estimation des niveaux marins extrêmes sans prise en compte de l'ensemble des effets, notamment ceux liés aux vagues.

2 Présentation de la méthode

La cartographie des niveaux marins extrêmes repose sur l'évaluation statistique des niveaux marins pour des ports principaux (ports pour lesquels il existe plus de 10 ans de mesures consolidées) et pour des sites secondaires (ports côtiers ou sites au large pour lesquels on dispose de moins de 10 ans de mesures consolidées). Une cartographie continue des niveaux marins est obtenue *in fine* par application d'une méthode d'interpolation spatiale permettant de relier les statistiques obtenues pour chacun des sites.

Pour chaque port principal/site secondaire, les niveaux extrêmes statistiques correspondant à une période de retour donnée sont évalués à partir de lois de probabilité calculées à partir des observations de niveaux d'eau (marégraphes) et des prédictions de marée. La méthode retenue pour le calcul de ces lois de probabilité repose séparément, d'une part sur l'analyse statistique des surcotes, d'autre part sur le calcul des probabilités des niveaux générés par les marées prédites de pleine mer, puis sur la combinaison des deux lois de probabilité obtenues (méthode des probabilités conjointes).

Pour les ports principaux, la loi de probabilité retenue pour l'ajustement des surcotes de pleine mer est la loi de Gumbel. Les paramètres de cette loi sont ajustés aux données disponibles pour chaque site, la loi adoptée permettant ensuite d'extrapoler les calculs pour des périodes de retour allant jusqu'à 100 ans. Pour les sites secondaires, le nombre de valeurs de surcotes observées n'est pas suffisant pour ajuster directement une loi à l'échantillon (moins de 10 ans d'observation). La loi de répartition des surcotes de pleine mer pour un site secondaire est alors déduite de celle du port principal le plus proche (en distance ou en similarité de comportement hydrodynamique). Pour cela, on s'appuie sur l'évaluation de la corrélation entre les surcotes observées au site secondaire et celles observées simultanément au port principal choisi. In fine, pour chaque site, la loi de probabilité conjointe permet d'associer un niveau d'eau à une probabilité d'occurrence dont on déduit la période de retour. Les valeurs des niveaux déterminés en chaque point de mesure pour une période de retour donnée (10, 20, 50 ou 100 ans) sont les valeurs utilisées en entrée de la méthode d'interpolation spatiale.

La méthode d'interpolation spatiale retenue est celle de la plaque mince, avec une plaque mince pouvant passer exactement ou au voisinage de chaque point de mesure. Les points de mesure sont les ports principaux et sites secondaires. L'application de la méthode d'interpolation spatiale permet de fournir pour chaque période de retour une représentation d'ensemble du niveau extrême sur une grille maillée à l'échelle du littoral Manche et Atlantique, puis une représentation cartographique sous forme d'isolignes de niveaux.

La méthode permet de fournir :

- pour tous les ports principaux, la loi de probabilité des niveaux extrêmes de pleine mer permettant de déduire les niveaux correspondant à une période de retour donnée;
- une cartographie générale des niveaux extrêmes de pleine mer sur les côtes de la Manche et de l'Atlantique (isolignes de niveaux), pour plusieurs périodes de retour (10, 20, 50 ou 100 ans).

3 Limites de la méthode

Les sources d'incertitudes des résultats et les limitations de la méthode ont fait l'objet d'un paragraphe dans le rapport du produit Statistiques de Niveaux Extrêmes (§2.3.3-2.3.4 pages 30-31) et ne seront pas intégralement rappelées ici. Les principales limitations impactant la compréhension ou l'utilisation du produit sont :

- La méthodologie mise en œuvre ne prend pas en compte la contribution des seiches, vagues et phénomènes haute fréquence, non mesurés, pour établir les niveaux marins extrêmes de référence. Cet aspect relève encore du domaine de la recherche et du développement.
- La méthodologie repose sur l'hypothèse d'indépendance entre marée et surcote. Cette hypothèse n'est pas systématiquement valide dans les zones de bassin et d'estuaire. Les résultats ne sont donc pas valables en zone estuarienne et dans le bassin d'Arcachon. Ces zones ne sont d'ailleurs pas couvertes par le produit cartographique.
- Les intervalles d'erreur/incertitude sur les résultats (ports principaux) n'ont pas été quantifiés : erreur liée à la qualité et durée des échantillons de données, et intervalles de confiance correspondant aux ajustements statistiques (surcotes puis niveaux). Qualitativement, pour un port principal, l'incertitude associée à un niveau statistique sera d'autant plus faible que le rapport *durée de l'échantillon/période de retour* estimée sera grand.
- La méthode suppose que les surcotes extrêmes à un port secondaire suivent, à un coefficient de proportionnalité près, la même loi de probabilité que celles du port principal le plus proche.
- La densité de points de mesure (ports principaux et sites secondaires) utilisés pour l'interpolation géographique est globalement considérée comme suffisante compte tenu de la variabilité spatiale des phénomènes étudiés, à l'exception de la zone Aquitaine, et de certaines zones en configuration de baies (baie du Mont St Michel, baie de Douarnenez...).
- La méthode d'interpolation géographique retenue (plaque mince) est une méthode purement géométrique. De plus, comme toute méthode d'interpolation, la méthode interpole entre des points de mesure, et extrapole au-delà des points de mesure. Les résultats sont modérément fiables dans les zones d'interpolation, et peu fiables dans les zones d'extrapolation où des artefacts de calcul peuvent apparaître. Les zones soumises à une extrapolation sont les fonds de baie où il n'existe pas de point de mesure simultanée au port principal le plus proche (ex : baie du Mont St Michel). Les incertitudes associées à ces interpolations n'ont pu être estimées.

Pour l'utilisation du produit, on retiendra que :

- les résultats sont plus précis aux ports principaux ;
- les incertitudes sur les niveaux de référence croissent avec la période de retour considérée ;
- les incertitudes sur les résultats sont plus fortes dans les fonds de baie (typiquement Baie du Mont St Michel) et les zones littorales où il existe moins de points de mesure (Aquitaine) ;

Note méthodologique relative au produit « Niveaux marins extrêmes »



- 69 -

- les résultats de l'étude ne sont pas valables en zone estuarienne et dans le bassin d'Arcachon.

4 Explication des différences observées entre les produits 2008 et 2012

Les différences observées entre les résultats cartographiques des deux éditions (2008 et 2012) proviennent de l'évolution des jeux de données exploités, et de l'évolution de la méthodologie employée.

4.1 Évolution entre le produit 2008 et le produit 2012 – Concernant les jeux de données

Concernant les séries d'observations :

- le nombre de ports principaux et de sites secondaires exploités a augmenté ;
- la durée des séries d'observations des ports principaux est plus longue dans la plupart des cas (entre +2 ans et +9 ans) ;
- un nouveau contrôle qualité des séries d'observations des ports principaux et des sites secondaires a été effectué, et certaines périodes douteuses ont été supprimées dans les jeux de données ;
- la sélection des sites secondaires pour le produit 2012 a fait l'objet d'une validation à partir de critères hydrodynamiques.

Concernant les séries de prédictions:

- les constantes harmoniques nécessaires au calcul de séries de prédiction de marée ont été mises à jour entre le produit 2008 et le produit 2012 ;
- pour un port donné, le niveau moyen des prédictions est le niveau moyen calculé à la fin de la période de mesure considérée, le niveau marin moyen ayant évolué entre 2008 et 2012.

L'ensemble des évolutions ci-dessus va dans le sens d'une meilleure qualité des résultats obtenus pour l'ensemble des sites d'observations retenus pour l'étude (observatoires principaux et secondaires).

4.2 Évolution entre le produit 2008 et le produit 2012 – Concernant la méthodologie

On relève une seule différence d'ordre méthodologique entre l'édition 2008 et l'édition 2012. Elle concerne l'application de la méthode d'interpolation géographique (plaque mince) entre les points de mesure.

Dans l'édition de 2012, le choix a été fait de mettre en œuvre une *plaque mince "exacte"*, passant strictement par tous les points de mesure (ports principaux et sites secondaires). Dans l'édition de 2008, le choix avait été fait de mettre en œuvre une *plaque mince "pondérée"*. La *plaque mince "pondérée"* passe exactement par les valeurs des ports principaux mais n'est pas strictement contrainte par les sites secondaires. Au niveau des sites secondaires, la distance maximale autorisée entre la valeur de la plaque mince et la valeur réelle est fonction d'un degré de confiance accordé à la valeur du site.

L'amélioration du processus de sélection des sites secondaires retenus pour l'édition 2012 justifie en partie l'utilisation d'une *plaque mince "exacte"*, puisque la confiance accordée en ces points de mesure est considérée comme meilleure que pour le produit 2008. Sinon, lorsque les mesures présentent une incertitude importante, il est d'usage de rechercher une surface d'interpolation de type *plaque mince "pondérée"*.

Il n'est pas possible aujourd'hui de distinguer directement la part liée à l'évolution des jeux de données de celle liée au choix de la méthode d'interpolation dans les différences observées dans les résultats cartographiques, et d'indiquer quel produit privilégier. Les incertitudes associées aux interpolations n'ont en effet pu être estimées. Pour cela, des recommandations d'usage sont fournies ci-après.

5 Conseils pour l'utilisation des données

La réactualisation de l'étude sur les niveaux marins extrêmes publiée en 2012 a bénéficié de périodes d'observation étendues, requalifiées et de l'apport de nouveaux points de mesure. Ainsi, les résultats de cette étude aux points de mesures principaux sont à privilégier.

En dehors de ces points, l'interpolation géographique amène des incertitudes supplémentaires, d'autant plus dans les zones peu couvertes par des points de mesure. Si les résultats des analyses statistiques aux ports principaux évoluent peu (différences observées inférieures à 10 cm pour le niveau centennal), le choix de la méthode d'interpolation combiné à l'utilisation d'un réseau de points secondaires plus dense peut amener des différences significatives, de plusieurs dizaines de centimètres pour le niveau centennal, entre les 2 produits. Il n'est pas possible de savoir a priori quel produit rend le mieux compte des niveaux marins en dehors des points de mesures des ports principaux. Pour cela, il est conseillé de :

- vérifier que la zone étudiée se trouve dans le domaine de validité des résultats de l'étude (hors estuaire et bassin, dans le domaine d'interpolation entre des points d'observations principaux et/ou secondaires) ;
- situer la zone étudiée par rapport aux points de mesure : plus la zone étudiée se trouve éloignée de points de mesure, plus l'incertitude sur le résultat est grande quel que soit le produit utilisé ;
- retenir les valeurs des estimations de niveaux marins du produit 2012 aux ports principaux et en dehors de ces ports, par sécurité, retenir la valeur maximum entre le niveau marin proposé dans le produit de 2008 et celui du produit 2012.

Par ailleurs, dans le cadre de la réalisation d'études d'aléa submersion marine, il est recommandé de réaliser une analyse des événements tempétueux historiques et des niveaux marins qu'ils ont engendrés à la côte. Ces niveaux marins ne sont pas directement comparables aux niveaux marins statistiques, puisqu'il ne s'agit en général pas de mesures issues de marégraphes. En revanche, ils permettent d'apporter une information de niveau atteint en conditions exceptionnelles. La confrontation de ces niveaux aux niveaux marins statistiques centennaux à la côte permet de déterminer l'événement de référence à retenir dans le cadre d'études d'aléa submersion marine, notamment dans le cadre des études préalables à l'élaboration de PPRL. Dans les cas où des informations sur les niveaux marins historiques n'ont pu être collectées, et en dehors des secteurs de mesures (ports principaux), compte tenu des fortes incertitudes concernant les résultats de

l'interpolation géographique, il est recommandé de retenir, à partir des produits de 2008 et 2012, le niveau marin centennal le plus haut.

6 Pistes d'amélioration du produit

La piste principale d'amélioration concerne la méthode d'interpolation géographique et de détermination de l'incertitude associée. La mise en œuvre d'améliorations sur cette méthode constitue un enjeu technique et opérationnel de manière à produire, au moins le long du littoral côtier, une représentation continue et de précision qualifiée des niveaux extrêmes entre les sites d'observations. Un projet commun, en cours d'élaboration entre le CETMEF et le SHOM, vise à tester d'autres méthodes d'interpolation.

Dans un premier temps, un effort d'analyse par rejeu des méthodes d'interpolation utilisées jusqu'ici (influence des jeux de données, pertinence de l'introduction de sites secondaires, comparaison des modèles d'interpolation utilisés,...) est en cours au SHOM, en vue d'estimer les incertitudes associées à la méthode d'interpolation par plaque mince choisie. Un effort supplémentaire sera également nécessaire pour explorer les domaines de validité de ces méthodes (méthodologie, données prises en compte et pré-traitement de ces données...).

L'exploration de nouvelles méthodes d'interpolation constituera la seconde étape d'amélioration. Des méthodes d'interpolation pondérée par des paramètres tels que la bathymétrie ou les intervalles de confiance sont envisagées. Des interpolations séparées des niveaux de pleine mer prédits et de la surcote, ensuite convolués, sont également envisagées. Les modalités de mise en œuvre concrète de cet effort restent à définir à ce jour.

En parallèle, un contrat de recherche en cours entre le CETMEF, EDF, le SHOM et la DGPR porte sur l'« Estimation des surcotes et niveaux marins extrêmes en Manche, Atlantique et Méditerranée ». Il permettra d'explorer les pistes d'amélioration des estimations statistiques aux ports principaux et à leur voisinage principalement par la prise en compte de la surélévation due aux vagues et par le calcul d'intervalles de confiance. Une méthode d'interpolation géographique devra être adaptée à ce nouvel enjeu.

7 Annexe : éléments cartographiques téléchargeables

Afin de permettre de suivre les recommandations formulées dans la présente note, une carte représentant la valeur maximum du niveau marin centennal entre les produits 2008 et 2012 a été fournie en résumé (Figure 1). Cette carte à petite échelle ainsi que des cartes par secteur, de meilleure résolution graphique, sont proposées au téléchargement sur les sites internet du CETMEF et du SHOM.

Fait le : 15 / 01 / 2013

Pour le directeur général du SHOM,
l'ingénieur en chef de l'armement Laurent Kerléguer
directeur des opérations, de la production et des services



Fait le : 21 / 01 / 2013

Le directeur du CETMEF

Pour le directeur du CETMEF
par délégation
le directeur adjoint


Olivier PIET

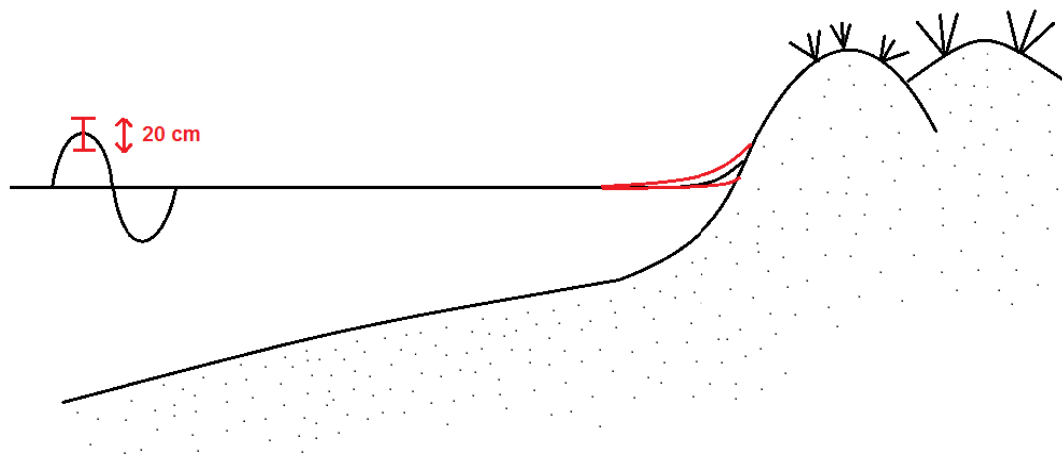
A N N E X E B

Tests de sensibilité au calcul de la surcote de déferlement sur les sites du Nord – Pas de Calais

Hypothèses :

Les paramètres desquels dépend la surcote de déferlement ont été cernés. Il s'agit des paramètres de la houle (hauteur, période), le niveau d'eau et la bathymétrie de la plage.

L'amplitude de variation concernant la hauteur significative de la houle a été fixée à ± 10 cm. Cela donne une amplitude totale de 20 cm. Ces variations de 10 cm de part et d'autre de la Hs de la houle est représentative de l'erreur qui peut être faite.



L'amplitude de variation de la **période moyenne** qui a été choisie est de $\pm 1,6$ s, qui reste acceptable et peut-être attendue sur une côte comme celle du Nord-Pas de Calais. L'amplitude totale de variation de la période est donc de 3,2 s autour de la valeur originale.

