



# Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro- sédimentaire de Coutainville et préconisations pour une gestion intégrée du trait de cote



Communauté de communes Coutances Mer et Bocage

## Rapport d'étude

### Siège social

36, quai de la Douane – 29200 Brest – France  
Tel : +33 298 44 24 51 – Fax : +33 298 46 91 04  
Email : [info@actimar.fr](mailto:info@actimar.fr) – Web : [www.actimar.fr](http://www.actimar.fr)

**ACTIMAR**  
Au service de la mer



## Suivi des modifications

Version	Modifications	Rédacteurs	Validation	Date
1.0	Création du document	Laurent Leballeur Benoit Waeles	Jean-Pierre Mazé	16/10/2018
1.3	Morphodynamique des aménagements à l'embouchure Effets des ouvrages sur l'aléa submersion	Laurent Leballeur Benoit Waeles		12/12/2018

## Liste de diffusion

Destinataire	Organisme
Adeline Hubert	Coutances Mer et Bocage

## Sommaire

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>19</b>
1.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS .....	19
1.2 UNITES ET CONVENTIONS .....	20
1.3 GLOSSAIRE .....	21
<b>2. ANALYSE DES EVOLUTIONS MORPHO-SEDIMENTAIRES HISTORIQUES .....</b>	<b>22</b>
2.1 EVOLUTIONS A LONG TERME .....	22
2.1.1 Depuis plusieurs centaines d'années .....	22
2.1.2 Evolutions au cours du 20 <sup>ème</sup> siècle (jusqu'au début du 21 <sup>ème</sup> siècle) .....	25
2.1.3 Evolutions du contexte sédimentaire .....	28
2.2 EVOLUTIONS RECENTES .....	29
2.2.1 Depuis les années 1980 (mise en place de la digue basse) .....	29
2.2.2 Depuis 2010 .....	39
2.3 CARACTERISATION DES SEDIMENTS A L'EMBOUCHURE .....	54
2.3.1 A l'embouchure .....	54
2.3.2 A l'extérieur : de l'estran à la dune .....	55
<b>3. CONDITIONS METEO-OCEANIQUES .....</b>	<b>57</b>
3.1 VENT .....	57
3.2 ETATS DE MER .....	59
3.3 MAREE ASTRONOMIQUE .....	61
3.4 CONDITIONS DE COURANT DE MAREE .....	62
<b>4. MODELISATION NUMERIQUE .....</b>	<b>65</b>
4.1 DESCRIPTION DU MODELE .....	65
4.2 CONSTRUCTION DU MODELE .....	65

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

4.2.1	Sources de données .....	65
4.2.2	Domaine de calcul.....	69
4.2.3	Maillages.....	70
4.3	VALIDATION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE .....	74
4.3.1	Variations des niveaux d'eau en mer (SHOM).....	75
4.3.2	Variations de niveau d'eau dans le havre de Regnéville (mesures IFREMER, 1983).....	77
4.3.3	Courant en mer (Cartes marines SHOM) .....	79
4.3.4	Courant en mer (Atlas SHOM).....	80
4.4	REANALYSE FINE DES CONDITIONS D'ETATS DE MER A LA COTE SUR LA PERIODE 1994-2016 .....	81
4.4.1	Principe et objectifs .....	81
4.4.2	Interactions Vagues-Courant.....	81
4.4.3	Validation de la réanalyse fine des états de mer .....	83
4.4.4	Paramétrage final des modèles hydrodynamique et d'états de mer.....	87
4.4.5	Estimation de la variabilité des conditions de dérive littorale .....	89
4.5	VALIDATION DU MODELE SEDIMENTAIRE : EVOLUTIONS MORPHODYNAMIQUES PASSEES (RECENTES) .....	94
4.5.1	Principe du facteur morphologique .....	94
4.5.2	Sélection statistiques des périodes modélisées.....	94
4.5.3	Scénarios sélectionnés .....	95
4.5.4	Tests de sensibilité réalisés.....	97
4.5.5	Résultats .....	98
<b>5.</b>	<b>EVALUATION DES EFFETS D'OUVRAGES SUR LE TRAIT DE COTE.....</b>	<b>112</b>
5.1	DIGUE DES GARENNES.....	112
5.2	CALE DE L'ECOLE DE DE VOILE .....	119
<b>6.</b>	<b>INVESTIGATIONS DE SOLUTIONS D'AMENAGEMENT .....</b>	<b>125</b>
6.1	EMBOUCHURE .....	125

6.1.1	Revue des solutions précédemment envisagées.....	125
6.1.2	propositions de solutions.....	130
6.2	MODELISATIONS DE LA MORPHODYNAMIQUE A L'EMBOUCHURE .....	137
6.2.1	Remarques préalables .....	137
6.2.2	Etat de référence (situation actuelle, sans aménagement) .....	138
6.2.3	Aménagement n°1 : creusement d'un chenal au centre (120 000 m <sup>3</sup> ) et dépôts dans le méandre à l'Est.....	142
6.2.4	Aménagement n°2 : suppression de la digue basse.....	148
6.2.5	Aménagement n°3 : prolongement de la digue basse vers l'Est depuis son enracinement .....	154
6.2.6	Hypothèse n°4 : brèche à l'enracinement de la digue basse .....	160
6.3	SYNTHESE DES TESTS DES SOLUTIONS D'AMENAGEMENT A L'EMBOUCHURE .....	166
<b>7.</b>	<b>EVALUATION DES EFFETS DES OUVRAGES ENVISAGES SUR L'ALEA SUBMERSION MARINE .....</b>	<b>167</b>
7.1	OUVRAGES RETRO-LITTORAUX.....	167
7.1.1	Objectifs et principe.....	167
7.1.2	Méthodologie de modélisation.....	168
7.1.3	Résultats.....	175
7.2	OUVRAGES A L'EMBOUCHURE .....	187
7.2.1	Aménagements testés.....	187
7.2.2	Résultats.....	187
7.2.3	Synthèse des simulations de submersion.....	196
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>197</b>
	<b>ANNEXE A : SYSTEME DE MODELISATION TELEMAR .....</b>	<b>198</b>
	TELEMAR-2D.....	198
	TOMARAC.....	199
	SISYPHE.....	200
	<b>ANNEXE B : COURANTS DE MAREE .....</b>	<b>201</b>

**ANNEXE C : ANALYSE DES CALAGES RELATIFS DES LEVES  
LIDAR..... 213**

## Liste des illustrations

Figure 1-1 : Site d'étude. ....	19
Figure 2-1 : Juxtaposition des cartes du 18 <sup>ème</sup> siècle (Cassini) et du 19 <sup>ème</sup> siècle (état-major). Source : site de l'IGN. ....	23
Figure 2-2 : Cartographie des évolutions depuis le 18 <sup>ème</sup> siècle, d'après les cartes géoréférencées de l'IGN. ....	24
Figure 2-3 : Carte du Moyen Age de la région de Coutances (source : Lundi, 2011. Regnéville-sur-Mer, un village maritime de la Manche). ....	24
Figure 2-4 : Cartes marines du 19 <sup>ème</sup> siècle (gauche : édition de 1851, droite : édition de 1893). Source : SHOM. ....	25
Figure 2-5 : Carte de Beautemps-Beaupré, édition de 1836 (source : Lundi, 2011). ....	25
Figure 2-6 : (source : Robin et Levoy, 2007, in Robin, 2007). ....	26
Figure 2-7 : Evolutions du trait de côte de 1947 à 2010 (source : DHI/GEOS).....	27
Figure 2-8 : Photos historiques de la digue de front de mer d'Hauteville - document issus de l'étude PPRL (DHI/GEOS). ....	27
Figure 2-9 : Evolution du schorre entre 1947 et 2010 (source : Liteau, 2012). ....	28
Figure 2-10 : Evolutions entre 1979 et 2002, d'après thèse N. Robin (2007). ....	29
Figure 2-11 : Evolutions morphologiques à l'embouchure de 1979 à 1992 (d'après N. Robin, 2007). ...	30
Figure 2-12 : Photographies aériennes de l'embouchure en 1981 et 1982 (source : IGN). ....	31
Figure 2-13 : Photographies aériennes de l'embouchure en 1988 et 1992 (source : IGN). ....	31
Figure 2-14 : Photographies aériennes de l'embouchure en 1992 et 1997 (source : IGN). ....	32
Figure 2-15 : Mise en évidence du méandrement « en appui » contre la digue basse dans les années 1990. ....	32
Figure 2-16 : Evolution de la pointe d'Agon entre 1972 et 1992, et d'une barre de « swash » sur l'estran (Robin, 2007). ....	33
Figure 2-17 : Evolution de la pointe d'Agon entre 1998 et 2002, et localisation des barres de « swash » (Robin, 2007). ....	34
Figure 2-18 : Evolution de la pointe d'Agon entre 1998 et 2006, et localisation des barres de « swash » (Robin, 2007). ....	34
Figure 2-19 : Evolutions du trait de côte de 1947 à 2010 -secteur Hauteville/Montmartin (source : Litteau, 2012). ....	35

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

Figure 2-20 : Evolutions du trait de côte entre 1947 et 2016 – secteur Hauteville/Montmartin. Le trait de côte 2016 est défini suivant un critère de cote topographique (LIDAR) à +8.5 m NGF, qui suit approximativement la limite de végétation dunaire. Pour les données plus anciennes, c'est la limite de végétation qui a été numérisée sur les images aériennes historiques de l'IGN (donnée OLIBAN déjà disponible en 1947, et géoréférencement puis numérisation pour les autres dates).....	36
Figure 2-21 : Evolutions du trait de côte de 1947 à 2010 -secteur Agon-Coutainville Sud (source : Litteau). .....	37
Figure 2-22 : Evolutions du trait de côte entre 1947 et 2016 – secteur Agon-Coutainville Sud. Le trait de côte 2016 est défini selon un critère de cote topographique (LIDAR) à +8.5 m NGF, qui suit approximativement la limite de végétation dunaire. Pour les données plus anciennes, c'est la limite de végétation qui a été numérisée sur les images aériennes historiques de l'IGN (donnée OLIBAN déjà disponible en 1947, et géoréférencement puis numérisation pour les autres dates). .....	38
Figure 2-23 : Evolutions à l'embouchure entre 2010 et 2016.....	40
Figure 2-24 : Visualisation de la micro-falaise d'érosion, en rive droite du chenal.....	40
Figure 2-25 : Evolutions de la flèche d'Agon entre 2010 et 2016. Gauche : lignes de niveau +5m NGF. Droite : lignes de niveau +7.5 m NGF, qui peuvent définir le trait de côte.....	41
Figure 2-26 : Synthèse des évolutions de la flèche d'Agon entre 2010 et 2016.....	41
Figure 2-27 : Synthèse des évolutions du trait de côte le long du cordon dunaire de Montmartin. ....	42
Figure 2-28 : Définition de profils en travers du cordon dunaire pour analyse les variations de volume de sable. ....	42
Figure 2-29 : Visualisation des quantités de sable (m <sup>3</sup> /m linéaire) en travers du cordon dunaire de Montmartin. En tout : 161 profils (espacés de 10 m), numérotés depuis le Sud. ....	43
Figure 2-30 : Littoral de Montmartin : transition enrochements/cordon dunaire. Photo lors de la visite technique avec T. Durozier le 01/12/2016. ....	43
Figure 2-31 : Loupe des évolutions du trait de côte à la transition enrochements/cordon dunaire – littoral de Montmartin. ....	44
Figure 2-32 : Localisation des profils, espacés de 10 m, en travers du cordon dunaire.....	45
Figure 2-33 : Quantités de sable constituant le cordon dunaire, au-dessus de la cote 8.5 m NGF, en 2010 et en 2016.....	46
Figure 2-34 : Quantités de sable constituant le cordon dunaire, au-dessus de la cote 8.5 m NGF, en 2010 et en 2016. Loupe à proximité de la cale de l'école de voile. ....	46
Figure 2-35 : Quantités de sable constituant le cordon dunaire, au-dessus de la cote 8.5 m NGF, en 2010 et en 2016. Profils 12 à 30. ....	47
Figure 2-36 : Détail des évolutions entre 2010 et 2016. Profil n°19.....	47
Figure 2-37 : Carte des érosions et des accrétions entre 2010 et 2016. ....	49

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

Figure 2-38 : Evolutions des lignes de niveau entre 2010 et 2016. ....	50
Figure 2-39 : Quantités de sable, en 2010 et en 2016, au-dessus de la cote +8.5 m NGF.....	51
Figure 2-40 : Variations des quantités de sable, de 2010 à 2016, au-dessus de la cote +8.5 m NGF.....	51
Figure 2-41 : Quantités de sable, en 2010 et en 2016, au-dessus de la cote +3 m NGF.....	52
Figure 2-42: Variations des quantités de sable, de 2010 à 2016, au-dessus de la cote +3 m NGF.....	52
Figure 2-43: Variations des quantités de sable, de 2010 à 2016, au-dessus de la cote +3 m NGF. Loupe sur les 300 premiers mètres.....	52
Figure 2-44 : Visualisation des profils transverses sur les 500 premiers mètres au Sud de la cale de l'école de voile. ....	53
Figure 2-45 : Localisation de prélèvements et description lithologique à l'embouchure. Figure adaptée du rapport FondOuest (2002). ....	54
Figure 2-46 : Extrait des résultats des analyses (FondOuest, 2002). ....	54
Figure 2-47 : Distribution granulométrique type le long de la pointe d'Agon (extrait de Robin, 2007). .....	55
Figure 2-48 : Profil type en travers d'une barre de « swash » (Robin, 2007).....	56
Figure 2-49 : Distribution granulométrique en haut de plage, le long de la Pointe d'Agon (figure extraite de la thèse d'E. Poullain, 2013).....	56
Figure 3-1 : Position du point CFSR sélectionné pour la description des conditions de vent sur la zone.....	57
Figure 3-2 : Distributions annuelles de la vitesse et de la direction du vent (venant de). En haut : histogrammes de la vitesse du vent (à gauche) et de sa direction (à droite). En bas : roses des vents. Source : NCEP-CFSR. ....	58
Figure 3-3 : Statistiques mensuelles de l'intensité du vent. Valeurs moyennes et écart-types (en noir) et valeurs minimales et maximales (respectivement en vert et rouge). Source : NCEP- CFSR.....	58
Figure 3-4 : Position du point de la réanalyse fine des états de mer sélectionné pour la description des conditions d'états de mer sur la zone.....	59
Figure 3-5 : Distributions annuelles de la hauteur significative, de la période pic et de la direction (venant de) des vagues. En haut : histogrammes de la hauteur significative (à gauche), de la direction (au milieu) et de la période pic (à droite). En bas : digramme de dispersion (à gauche) et roses des vagues (à droite). ....	60
Figure 3-6 : Statistiques mensuelles de la hauteur significative : valeurs moyennes et écart-type associé (en noir) et valeurs minimales et maximales (respectivement en vert et rouge). ....	60
Figure 3-7 : Niveaux d'eau (en bleu) et marnages (en rouge) référencés au zéro hydrographique à la Pointe d'Agon, prédits par la marée astronomique. Source : SHOM 2017. ....	61

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

Figure 3-8 : Courants de flot à l'embouchure du havre de Regnéville, le 8 Mars 2016 (coefficient 94) modélisés à partir de Telemac-2D. En haut : 2h avant la pleine mer ; en bas : 1h30 avant la pleine mer.....	63
Figure 3-9 : Courants de jusant à l'embouchure du havre de Regnéville, le 8 Mars 2016 (coefficient 94) modélisés à partir de Telemac-2D. En haut : 1h30 après la pleine mer ; en bas : 2h30 après la pleine mer. ....	64
Figure 4-1 : Grille de la base de données HOMERE.....	66
Figure 4-2 : Domaine de calcul et sa frontière maritime (ligne noire), superposés avec les positions des points de sortie spectrale 2D HOMERE (points rouges). ....	69
Figure 4-3 : Grille de calcul à basse résolution (90 m), illustrant la résolution du maillage au large (en haut) et dans le havre de Regnéville (en bas).....	71
Figure 4-4 : Grilles de calcul à résolution intermédiaire (25 m), illustrant la résolution du maillage et les trois MNT utilisés dans le havre de Regnéville : 1979 (en haut), 1979 avec chenaux 1982 (au milieu) et 1984 (en bas). ....	72
Figure 4-5 : Grilles de calcul à résolution intermédiaire (25 m), illustrant la résolution du maillage et les deux MNT utilisés dans le havre de Regnéville : 2010 (en haut) et 2016 (en bas). ....	73
Figure 4-6 : Positions des 5 ports de référence du SHOM pour la validation en niveau d'eau. ....	75
Figure 4-7 : Comparaison entre les niveaux d'eau prédits (SHOM) et modélisés (TELEMAC), pendant la période de mesure de niveau au Pont de la Roche (du 1983/07/10 au 1983/07/14). SHOM en bleu, résultats du modèle Telemac-2D en rouge. ....	76
Figure 4-8 : Position des points mesures de niveaux d'eau dans le havre de Regnéville lors de la campagne réalisée par l'IFREMER en juillet 1983. La bathymétrie correspond au levé LIDAR de 2016.....	77
Figure 4-9 : Comparaison entre les niveaux d'eau mesurés dans le havre de Regnéville et les résultats du modèle Telemac2D, le 12 juillet 1983, pour les 3 points de mesures présentés sur la Figure 4-8. ....	78
Figure 4-10 : Positions des points de courants de marée figurant sur les cartes marines SHOM 7156 et 7157 utilisés pour cette comparaison.....	79
Figure 4-11 : Comparaison des roses de courant de marée issues des cartes marines SHOM (en noir) et issues des résultats du modèle Telemac-2D (en rouge), pour une marée moyenne de vive-eau, aux points localisés sur la Figure 4-10. ....	79
Figure 4-12 : Positions des points de grille de l'atlas de courants de marée du SHOM sélectionnés pour cette comparaison.....	80
Figure 4-13 : Comparaison des roses de courant de marée issues de l'atlas de marée du SHOM (en noir) et issues des résultats du modèle Telemac-2D (en rouge), pour une marée moyenne de vive-eau, aux points localisés sur la Figure 4-12.....	80
Figure 4-14 : Position du point de comparaison pour la validation de la réanalyse fine des états de mer (étoile noire). ....	83

**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

**Figure 4-15 : Comparaison hydrodynamique au point de mesure du 04/06/2014 au 04/07/2014. Evolutions temporelles de la hauteur d'eau (en haut, en mètres), de l'intensité du courant (au milieu, en m/s) et de sa direction (en bas, portant vers). Les résultats de la réanalyse fine des états de mer Telemac2D sont en rouge, les résultats de la réanalyse MARC-IFREMER sont en bleu. ....84**

**Figure 4-16 : Comparaison hydrodynamique au point de mesure du 04/06/2004 au 04/07/2004. Evolutions temporelles de la hauteur d'eau (en haut, en mètres), de l'intensité du courant (au milieu, en m/s) et de sa direction (en bas, portant vers). Les résultats de la réanalyse fine des états de mer Telemac2D sont en rouge, les mesures in-situ en noir. ....85**

**Figure 4-17 : Comparaison des états de mer au point de mesure du 04/06/2004 au 04/07/2004. Evolutions temporelles de la hauteur significative (en haut, en mètres), de la période des vagues (au milieu, en secondes) et de la direction de provenance (en bas). Les résultats de la réanalyse fine des états de mer Telemac2D sont en rouge, les mesures in-situ en noir et les résultats de la réanalyse HOMERE en bleu. ....86**

**Figure 4-18 : Schéma de principe du système de modélisation, illustrant les couplages (en vert) entre les différents modèles (en noir), les données nécessaires à leur fonctionnement (en bleu) et les résultats produits (en rouge). ....88**

**Figure 4-19 : Position des points de la grille de calcul sélectionnés pour estimer la variabilité des conditions de dérive littorale. ....89**

**Figure 4-20 : Estimation de la variabilité des conditions de dérive littorale à partir de la réanalyse fine des états de mer (1994-2016) pour le point 1 (cf. Figure 4-19) et pour différentes incidences perpendiculaires au trait de côte : 265° (en haut), 270° (au milieu) et 275° (en bas). En noir : estimation du transport solide instantané ; en rouge : moyenne glissante sur 365 jours du transport solide instantané ; en vert : transport solide instantané cumulé. Transport positif vers le Nord, négatif vers le Sud. ....90**

**Figure 4-21 : Estimation de la variabilité des conditions de dérive littorale à partir de la réanalyse fine des états de mer (1994-2016) pour le point 2 (cf. Figure 4-19) et pour différentes incidences perpendiculaires au trait de côte centrées sur le secteur Ouest : 275° (en haut), 280° (au milieu) et 285° (en bas). En noir : estimation du transport solide instantané ; en rouge : moyenne glissante sur 365 jours du transport solide instantané ; en vert : transport solide instantané cumulé. Transport positif vers le Nord, négatif vers le Sud. ....91**

**Figure 4-22 : Estimation de la variabilité des conditions de dérive littorale à partir de la réanalyse fine des états de mer (1994-2016) pour le point 5 (cf. Figure 4-19) et pour différentes incidences perpendiculaires au trait de côte centrées sur le secteur Ouest : 240° (en haut), 245° (au milieu) et 250° (en bas). En noir : estimation du transport solide instantané ; en rouge : moyenne glissante sur 365 jours du transport solide instantané ; en vert : transport solide instantané cumulé. Transport positif vers le Nord, négatif vers le Sud. ....92**