Concernant le niveau marin, la courbe des statistiques combinées (Hs de la houle/ Niveau marin) à Calais est donnée ci-après.

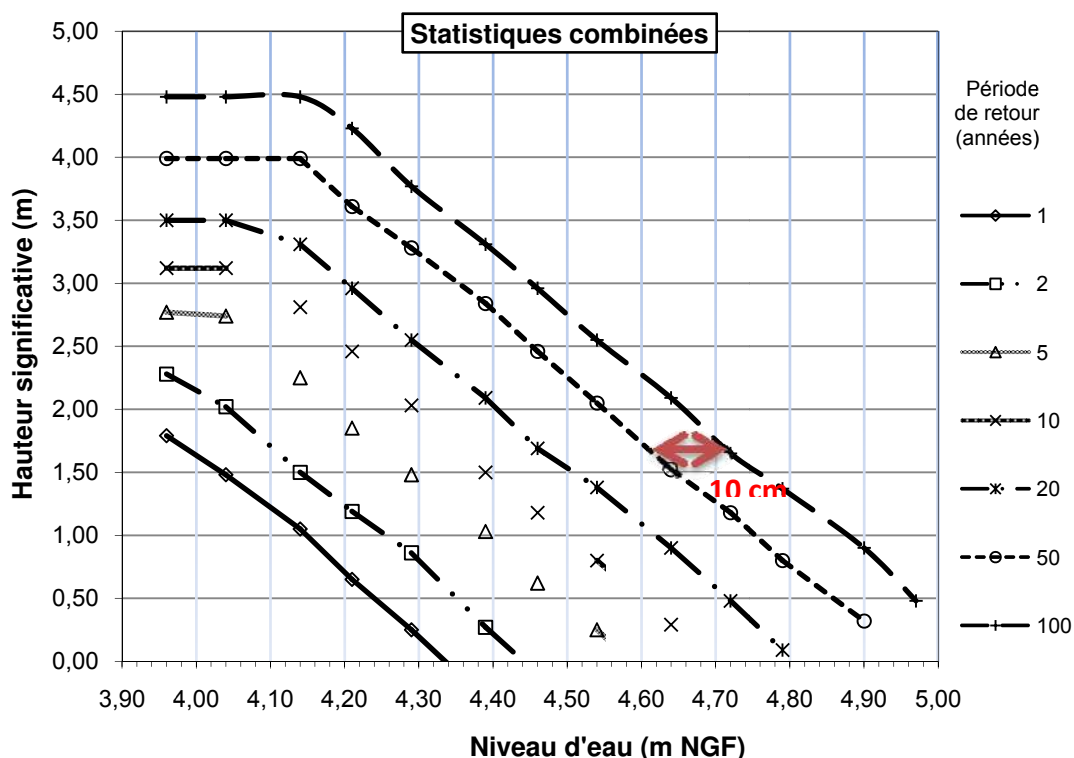
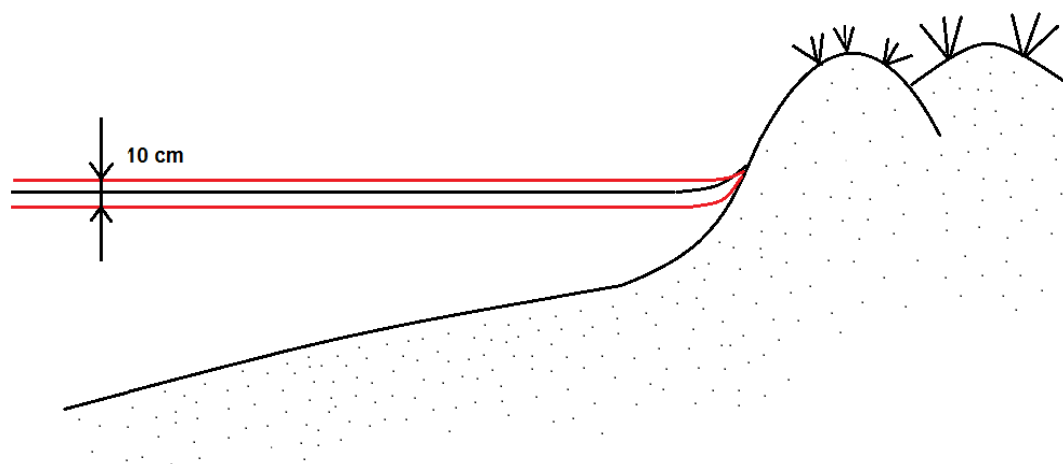


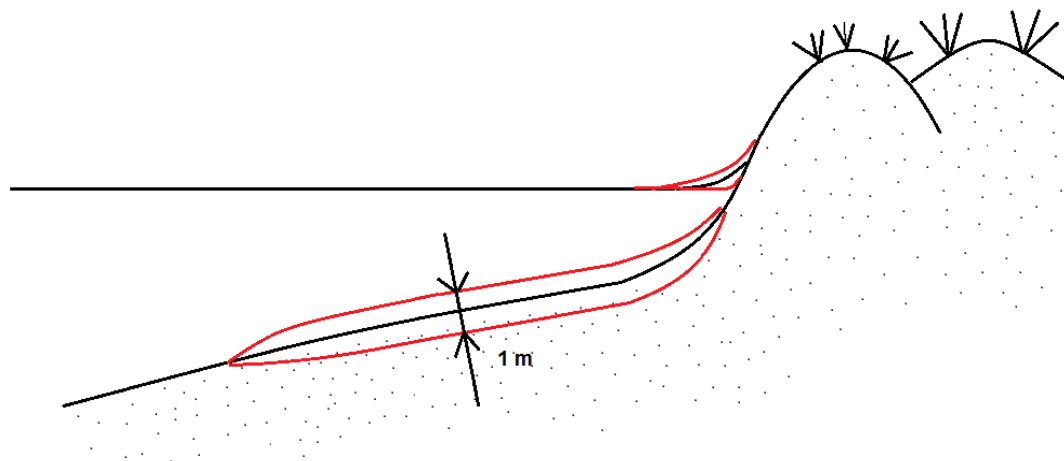
Figure : Statistiques combinées à Calais

L'amplitude en niveau entre la courbe cinquantennale et la courbe centennale, à hauteur de houle égale, est en moyenne de 10 cm lorsqu'on se déplace sur la courbe des probabilités conjointes. Cette amplitude est la même à Dunkerque et Boulogne sur Mer. Nous avons ainsi choisi cette amplitude pour faire varier le niveau marin de part et d'autre de la valeur correspondant à un aléa centennal (comprenant la surcote du changement climatique) qui est de 5,4m NGF. Le niveau varie donc de +/- 5cm par rapport à ce niveau.



Enfin, le dernier paramètre influant sur la surcote de déferlement et sur lequel une incertitude

peut être est la bathymétrie de la plage. La partie la plus influente est la bathymétrie dans la zone de déferlement. Une variation de +/- 50cm de l'altitude de cette zone a été considérée. Cette variation est très probable, et correspond à un engraissement ou un dégraissement moyen d'une plage sur un hiver, par exemple.



Résultats :

La hauteur d'eau propagée est sensible et augmente avec :

- L'augmentation de la houle ;
- La diminution du niveau marin ;
- L'abaissement de l'estran ;
- L'augmentation de la période.

Le test nommé « test combiné » a été mené conjuguant les variations les plus influentes sur l'augmentation du set-up, soit :

- Une hauteur significative de la houle augmentée de 10 cm
- Une période de houle augmentée de 1,6 s
- Un niveau marin maximal diminué de 5 cm
- Une bathymétrie dans la zone de déferlement abaissée de 50cm

Bray-Dunes :

A Bray-Dunes, le niveau d'eau maximal centennal est de 4,90 m NGF: La houle de projet a une hauteur significative de 2,9 m, une période de pic de 9,78 s. Les résultats intermédiaires sont seulement précisés pour le profil 1.

	Niveau d'eau maximal au large (m NGF)	Niveau d'eau maximal propagé (m NGF)	Wave set-up (m)
Original	4,9	5,20	0,30
Hs de la houle +10cm	4,9	5,21	0,31
Hs de la houle -10cm	4,9	5,19	0,29
Niveau marin +5cm	4,95	5,24	0,29
Niveau marin -5cm	4,85	5,16	0,31
Bathymétrie de l'estran +50cm	4,90	5,17	0,27
Bathymétrie de l'estran -50cm	4,90	5,23	0,33
Période de la houle +1,6 s	4,90	5,23	0,33
Période de la houle -1,6 s	4,90	5,16	0,26
Test combiné	4,85	5,23	0,38

Les nouveaux niveaux marins s'établissent ainsi :

T100	Profil 1	Profil 2
Niveau marin	4,70 m NGF	4,70 m NGF
Changement climatique	0,20 m	0,20 m
Surcote de déferlement	0,30 m	0,39 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,08 m	0,07 m
TOTAL	5,28 m NGF	5,36 m NGF

T100 + CC	Profil 1	Profil 2
Niveau marin	4,70 m NGF	4,70 m NGF
Changement climatique	0,60 m	0,60 m
Surcote de déferlement	0,22 m	0,30 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,08 m	0,07 m
TOTAL	5,60 m NGF	5,67 m NGF

Malo-les-Bains :

A Malo-les-Bains, le niveau d'eau maximal centennal est de 4,90 m NGF: La houle de projet a une hauteur significative de 3,2 m, une période de pic de 9,78 s. Les résultats intermédiaires sont seulement précisés pour le profil 1.

	Niveau d'eau maximal au large (m NGF)	Niveau d'eau maximal propagé (m NGF)	Wave set-up (m)
Original	4,9	5,14	0,24
Hs de la houle +10cm	4,9	5,15	0,25
Hs de la houle -10cm	4,9	5,13	0,23
Niveau marin +5cm	4,95	5,19	0,24
Niveau marin -5cm	4,85	5,10	0,25
Bathymétrie de l'estran +50cm	4,90	5,14	0,24
Bathymétrie de l'estran -50cm	4,90	5,15	0,25
Période de la houle +1,6 s	4,90	5,15	0,25
Période de la houle -1,6 s	4,90	5,12	0,22
Test combiné	4,85	5,12	0,27

Les nouveaux niveaux marins s'établissent ainsi :

T100	Profil 1	Profil 2	Profil 3
Niveau marin	4,70 m NGF	4,70 m NGF	4,70 m NGF
Changement climatique	0,20 m	0,20 m	0,20 m
Surcote de déferlement	0,24 m	0,10 m	0,12 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,03 m	0,03 m	0,03 m
TOTAL	5,17 m NGF	5,03 m NGF	5,05 m NGF

T100 + CC	Profil 1	Profil 2	Profil 3
Niveau marin	4,70 m NGF	4,70 m NGF	4,70 m NGF
Changement climatique	0,60 m	0,60 m	0,60 m
Surcote de déferlement	0,19 m	0,09 m	0,10 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,04 m	0,02 m	0,02 m
TOTAL	5,53 m NGF	5,41 m NGF	5,42 m NGF

Dunkerque :

A Dunkerque, le niveau d'eau maximal centennal est de 4,90 m NGF: La houle de projet a une hauteur significative de 2,12 m, une période de pic de 9,31 s.

	Niveau d'eau maximal au large (m NGF)	Niveau d'eau maximal propagé (m NGF)	Wave set-up (m)
Original	4,90	5,22	0,32
Hs de la houle +10cm	4,90	5,24	0,34
Hs de la houle -10cm	4,90	5,20	0,30
Niveau marin +5cm	4,95	5,26	0,31
Niveau marin -5cm	4,85	5,18	0,33
Bathymétrie de l'estran +50cm	4,90	5,21	0,31
Bathymétrie de l'estran -50cm	4,90	5,22	0,32
Période de la houle +1,6 s	4,90	5,24	0,34
Période de la houle -1,6 s	4,90	5,18	0,28
Test combiné	4,85	5,23	0,38

Le nouveau niveau marin s'établit ainsi :

T100	
Niveau marin	4,70 m NGF
Changement climatique	0,20 m
Surcote de déferlement	0,32 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,06 m
TOTAL	5,29 m NGF

T100 + CC	
Niveau marin	4,70 m NGF
Changement climatique	0,60 m
Surcote de déferlement	0,20 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,06 m
TOTAL	5,56 m NGF

Marck :

A Marck, le niveau d'eau maximal centennal est de 5,10 m NGF: La houle de projet a une hauteur significative de 1,55 m, une période de pic de 11,71 s.

	Niveau d'eau maximal au large (m NGF)	Niveau d'eau maximal propagé (m NGF)	Wave set-up (m)
Original	5,10	5,21	0,11
Hs de la houle +10cm	5,10	5,22	0,12
Hs de la houle -10cm	5,10	5,19	0,09
Niveau marin +5cm	5,15	5,25	0,10
Niveau marin -5cm	5,05	5,16	0,11
Bathymétrie de l'estran +50cm	5,10	5,22	0,12
Bathymétrie de l'estran -50cm	5,10	5,22	0,12
Période de la houle +1,6 s	5,10	5,21	0,11
Période de la houle -1,6 s	5,10	5,20	0,10
Test combiné	5,05	5,20	0,15

Le nouveau niveau marin s'établit ainsi :

T100	
Niveau marin	4,90 m NGF
Changement climatique	0,20 m
Surcote de déferlement	0,11 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,04 m
TOTAL	5,25 m NGF

T100 + CC	
Niveau marin	4,90 m NGF
Changement climatique	0,60 m
Surcote de déferlement	0,07 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,02 m
TOTAL	5,59 m NGF

Blériot-Plage :

A Blériot-Plage, le niveau d'eau maximal centennal est de 5,30 m NGF: La houle de projet a une hauteur significative de 1,15 m, une période de pic de 10,58 s.

	Niveau d'eau maximal au large (m NGF)	Niveau d'eau maximal propagé (m NGF)	Wave set-up (m)
Original	5,30	5,41	0,11
Hs de la houle +10cm	5,30	5,43	0,13
Hs de la houle -10cm	5,30	5,39	0,09
Niveau marin +5cm	5,35	5,45	0,10
Niveau marin -5cm	5,25	5,37	0,12
Bathymétrie de l'estran +50cm	5,30	5,40	0,10
Bathymétrie de l'estran -50cm	5,30	5,42	0,12
Période de la houle +1,6 s	5,30	5,42	0,12
Période de la houle -1,6 s	5,30	5,40	0,10
Test combiné	5,25	5,42	0,17

Le nouveau niveau marin s'établit ainsi :

T100	
Niveau marin	5,10 m NGF
Changement climatique	0,20 m
Surcote de déferlement	0,11 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,06 m
TOTAL	5,47 m NGF

T100 + CC	
Niveau marin	5,10 m NGF
Changement climatique	0,60 m
Surcote de déferlement	0,03 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,05 m
TOTAL	5,78 m NGF

Sangatte – Dune :

A Sangatte, sur la partie correspondant au cordon dunaire, le niveau d'eau maximal centennal est de 5,40 m NGF: La houle de projet a une hauteur significative de 1,20 m, une période de pic de 11,54 s.

	Niveau d'eau maximal au large (m NGF)	Niveau d'eau maximal propagé (m NGF)	Wave set-up (m)
Original	5,40	5,54	0,14
Hs de la houle +10cm	5,40	5,56	0,16
Hs de la houle -10cm	5,40	5,51	0,11
Niveau marin +5cm	5,45	5,58	0,13
Niveau marin -5cm	5,35	5,50	0,15
Bathymétrie de l'estran +50cm	5,40	5,53	0,13
Bathymétrie de l'estran -50cm	5,40	5,54	0,14
Période de la houle +1,6 s	5,40	5,55	0,15
Période de la houle -1,6 s	5,40	5,52	0,12
Test combiné	5,35	5,54	0,19

Le nouveau niveau marin s'établit ainsi :

T100	
Niveau marin	5,20 m NGF
Changement climatique	0,20 m
Surcote de déferlement	0,14 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,05 m
TOTAL	5,59 m NGF

T100 + CC	
Niveau marin	5,20 m NGF
Changement climatique	0,60 m
Surcote de déferlement	0,04 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,05 m
TOTAL	5,89 m NGF

Sangatte – Digue :

A Sangatte, sur la partie correspondant à la digue, le niveau d'eau maximal centennal est de 5,40 m NGF: La houle de projet a une hauteur significative de 1,20 m, une période de pic de 11,54 s.

	Niveau d'eau maximal au large (m NGF)	Niveau d'eau maximal propagé (m NGF)	Wave set-up (m)
Original	5,40	5,60	0,20
Hs de la houle +10cm	5,40	5,62	0,22
Hs de la houle -10cm	5,40	5,58	0,18
Niveau marin +5cm	5,45	5,64	0,19
Niveau marin -5cm	5,35	5,57	0,22
Bathymétrie de l'estran +50cm	5,40	5,58	0,18
Bathymétrie de l'estran -50cm	5,40	5,61	0,21
Période de la houle +1,6 s	5,40	5,61	0,21
Période de la houle -1,6 s	5,40	5,60	0,20
Test combiné	5,35	5,60	0,25

Le nouveau niveau marin s'établit ainsi :

T100	
Niveau marin	5,20 m NGF
Changement climatique	0,20 m
Surcote de déferlement	0,20 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,05 m
TOTAL	5,65 m NGF

T100 + CC	
Niveau marin	5,20 m NGF
Changement climatique	0,60 m
Surcote de déferlement	0,09 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,05 m
TOTAL	5,94 m NGF

Wissant :

Sur le site de Wissant, le niveau d'eau maximal centennal est de 5,60 m NGF: La houle de projet a une hauteur significative de 4,30 m, une période de pic de 9,78 s.

	Niveau d'eau maximal au large (m NGF)	Niveau d'eau maximal propagé (m NGF)	Wave set-up (m)
Original	5,60	5,69	0,09
Hs de la houle +10cm	5,60	5,70	0,10
Hs de la houle -10cm	5,60	5,68	0,08
Niveau marin +5cm	5,65	5,74	0,09
Niveau marin -5cm	5,55	5,64	0,09
Bathymétrie de l'estran +50cm	5,60	5,64	0,04
Bathymétrie de l'estran -50cm	5,60	5,73	0,13
Période de la houle +1,6 s	5,60	5,69	0,09
Période de la houle -1,6 s	5,60	5,67	0,07
Test combiné	5,55	5,70	0,15

Le nouveau niveau marin s'établit ainsi :

T100	
Niveau marin	5,40 m NGF
Changement climatique	0,20 m
Surcote de déferlement	0,09 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,06 m
TOTAL	5,75 m NGF

T100 + CC	
Niveau marin	5,40 m NGF
Changement climatique	0,60 m
Surcote de déferlement	0,06 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,06 m
TOTAL	6,12 m NGF

Tardinghen :

Sur le site de Tardinghen, le niveau d'eau maximal centennal est de 5,60 m NGF: La houle de projet a une hauteur significative de 2,15 m, une période de pic de 11,73 s.

	Niveau d'eau maximal au large (m NGF)	Niveau d'eau maximal propagé (m NGF)	Wave set-up (m)
Original	5,60	5,86	0,26
Hs de la houle +10cm	5,60	5,88	0,28
Hs de la houle -10cm	5,60	5,85	0,25
Niveau marin +5cm	5,65	5,90	0,25
Niveau marin -5cm	5,55	5,83	0,28
Bathymétrie de l'estran +50cm	5,60	5,84	0,24
Bathymétrie de l'estran -50cm	5,60	5,89	0,29
Période de la houle +1,6 s	5,60	5,88	0,28
Période de la houle -1,6 s	5,60	5,84	0,24
Test combiné	5,55	5,88	0,33

Le nouveau niveau marin s'établit ainsi :

T100	
Niveau marin	5,40 m NGF
Changement climatique	0,20 m
Surcote de déferlement	0,26 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,07 m
TOTAL	5,93 m NGF

T100 + CC	
Niveau marin	5,40 m NGF
Changement climatique	0,60 m
Surcote de déferlement	0,16 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,06 m
TOTAL	6,22 m NGF

Audresselles :

A Audresselles, le niveau d'eau maximal centennal est de 5,80 m NGF: La houle de projet a une hauteur significative de 4,20 m, une période de pic de 9,78 s. Les résultats intermédiaires sont seulement précisés pour le profil 1.

	Niveau d'eau maximal au large (m NGF)	Niveau d'eau maximal propagé (m NGF)	Wave set-up (m)
Original	5,80	6,19	0,39
Hs de la houle +10cm	5,80	6,20	0,40
Hs de la houle -10cm	5,80	6,18	0,38
Niveau marin +5cm	5,85	6,23	0,38
Niveau marin -5cm	5,75	6,15	0,40
Bathymétrie de l'estran +50cm	5,80	6,17	0,37
Bathymétrie de l'estran -50cm	5,80	6,20	0,40
Période de la houle +1,6 s	5,80	6,21	0,41
Période de la houle -1,6 s	5,80	6,15	0,35
Test combiné	5,75	6,18	0,43

Les nouveaux niveaux marins s'établissent ainsi :

T100	Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4
Niveau marin	5,60 m NGF	5,60 m NGF	5,60 m NGF	5,60 m NGF
Changement climatique	0,20 m	0,20 m	0,20 m	0,20 m
Surcote de déferlement	0,39 m	0,38 m	0,32 m	0,27 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,04 m	0,06 m	0,02 m	0,03 m
TOTAL	6,23 m NGF	6,24 m NGF	6,14 m NGF	6,10m NGF

T100 + CC	Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4
Niveau marin	5,60 m NGF	5,60 m NGF	5,60 m NGF	5,60 m NGF
Changement climatique	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m
Surcote de déferlement	0,33 m	0,44 m	0,27 m	0,22 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,05 m	0,06 m	0,03 m	0,04 m
TOTAL	6,58 m NGF	6,70 m NGF	6,50 m NGF	6,46 m NGF

Ambleteuse :

A Ambleteuse, le niveau d'eau maximal centennal est de 5,80 m NGF: La houle de projet a une hauteur significative de 4,1 m, une période de pic de 9,78 s. Les résultats intermédiaires sont seulement précisés pour le profil 1.

	Niveau d'eau maximal au large (m NGF)	Niveau d'eau maximal propagé (m NGF)	Wave set-up (m)
Original	5,80	6,15	0,35
Hs de la houle +10cm	5,80	6,16	0,36
Hs de la houle -10cm	5,80	6,14	0,34
Niveau marin +5cm	5,85	6,20	0,35
Niveau marin -5cm	5,75	6,11	0,36
Bathymétrie de l'estran +50cm	5,80	6,12	0,32
Bathymétrie de l'estran -50cm	5,80	6,16	0,36
Période de la houle +1,6 s	5,80	6,18	0,38
Période de la houle -1,6 s	5,80	6,08	0,28
Test combiné	5,75	6,16	0,41

Les nouveaux niveaux marins s'établissent ainsi :

T100	Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4
Niveau marin	5,60 m NGF	5,60 m NGF	5,60 m NGF	5,60 m NGF
Changement climatique	0,20 m	0,20 m	0,20 m	0,20 m
Surcote de déferlement	0,35 m	0,24 m	0,48 m	0,46 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,06 m	0,06 m	0,04 m	0,03 m
TOTAL	6,21 m NGF	6,10 m NGF	6,32 m NGF	6,29m NGF

T100 + CC	Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4
Niveau marin	5,60 m NGF	5,60 m NGF	5,60 m NGF	5,60 m NGF
Changement climatique	0,60 m	0,60 m	0,60 m	0,60 m
Surcote de déferlement	0,28 m	0,17 m	0,42 m	0,39 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,07 m	0,08 m	0,04 m	0,04 m
TOTAL	6,55 m NGF	6,45 m NGF	6,66 m NGF	6,63 m NGF

Wimereux :

Sur le site de Wimereux, le niveau d'eau maximal centennal est de 5,9 m NGF: La houle de projet a une hauteur significative de 4,30 m, une période de pic de 9,78 s.

	Niveau d'eau maximal au large (m NGF)	Niveau d'eau maximal propagé (m NGF)	Wave set-up (m)
Original	5.9	6.03	0.13
Hs de la houle +10cm	5.9	6.04	0.14
Hs de la houle -10cm	5.9	6.02	0.12
Niveau marin +5cm	5.95	6.07	0.12
Niveau marin -5cm	5.85	5.98	0.13
Bathymétrie de l'estran +50cm	5.9	5.99	0.09
Bathymétrie de l'estran -50cm	5.9	6.05	0.15
Période de la houle +1,6 s	5.9	6.04	0.14
Période de la houle -1,6 s	5.9	6.00	0.10
Test combiné	5.85	6.04	0.19

Le nouveau niveau marin s'établit ainsi :

T100	
Niveau marin	5,70 m NGF
Changement climatique	0,20 m
Surcote de déferlement	0,13 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,06 m
TOTAL	6,09m NGF

T100 + CC	
Niveau marin	5,70 m NGF
Changement climatique	0,60 m
Surcote de déferlement	0,11 m
Incertitudes sur la surcote de déferlement	0,06 m
TOTAL	6,47 m NGF

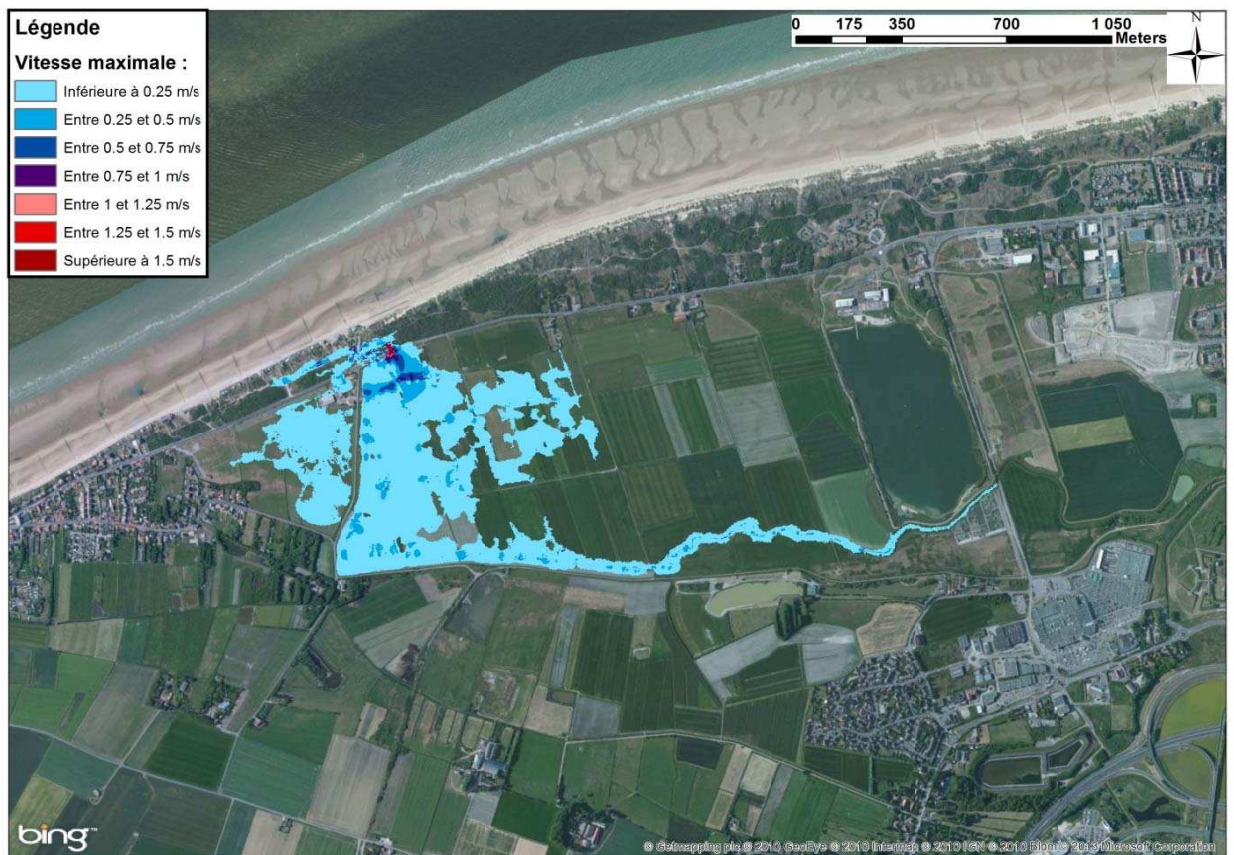
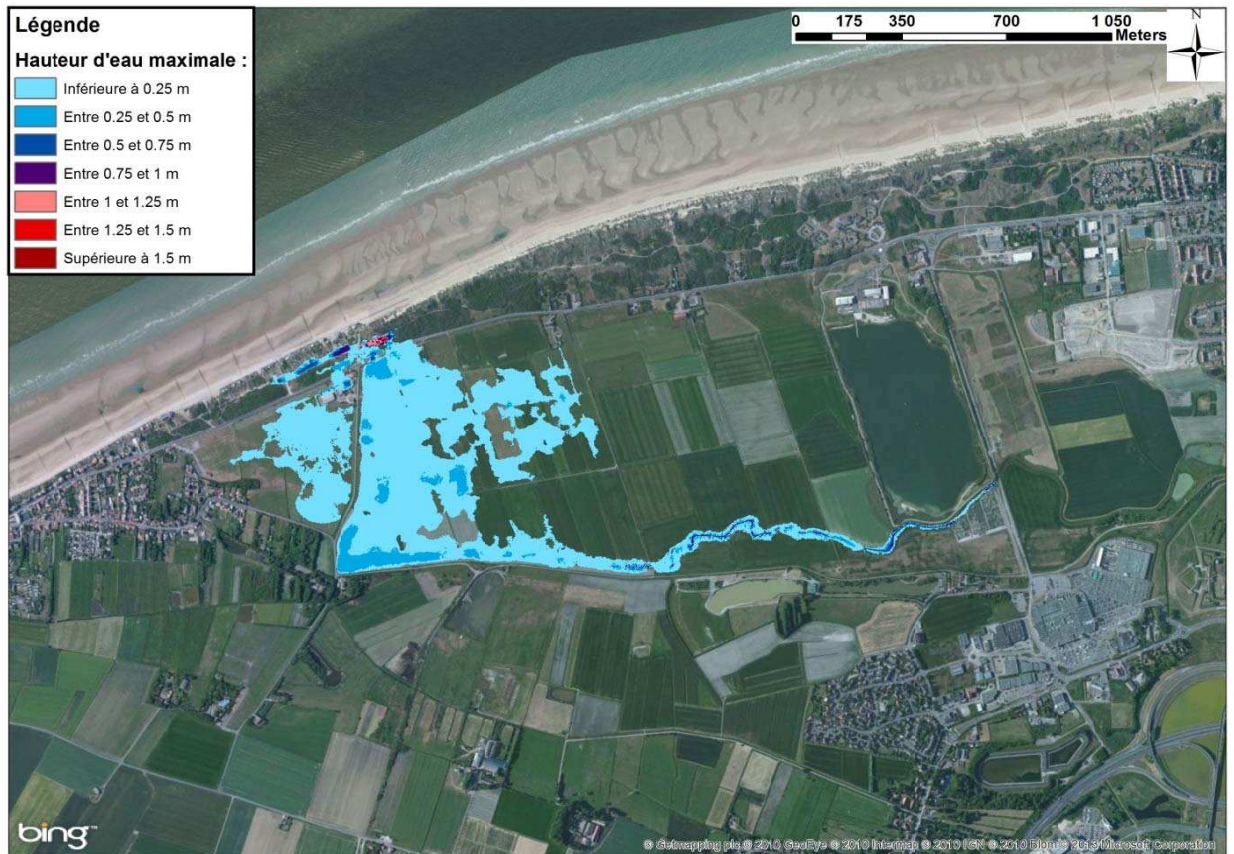
A N N E X E C