**Figure 4-23 : Estimation de la variabilité des conditions de dérive littorale à partir de la réanalyse fine des états de mer (1994-2016) pour le point 6 (cf. Figure 4-19) et pour différentes incidences perpendiculaires au trait de côte centrées sur le secteur Ouest : 240° (en haut), 245° (au milieu) et 250° (en bas). En noir : estimation du transport solide instantané ; en rouge : moyenne glissante sur 365 jours du transport solide instantané ; en vert : transport solide instantané cumulé. Transport positif vers le Nord, négatif vers le Sud. ....93**

**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

**Figure 4-24 : Evolutions temporelles des principaux paramètres (de haut en bas : hauteur significative, incidence des vagues, vitesse orbitale au fond, hauteur d'eau, vitesse du courant, transport solide) pour la période de référence allant du 01/01/1994 au 31/12/2016 (courbes noires) et pour la période cible 1 (courbes rouges, allant du 03/01/2010 au 03/02/2010).....96**

**Figure 4-25 : MNT au début (à gauche) et à la fin (à droite) de la simulation (durée équivalente de 3 ans et 4 mois) réalisée à partir d'un MNT représentatif de la bathymétrie en 1979 et avec la digue basse. ....99**

**Figure 4-26 : Evolution du fond (en mètre) à la fin de la simulation (durée équivalente de 3 ans et 4 mois) réalisée à partir d'un MNT représentatif de la bathymétrie en 1979 et avec la digue basse. ....99**

**Figure 4-27 : MNT au début (à gauche) et à la fin (à droite) de la simulation (durée équivalente de 3 ans et 4 mois) réalisée à partir d'un MNT représentatif de la bathymétrie en 1979 et des chenaux de 1982, avec la digue basse (en haut) et sans (en bas). .... 101**

**Figure 4-28 : Evolution du fond (en mètre) à la fin de la simulation (durée équivalente de 3 ans et 4 mois) réalisée à partir d'un MNT représentatif de la bathymétrie en 1979 et des chenaux de 1982, avec la digue basse (en haut) et sans (en bas). .... 102**

**Figure 4-29 : Différentiel de l'évolution du fond (en mètre) entre la simulation avec et sans digue basse, et pour un MNT représentatif de la bathymétrie en 1979 et des chenaux de 1982. .... 103**

**Figure 4-30 : MNT au début (à gauche) et à la fin (à droite) de la simulation (durée équivalente de 3 ans et 4 mois) réalisée à partir d'un MNT représentatif de la bathymétrie en 1984, avec la digue basse (en haut) et sans (en bas). .... 105**

**Figure 4-31 : Evolution du fond (en mètre) à la fin de la simulation (durée équivalente de 3 ans et 4 mois) réalisée à partir d'un MNT représentatif de la bathymétrie en 1984, avec la digue basse (en haut) et sans (en bas)..... 106**

**Figure 4-32 : Différentiel de l'évolution du fond (en mètre) entre la simulation avec et sans digue basse, et pour un MNT représentatif de la bathymétrie en 1984. .... 107**

**Figure 4-33 : MNT au début (à gauche) et à la fin (à droite) de la simulation (durée équivalente de 6 ans et 8 mois) réalisée à partir d'un MNT représentatif de la bathymétrie en 1984, avec la digue basse (en haut) et sans (en bas). .... 109**

**Figure 4-34 : Evolution du fond (en mètre) à la fin de la simulation (durée équivalente de 6 ans et 8 mois) réalisée à partir d'un MNT représentatif de la bathymétrie en 1984, avec la digue basse (en haut) et sans (en bas)..... 110**

**Figure 4-35 : Différentiel de l'évolution du fond (en mètre) entre la simulation avec et sans digue basse, et pour un MNT représentatif de la bathymétrie en 1984, avec suite de calcul..... 111**

**Figure 5-1 : Bathymétries (en m) utilisées pour évaluer l'incidence de la digue des Garennes sur le transit littoral, pour l'état initial (en haut) et pour l'état aménagé (en bas). .... 113**

**Figure 5-2 : Différentiel bathymétrique (en m) entre les bathymétries de l'état aménagé et de l'état initial pour la digue des Garennes. .... 114**

**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

**Figure 5-3 : Cartes de transport solide instantané ( $m^3/m/s$ ) pour le scénario 1 au moment de la pleine mer, dans l'état initial (en haut) et pour l'aménagement de la digue des Garennes (en bas)..... 115**

**Figure 5-4 : Cartes de transport solide instantané ( $m^3/m/s$ ) pour le scénario 1 au moment de la pleine mer, dans l'état initial (en haut) et pour l'aménagement de la digue des Garennes (en bas)..... 116**

**Figure 5-5 : Cartes de transport solide instantané ( $m^3/m/s$ ) pour le scénario 2 au moment de la pleine mer, dans l'état initial (en haut) et pour l'aménagement de la digue des Garennes (en bas)..... 117**

**Figure 5-6 : Cartes de transport solide instantané ( $m^3/m/s$ ) pour le scénario 2 au moment de la pleine mer, dans l'état initial (en haut) et pour l'aménagement de la digue des Garennes (en bas)..... 118**

**Figure 5-7 : Bathymétries (en m) utilisées pour évaluer l'incidence de la cale de l'école de voile sur le transit littoral, pour l'état initial (en haut) et pour l'état aménagé (en bas). ..... 119**

**Figure 5-8 : Différentiel bathymétrique (en m) entre les bathymétries de l'état aménagé et de l'état initial pour la cale de l'école de voile..... 120**

**Figure 5-9 : Cartes de transport solide instantané ( $m^3/m/s$ ) pour le scénario 1 au moment de la pleine mer, dans l'état initial (en haut) et pour l'aménagement de la cale de l'école de voile (en bas)..... 121**

**Figure 5-10 : Cartes de transport solide instantané ( $m^3/m/s$ ) pour le scénario 1 au moment de la pleine mer, dans l'état initial (en haut) et pour l'aménagement de la cale de l'école de voile (en bas)..... 122**

**Figure 5-11 : Cartes de transport solide instantané ( $m^3/m/s$ ) pour le scénario 2 au moment de la pleine mer, dans l'état initial (en haut) et pour l'aménagement de la cale de l'école de voile (en bas)..... 123**

**Figure 5-12 : Cartes de transport solide instantané ( $m^3/m/s$ ) pour le scénario 2 au moment de la pleine mer, dans l'état initial (en haut) et pour l'aménagement de la cale de l'école de voile (en bas)..... 124**

**Figure 6-1 : Evolutions morphodynamiques simulées par modèle physique sur la période 1969-1979 (LCHF, 1982). ..... 125**

**Figure 6-2 : Etat des fonds à T0 et à T0+3ans - solution N°1 (chenal « Nord rectiligne »). ..... 126**

**Figure 6-3 : Etat des fonds à T0 et à T0+3ans - solution N°2 (chenal « Nord rectiligne » + épi d'arrêt). ..... 126**

**Figure 6-4 : Etat des fonds à T0 et à T0+3ans - solution N°3 (chenal « Nord rectiligne » + digue basse côté Montmartin)..... 127**

**Figure 6-5 : Descriptif des aménagements pour l'essai en cycle long (durée équivalente à 8 ans)..... 128**

**Figure 6-6 : Localisation des épis et des rechargements en sable, projet de confortement du front de mer d'Hauteville (GRESARC, 2001). ..... 128**

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

Figure 6-7 : Extrait de l'AVP (GRESARC, 2002).....	129
Figure 6-8 : Exemple de projets de rechargement devant le front de mer d'Hauteville. ....	131
Figure 6-9 : Surface type (contour blanc en pointillés) à définir comme zone d'emprunt pour les sables de rechargement.....	132
Figure 6-10 : Quantités de sable au-dessus de la cote +9m NGF en 2010 (marron) et en 2016 (bleu) – les traits (marron, bleu) sont les contours +9 m NGF (2010, 2016). ....	133
Figure 6-11 : Parcelles urbanisées et routes en-dessous de la cote +9 m NGF – littoral de Regnéville. ....	135
Figure 6-12 : Superposition de la ligne +9m NGF (trait bleu continu) sur la carte IGN - secteur amont : Les Vandais, La Duranderie, Manoir d'Urville. ....	136
Figure 6-13 : Superposition de la ligne +9m NGF (trait bleu continu) sur l'ortho-photo IGN - secteur amont : Les Vandais, La Duranderie, Manoir d'Urville.....	136
Figure 6-14 : Etat de référence (situation actuelle) : MNT initial à T0 de la simulation morphodynamique.....	138
Figure 6-15 : Evolutions simulées à partir de l'état de référence (situation actuelle, sans aménagement) – fonds aux échéances T0+3.5 ans (en haut) et à T0+10 ans (en bas). ....	139
Figure 6-16 : Evolutions simulées à partir de l'état de référence (situation actuelle, sans aménagement) – bilans des érosions et des dépôts aux échéances T0+3.5 ans (en haut) et à T0+10 ans (en bas).....	140
Figure 6-17 : Tracés des deux profils le long desquels les évolutions morphodynamiques simulées sont analysées au cours du temps.....	141
Figure 6-18 : Evolutions simulées à partir de l'état de référence (situation actuelle, sans aménagement) - profils simulés à T0, T0+3.5 ans, T0+7 ans et T0+10 ans. Profil « cross-shore » (en haut) et à « l'enracinement » (en bas). ....	141
Figure 6-19 : Aménagement n°1 (creusement d'un chenal + dépôt dans le prolongement de la flèche de Montmartin) : MNT initial à T0 de la simulation morphodynamique (en haut). Différentiel bathymétrique (en bas, en m) entre cet aménagement et la situation actuelle.....	143
Figure 6-20 : Aménagement n°1 (creusement d'un chenal + dépôt dans le prolongement de la flèche de Montmartin) : MNT simulés au cours de la simulation morphodynamique pour l'état de référence (à gauche) et pour l'aménagement n°1 (à droite), à T0+3.5 ans (en haut) et à T0+10 ans (en bas).....	144
Figure 6-21 : Aménagement n°1 (creusement d'un chenal + dépôt dans le prolongement de la flèche de Montmartin) : évolutions des fonds au cours de la simulation morphodynamique pour l'état de référence (à gauche) et pour l'aménagement n°1 (à droite), à T0+3.5 ans (en haut) et à T0+10 ans (en bas).....	145
Figure 6-22 : Aménagement n°1 (creusement d'un chenal + dépôt dans le prolongement de la flèche de Montmartin) : profils obtenus le long de la section « cross-shore » représentée sur la Figure 6-17, à T0, T0+3.5 ans, T0+7 ans et T0+10 ans pour la situation de référence (en haut, en bleu) et pour l'aménagement n°1 (en bas, en rouge). ....	146

**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

**Figure 6-23 : Aménagement n°1 (creusement d'un chenal + dépôt dans le prolongement de la flèche de Montmartin) : profils obtenus le long de la section « enracinement » représentée sur la Figure 6-17, à T0, T0+3.5 ans, T0+7 ans et T0+10 ans pour la situation de référence (en haut, en bleu) et pour l'aménagement n°1 (en bas, en rouge). ..... 147**

**Figure 6-24 : Aménagement n°1 (creusement d'un chenal + dépôt dans le prolongement de la flèche de Montmartin) : profils obtenus le long de la section « enracinement » représentée sur la Figure 6-17, en 2010 (courbe noire) et à T0 et T0+3.5 ans pour la situation de référence (en bleu) et pour l'aménagement n°1 (en rouge). ..... 147**

**Figure 6-25 : Aménagement n°2 (suppression de la digue basse) : MNT initial à T0 de la simulation morphodynamique (en haut). Différentiel bathymétrique (en bas, en m) entre cet aménagement et la situation actuelle. .... 149**

**Figure 6-26 : Aménagement n°2 (suppression de la digue basse) : MNT simulés au cours de la simulation morphodynamique pour l'état de référence (à gauche) et pour l'aménagement n°2 (à droite), à T0+3.5 ans (en haut) et à T0+10 ans (en bas)..... 150**

**Figure 6-27 : Aménagement n°2 (suppression de la digue basse) : évolutions des fonds au cours de la simulation morphodynamique pour l'état de référence (à gauche) et pour l'aménagement n°2 (à droite), à T0+3.5 ans (en haut) et à T0+10 ans (en bas)..... 151**

**Figure 6-28 : Aménagement n°2 (suppression de la digue basse) : profils obtenus le long de la section « cross-shore » représentée sur la Figure 6-17, à T0, T0+3.5 ans, T0+7 ans et T0+10 ans pour la situation de référence (en haut, en bleu) et pour l'aménagement n°2 (en bas, en rouge). ..... 152**

**Figure 6-29 : Aménagement n°2 (suppression de la digue basse) : profils obtenus le long de la section « enracinement » représentée sur la Figure 6-17, à T0, T0+3.5 ans, T0+7 ans et T0+10 ans pour la situation de référence (en haut, en bleu) et pour l'aménagement n°2 (en bas, en rouge). ..... 153**

**Figure 6-30 : Aménagement n°3 (prolongement de la digue basse depuis son enracinement) : MNT initial à T0 de la simulation morphodynamique (en haut). Différentiel bathymétrique (en bas, en m) entre cet aménagement et la situation actuelle. .... 155**

**Figure 6-31 : Aménagement n°3 (prolongement de la digue basse depuis son enracinement) : MNT simulés au cours de la simulation morphodynamique pour l'état de référence (à gauche) et pour l'aménagement n°3 (à droite), à T0+3.5 ans (en haut) et à T0+10 ans (en bas)..... 156**

**Figure 6-32 : Aménagement n°3 (prolongement de la digue basse depuis son enracinement) : évolutions des fonds au cours de la simulation morphodynamique pour l'état de référence (à gauche) et pour l'aménagement n°3 (à droite), à T0+3.5 ans (en haut) et à T0+10 ans (en bas). . 157**

**Figure 6-33 : Aménagement n°3 (prolongement de la digue basse depuis son enracinement) : profils obtenus le long de la section « cross-shore » représentée sur la Figure 6-17, à T0, T0+3.5 ans, T0+7 ans et T0+10 ans pour la situation de référence (en haut, en bleu) et pour l'aménagement n°3 (en bas, en rouge)..... 158**

**Figure 6-34 : Aménagement n°3 (prolongement de la digue basse depuis son enracinement) : profils obtenus le long de la section « enracinement » représentée sur la Figure 6-17, à T0, T0+3.5 ans, T0+7 ans et T0+10 ans pour la situation de référence (en haut, en bleu) et pour l'aménagement n°3 (en bas, en rouge)..... 159**

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

Figure 6-35 : Hypothèse n°4 (brèche à l'enracinement de la digue basse) : MNT à T0 de la simulation morphodynamique (en haut). En bas : coupe bathymétrique selon un axe Nord-Ouest/Sud-Est de la brèche (ligne rouge). Les profils représentés en bas illustrent le recul observé de la berge entre 2010 et 2016 (LIDAR) et le recul projeté à l'horizon 2022-2025 qui a été pris en compte pour cette hypothèse n°4. ....	161
Figure 6-36 : Hypothèse n°4 (brèche à l'enracinement de la digue basse) : MNT simulés au cours de la simulation morphodynamique pour l'état de référence (à gauche) et pour l'hypothèse n°4 (à droite), à T0+3.5 ans (en haut) et à T0+10 ans (en bas). ....	162
Figure 6-37 : Hypothèse n°4 (brèche à l'enracinement de la digue basse) : évolutions des fonds au cours de la simulation morphodynamique pour l'état de référence (à gauche) et pour l'hypothèse n°4 (à droite), à T0+3.5 ans (en haut) et à T0+10 ans (en bas). ....	163
Figure 6-38 : Hypothèse n°4 (brèche à l'enracinement de la digue basse) : profils obtenus le long de la section « cross-shore » représentée sur la Figure 6-17, à T0, T0+3.5 ans, T0+7 ans et T0+10 ans pour la situation de référence (en haut, en bleu) et pour l'hypothèse n°4 (en bas, en rouge). ....	164
Figure 6-39 : Hypothèse n°4 (brèche à l'enracinement de la digue basse) : profils obtenus le long de la section « enracinement » représentée sur la Figure 6-17, à T0, T0+3.5 ans, T0+7 ans et T0+10 ans pour la situation de référence (en haut, en bleu) et pour l'hypothèse n°4 (en bas, en rouge). ....	165
Figure 7-1 : Visualisation des aménagements à tester - gauche : référence ; centre : digue pour contenir la submersion ; droite : digue + ligne de dépoldérisation. Trait noir : niveau +9.5 m NGF.....	167
Figure 7-2 : Grille de calcul à haute résolution définie pour simuler les phénomènes de submersion. La résolution est de 10 m dans toute l'embouchure et 1 m localement au niveau de certaines levées de terre (cf. Figure 7-3). MNT (LIDAR) de 2016. ....	169
Figure 7-3 : Grille de calcul à haute résolution définie pour simuler les phénomènes de submersion. La résolution est de 10 m dans toute l'embouchure et 1 m localement au niveau de certaines levées de terre et identifiées en rouge sur cette figure. Le trait de côte est représenté en bleu, il n'y a pas de continuité du cordon dunaire. ....	170
Figure 7-4 : Grille de calcul à haute résolution définie pour simuler les phénomènes de submersion marine. Zoom sur la zone « Hauteville/Montmartin ». La résolution est de 10 m dans toute l'embouchure et 1 m localement au niveau de certaines levées de terre. MNT de 2016.....	171
Figure 7-5 : Grille de calcul à haute résolution définie pour simuler les phénomènes de submersion marine. Zoom sur la zone « Regnéville ». La résolution est de 10 m dans toute l'embouchure et 1 m localement au niveau de certaines levées de terre. MNT de 2016.....	172
Figure 7-6 : Différentiel bathymétrique (m) entre l'aménagement n°1 et le MNT actuel (2016). ....	173
Figure 7-7 : Différentiel bathymétrique (m) entre l'aménagement n°2 et le MNT actuel (2016). ....	174
Figure 7-8 : Carte des niveaux d'eau maximaux (m/NGF) simulés en configuration actuelle pour des événements de période de retour centennale– En haut : horizon 2020 ; en bas : horizon 2100. .	175

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

Figure 7-9 : Cartes des niveaux d'eau maximaux (m/NGF) simulés en configuration actuelle (à gauche) et pour l'aménagement n°1 (à droite), pour des événements de période de retour centennale– En haut : horizon 2020 ; en bas : horizon 2100. ....	178
Figure 7-10 : Cartes des niveaux d'eau maximaux (m/NGF) simulés en configuration actuelle (à gauche) et pour l'aménagement n°2 (à droite), pour des événements de période de retour centennale– En haut : horizon 2020 ; en bas : horizon 2100. ....	179
Figure 7-11 : Localisation des points pour l'analyse des évolutions temporelles des niveaux d'eau pour les ouvrages rétro-littoraux. ....	180
Figure 7-12 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2020 au point n°1 sur toute la marée (en haut) et zoom au moment de la pleine mer (en bas). L'état actuel est représenté en rouge, l'aménagement n°1 en bleu et l'aménagement n°3 en vert. ....	181
Figure 7-13 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2020 au point n°2 sur toute la marée (en haut) et zoom au moment de la pleine mer (en bas). L'état actuel est représenté en rouge, l'aménagement n°1 en bleu et l'aménagement n°3 en vert. ....	182
Figure 7-14 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2020 au point n°3 sur toute la marée (en haut) et zoom au moment de la pleine mer (en bas). L'état actuel est représenté en rouge, l'aménagement n°1 en bleu et l'aménagement n°3 en vert. ....	183
Figure 7-15 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2100 au point n°1 sur toute la marée (en haut) et zoom au moment de la pleine mer (en bas). L'état actuel est représenté en rouge, l'aménagement n°1 en bleu et l'aménagement n°3 en vert. ....	184
Figure 7-16 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2100 au point n°2 sur toute la marée (en haut) et zoom au moment de la pleine mer (en bas). L'état actuel est représenté en rouge, l'aménagement n°1 en bleu et l'aménagement n°3 en vert. ....	185
Figure 7-17 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2100 au point n°3 sur toute la marée (en haut) et zoom au moment de la pleine mer (en bas). L'état actuel est représenté en rouge, l'aménagement n°1 en bleu et l'aménagement n°3 en vert. ....	186
Figure 7-18 : Cartes des niveaux d'eau maximaux (m/NGF) simulés en configuration actuelle (à gauche) et pour l'aménagement n°1 (creusement d'un chenal + dépôt, à droite), pour des événements de période de retour centennale– En haut : horizon 2020 ; en bas : horizon 2100. .	188
Figure 7-19 : Cartes des niveaux d'eau maximaux (m/NGF) simulés en configuration actuelle (à gauche) et pour l'aménagement n°2 (suppression de la digue basse, à droite), pour des événements de période de retour centennale– En haut : horizon 2020 ; en bas : horizon 2100. .	189
Figure 7-20 : Cartes des niveaux d'eau maximaux (m/NGF) simulés en configuration actuelle (à gauche) et pour l'aménagement n°3 (prolongement de l'enracinement de la digue basse, à droite), pour des événements de période de retour centennale– En haut : horizon 2020 ; en bas : horizon 2100. ....	190

**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

---

**Figure 7-21 : Cartes des niveaux d'eau maximaux (m/NGF) simulés en configuration actuelle (à gauche) et pour l'hypothèse n°4 (brèche à l'enracinement, à droite), pour des événements de période de retour centennale– En haut : horizon 2020 ; en bas : horizon 2100. .... 191**

**Figure 7-22 : Localisation des points pour l'analyse des évolutions temporelles des niveaux d'eau pour les aménagements à l'embouchure..... 192**

**Figure 7-23 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2020 au point n°1. .... 193**

**Figure 7-24 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2020 au point n°2. .... 193**

**Figure 7-25 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2020 au point n°3. .... 194**

**Figure 7-26 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2100 au point n°1. .... 195**

**Figure 7-27 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2100 au point n°2. .... 195**

**Figure 7-28 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2100 au point n°3. .... 196**

# 1. INTRODUCTION

## 1.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

La demande de cette étude hydro-sédimentaire tient son origine des différentes réflexions menées par les communes et regroupement de communes du secteur du havre de Regnéville et de l'embouchure de la Sienne (cf. Figure 1-1).