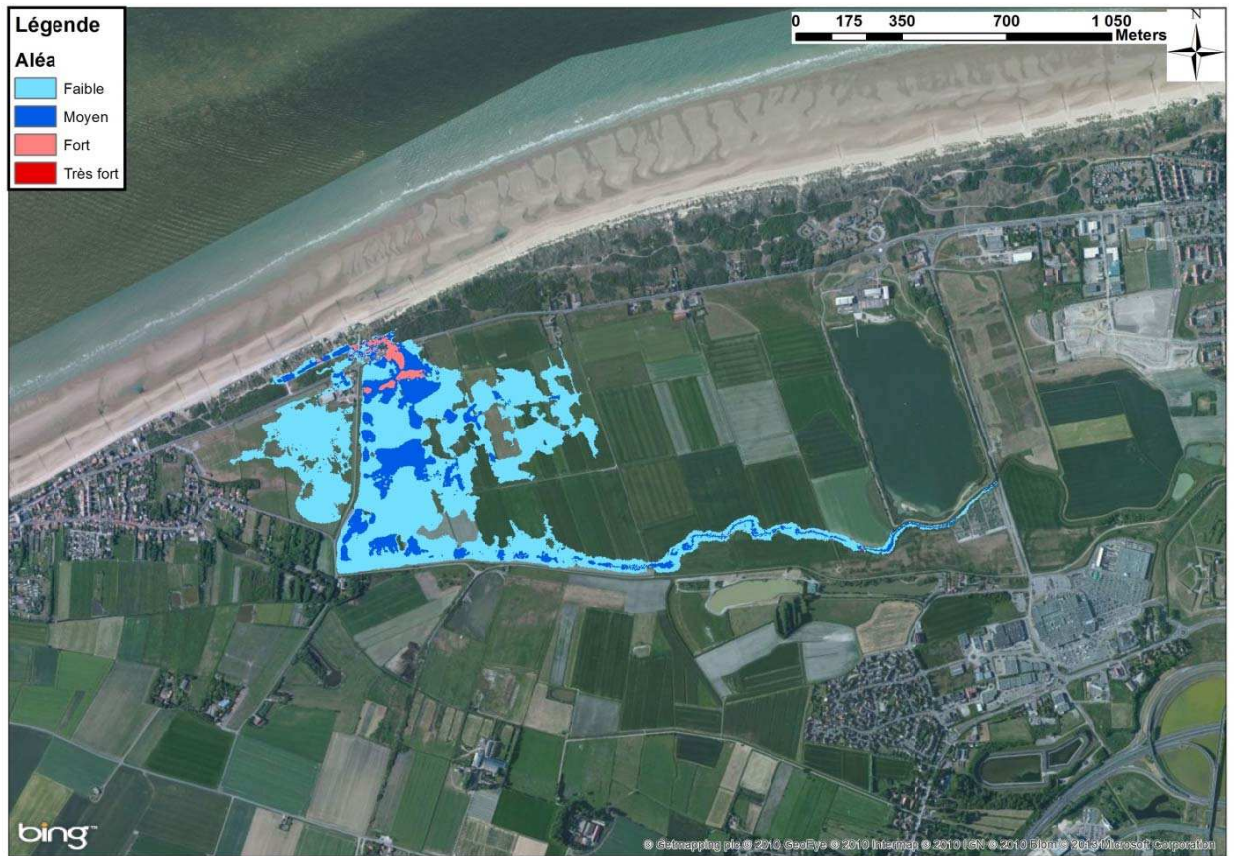
Cartographie des brèches unitaires

A N N E X E C 1

***Cartographie des brèches unitaires sur le site de Sangatte
Dune***

Événement centennal

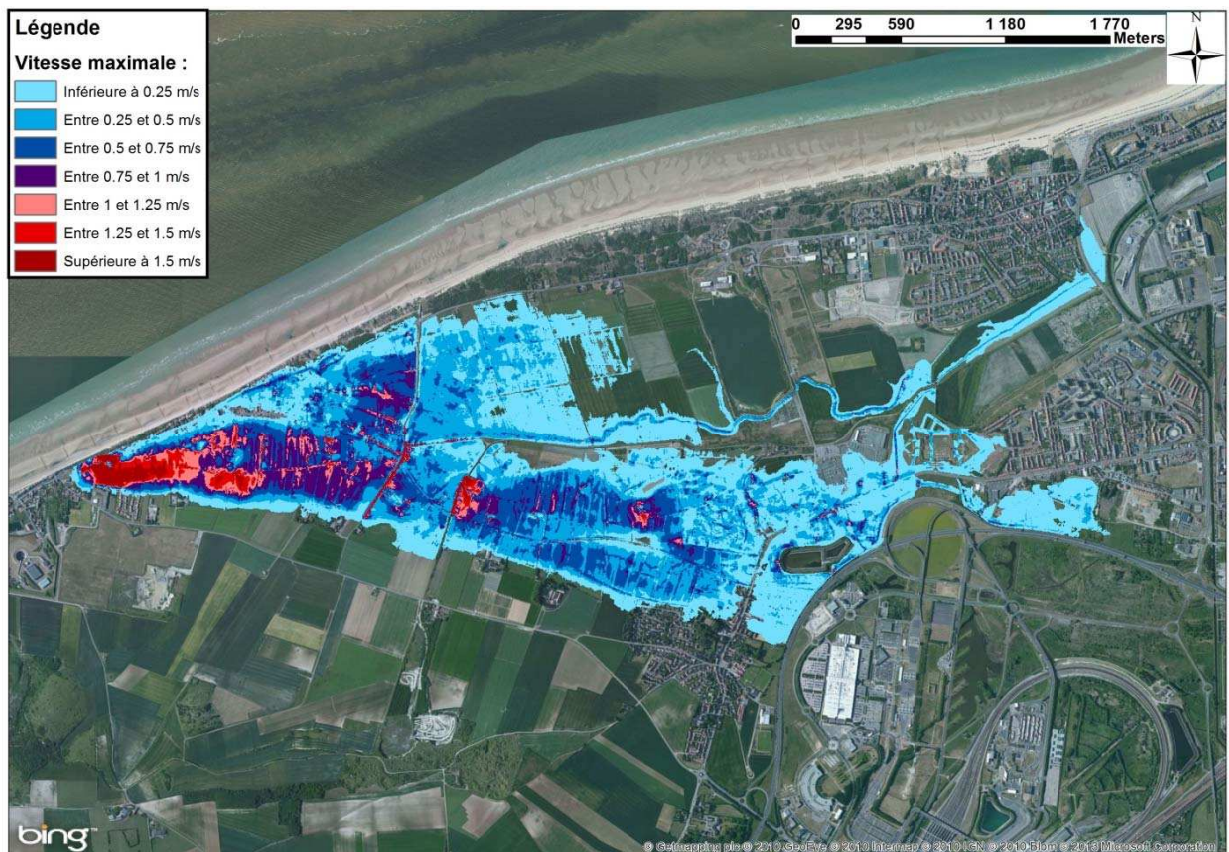
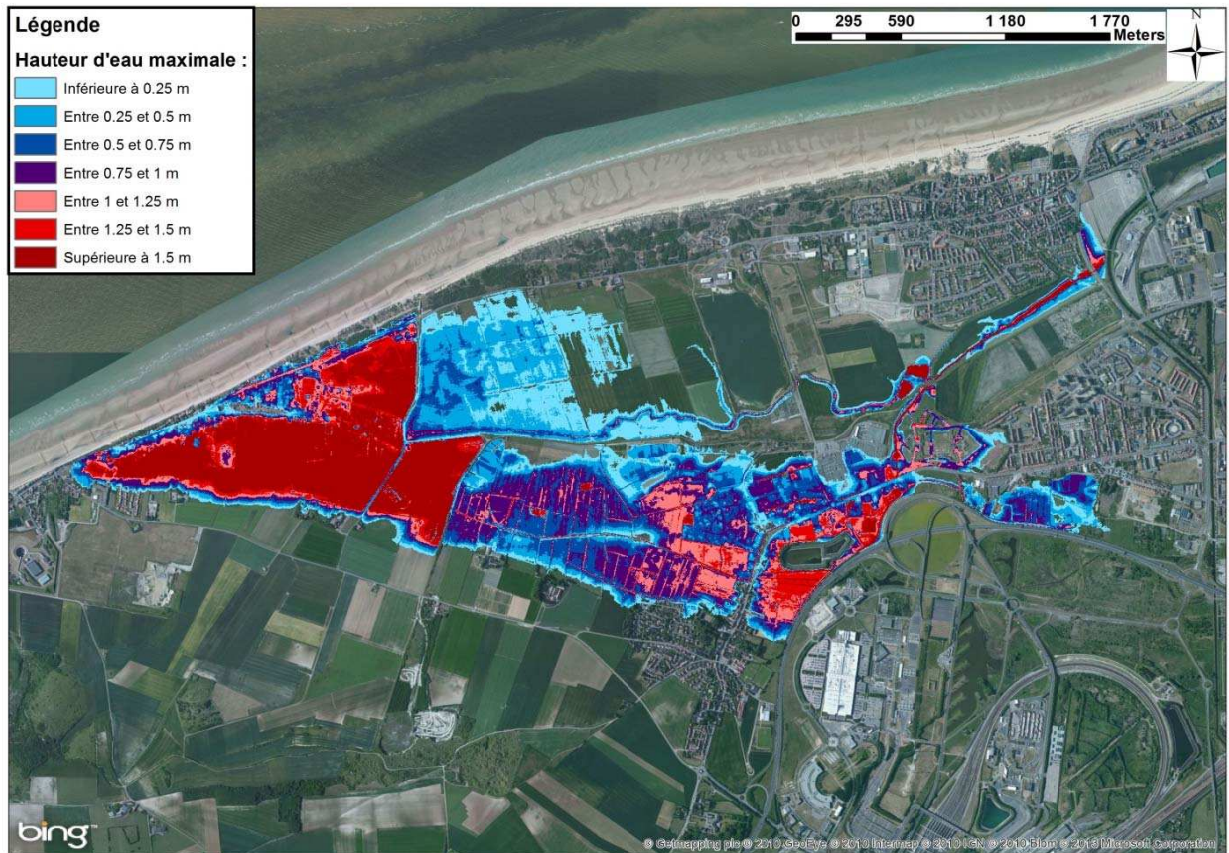


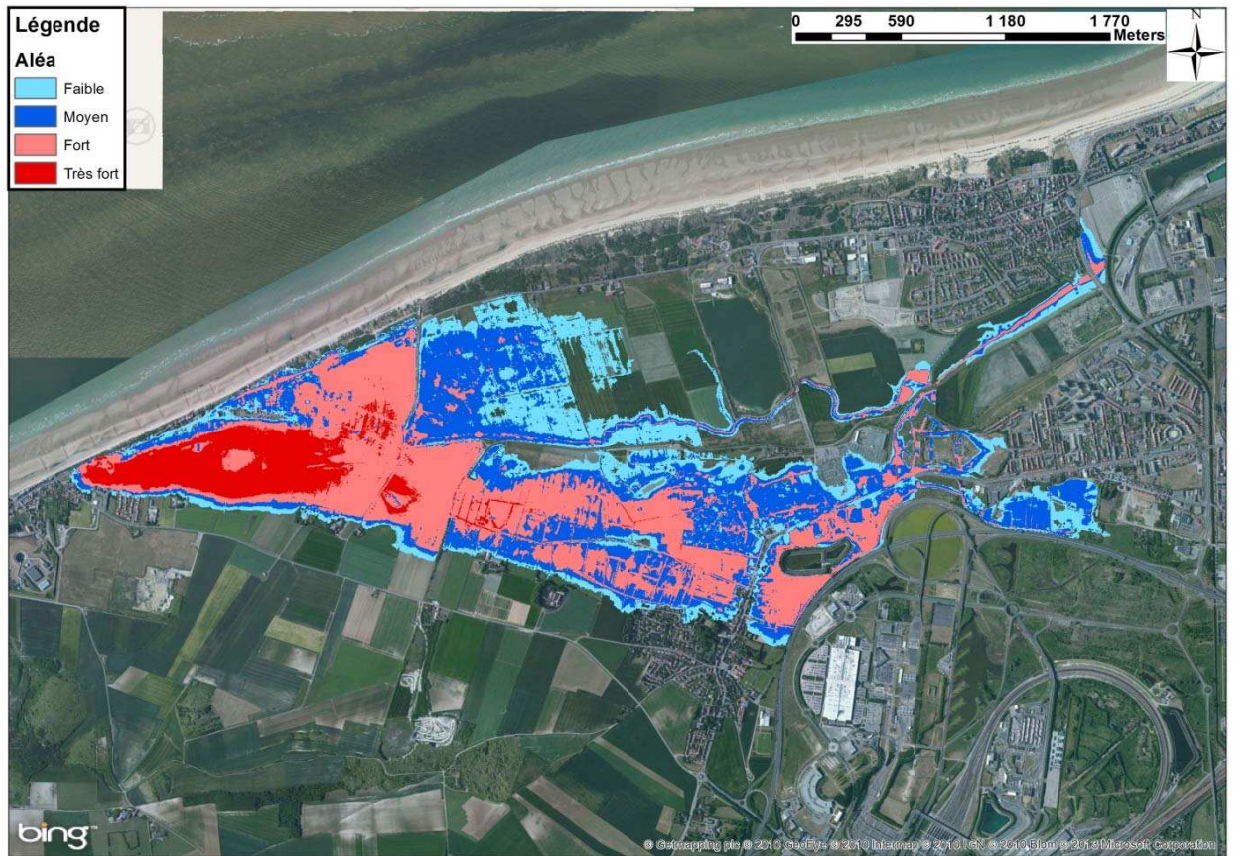


A N N E X E C 2

Cartographie des brèches unitaires sur le site de Sangatte digue 1

Evénement centennal

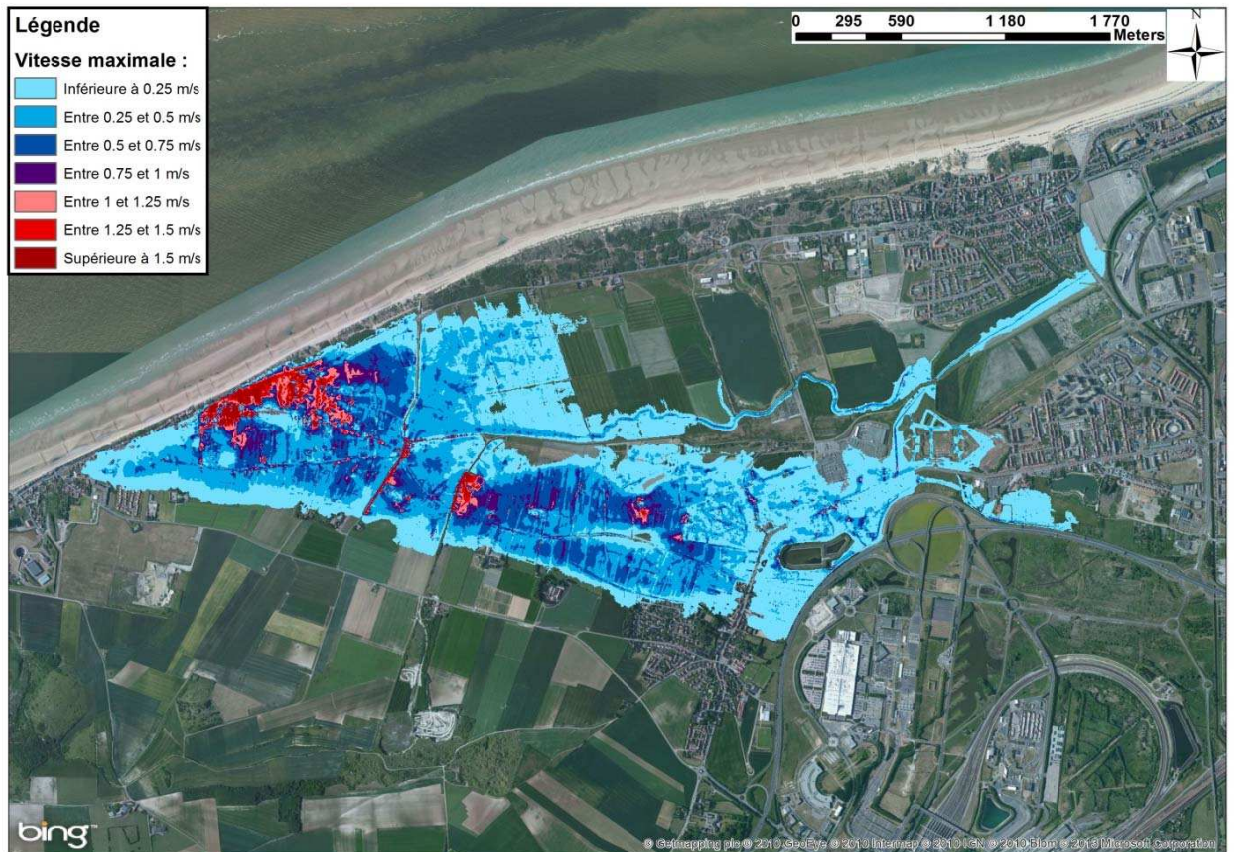
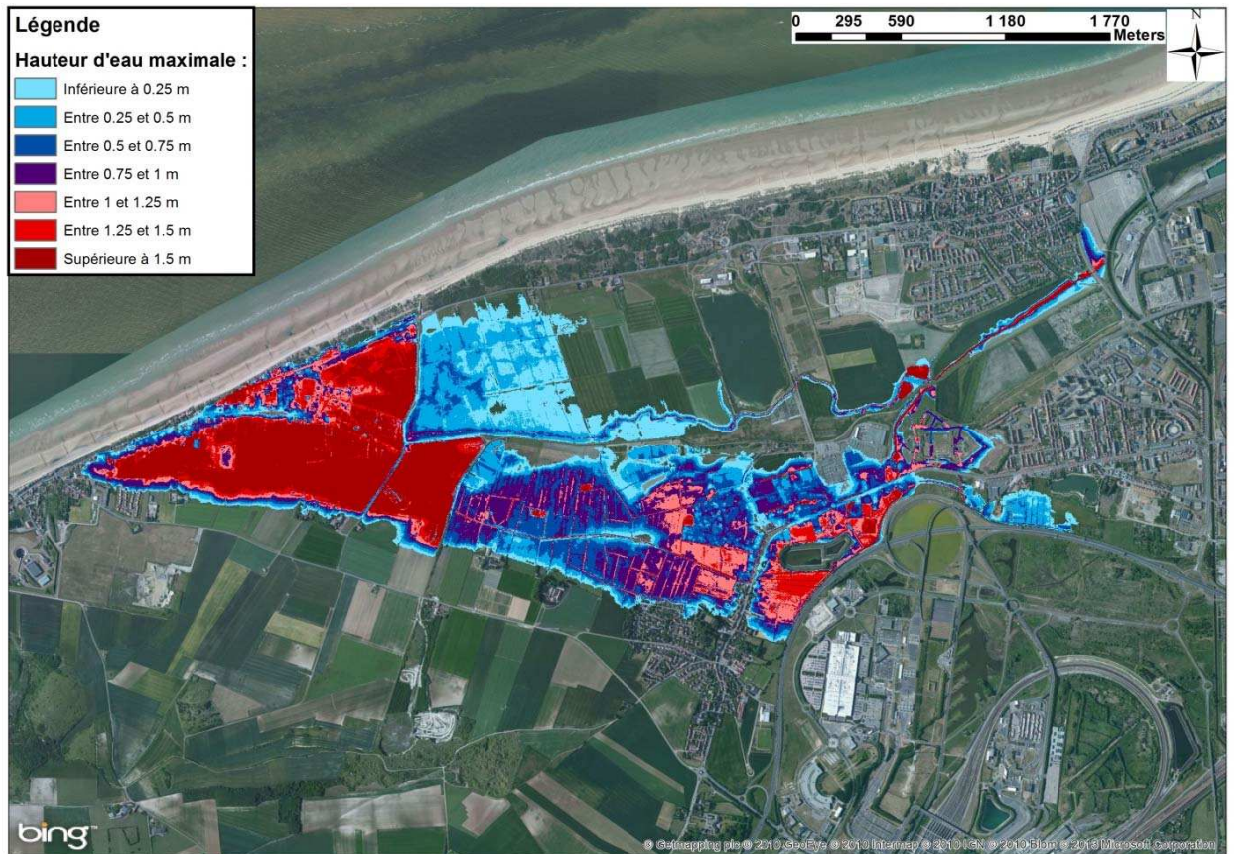


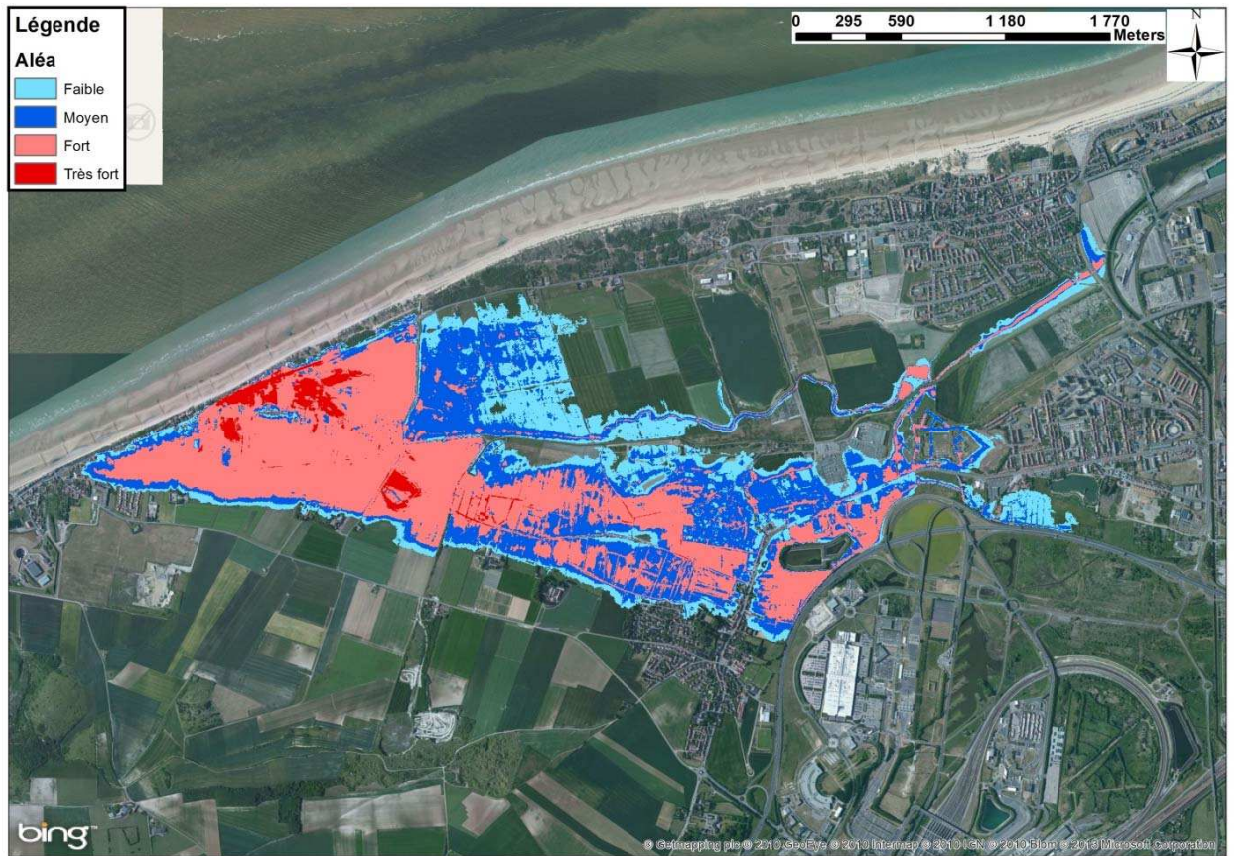


A N N E X E C 3

Cartographie des brèches unitaires sur le site de Sangatte digue 2

Événement centennal

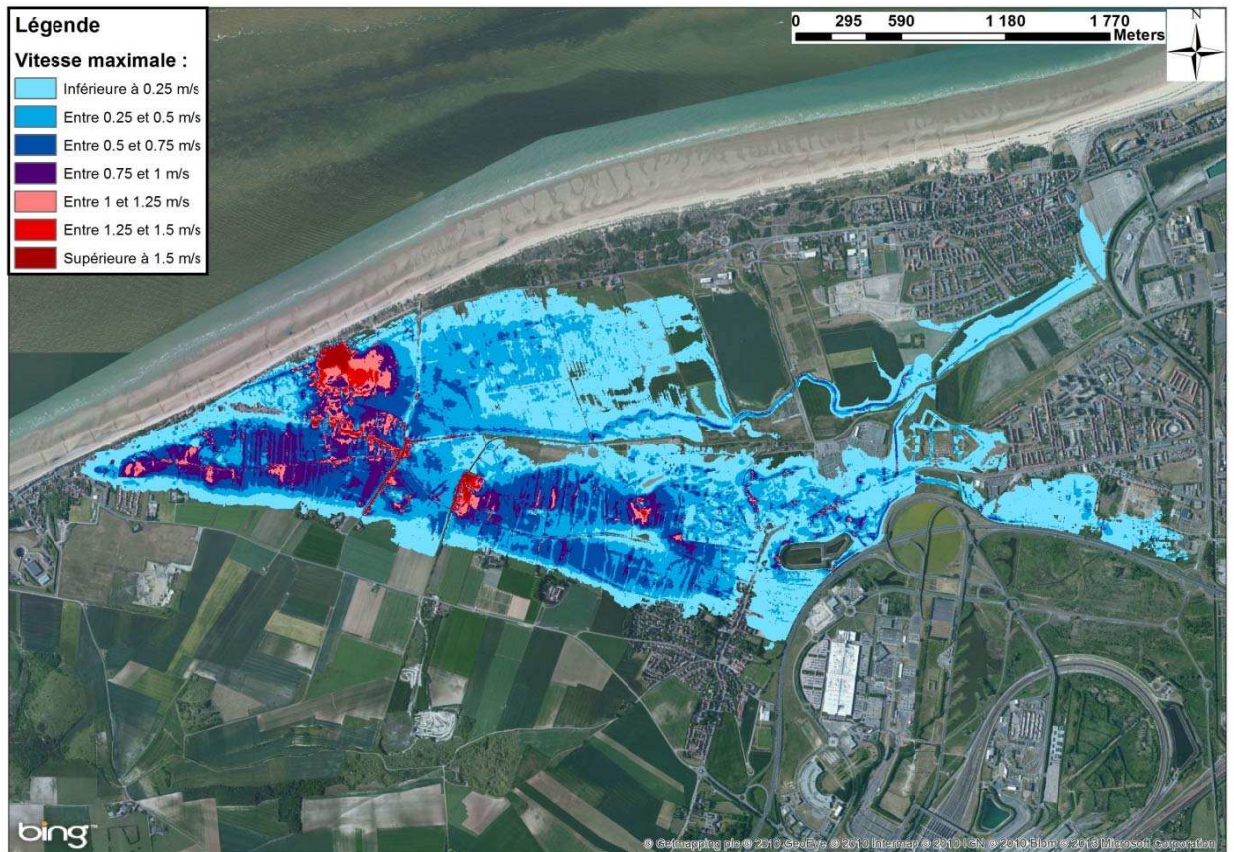
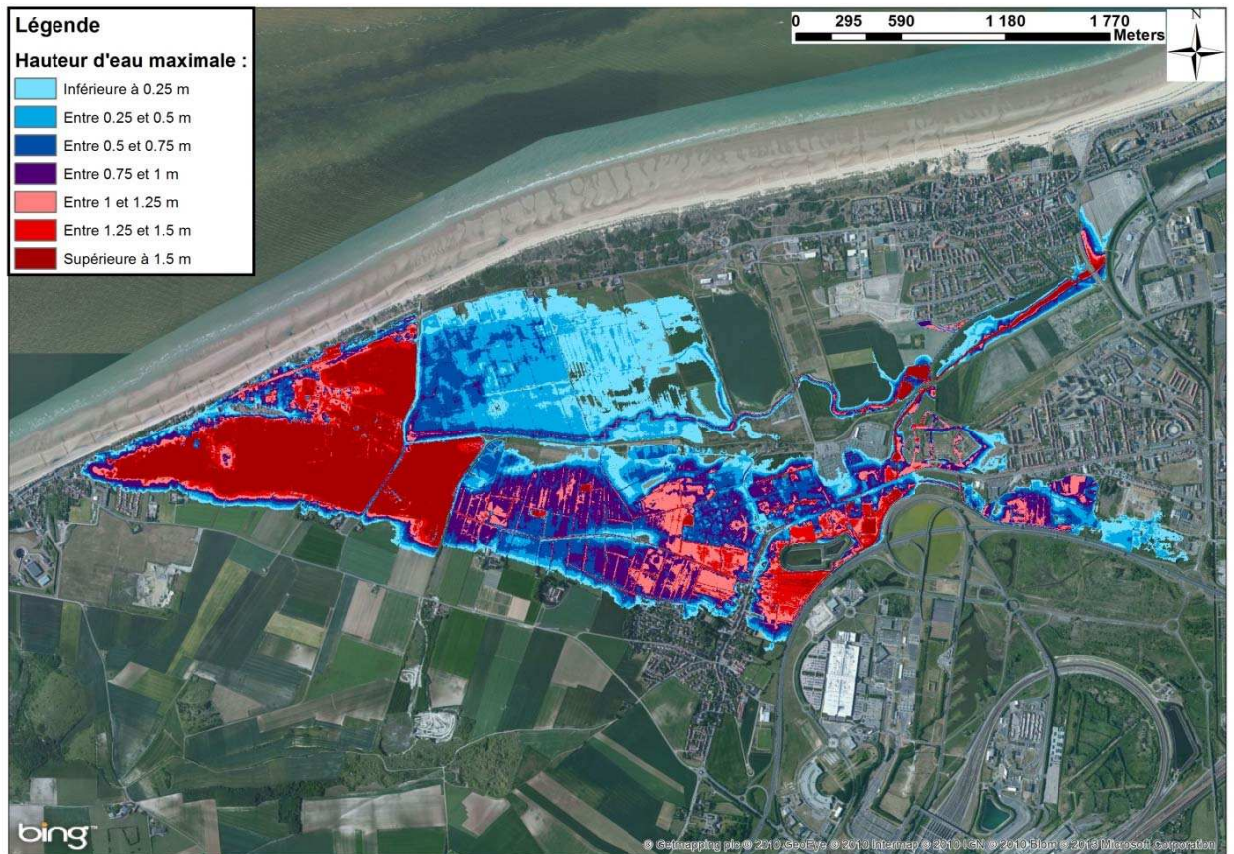