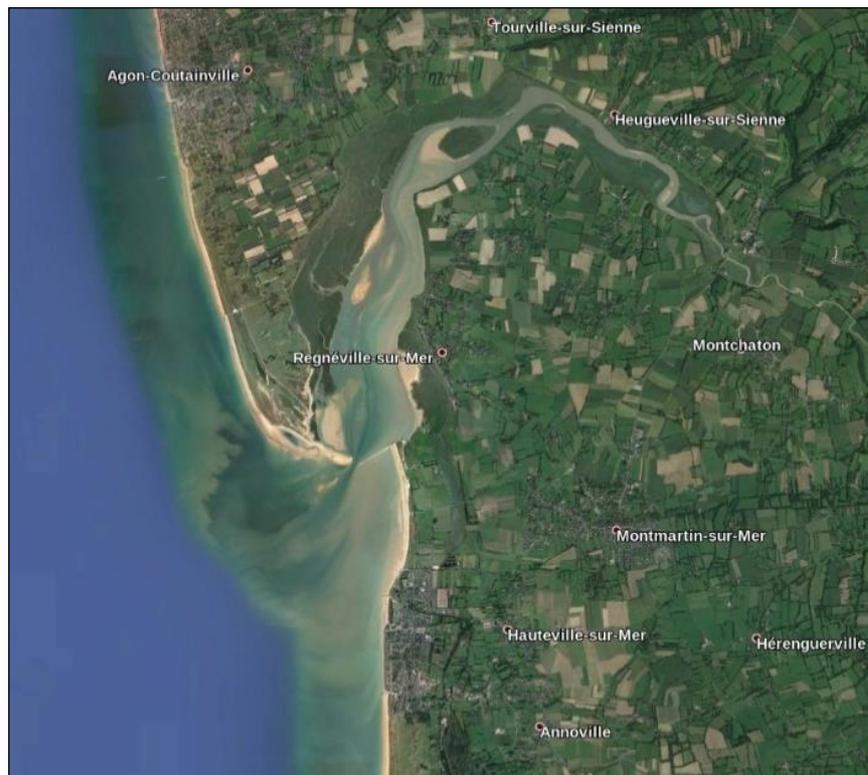


Figure 1-1 : Site d'étude.

La volonté des élus locaux d'assurer une protection optimale des biens, des personnes, du patrimoine naturel présents à proximité du littoral est bien entendu le fondement de ces réflexions.

Certains projets de protection ont été initiés et les demandes d'autorisation administrative ont permis de préciser les attentes des services de l'état et notamment la volonté de disposer d'une vision plus large de la protection du littoral.

La présente étude, lancée par le Syndicat Intercommunal de Défense du Littoral et d'Aménagement Touristique de la Baie de Sienne, et transférée à la Communauté de Communes Coutances Mer et Bocage, a pour vocation de répondre à ces demandes mais également de comprendre le fonctionnement hydro-sédimentaire du site. La vision générale présentée dans ce rapport d'étude a pour but de fournir les éléments permettant d'orienter les décideurs dans leurs choix d'aménagement à réaliser et d'anticiper certaines évolutions du trait de côte.

Le schéma directeur de gestion en conclusion de ce rapport est l'aboutissement des réflexions techniques analysées sur plusieurs critères socio-économiques et environnementaux.

## 1.2 UNITES ET CONVENTIONS

La liste suivante décrit les unités et conventions utilisées dans ce rapport.

Vitesse du vent exprimée en m/s.

Direction du vent exprimée en degrés par rapport au Nord et représente la direction de provenance (venant de).

Hauteur des vagues exprimée en m.

Période des vagues exprimée en s.

Direction des vagues exprimée en degrés par rapport au Nord et représente la direction de provenance (venant de).

Etalement directionnel exprimé en degrés.

Vitesse du courant exprimée en m/s

Direction du courant exprimée en degrés par rapport au Nord et représente la direction vers laquelle porte le courant.

Niveau d'eau exprimé en m par rapport :

- au Zéro Hydrographique (ZH) équivalent au Zéro des Cartes Marines (CM),
- au Niveau Moyen des mers (NM) exprimé à Dunkerque,
- au zéro du réseau de Nivellement Général de la France (NGF-IGN69), repère altimétrique légal en France métropolitaine.

Tous les temps sont exprimés par rapport au Temps Moyen de Greenwich (GMT) équivalent au Temps Universel Coordonné (UTC).

## 1.3 GLOSSAIRE

La liste suivante décrit les abréviations utilisées dans ce rapport.

Abréviation	Définition
BM	Basse Mer
BMME	Basse Mer de Mortes-Eaux
BMVE	Basse Mer de Vives-Eaux
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CM	Zéro des Cartes Marines
ks	Coefficient de rugosité de Nikuradse
LIDAR	« Light Detection And Ranging » (détection et estimation de la distance par la lumière)
MNT	Modèle Numérique de Terrain
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NGF-IGN69	Nivellement Général de la France : réseau de repères altimétriques mis en place par l'Institut Géographique National en 1969. Il constitue le système altimétrique légal actuel en France métropolitaine. L'altitude 0 est déterminée par le marégraphe de Marseille.
NM	Niveau Moyen des mers
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PBMA	Plus Basses Mers Astronomiques
PHMA	Plus Hautes Mers Astronomiques
PM	Pleine Mer
PMME	Pleine Mer de Mortes-Eaux
PMVE	Pleine Mer de Vives-Eaux
WW3	WaveWatch3 (modèle spectral d'états de mer)

Tableau 1-1 : Abréviations

## 2. ANALYSE DES EVOLUTIONS MORPHO-SEDIMENTAIRES HISTORIQUES

### 2.1 EVOLUTIONS A LONG TERME

#### 2.1.1 DEPUIS PLUSIEURS CENTAINES D'ANNEES

Les données disponibles permettent de caractériser les évolutions, à partir de cartes datées et dont on peut évaluer la précision, depuis le milieu du 18<sup>ème</sup> siècle, soit depuis près de 300 ans.

Entre le 18<sup>ème</sup> siècle et le 19<sup>ème</sup> siècle, la morphologie à l'embouchure a radicalement changé. L'embouchure, qui était relativement ouverte vers la mer et orientée vers le Sud-Ouest, est à partir du 19<sup>ème</sup> siècle largement contrainte par la flèche d'Agon et orientée plein Sud. Même si la précision des cartes anciennes est toute relative, en particulier pour celle de Cassini (milieu du 18<sup>ème</sup> siècle), les évolutions sont telles (e.g. allongement de la flèche d'Agon de plus de 2 km) qu'il n'y a pas de doute sur des évolutions très dynamiques de la flèche d'Agon et de l'embouchure du havre de Regnéville. A titre indicatif, les ponts qui peuvent être localisés sur les deux cartes (pont de La Roque, pont de Hyenville, pont entre Agon et Tourville) sont décalés d'environ 200-300 m entre les deux cartes (géoréférencées sur le site de l'IGN), ce qui est raisonnable pour caractériser des évolutions kilométriques. La précision de la carte de l'état-major est elle-même remarquable : ponts mentionnés précédemment distants de moins de 10 m, soit l'épaisseur du trait, si on se rapporte à la carte IGN de 1950).

#### **Le développement de la flèche d'Agon depuis le 18<sup>ème</sup> siècle :**

- **Vers le Sud** : plus de 2 km entre le 18<sup>ème</sup> et le 19<sup>ème</sup> siècle, soit 20 m/an ; 600-700 m entre le 19<sup>ème</sup> et le 20<sup>ème</sup> siècle (1947) soit 5 à 10 m/an.
- **Vers l'Est** : ~1 km entre le 18<sup>ème</sup> et le 20<sup>ème</sup> siècle, soit 5 m/an ; ~200 m entre le 19<sup>ème</sup> et le 20<sup>ème</sup> siècle (1947), soit 2 m/an.

#### **L'embouchure de la Sienne s'est déplacée d'autant sur ces périodes.**

Le développement de la flèche d'Agon entre le 18<sup>ème</sup> et le 19<sup>ème</sup> siècle est spectaculaire (20 m/an). Une accumulation de sable aussi rapide peut paraître surprenante mais a pu être observée sur d'autres sites ; c'est par exemple le cas de la pointe de la Coubre, à l'embouchure de la Gironde, qui est une flèche de sable de 6 km de long (dont la moitié selon un axe Nord-Sud) qui n'existait pas au début du 20<sup>ème</sup> siècle (Bertin, 2015).

D'autres documents historiques plus anciens indiquent que la flèche d'Agon a pu connaître des tendances érosives marquées à certaines époques. Une carte du moyen-âge (Figure 2-3) montre par exemple une flèche sableuse dont l'extrémité se situerait en face de Regnéville. Sa forme allongée et son étroitesse suggèrent que la flèche a pu facilement être érodée par les actions hydrodynamiques (vagues, marée).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

Le fort d'Agon, construit en 1747, a été démolé par « les marées » (<http://patrimoine-maritime-normand.org/phare-d-Agon>) en 1776. Ce qui figure sur la carte de Cassini (Figure 2-1) semble indiquer que le fort se trouvait déjà dans une situation compliquée (en haut de plage) dans les années 1950, puisque la flèche sur laquelle il avait été édifié avait été ensuite érodée. A noter que le phare d'Agon, inauguré en 1856, se trouve à l'emplacement de cet ancien fort. On peut se poser la question de la carte mentionnée comme datant du moyen-âge (Figure 2-3) sur laquelle figure un fort vers l'extrémité de la flèche, ou alors s'agit-il d'un autre fort plus ancien, et lui aussi détruit, que celui construit en 1747.

On peut penser que les informations sur la carte de l'état-major caractérisent probablement une situation proche de 1866. D'autres cartes du 19<sup>ème</sup> siècle, qui sont des cartes marines avec une représentation plus détaillée sur le littoral, indiquent une situation plus contrastée (Figure 2-4 et Figure 2-5) : la flèche n'est pas pleinement développée sur sa largeur (dunes embryonnaires en arrière du cordon bordier, marais en formation, etc.).



Figure 2-1 : Juxtaposition des cartes du 18<sup>ème</sup> siècle (Cassini) et du 19<sup>ème</sup> siècle (état-major). Source : site de l'IGN.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

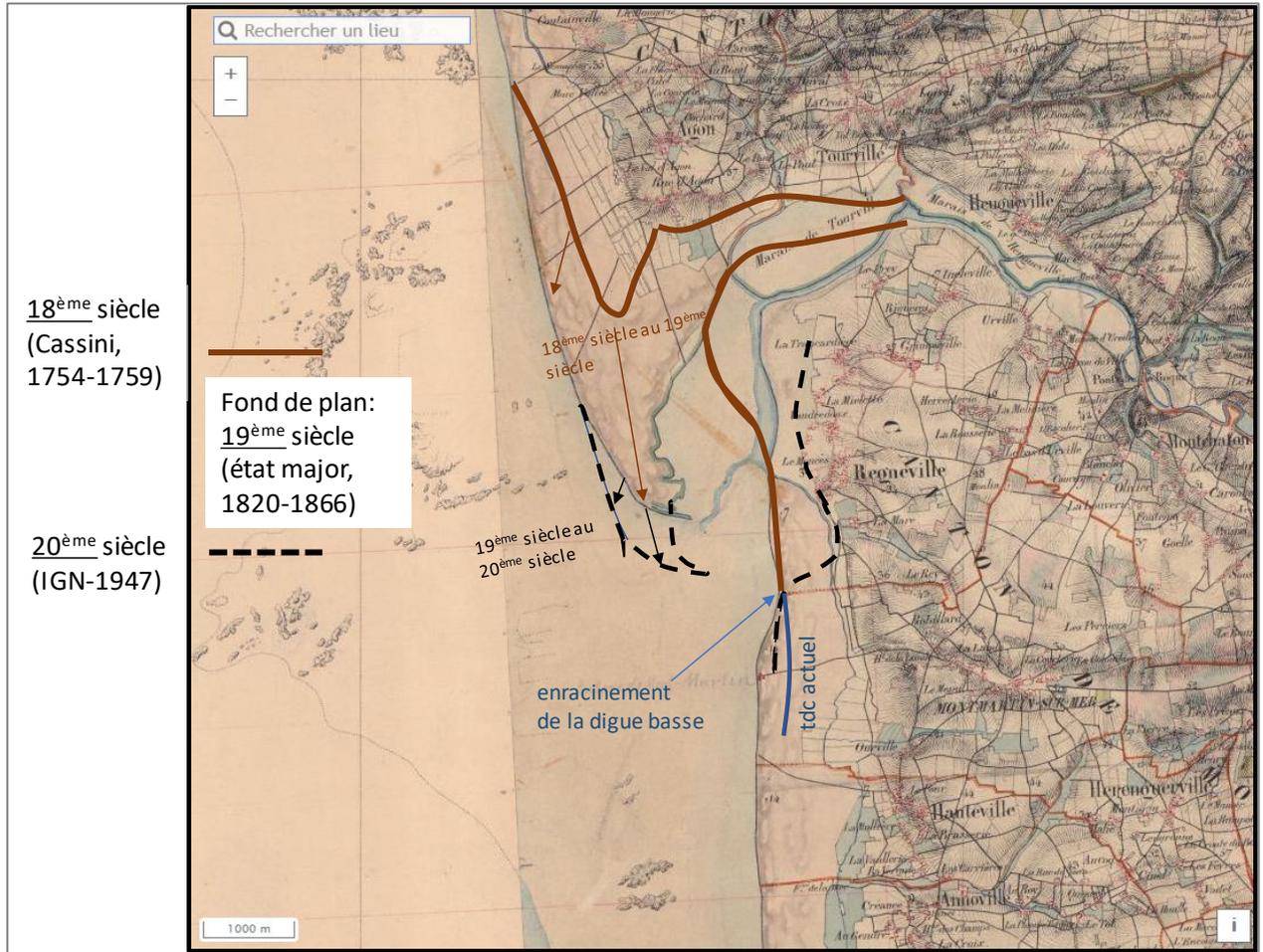


Figure 2-2 : Cartographie des évolutions depuis le 18<sup>ème</sup> siècle, d'après les cartes géoréférencées de l'IGN.



Figure 2-3 : Carte du Moyen Age de la région de Coutances (source : Lundi, 2011. Regnéville-sur-Mer, un village maritime de la Manche).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville



Figure 2-4 : Cartes marines du 19<sup>ème</sup> siècle (gauche : édition de 1851, droite : édition de 1893).  
Source : SHOM.

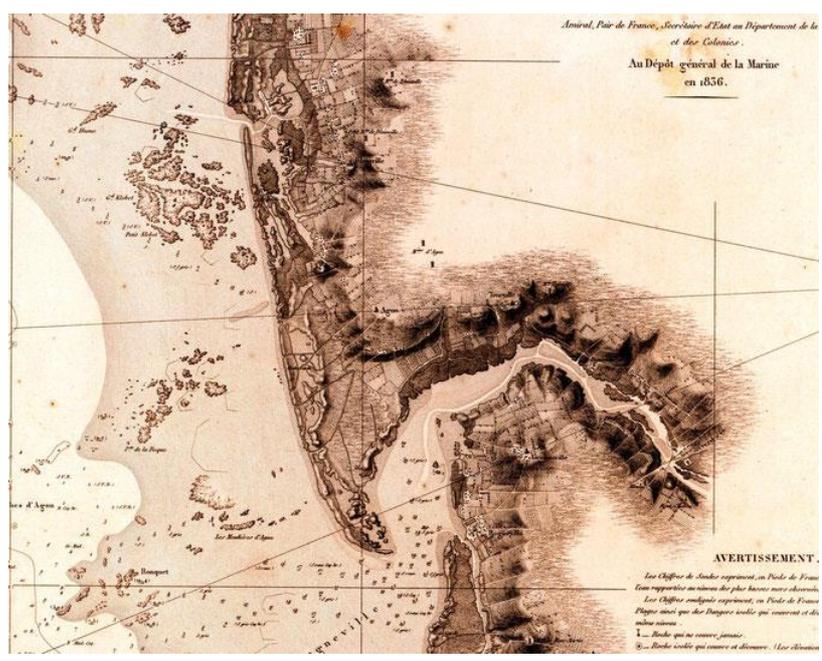


Figure 2-5 : Carte de Beautemps-Beaupré, édition de 1836 (source : Lundi, 2011).

2.1.2 ÉVOLUTIONS AU COURS DU 20<sup>ÈME</sup> SIÈCLE (JUSQU'AU DÉBUT DU 21<sup>ÈME</sup> SIÈCLE)

2.1.2.1 Flèche d'Agon et embouchure

Les évolutions observées entre le 18<sup>ème</sup> siècle et le 20<sup>ème</sup> siècle se sont globalement poursuivies au cours du 20<sup>ème</sup> siècle et au début du 21<sup>ème</sup> siècle. La flèche d'Agon s'est considérablement étoffée, dans sa largeur comme dans sa longueur. L'allongement est par exemple de l'ordre de 300 à 400 m entre 1947 et la situation actuelle.

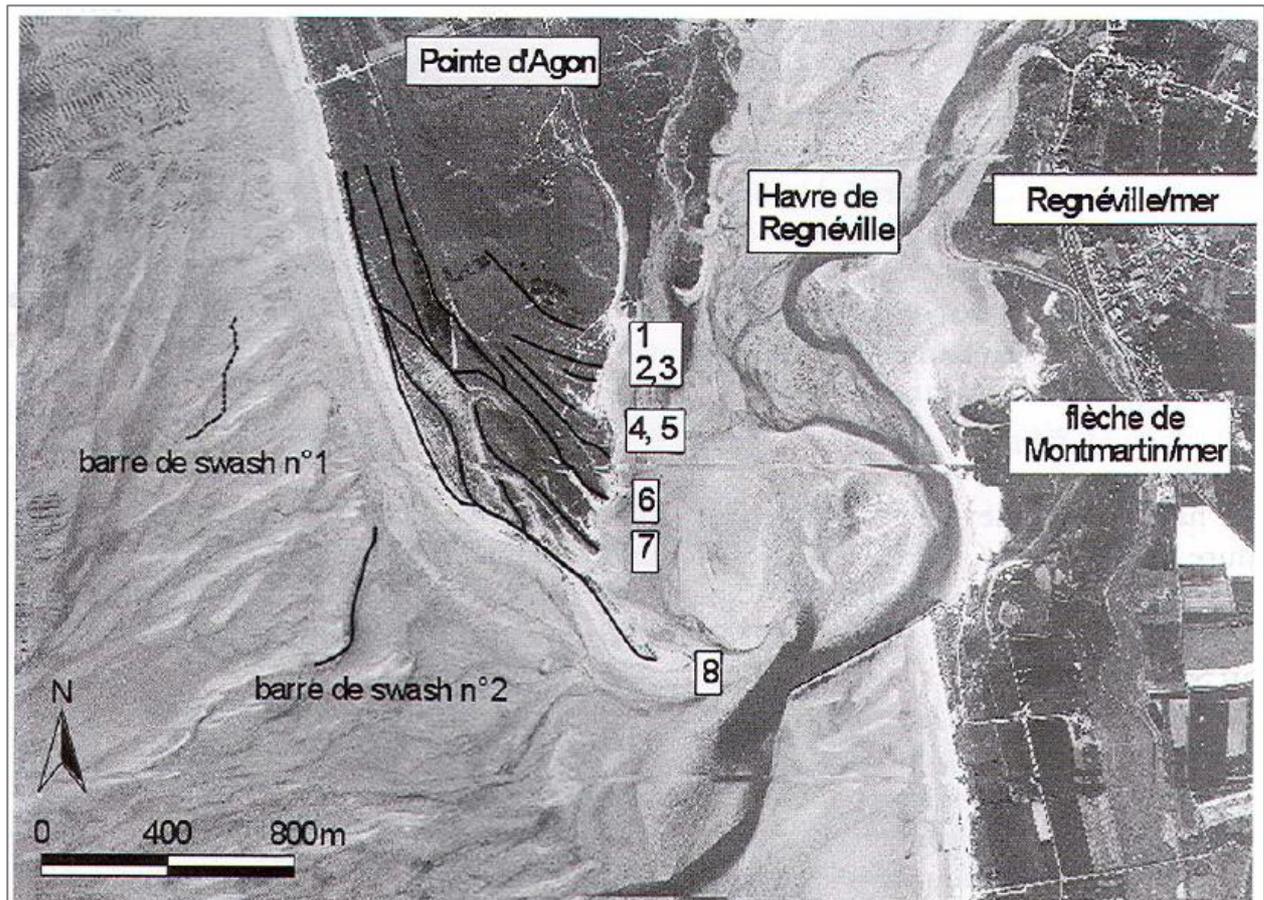


Fig.2. Le havre de Regnéville. Emplacement des crochets sédimentaires à l'extrémité de la Pointe d'Agon (©Orthophotoplan littoral, 2000). Le crochet n°1 a été mentionné au travers de la littérature en 1756, le n°6 en 1850, le n°7 est visible sur les photographies aériennes de l'IGN à partir de 1947 et le n°8 à partir de 1983. La barre de swash n°1 apparaît en 1972 et disparaît dans la dynamique de la haute plage en 1984. La barre n°2 apparaît en 1998.