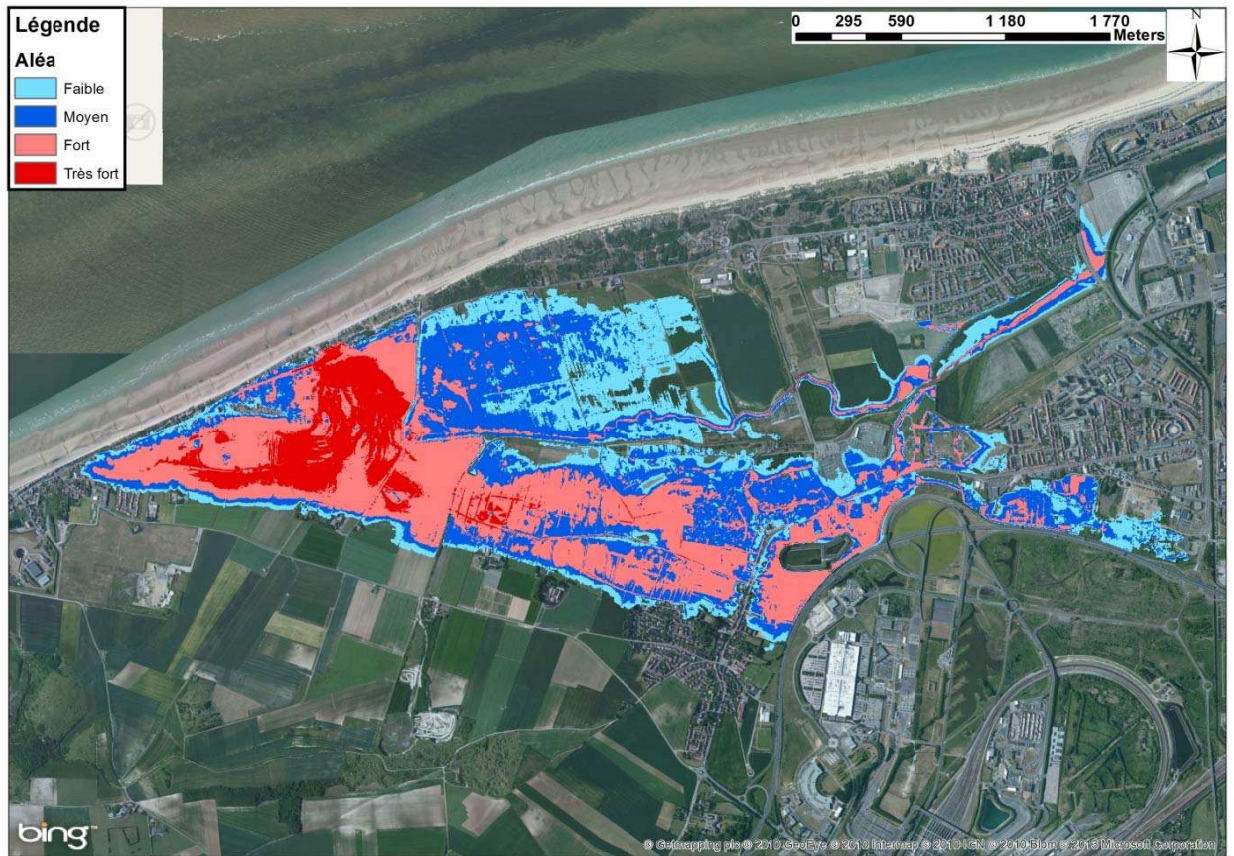


A N N E X E C 4

Cartographie des brèches unitaires sur le site de Sangatte digue 3

Evénement centennal

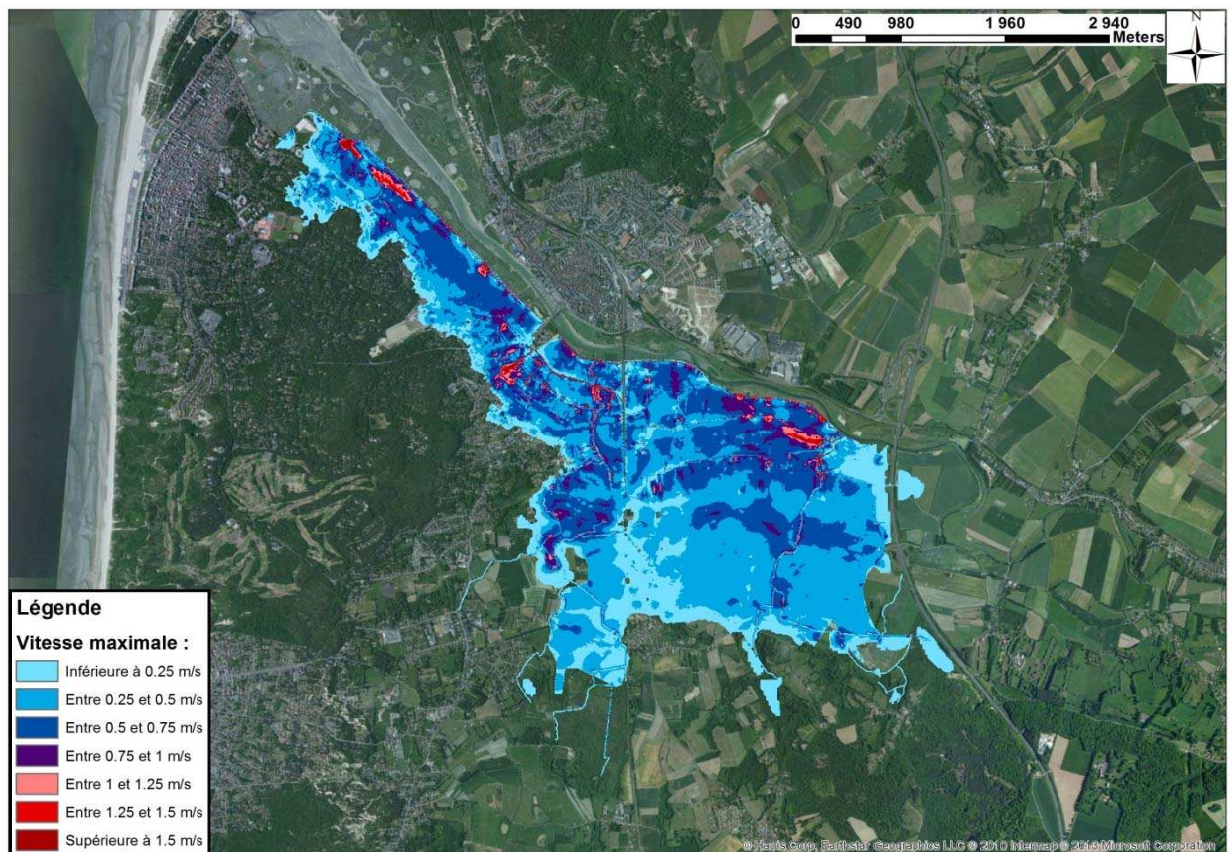
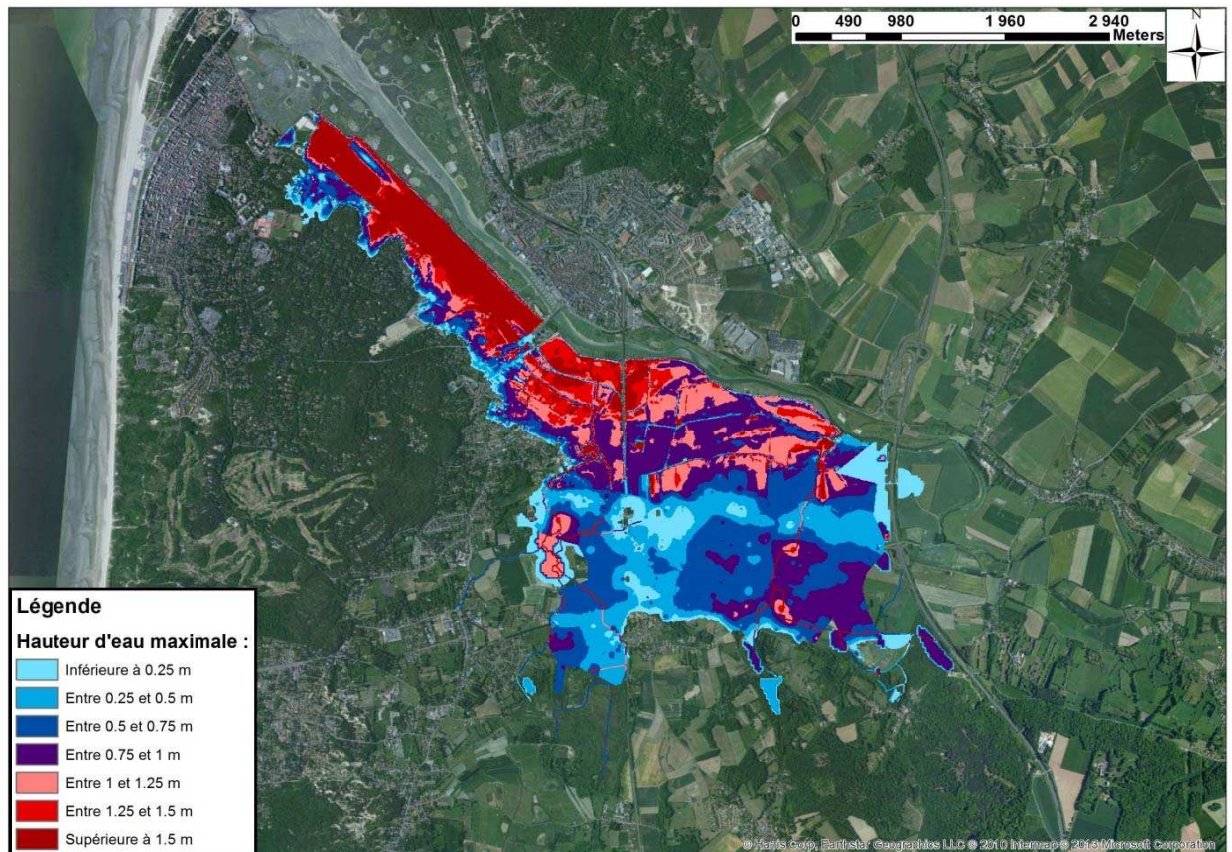


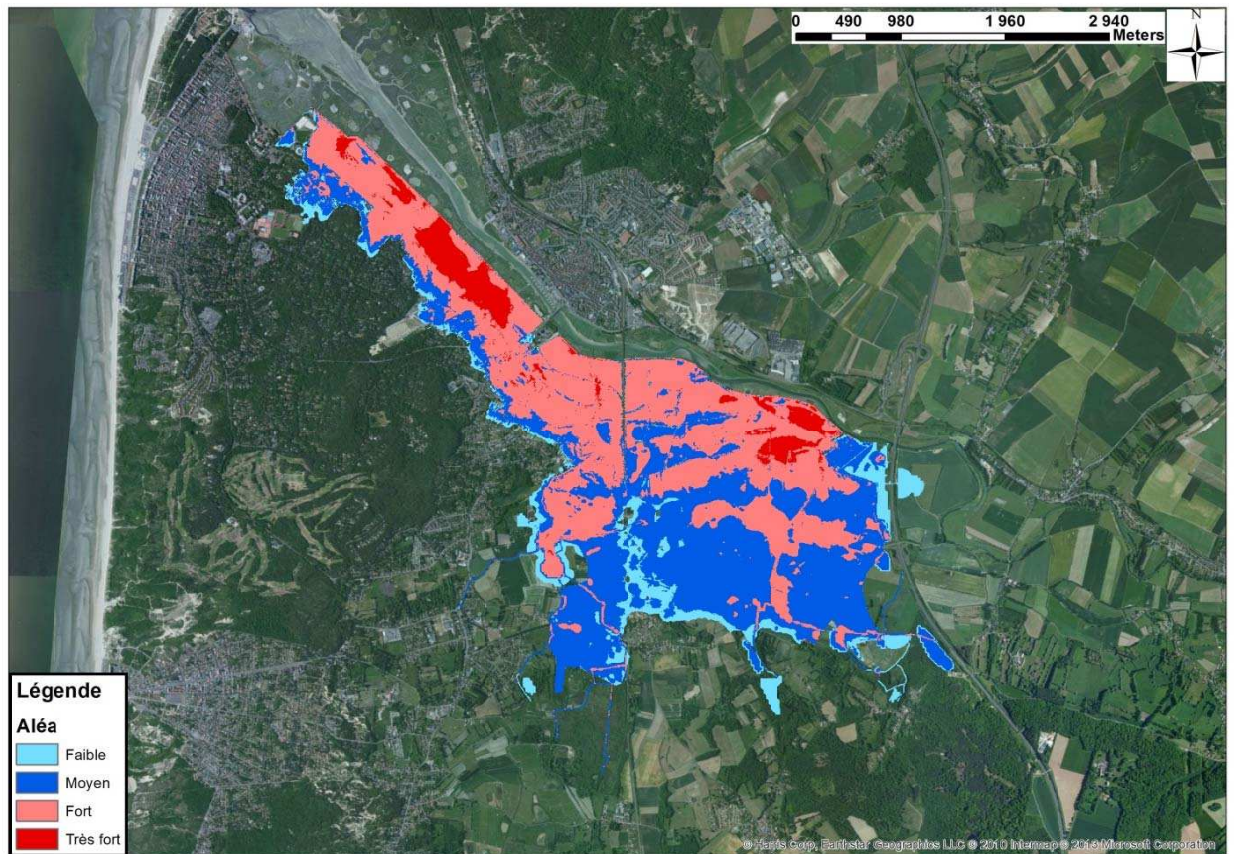


A N N E X E C 5

Cartographie des brèches unitaires sur le site du Touquet digue 1

Événement centennal

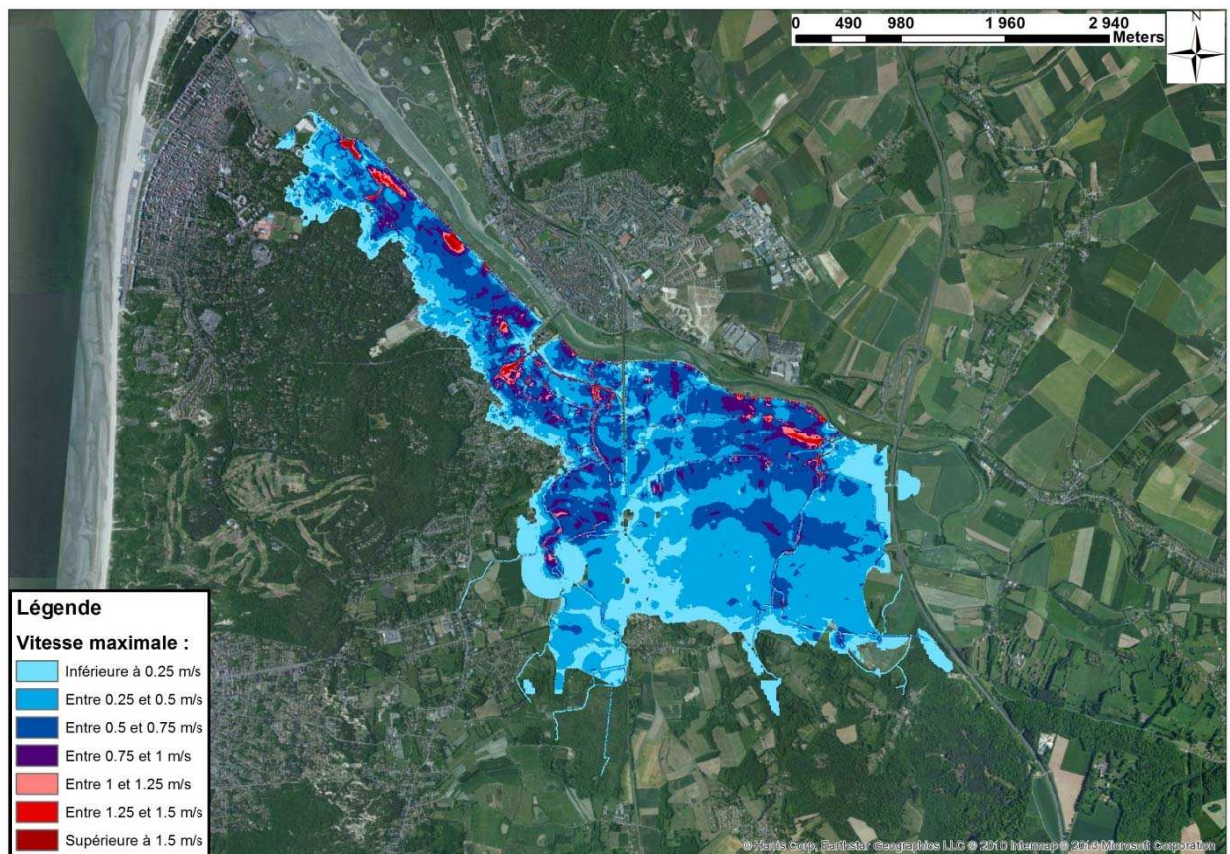
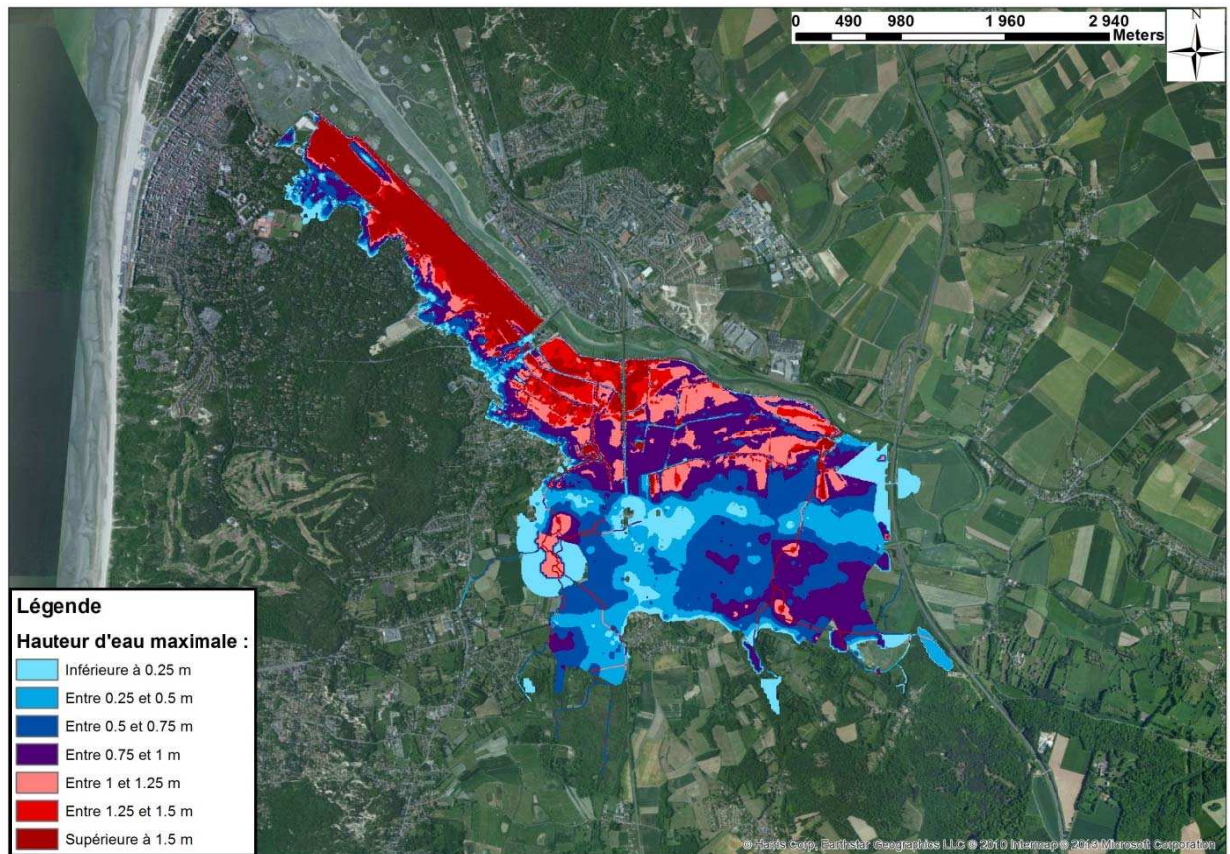