Figure 2-6 : (source : Robin et Levoy, 2007, in Robin, 2007).

### 2.1.2.2 Côté Hauteville et Montmartin

Même si le recul s'y est avéré relativement modéré, en comparaison des évolutions conjointes de la flèche d'Agon et de l'embouchure (cf. Figure 2-2), le trait de côte a dû être fixé sur le secteur d'Hauteville pour protéger la zone urbanisée en arrière. Le premier ouvrage longitudinal de type perré en béton date des années 1930, avec un confortement ultérieur par des enrochements (d'abord en pied puis sur toute sa hauteur comme c'est le cas actuellement). Le littoral de Montmartin a continué à reculer, notamment parce qu'il était longé par le prolongement du chenal de la Sienne.

Une digue basse (franchissable), avec une cote d'arase estimée entre +2.5 m et +3 m NGF (qui correspond au niveau de pleine mer de morte-eau), a été mise en place dans les années 1980 pour limiter le recul du trait de côte du littoral dunaire de Montmartin.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

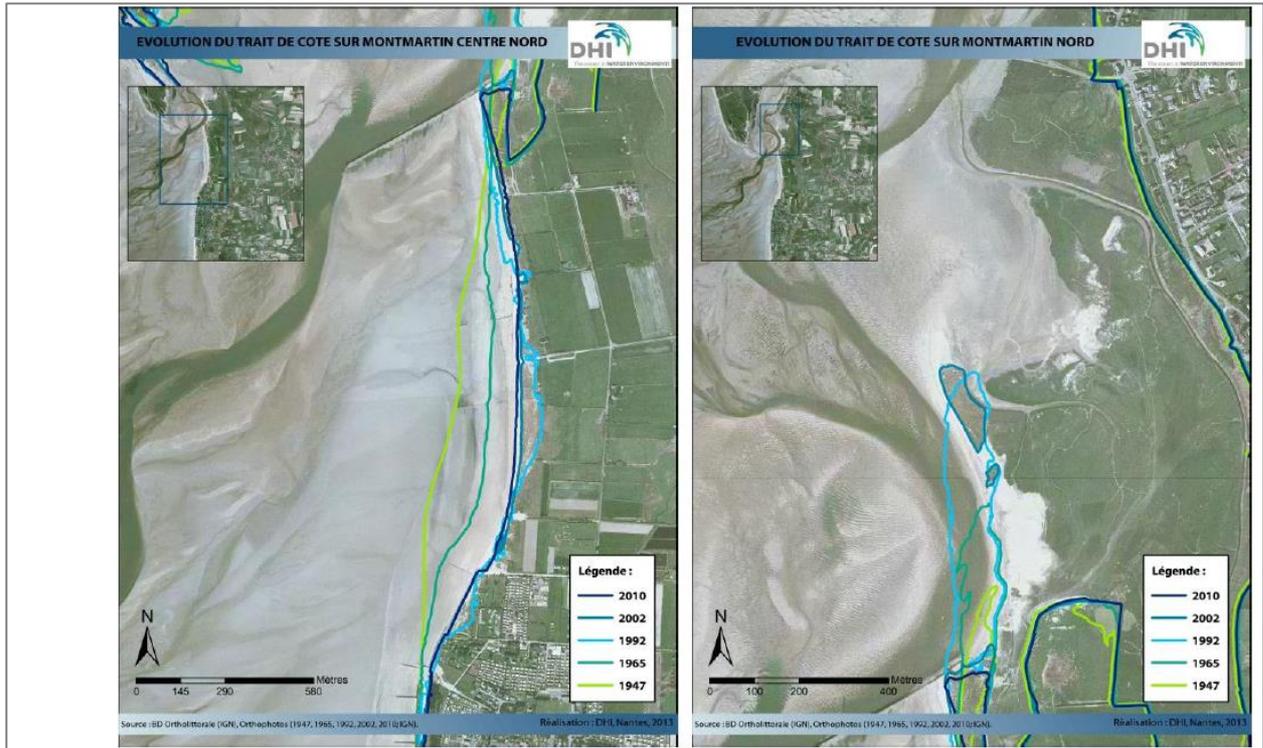


Figure 3-6 : Evolution du trait de côte du secteur d'étude, entre 1947 et 2010 (source Université de Caen – Programme Liteau Surcote)

Figure 2-7 : Evolutions du trait de côte de 1947 à 2010 (source : DHI/GEOS).



Figure 5-6 : La première digue de Hauteville construite en 1933 (Source: DERNOVAYA et LASJAUNIAS, 2010)

Figure 2-8 : Photos historiques de la digue de front de mer d'Hauteville - document issu de l'étude PRL (DHI/GEOS).

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

### 2.1.3 EVOLUTIONS DU CONTEXTE SEDIMENTAIRE

L'envasement progressif du havre de Regnéville (et plus généralement de l'ensemble des havres, estuaires, baies) est lié :

- Aux évolutions à long terme des apports fluviaux et des conditions de turbidité des eaux côtières en lien avec d'importantes déforestations, à partir de 1400 AD, et d'une augmentation des précipitations automnales et hivernales (cf. Poirier C., Poitevin C., Chaumillon E., 2016. *Comparison of estuarine sediment record with modelled rates of sediment supply from a western European catchment since 1500. C. R. Geoscience*). Ces conditions de turbidité ont pu considérablement augmenter jusqu'au 18<sup>ème</sup> siècle, et les dépôts vaseux (drapages par-dessus des fonds sableux), qui sont des processus relativement lents et progressifs, viennent en suivant.
- Aux évolutions des conditions d'agitation à l'intérieur du havre, le développement de la flèche d'Agon limitant progressivement l'agitation incidente.

Localement, la distribution des surfaces de schorre peut changer au gré des évolutions des bancs, des chenaux et de leurs méandres.

La carte de Beautemps-Beaupré (édition de 1836, cf. Figure 2-5) semble montrer des surfaces de schorre en rive droite, ce qui indique que le processus d'envasement du havre était déjà effectif. La tendance, qui peut être dégagée d'après les informations de 1836 d'une part et de 1947 et 2010 d'autre part (Figure 2-9), est cohérente avec un envasement possible depuis environ 1400 AD.

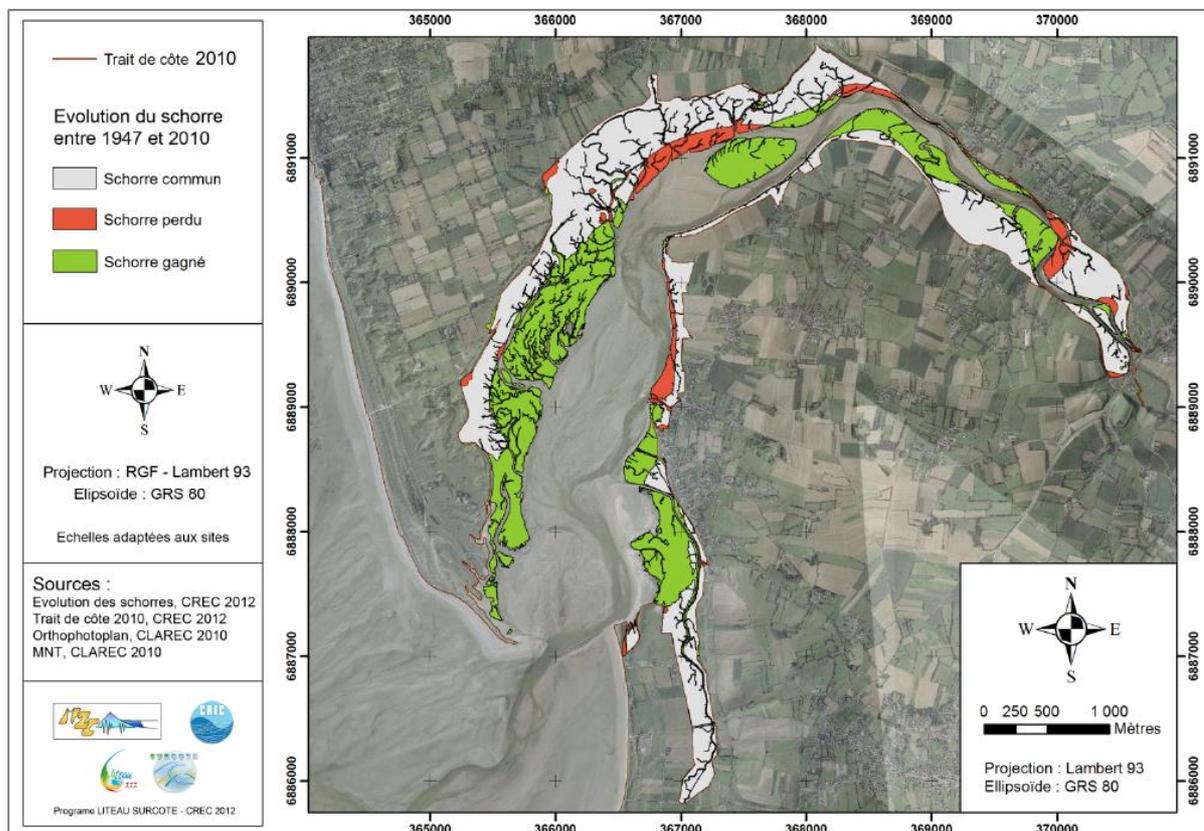


Figure 2-9 : Evolution du schorre entre 1947 et 2010 (source : Liteau, 2012).

## 2.2 EVOLUTIONS RECENTES

### 2.2.1 DEPUIS LES ANNEES 1980 (MISE EN PLACE DE LA DIGUE BASSE)

#### 2.2.1.1 Embouchure et flèches (Agon et Montmartin)

La digue basse à l'embouchure du havre a été mise en place en 1988 pour limiter les phénomènes d'érosion, et donc le recul du trait de côte, le long des littoraux de Montmartin et d'Hauteville. Un tel aménagement a été décidé à partir d'études du LCHF (1982), dont l'exploitation d'un modèle physique hydro-sédimentaire (essais en bassin) basée sur la morphologie de l'estuaire en 1979, définie à partir de mesures topographiques et d'une photographie aérienne.

Les évolutions du système de bancs et de chenaux à l'embouchure entre 1979 et 2002 ont été cartographiées par Robin (2007). A noter qu'il y a peu d'informations dans les années 1980, sans doute en l'absence d'images aériennes exploitables au moment des travaux de thèse. Il faut en effet que la prise de vue soit à marée basse pour que les chenaux puissent être distingués.

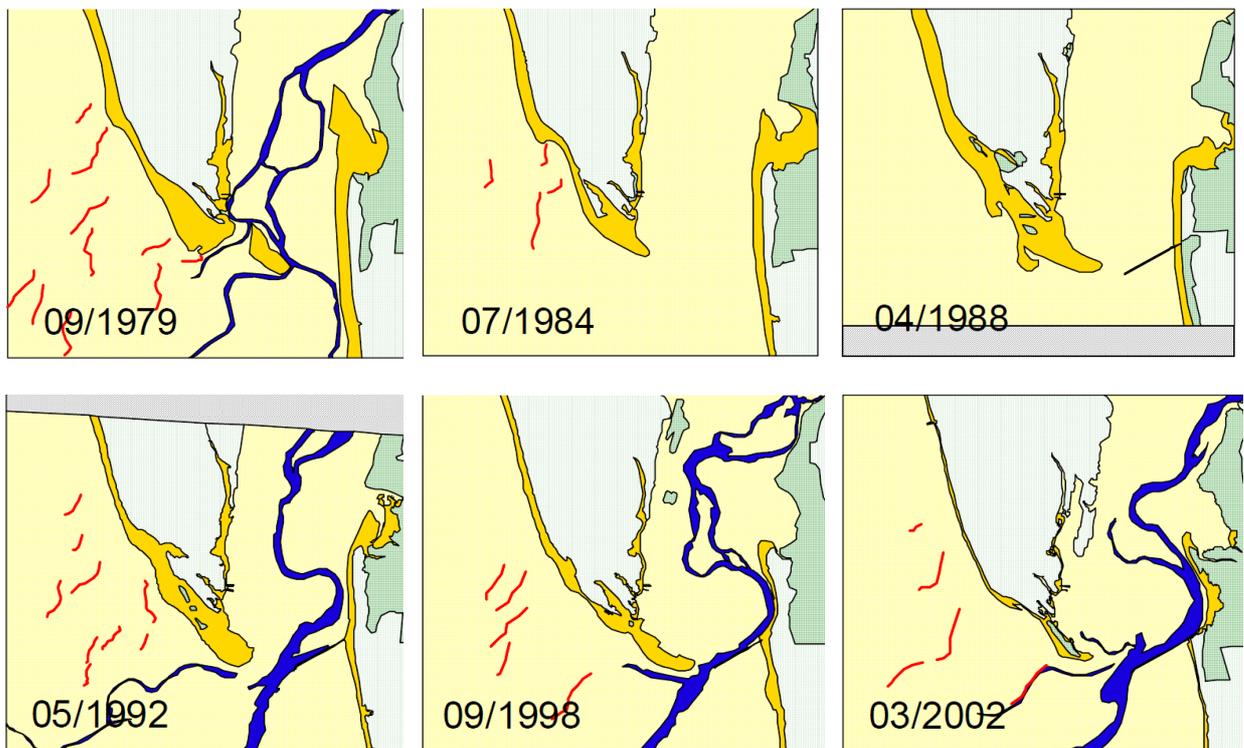


Figure 2-10 : Evolutions entre 1979 et 2002, d'après thèse N. Robin (2007).

Les premières cartes après la mise en place de la digue basse (1988) sont celles de 1992 et 1998, soit jusqu'à 10 ans après. Une information importante est que la flèche de Montmartin n'a pas encore été rétrécie, par rapport à ce qu'indiquent, en moyenne, les cartes de 1979, 1984 et 1988.

Le méandrement important vers l'Est que l'on observe entre 1979 et 1992 (Figure 2-11) était-il déjà initié avant la mise en place de la digue basse ? C'est une des questions essentielles vis-à-vis des effets induits par la digue basse sur la morphodynamique de l'embouchure. Il n'y a rien d'évident sur les images aériennes de 1981 et 1982 (Figure 2-12). On devine le changement de méandre (Ouest→Est) entre 1988 et 1992 (Figure 2-13), mais qui, étonnamment, ne paraît pas imputable à la digue basse.

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

La flèche de Montmartin n'est pas encore rétrécie en 1997 mais on peut observer que le méandre commence à l'éroder latéralement. L'érosion de la flèche de Montmartin est visiblement initiée vers 1997 sous forme d'érosion latérale par un méandrement vers l'Est du chenal principal de la Sienne (Figure 2-14), et qui se confirme en 1998 sur la cartographie de N. Robin (Figure 2-10).

D'autre part, Le chenal qui s'est créé le long de la digue basse, par « effet de seuil », constitue désormais (depuis 1998) le bas de la boucle de ce méandre Est.

Sans la digue basse, quelle aurait été l'évolution de ce méandre :

- La boucle se serait-elle étendue plus au Sud ?
- Et se serait-elle étendue et/ou déplacée moins à l'Est (par exemple que sa position de 1992) ?

Les modélisations morphodynamiques, avec et sans la digue basse (cf. chapitre 4), nous éclairent en partie sur ces questions. S'il semble que la boucle se soit étendue plus au Sud, il n'y a rien d'évident sur son extension vers l'Est.

Les évolutions passées nous indiquent par ailleurs que la flèche de Montmartin n'a pas toujours été aussi développée qu'avant la mise en place de la digue basse. Elle était par exemple beaucoup plus courte en 1947 qu'elle ne l'était dans les années 1980. Ce qui suggère par exemple qu'un méandre vers l'Est avant 1947 a pu empêcher son développement.

On peut retenir qu'un méandre vers l'Est aurait pu éroder la flèche de Montmartin, sans la digue basse, mais que celle-ci a pu exacerber la tendance du chenal à méandrer vers l'Est. Et que le chenal qui s'est créé le long de la digue basse, côté amont, peut contribuer à maintenir un méandre à l'Est (qui repartira plus difficilement vers l'Ouest).

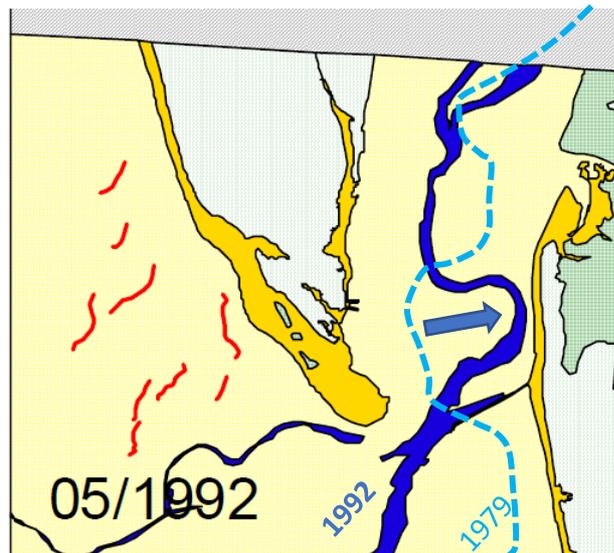


Figure 2-11 : Evolutions morphologiques à l'embouchure de 1979 à 1992 (d'après N. Robin, 2007).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville



Figure 2-12 : Photographies aériennes de l'embouchure en 1981 et 1982 (source : IGN).



Figure 2-13 : Photographies aériennes de l'embouchure en 1988 et 1992 (source : IGN).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville



Figure 2-14 : Photographies aériennes de l'embouchure en 1992 et 1997 (source : IGN).

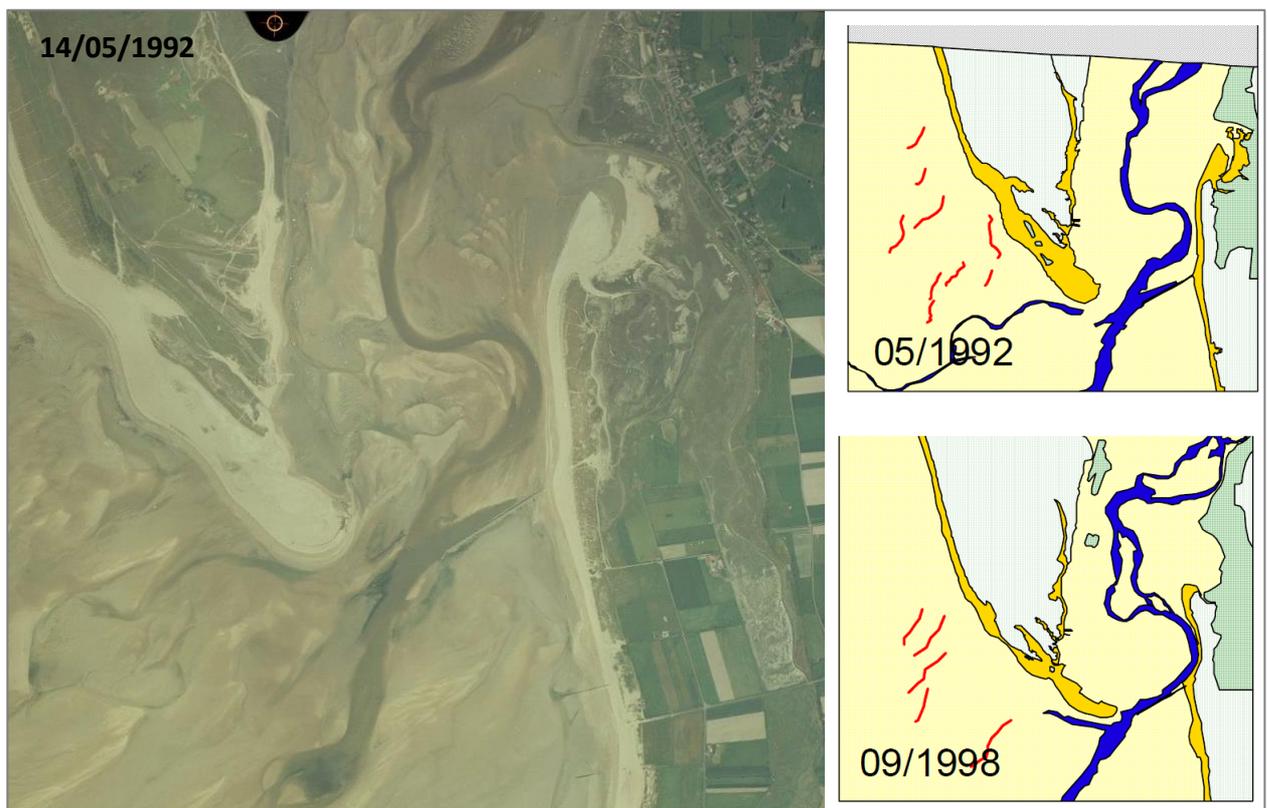


Figure 2-15 : Mise en évidence du méandrement « en appui » contre la digue basse dans les années 1990.

Une autre caractéristique importante des évolutions à l'embouchure est le développement (puis la disparition) de crochons sableux qui font que la flèche d'Agon est plus ou moins longue, en lien avec les évolutions des barres de « swash » sur l'estran (Robin, 2007, Figure 2-16, Figure 2-17 et Figure 2-18).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

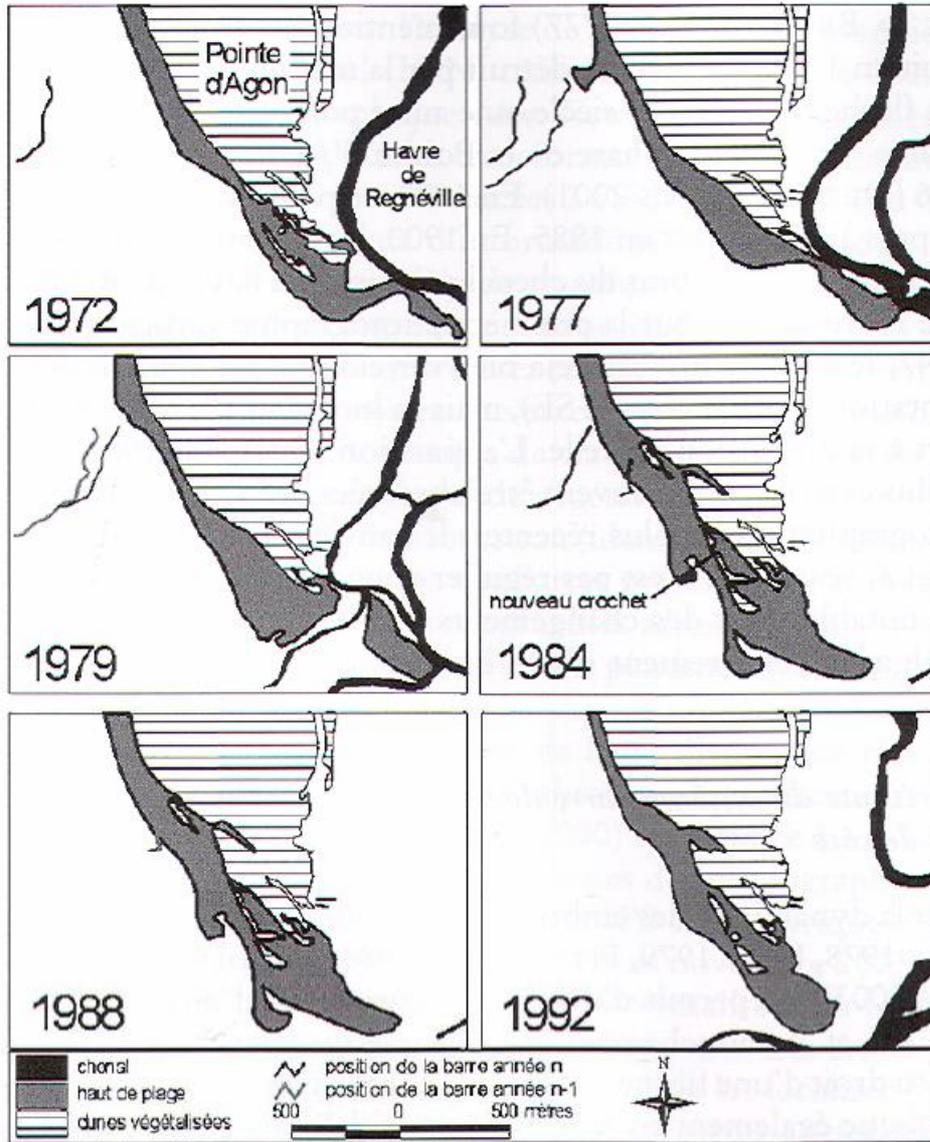


Figure 2-16 : Evolution de la pointe d'Agon entre 1972 et 1992, et d'une barre de « swash » sur l'estran (Robin, 2007).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

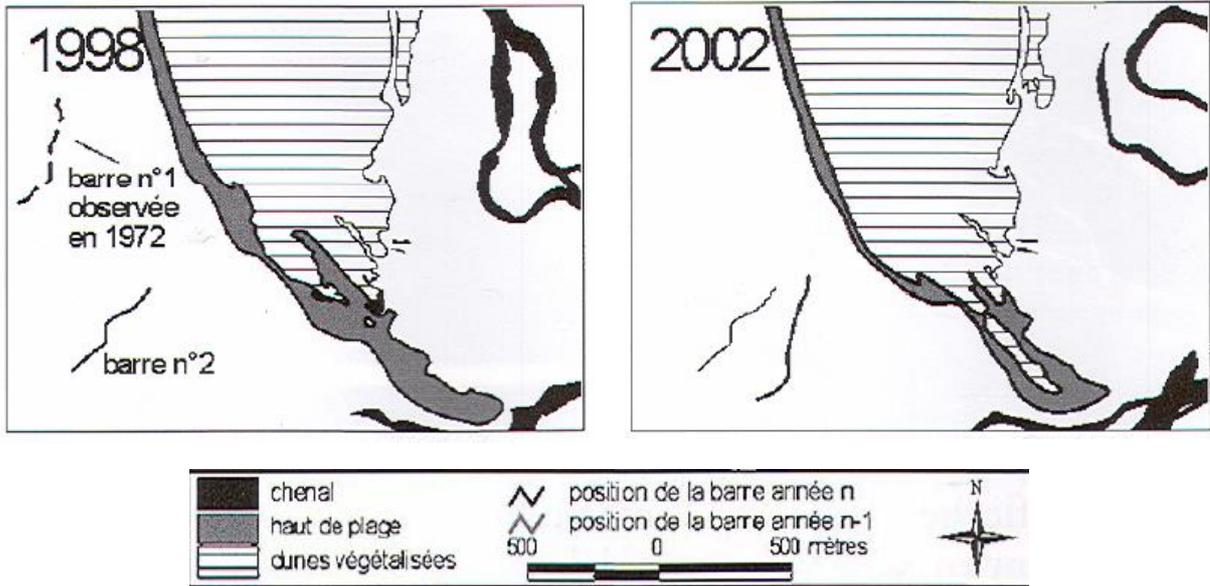


Figure 2-17 : Evolution de la pointe d'Agon entre 1998 et 2002, et localisation des barres de « swash » (Robin, 2007).

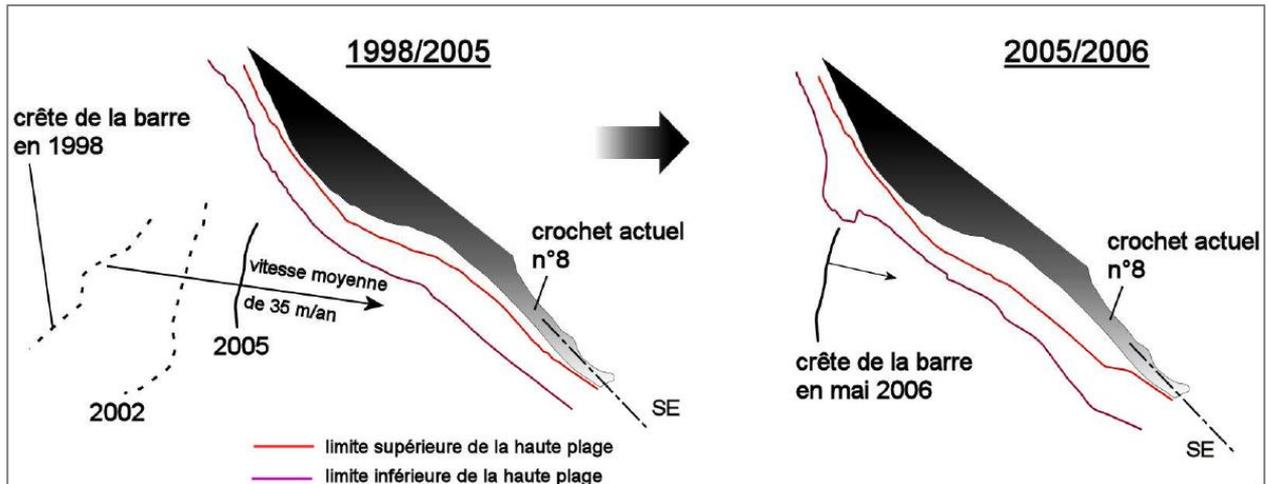


Figure 2-18 : Evolution de la pointe d'Agon entre 1998 et 2006, et localisation des barres de « swash » (Robin, 2007).

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

### 2.2.1.2 Littoral de Hauteville et de Montmartin

Dès lors que la digue basse a été mise en place (en 1988) pour enrayer le recul du trait de côte, le littoral allant du Sud de celle-ci au front de mer d'Hauteville (qui était déjà induré par une digue longitudinale) s'est globalement stabilisé (Figure 2-7, Figure 2-19 et Figure 2-20).

Pendant les années 1980 (traits de côte 1982 et 1988, Figure 2-20), le recul du trait de côte reste significatif surtout dans les parties centrale et Sud du cordon dunaire de Montmartin. Le fond de plan de 1988 (Figure 2-20) souligne bien la situation critique qui a conduit à la construction de la digue basse cette même année. Le recul du trait de côte ne résultait pas uniquement de l'action érosive des vagues, comme c'est le cas classiquement, mais également de l'action d'un chenal (entretenu par les courants de marée et le débit la Sienne) qui longeait le trait de côte et tendait à méandrer vers l'Est.

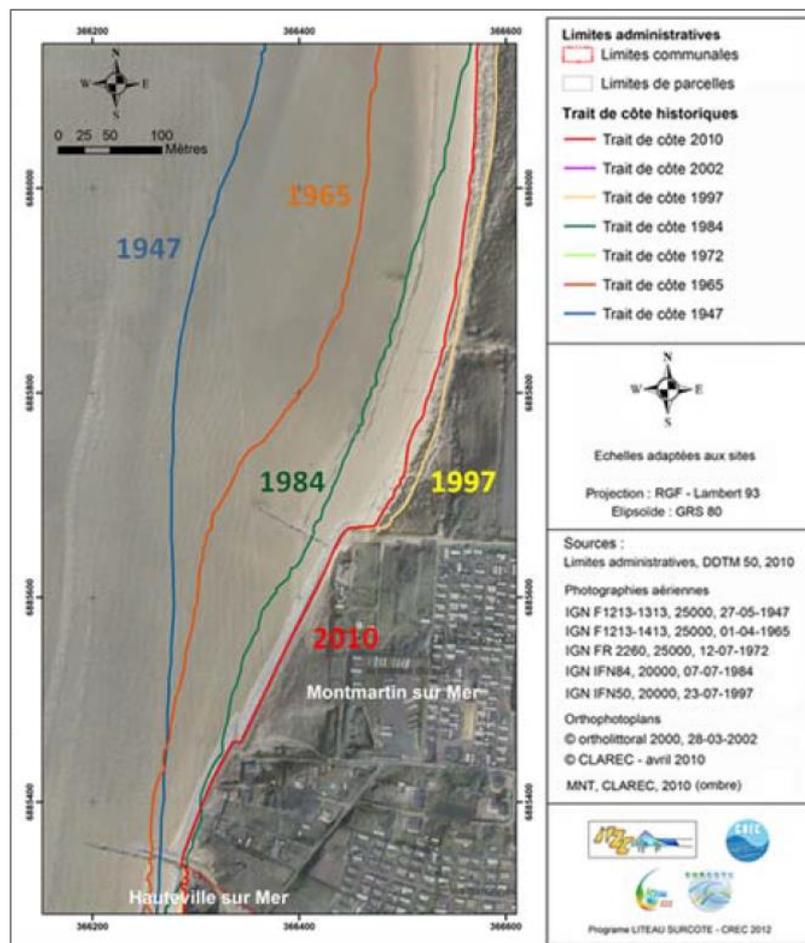


Figure 2-19 : Evolutions du trait de côte de 1947 à 2010 -secteur Hauteville/Montmartin (source : Litteau, 2012).

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

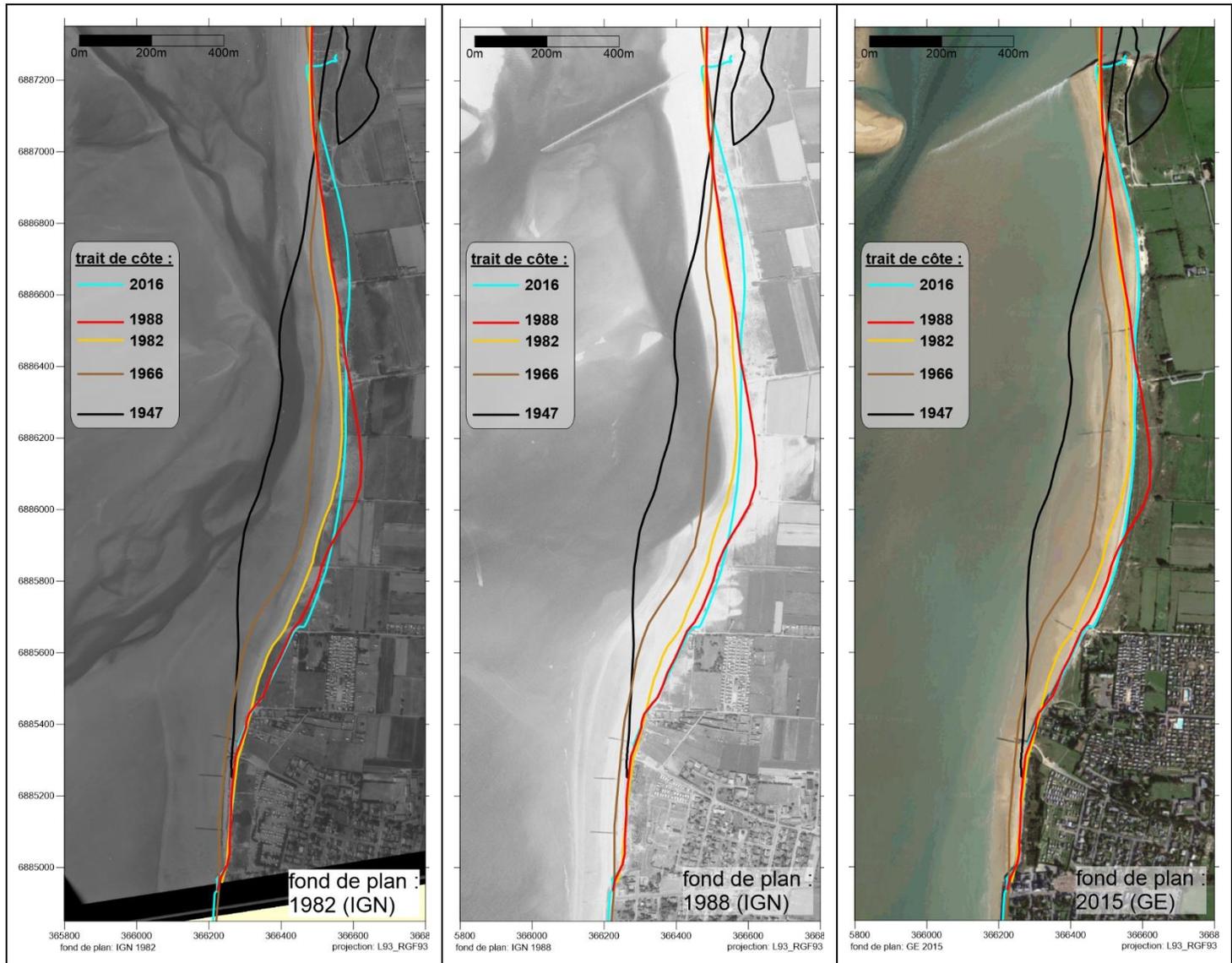


Figure 2-20 : Evolutions du trait de côte entre 1947 et 2016 – secteur Hauteville/Montmartin. Le trait de côte 2016 est défini suivant un critère de cote topographique (LIDAR) à +8.5 m NGF, qui suit approximativement la limite de végétation dunaire. Pour les données plus anciennes, c'est la limite de végétation qui a été numérisée sur les images aériennes historiques de l'IGN (donnée OLIBAN déjà disponible en 1947, et géoréférencement puis numérisation pour les autres dates).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

2.2.1.3 Littoral d'Agon-Coutainville

Au Sud du littoral enroché (front de mer) d'Agon-Coutainville, il n'y a pas de tendance nette de l'évolution générale du trait de côte à une échelle de temps 30 ans, depuis les années 1980 (Figure 2-21 et Figure 2-22). Les évolutions sont significatives dès lors qu'on se rapproche de la pointe d'Agon, les évolutions du trait de côte étant liées à celles des barres de « swash » et des crochons (Figure 2-16).

L'érosion la plus marquée entre 1982 et 2016 est localisée immédiatement au Sud des derniers ouvrages en mer du front de mer d'Agon-Coutainville, avec un décrochement juste après la cale de l'école de voile. Le recul atteint au plus 25 m (soit 0.7 m/an). On peut cependant rappeler que le trait de côte avait globalement peu évolué depuis 1947, avec une première séquence de progradation entre 1947 et 1966 puis un recul. Ces évolutions relativement faibles et contrastées sont sans commune mesure avec celle du littoral de Montmartin, qui avait subi un important recul entre les années 1940 et les années 1980 (localement jusqu'à plus de 250 m).

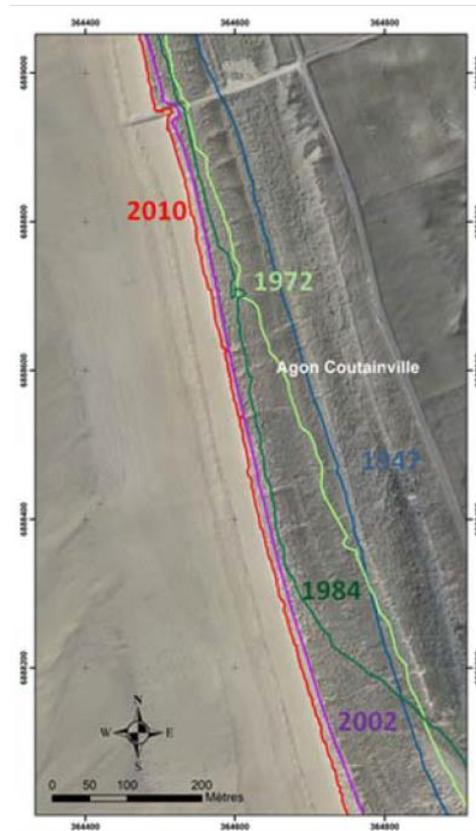


Figure 2-21 : Evolutions du trait de côte de 1947 à 2010 -secteur Agon-Coutainville Sud (source : Litteau).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

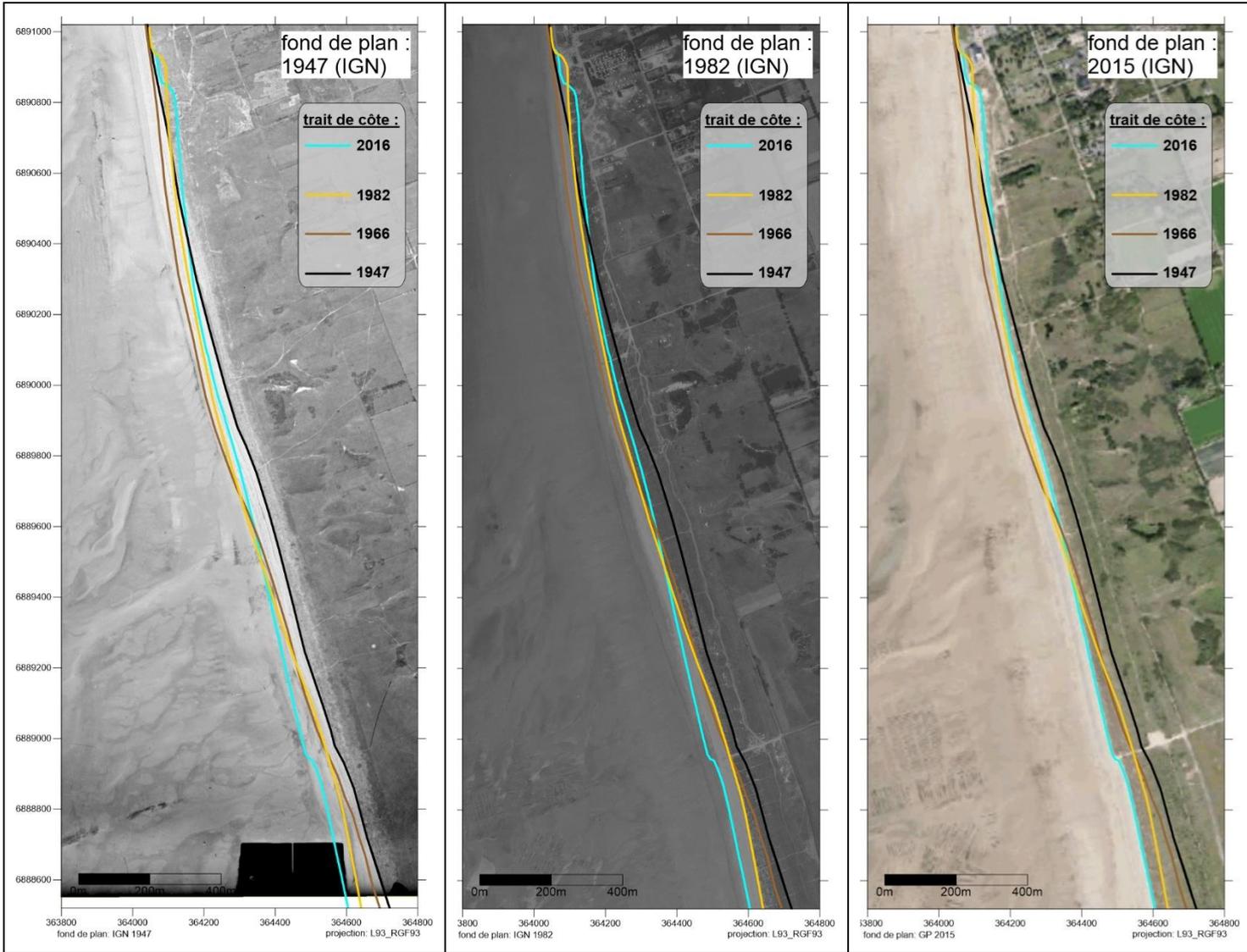


Figure 2-22 : Evolutions du trait de côte entre 1947 et 2016 – secteur Agon-Coutainville Sud. Le trait de côte 2016 est défini selon un critère de cote topographique (LIDAR) à +8.5 m NGF, qui suit approximativement la limite de végétation dunaire. Pour les données plus anciennes, c'est la limite de végétation qui a été numérisée sur les images aériennes historiques de l'IGN (donnée OLIBAN déjà disponible en 1947, et géoréférencement puis numérisation pour les autres dates).