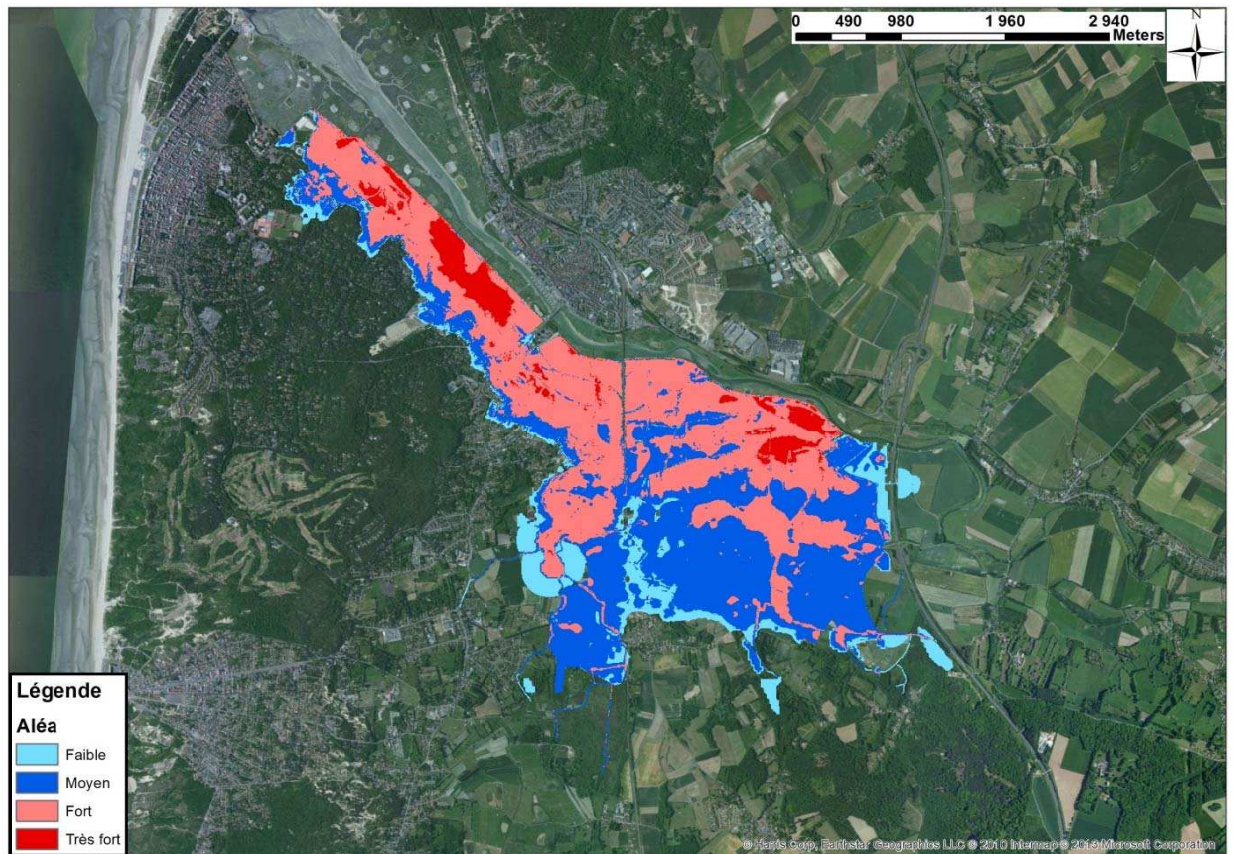


A N N E X E C 6

Cartographie des brèches unitaires sur le site du Touquet digue 2

Événement centennal

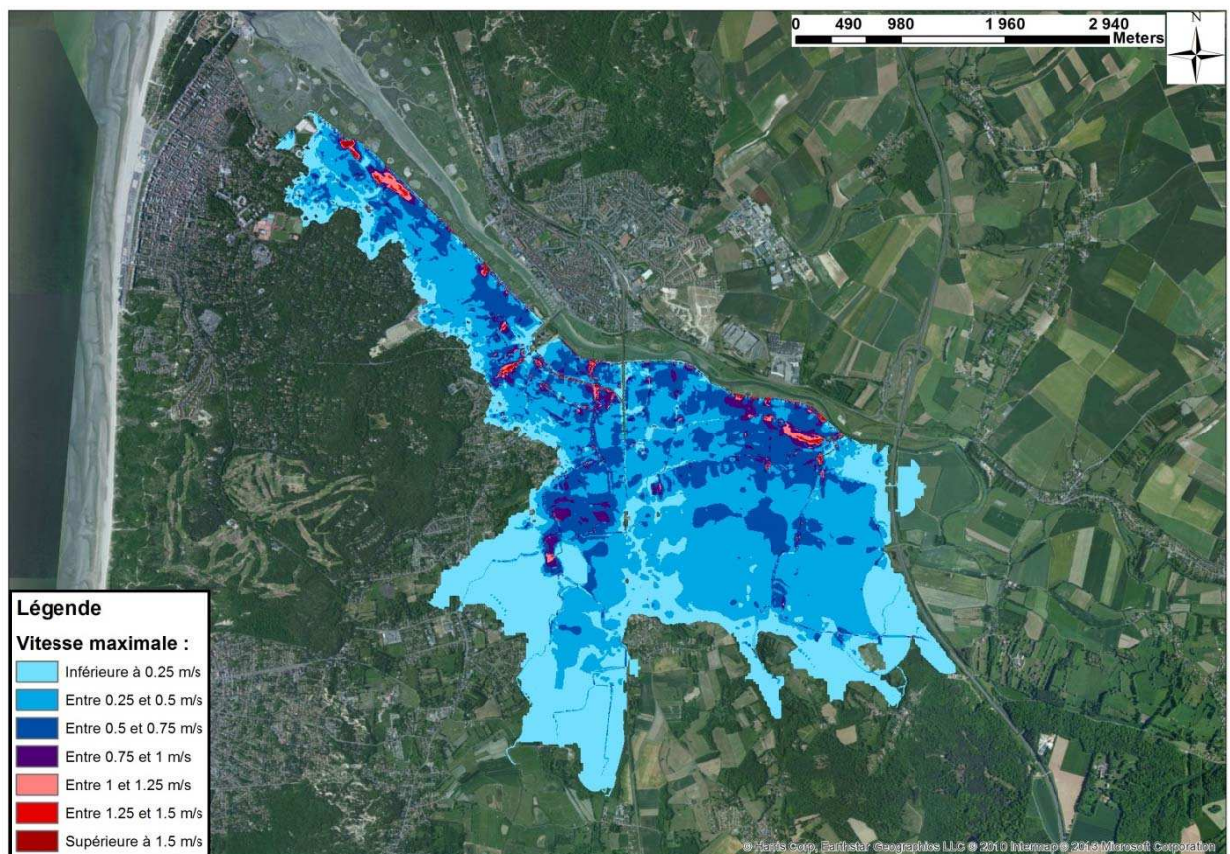
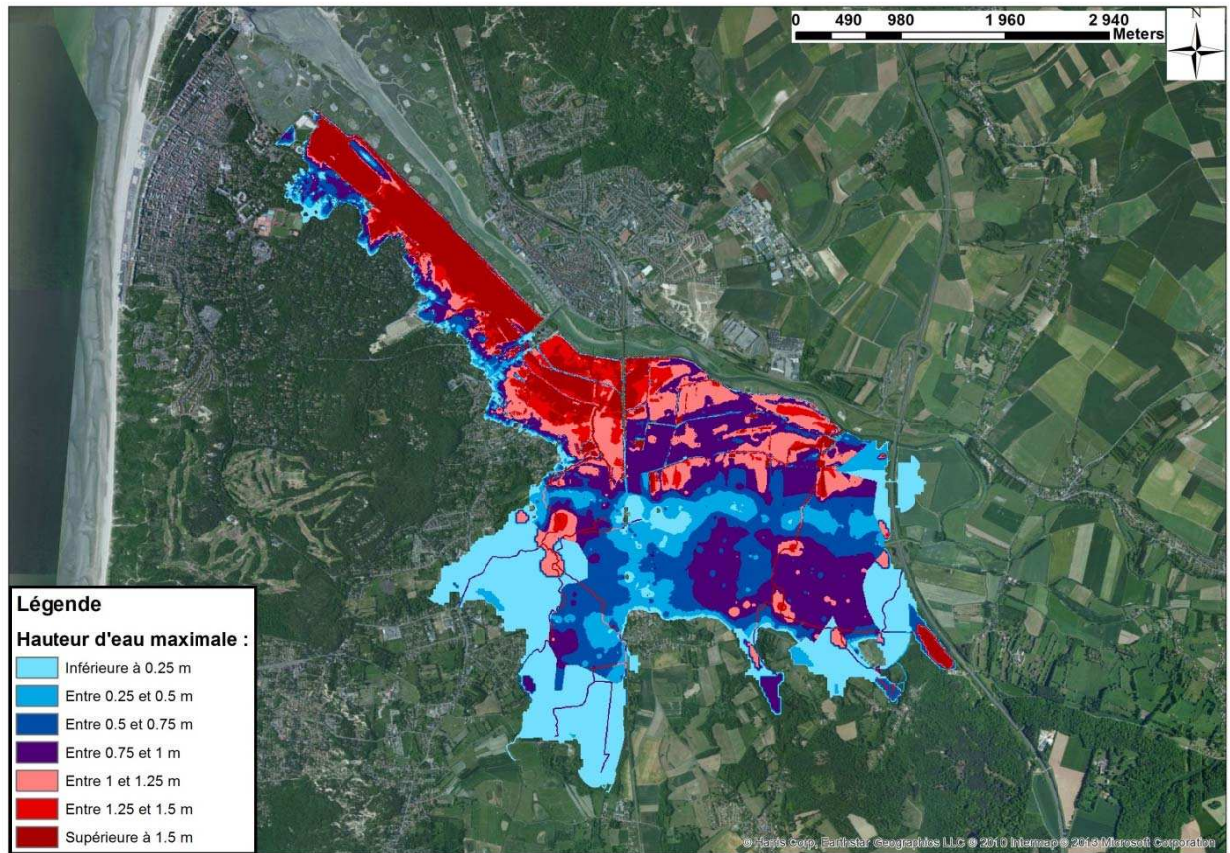


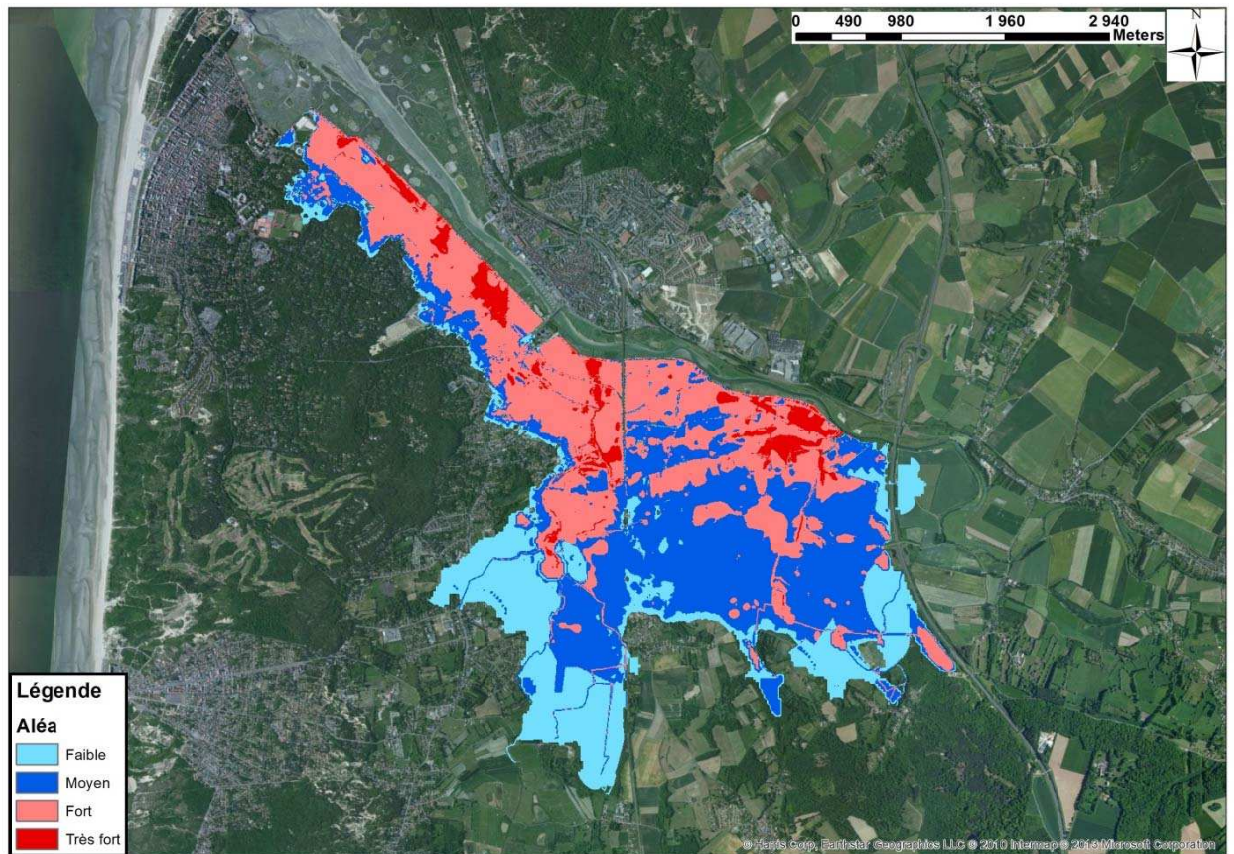


A N N E X E C 7

***Cartographie des brèches unitaires sur le site du Touquet Grande
Tringue***

Evénement centennal

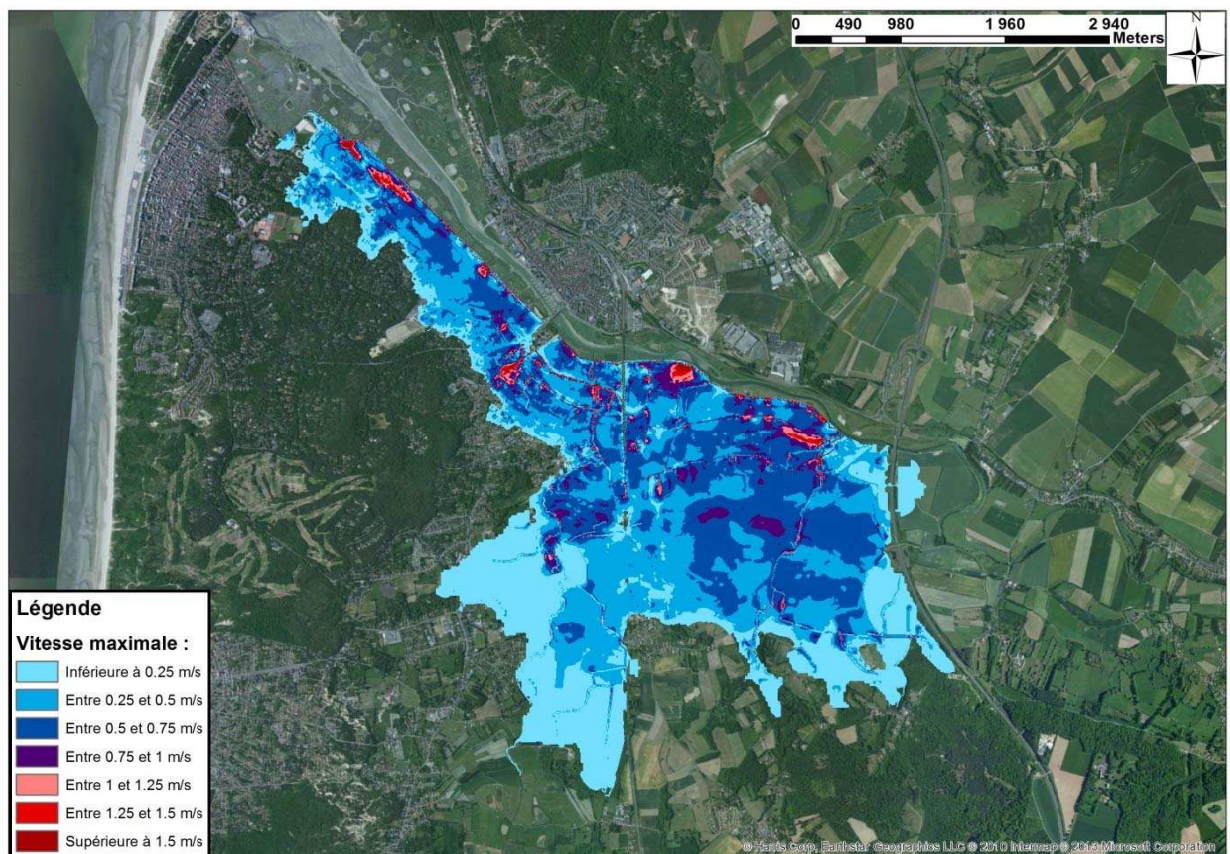
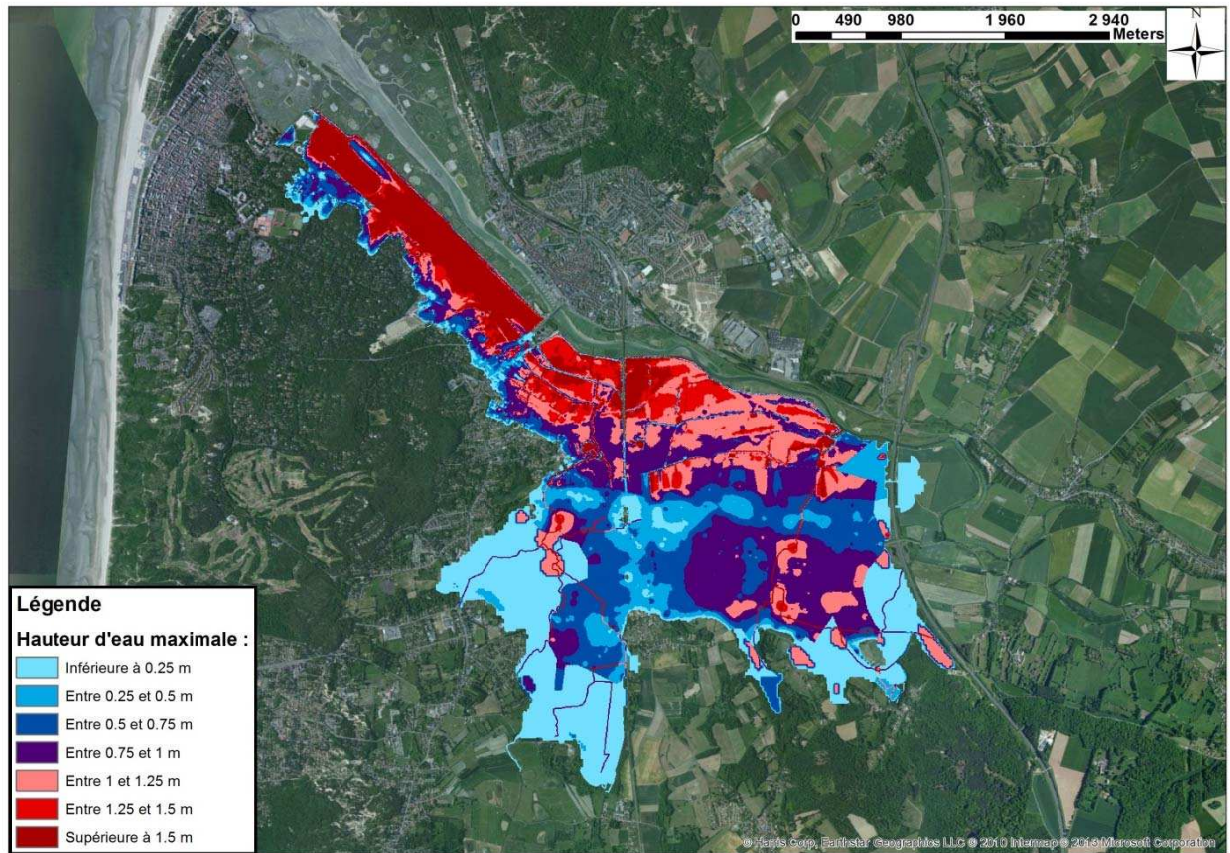