#### 2.2.2 DEPUIS 2010

A partir de 2010, les données LIDAR permettent des analyses plus systématiques et une estimation des volumes de sable qui se sont déplacés.

Les données LIDAR permettent une définition plus objective du trait de côte, basée sur une ligne de niveau. La cote est généralement choisie au-dessus des niveaux de pleine mer, par exemple à un niveau qui peut être atteint par le jet de rive en condition exceptionnelle. Pour réduire les marges d'erreur, la cote doit se trouver sur une pente homogène et marquée comme celle du flanc bordier d'un cordon dunaire ou celle de la berge d'un chenal. Idéalement, la ligne de niveau doit suivre approximativement les limites de végétation de telle sorte que les traits de côtes ainsi définis puissent être comparés aux traits de côte anciens qui sont tracés par photo-interprétation.

De plus, les données LIDAR permettent de travailler directement sur les évolutions des quantités de sable.

Les deux approches (données LIDAR et photo-interprétation) sont complémentaires. La superposition des traits de côte permet de faire le lien avec les évolutions passées et d'appréhender les tendances par rapport aux enjeux en arrière, et l'analyse des évolutions volumétriques permet d'appréhender les risques (e.g. rupture de cordon dunaire) en cas de tempête et l'efficacité d'éventuels rechargements.

De fait, il s'agit aussi d'une mise à jour des évolutions caractérisées dans les études précédentes (de la thèse de Robin soutenue en 2007 aux études PPRL en 2014 en passant par les études Liteau qui se sont terminées en 2012).

##### 2.2.2.1 Embouchure et flèche d'Agon

Depuis 2010, la migration de la berge Est du chenal est impressionnante : 10 à 15 m par an ! (Figure 2-23 et Figure 2-24).

On pourrait penser que le retrait de la flèche (ou du moins de sa partie haute) a pu favoriser cette migration (érosion) mais l'érosion concerne un linéaire important dont la partie plus au Nord est bien protégée des vagues incidentes et la tendance était déjà bien engagée entre 2010 et 2012.

Le recul de l'extrémité de la flèche depuis 2011/2012 semble lié à l'apparition d'un nouveau crochon, bien visible sur le contour +5 m NGF de 2016.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

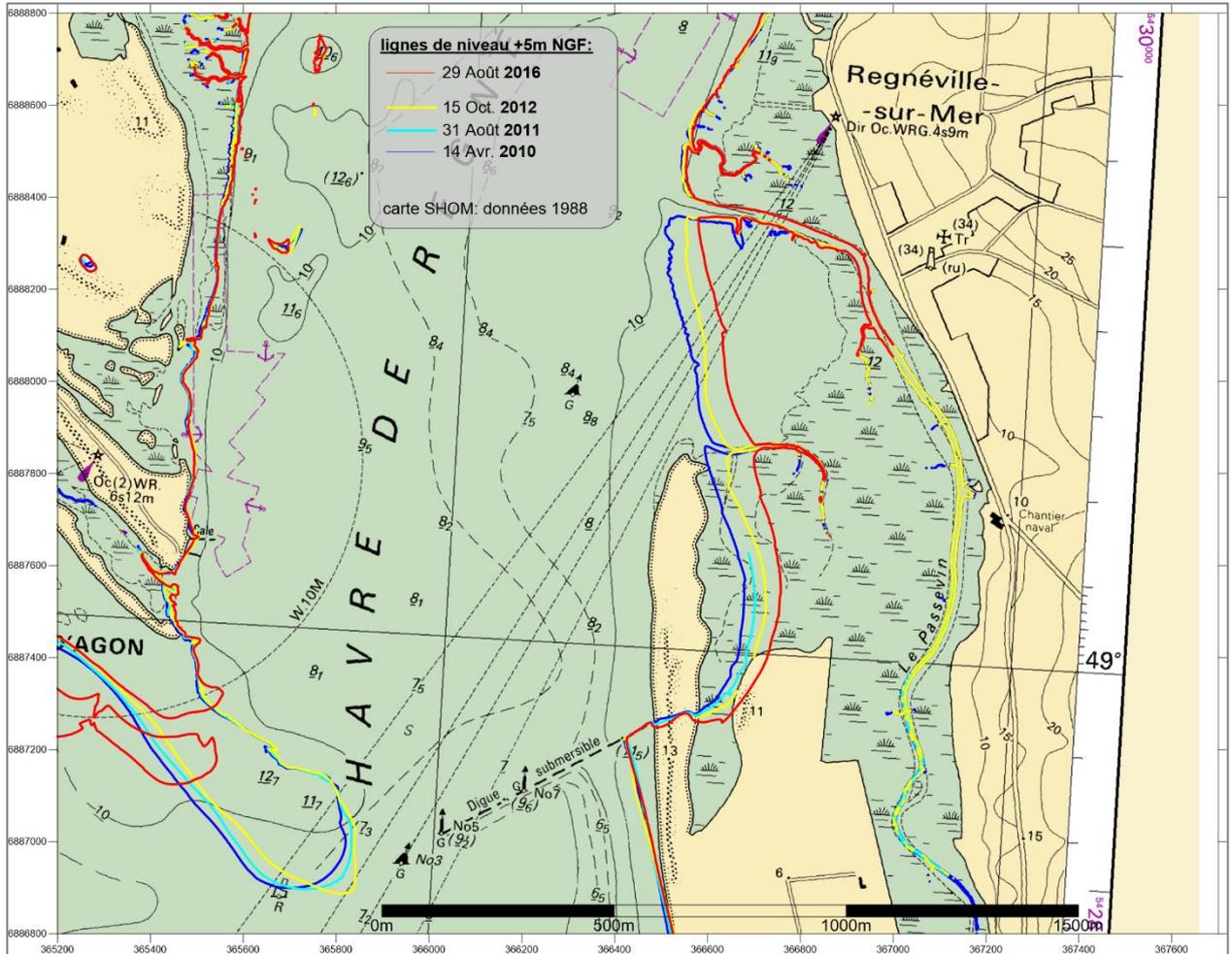


Figure 2-23 : Evolutions à l'embouchure entre 2010 et 2016



Figure 2-24 : Visualisation de la micro-falaise d'érosion, en rive droite du chenal.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

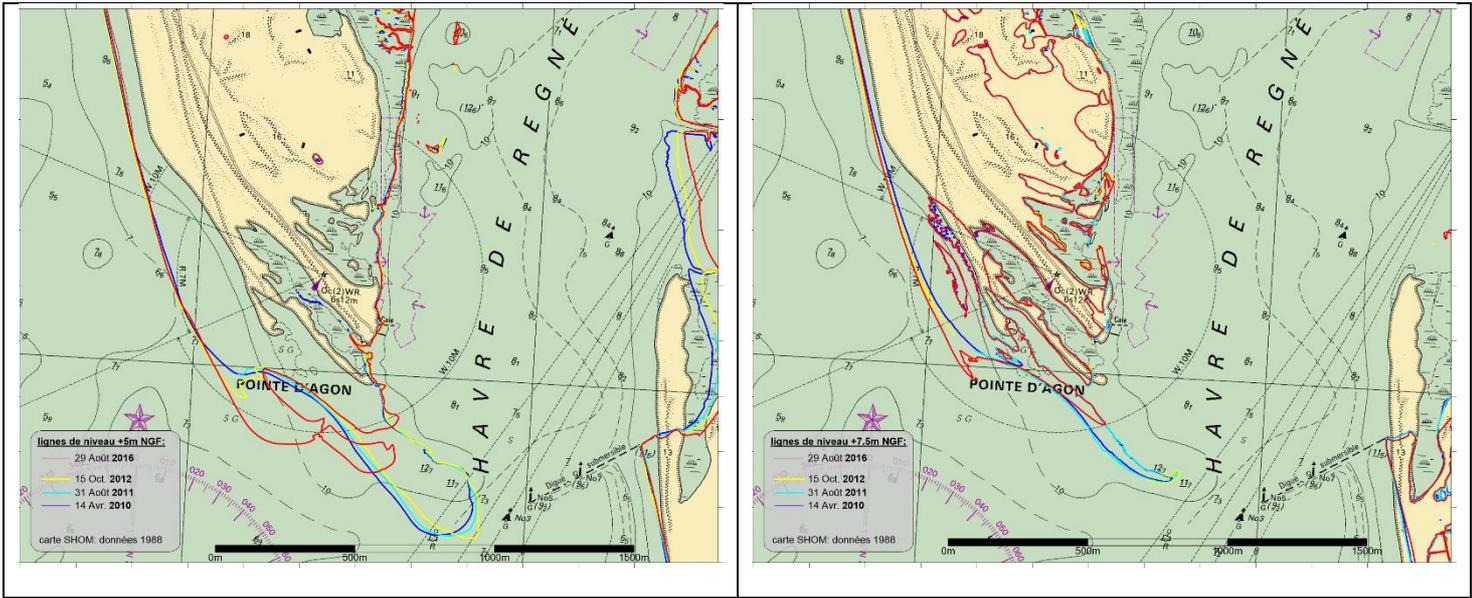


Figure 2-25 : Evolutions de la flèche d'Agon entre 2010 et 2016. Gauche : lignes de niveau +5m NGF. Droite : lignes de niveau +7.5 m NGF, qui peuvent définir le trait de côte.

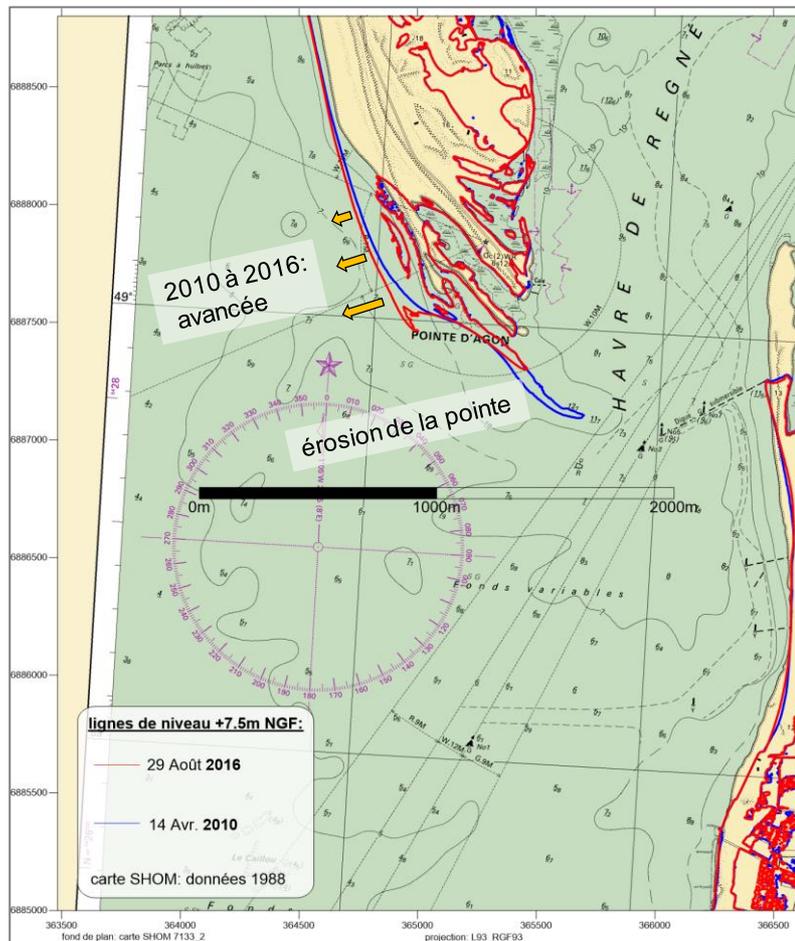


Figure 2-26 : Synthèse des évolutions de la flèche d'Agon entre 2010 et 2016.

2.2.2.2 Littoral Hauteville/Montmartin

2.2.2.2.1 Trait de côte et cordon dunaire

Les évolutions du trait de côte sont globalement caractérisées par une érosion de la partie Nord du cordon dunaire de Montmartin, jusqu'à 10-15 m en 6 ans, et un engraissement de sa partie Sud, jusqu'à 10 m en 6 ans.

L'analyse des quantités de sable au-dessus de la cote 8.4 m NGF mettent en évidence, en 2016, un tronçon critique autour des profils 100 à 120. En effet, selon le critère FEMA (50 m<sup>3</sup>/m linéaire), le risque de brèche dans le cordon dunaire en cas de surverse de celui-ci est probable.

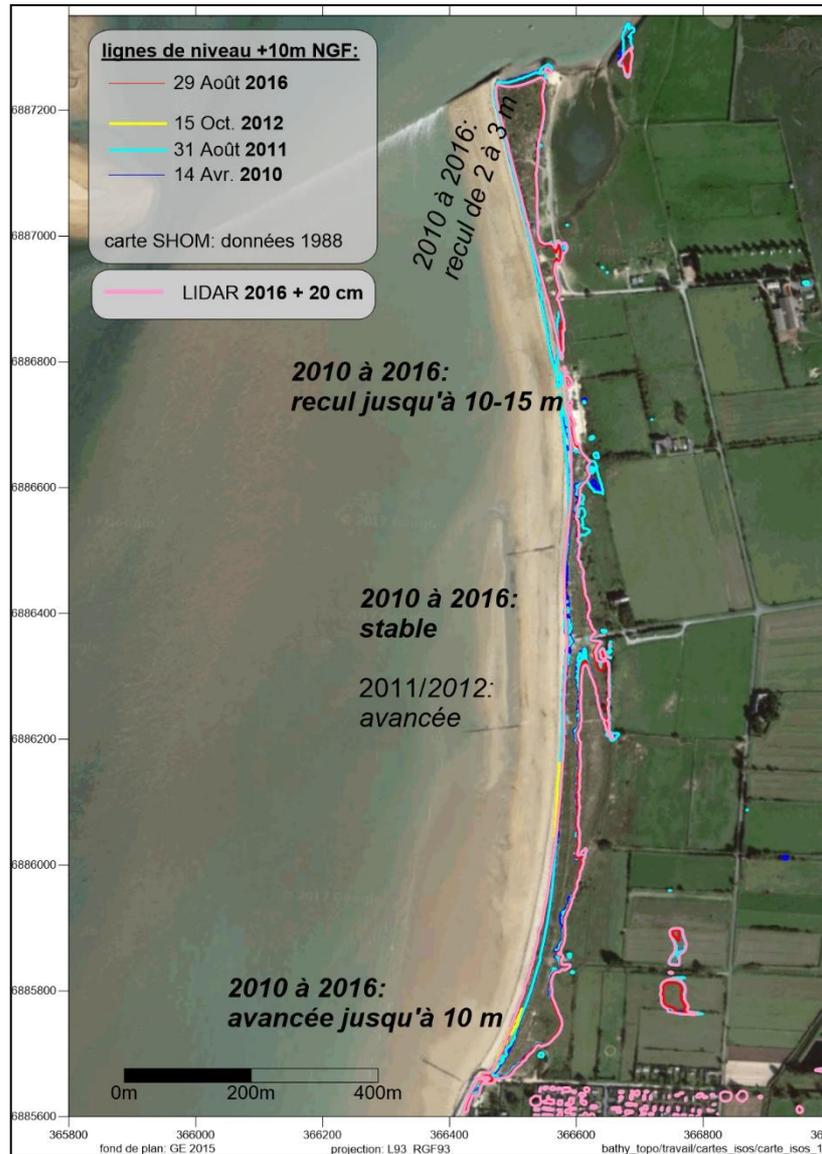


Figure 2-27 : Synthèse des évolutions du trait de côte le long du cordon dunaire de Montmartin.

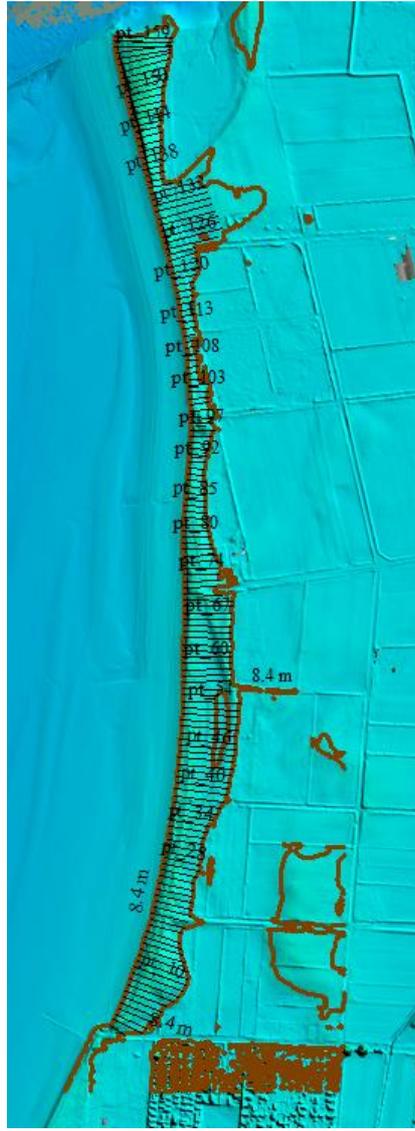


Figure 2-28 : Définition de profils en travers du cordon dunaire pour analyse les variations de volume de sable.

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

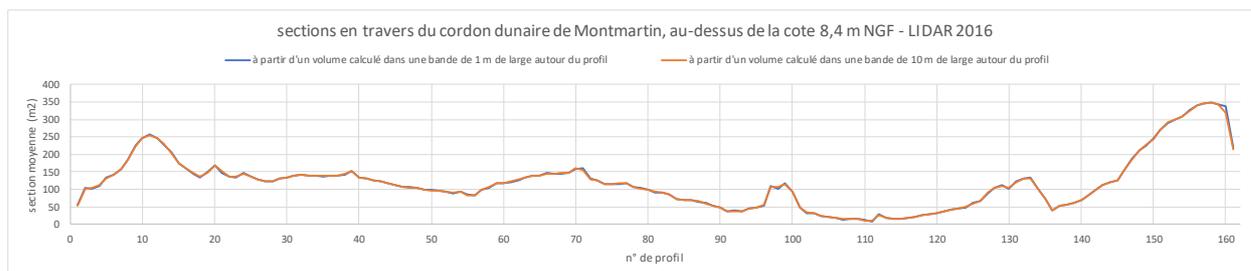


Figure 2-29 : Visualisation des quantités de sable ( $m^3/m$  linéaire) en travers du cordon dunaire de Montmartin. En tout : 161 profils (espacés de 10 m), numérotés depuis le Sud.

### 2.2.2.2 Transition enrochements/cordon dunaire

Le cas des épis (généralement en enrochements) transverses au trait de côte, implantés sur des secteurs côtiers où une dérive littorale significative prédomine dans un sens, est bien documenté et les processus hydro-sédimentaires sont bien appréhendés. Les effets sont prévisibles, avec une accumulation de sable à l'amont (par rapport au sens de la dérive littorale), et un déficit de sable à l'aval. Ce déficit de sable se traduit par un recul du trait de côte, notamment dans le cas où un cordon dunaire le constitue.

Lorsqu'un ouvrage en dur est longitudinal au trait de côte et/ou que la dérive littorale n'est pas marquée dans un sens, la situation est plus complexe. Ce type d'ouvrage longitudinal est généralement mis en place pour enrayer une tendance à l'érosion, lorsque des enjeux sont présents en arrière du trait de côte. Il se peut alors que le trait de côte continue à reculer de part et d'autre de l'ouvrage. L'érosion n'est alors pas forcément due au voisinage de l'ouvrage. Il peut s'agir simplement d'un différentiel d'évolution, le trait de côte constitué par l'ouvrage n'ayant pas bougé.

Sur notre secteur d'étude, et aussi étonnant que cela puisse paraître, la progradation du trait de côte est manifeste au Nord des enrochements de Montmartin. L'avancée du cordon dunaire atteint près de 10 m, alors que d'autres secteurs du cordon dunaire sont stables ou ont pu reculer. On peut noter la mise en place de ganivelles, pour faciliter l'atterrissage du sable, en 2014 (T. Durozier, comm. pers.).



Figure 2-30 : Littoral de Montmartin : transition enrochements/cordon dunaire. Photo lors de la visite technique avec T. Durozier le 01/12/2016.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

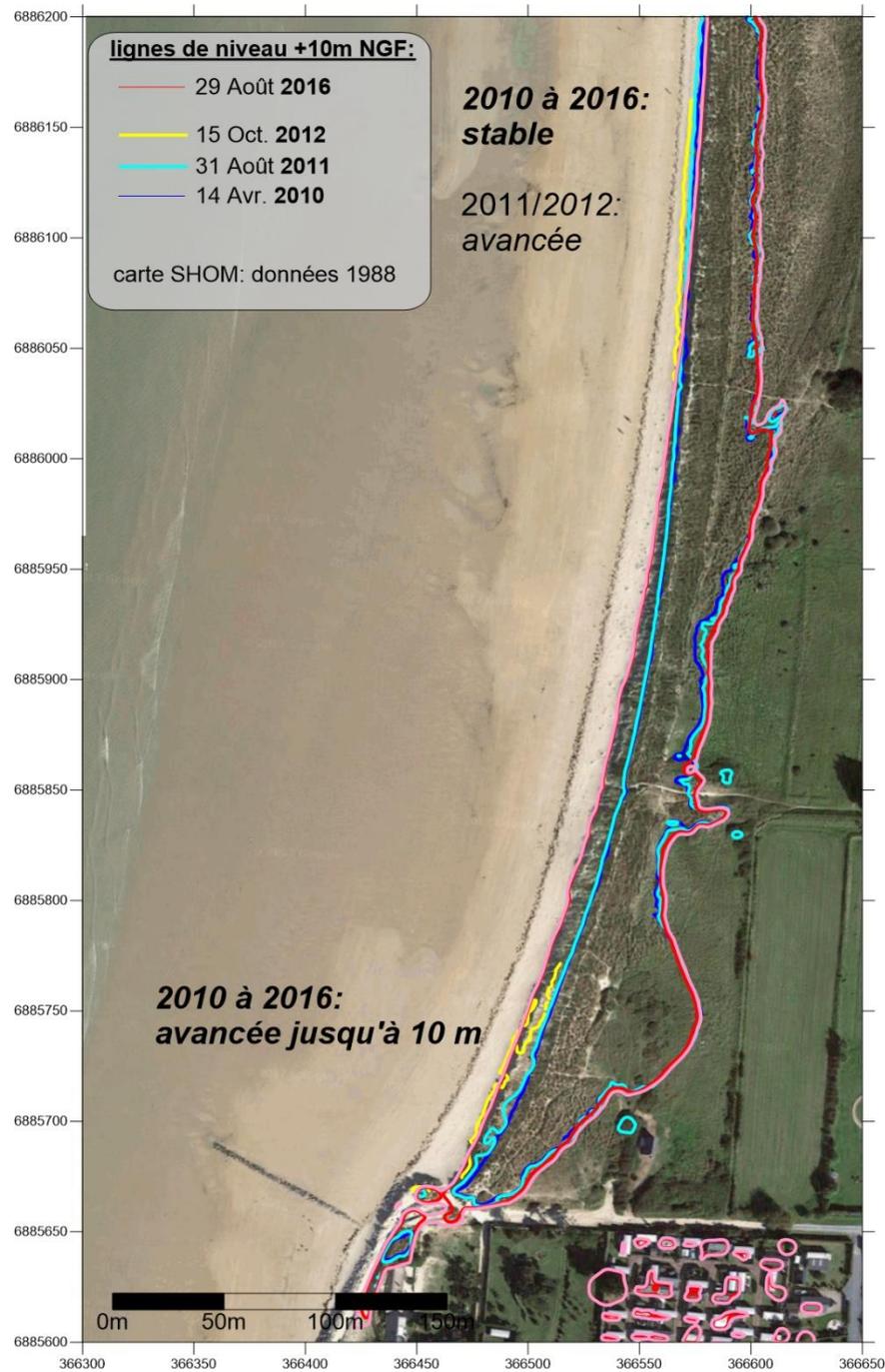


Figure 2-31 : Loupe des évolutions du trait de côte à la transition enrochements/cordon dunaire – littoral de Montmartin.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

2.2.2.3 Littoral Hauteville Sud

Les évolutions des quantités de sable qui constituent le cordon dunaire au Sud de la cale de l'école de voile ont été analysées à partir des données LIDAR de 2010 et de 2016. Environ 170 profils en travers du cordon dunaire, espacés de 10 m, ont été numérotés depuis la cale de l'école de voile en descendant vers le Sud (Figure 2-32).

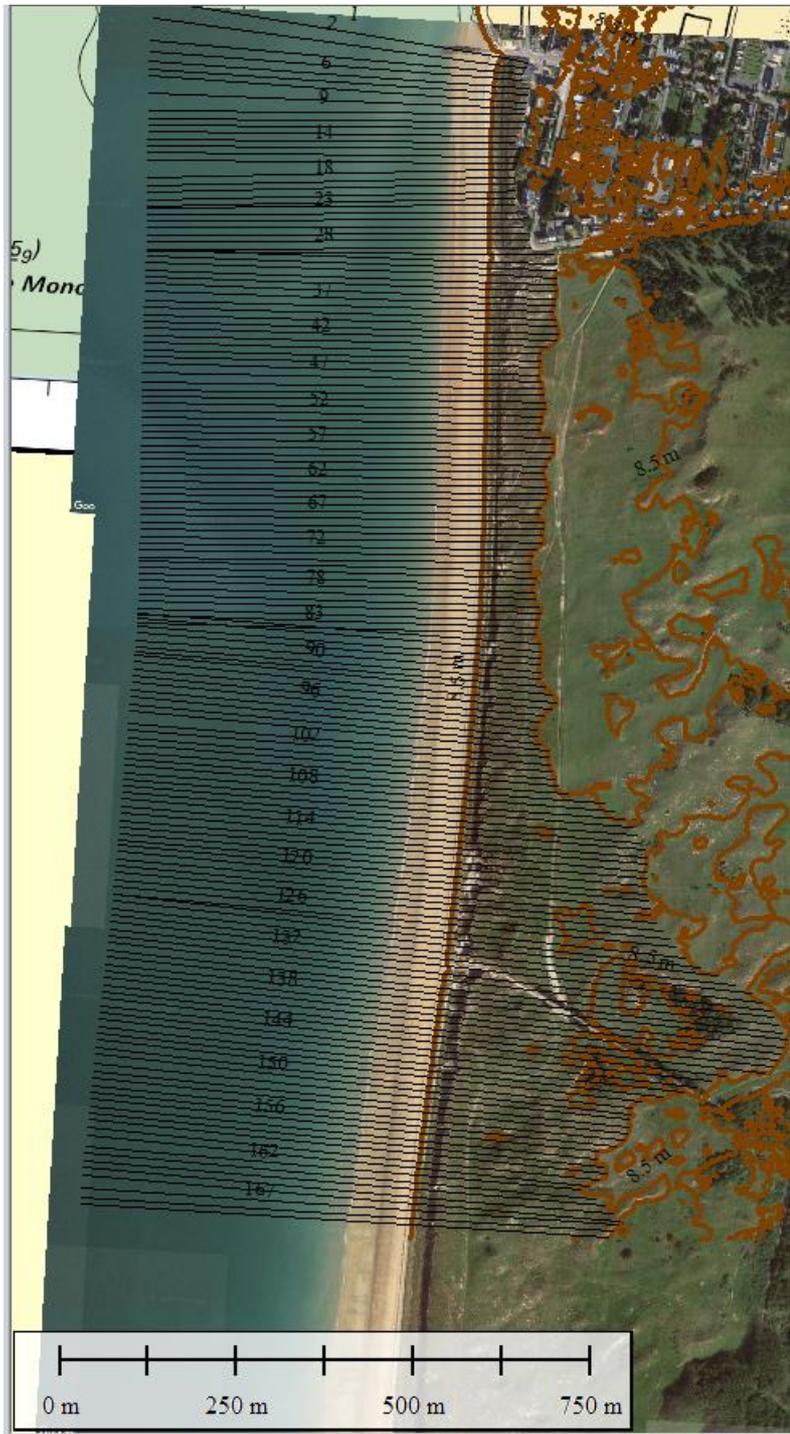


Figure 2-32 : Localisation des profils, espacés de 10 m, en travers du cordon dunaire.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

Un premier constat est qu'il n'y a aucun profil pour lequel la quantité de sable est en-deçà du critère FEMA (50 m<sup>3</sup>/m linéaire de cordon dunaire). Ce cordon dunaire n'est donc pas considéré comme critique vis-à-vis d'une rupture du cordon dunaire en cas de surverse, d'autant plus que la comparaison des données de 2010 et 2016 montre un certain engraissement.

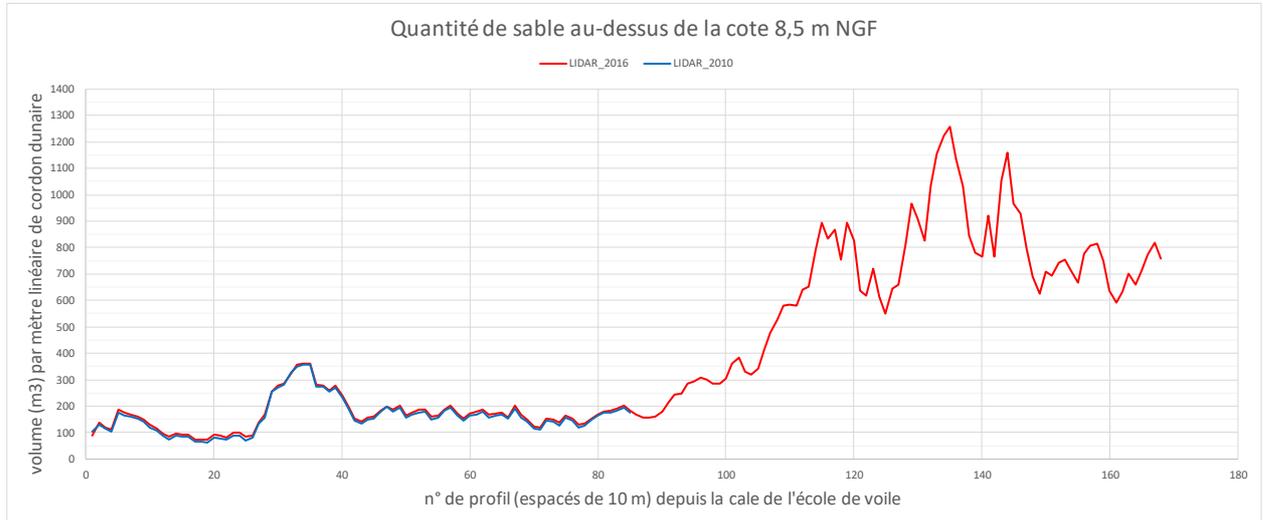


Figure 2-33 : Quantités de sable constituant le cordon dunaire, au-dessus de la cote 8.5 m NGF, en 2010 et en 2016.

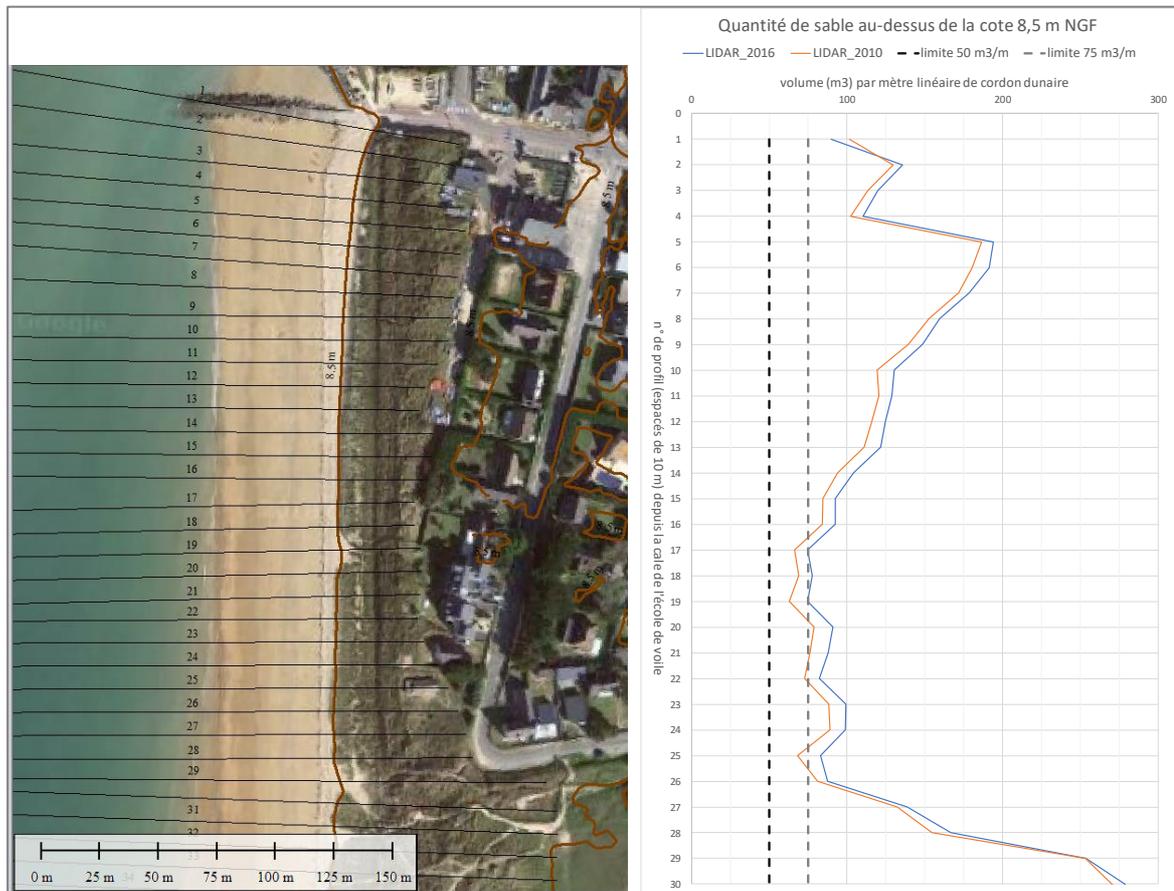


Figure 2-34 : Quantités de sable constituant le cordon dunaire, au-dessus de la cote 8.5 m NGF, en 2010 et en 2016. Loupe à proximité de la cale de l'école de voile.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

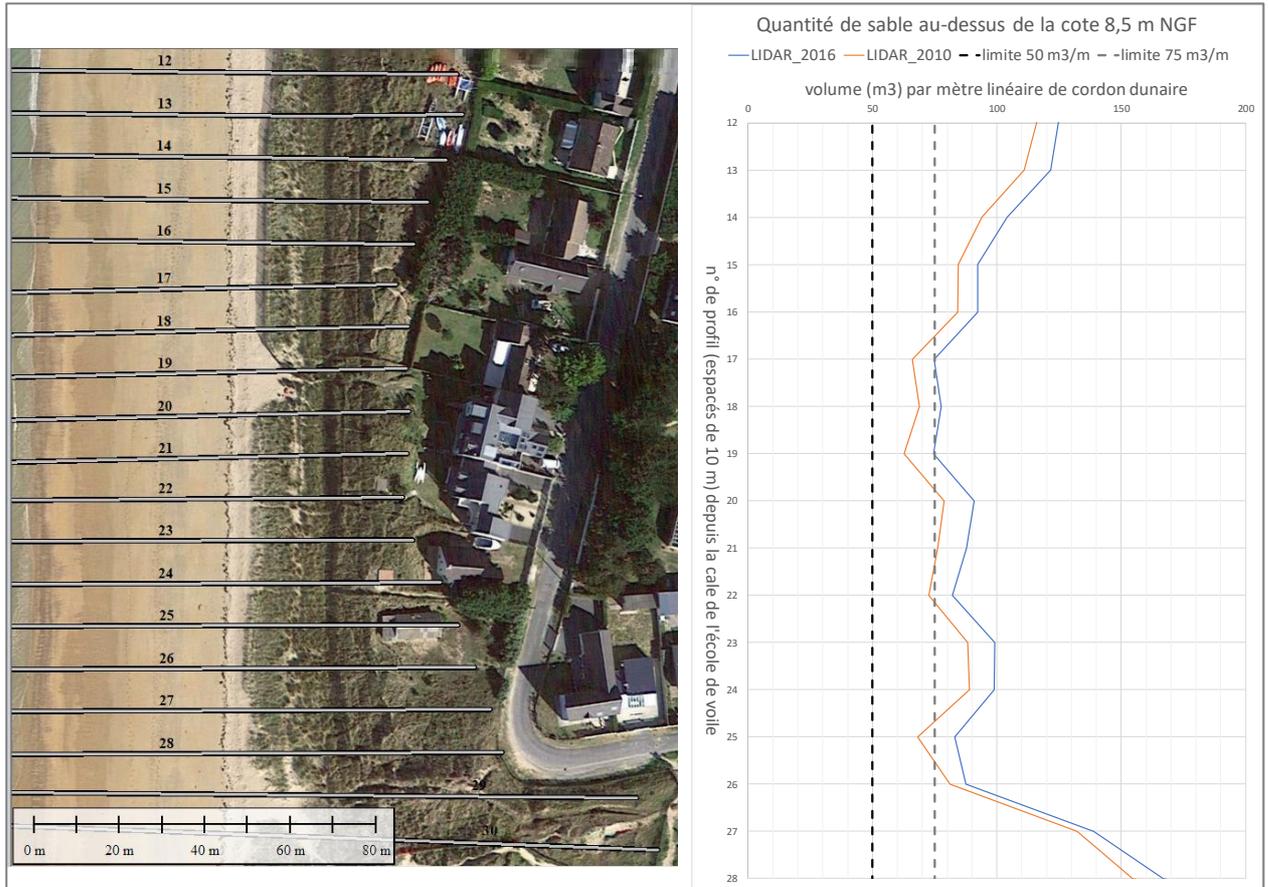


Figure 2-35 : Quantités de sable constituant le cordon dunaire, au-dessus de la cote 8.5 m NGF, en 2010 et en 2016. Profils 12 à 30.

L'engraissement systématique entre 2010 et 2016 peut paraître étonnant, mais une analyse par profil (par exemple le n°19, soit 190 m au Sud de la cale) nous indique que cette évolution est bien réelle. Il s'agit d'un élargissement du cordon dunaire côté plage, avec un trait de côte qui a avancé de 5 à 10 mètres.

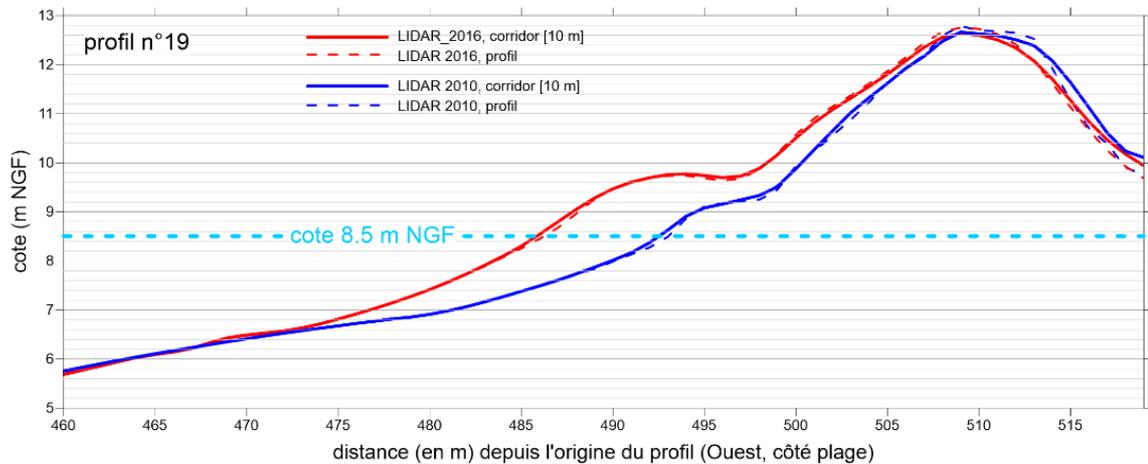


Figure 2-36 : Détail des évolutions entre 2010 et 2016. Profil n°19.

#### 2.2.2.4 Littoral d'Agon-Coutainville

Les phénomènes d'érosion sur la zone d'étude sont de 2 types :

- Dérive littorale dont l'intensité croît progressivement vers le Sud, à mesure que l'on s'écarte du dernier épi en dur du front de mer d'Agon-Coutainville,
- Transports « dans le profil » (perpendiculaires au trait de côte) orientés vers la mer lors d'événements de tempête, le flanc de la dune pouvant être attaqué lorsque les niveaux d'eau sont suffisamment hauts.

La dérive littorale, liée à l'obliquité des vagues incidentes par rapport au trait de côte, peut se manifester même pour des conditions de vagues peu énergétiques. L'érosion en aval du dernier épi est un phénomène relativement progressif. En revanche, les phénomènes d'érosion dans le profil sont discontinus et ne sont généralement associés qu'à quelques événements très énergétiques (tempêtes).

Les séquences de ré-engraissement sont, sur le secteur d'étude, a priori essentiellement associées à des transports dans le profil, orientés vers le haut de plage :

- lorsque les conditions de vagues sont faiblement à moyennement énergétiques,
- lorsque les conditions de vent sont favorables (vents de secteur Ouest et sable sec sur une largeur de plage suffisante).