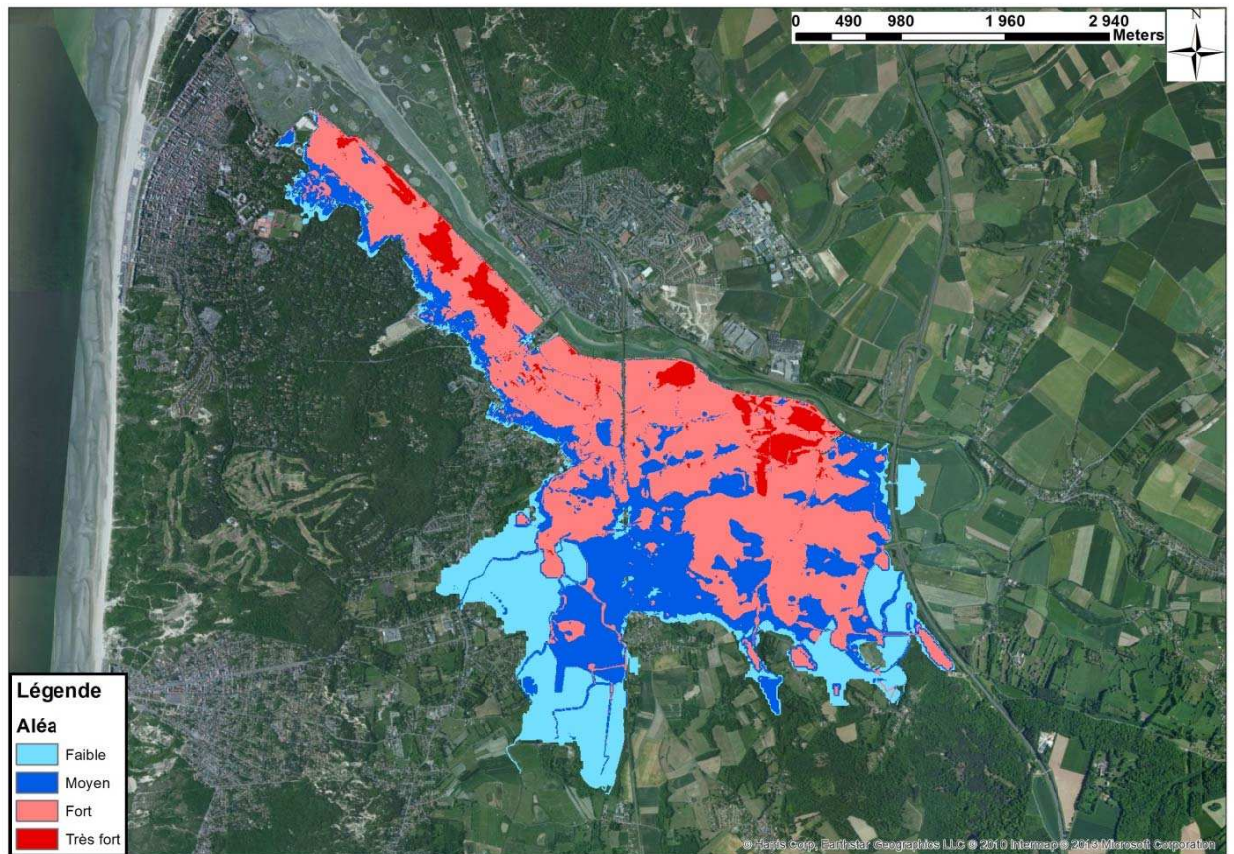


A N N E X E C 8

Cartographie des brèches unitaires sur le site de Saint Josse

Événement centennal

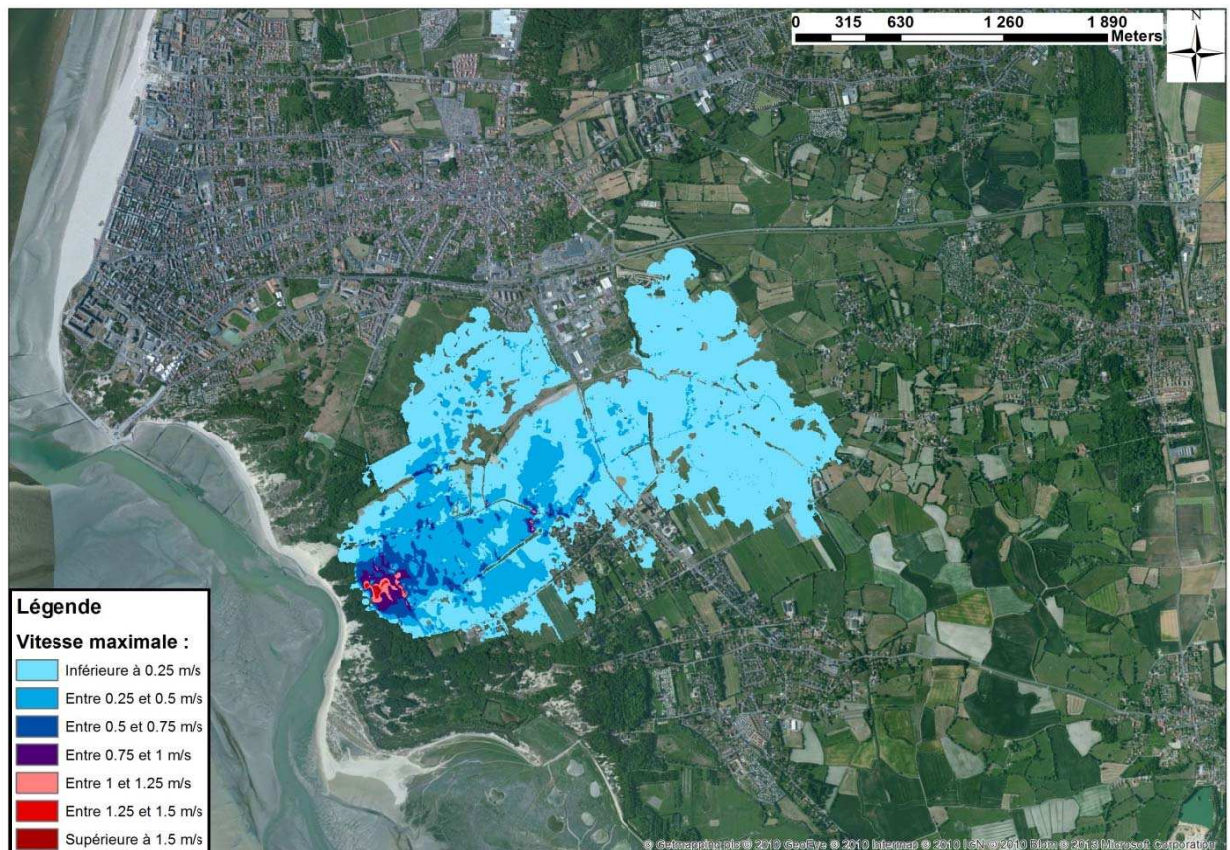
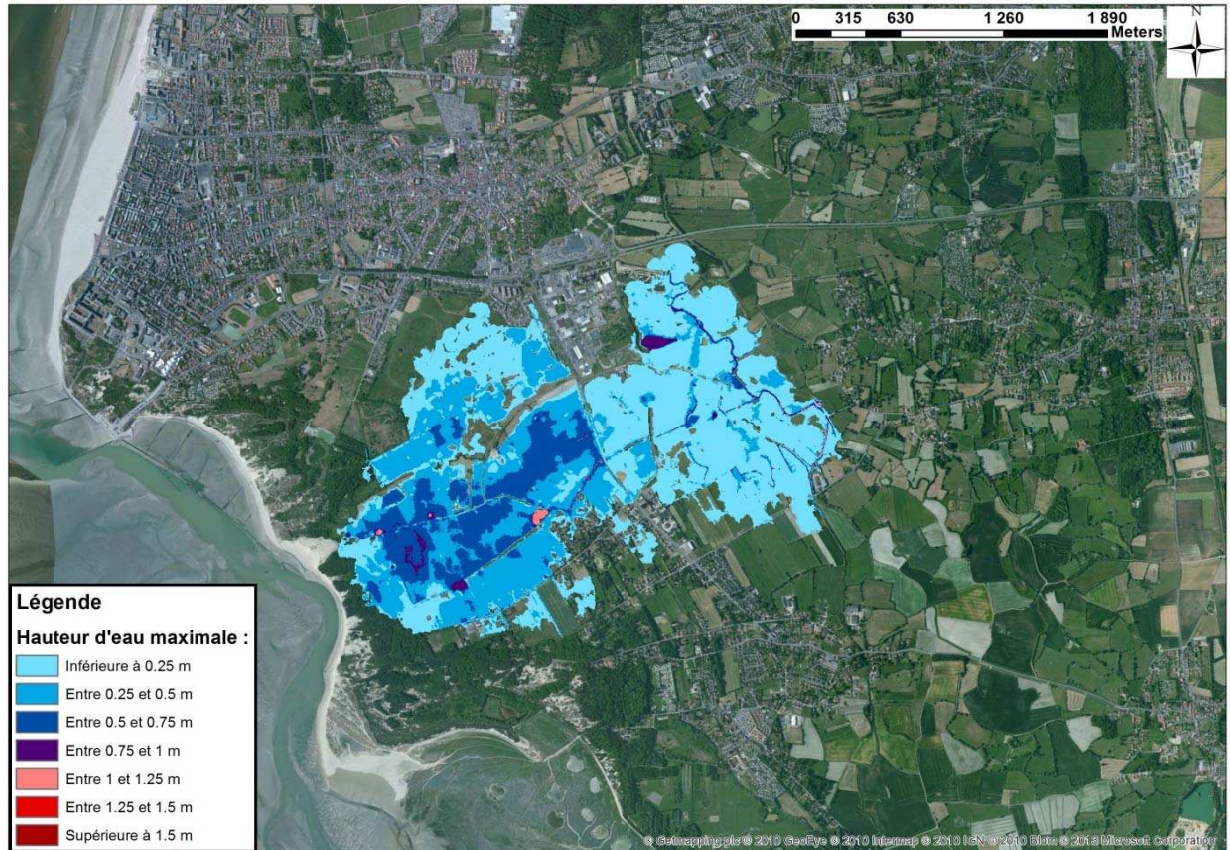


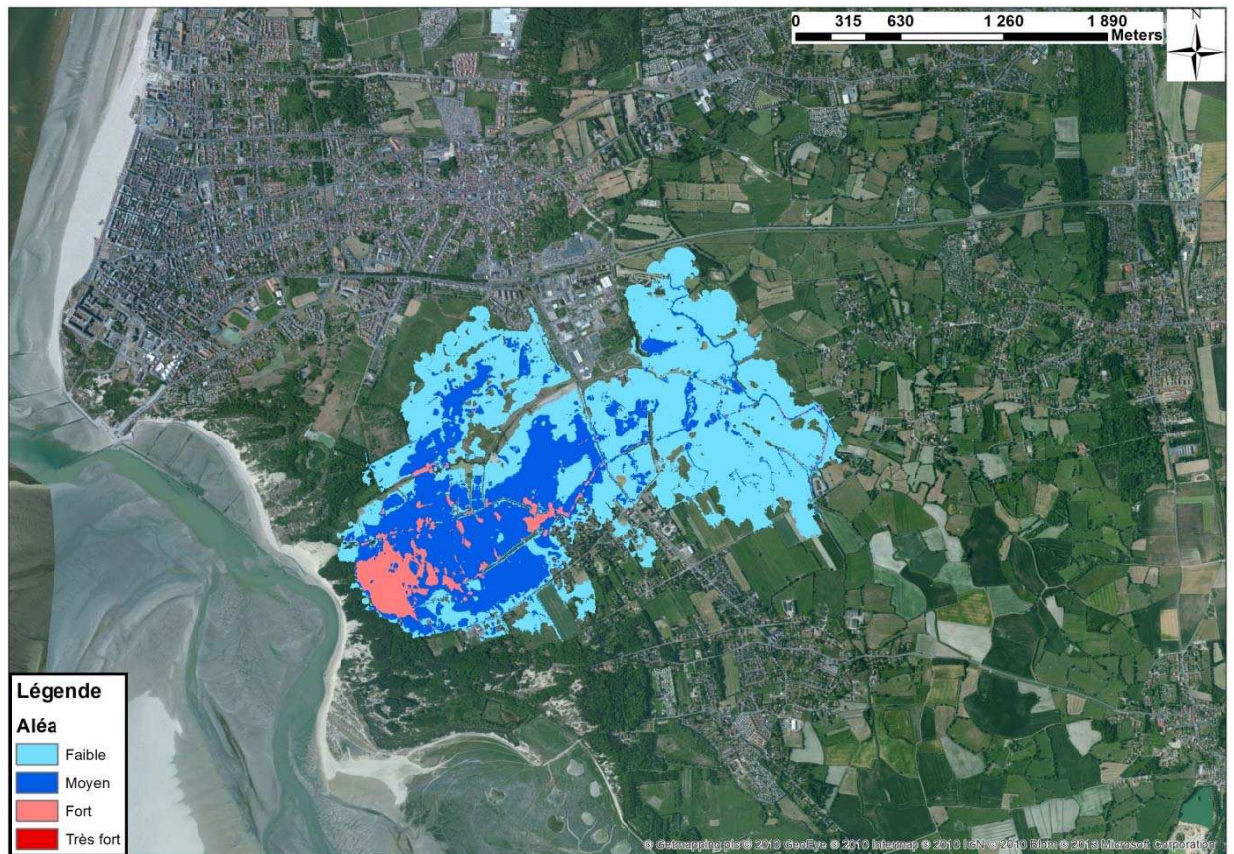


A N N E X E C 9

***Cartographie des brèches unitaires sur le site de Groffliers
dune***

Événement centennal





ANNEXE C 10

***Cartographie des brèches unitaires sur le site de Groffliers
digue***

Événement centennal