Les évolutions au Sud du secteur aménagé (enroché) indiquent deux évolutions contrastées (Figure 2-37) :

- Un estran en érosion,
- Un cordon dunaire en accrétion.

On rappelle que ce type de cartes montre une évolution résiduelle sur plusieurs années, qui résulte d'une succession de (multiples) séquences d'érosion et d'engraissement.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

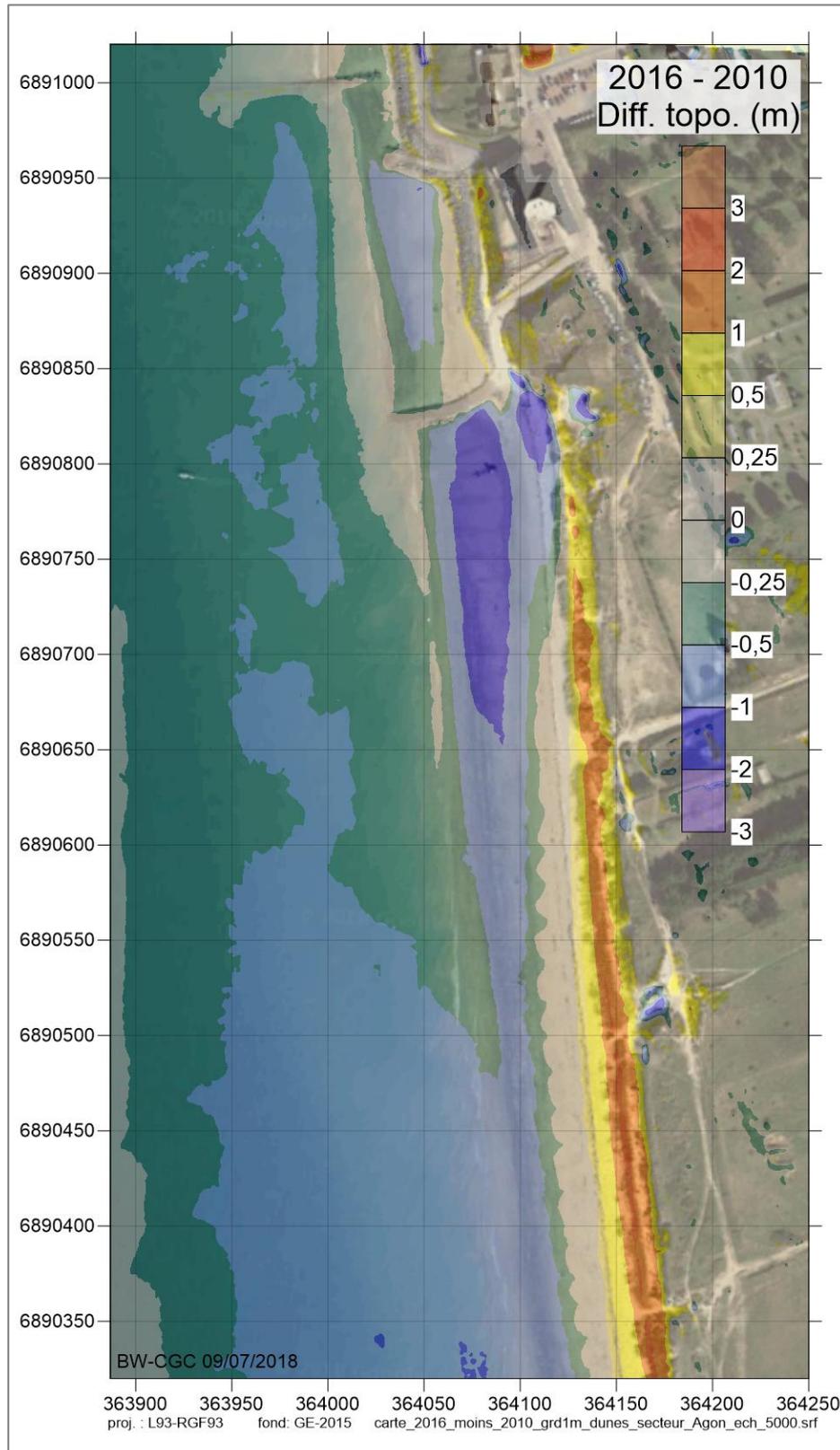


Figure 2-37 : Carte des érosions et des accrétions entre 2010 et 2016.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

Une carte d'évolution de différentes lignes de niveau sur l'estran et le cordon dunaire (Figure 2-38) complète l'analyse de ces évolutions :

- recul des lignes topos +3 et +5 m NGF (estran en érosion),
- avancée des lignes topos +8 et +10 m NGF (cordon dunaire en accrétion), sauf sur les 30-40 premiers mètres depuis la cale de l'école où on observe un recul de la ligne +8.5 m NGF (qui correspond à une partie relativement basse du cordon dunaire).

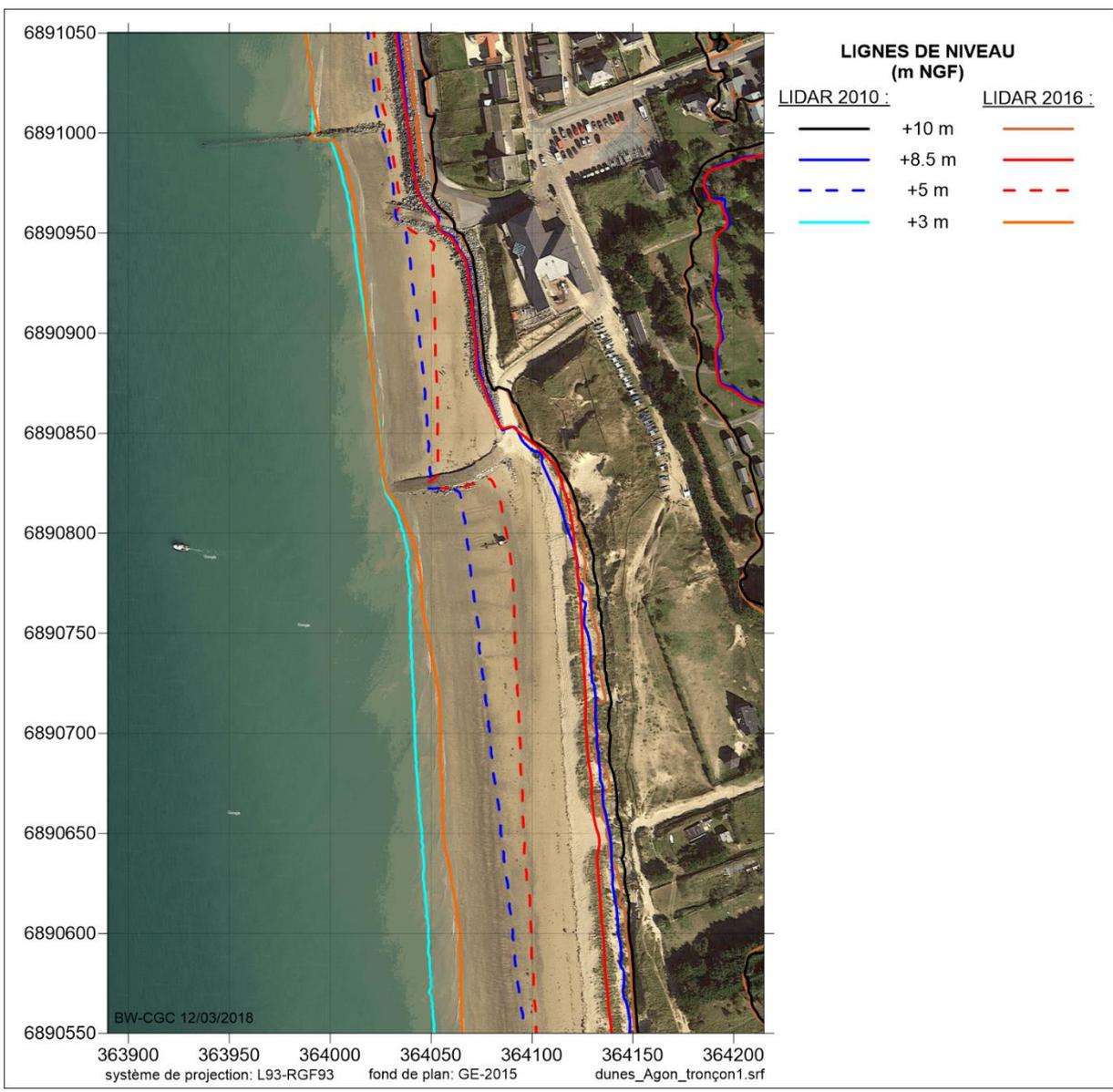


Figure 2-38 : Evolutions des lignes de niveau entre 2010 et 2016.

L'évolution des quantités de sable sur la période 2010-2016 peut être analysée de façon synthétique en calculant, le long de profils transverses au trait de côte, les volumes de sable au-dessus d'une certaine cote. Les profils sont espacés de 10 m (cf. Figure 2-44). L'analyse se fait d'abord à une échelle élargie, jusqu'à l'extrémité de la pointe d'Agon, ce qui permet de bien appréhender les grandes tendances :

**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

- Au-dessus de la cote +8.5 m NGF (Figure 2-39), qui correspond à un niveau extrême de période de retour 100 ans à un horizon 2100 (c'est-à-dire qui tient compte d'une montée du niveau marin, liée au changement climatique, de 60 cm). Selon le critère FEMA, on considère qu'au-dessous d'un volume de 50 m<sup>3</sup>/m linéaire de cordon dunaire, le risque de brèche ou de surverse du cordon dunaire est significatif. C'est-à-dire qu'autour du profil 20 (soit 200 m au Sud de la cale de l'école de voile), le cordon dunaire serait déjà trop peu fourni pour résister à une tempête exceptionnelle qui se produirait en 2100. On peut cependant indiquer que l'approche, qui consiste à ne pas tenir compte de certains terrains (jardins..., cf. limites des profils sur la carte de la Figure 2-44) en arrière du cordon dunaire, alors qu'ils sont au-dessus de la cote 8,5 m NGF, minimise les volumes obtenus. On peut noter un engraissement, en moyenne de 20 m<sup>3</sup>/m sur l'ensemble du cordon dunaire de la flèche d'Agon (Figure 2-40), en réponse à des conditions de vent favorables. On retrouve cette même tendance pour les cordons dunaires de Montmartin et au Sud d'Hauteville.
- Au-dessus de la cote +3 m NGF (Figure 2-41). Les 300 premiers mètres au Sud de l'école de voile sont en déficit (Figure 2-42 et Figure 2-43), avec un volume érodé total d'environ 8 000 m<sup>3</sup>, soit environ 1 500 m<sup>3</sup>/an.

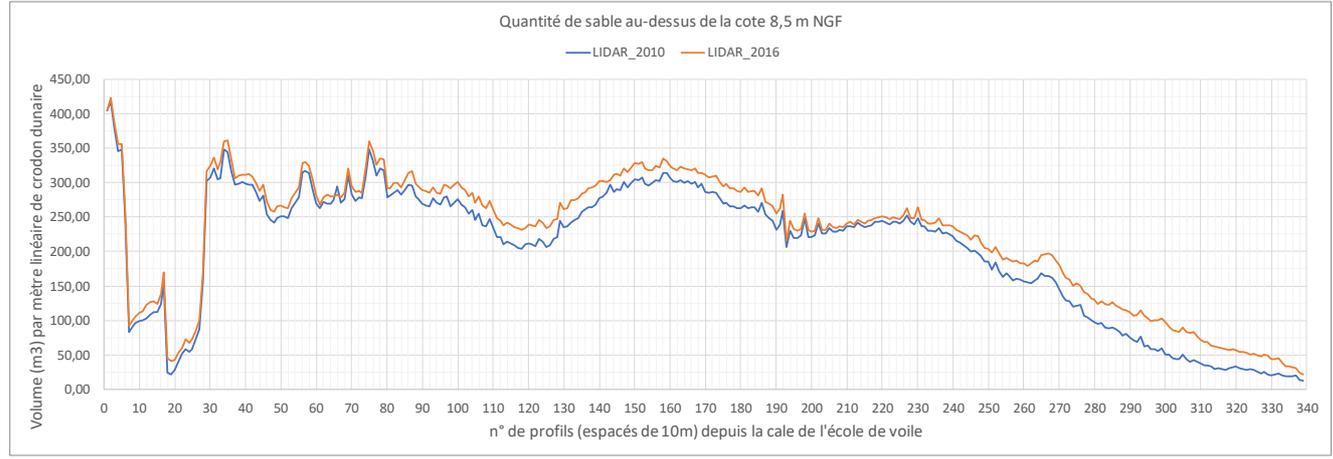


Figure 2-39 : Quantités de sable, en 2010 et en 2016, au-dessus de la cote +8.5 m NGF.

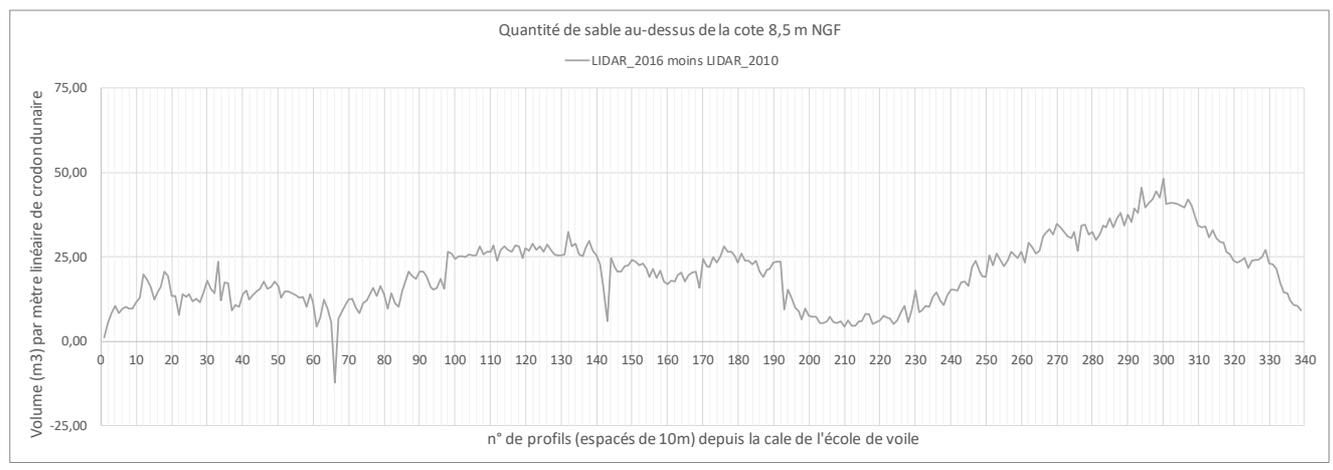


Figure 2-40 : Variations des quantités de sable, de 2010 à 2016, au-dessus de la cote +8.5 m NGF.

**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

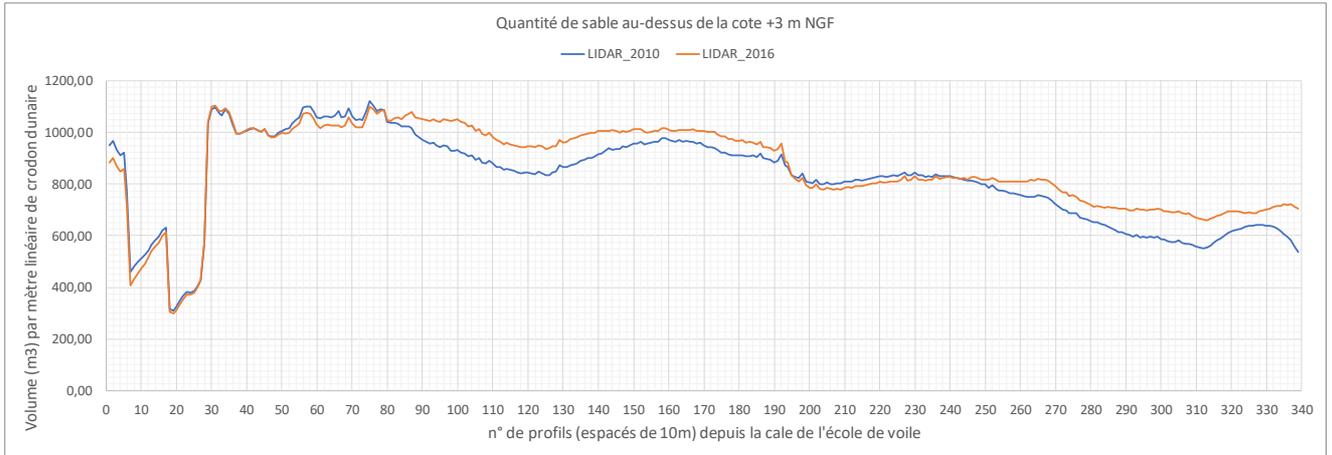


Figure 2-41 : Quantités de sable, en 2010 et en 2016, au-dessus de la cote +3 m NGF.

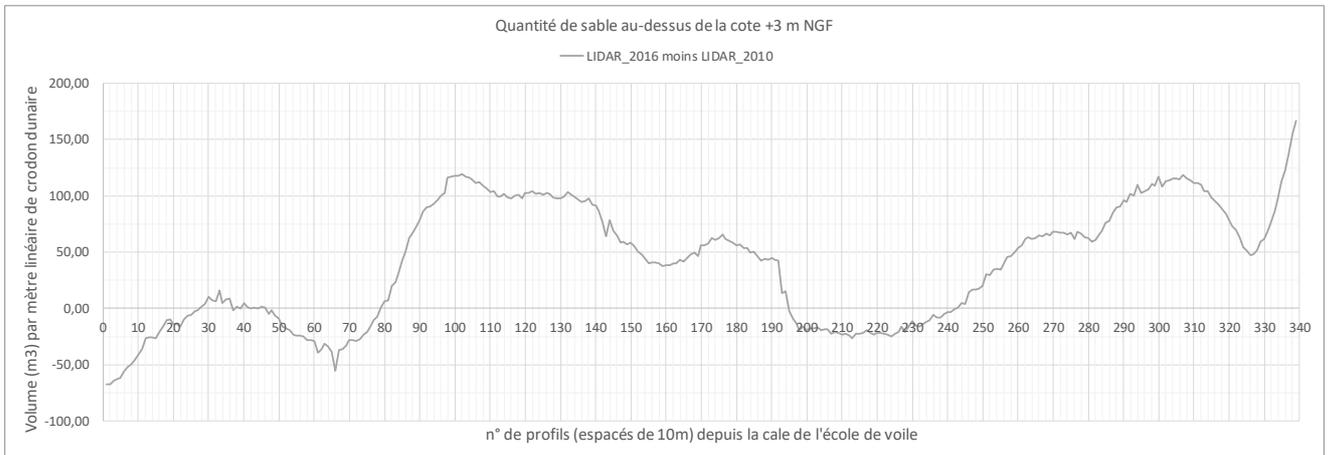


Figure 2-42: Variations des quantités de sable, de 2010 à 2016, au-dessus de la cote +3 m NGF.

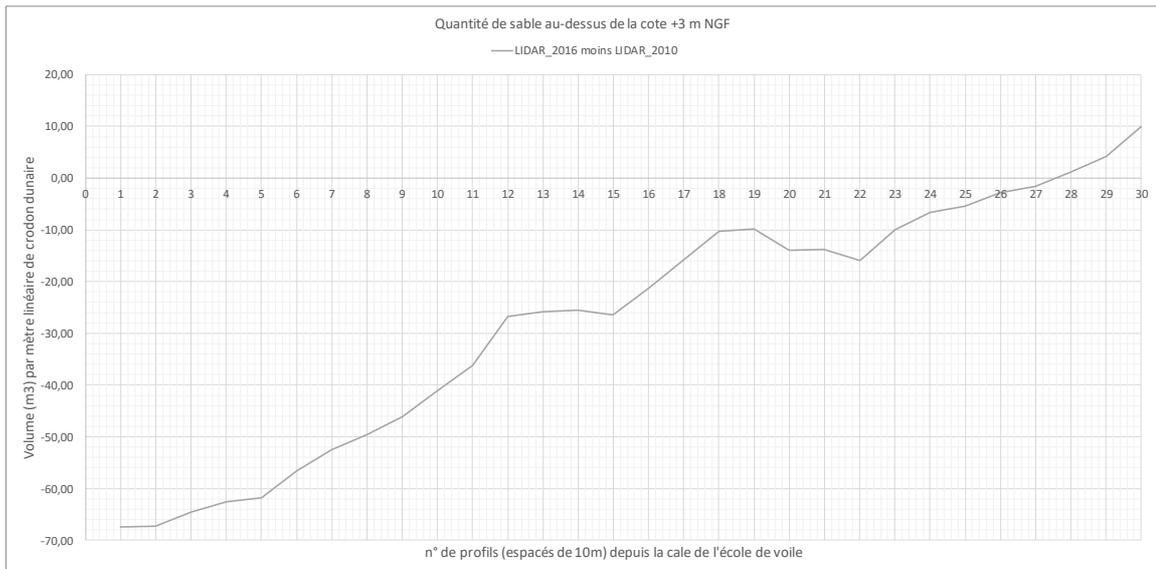


Figure 2-43: Variations des quantités de sable, de 2010 à 2016, au-dessus de la cote +3 m NGF. Loupe sur les 300 premiers mètres.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

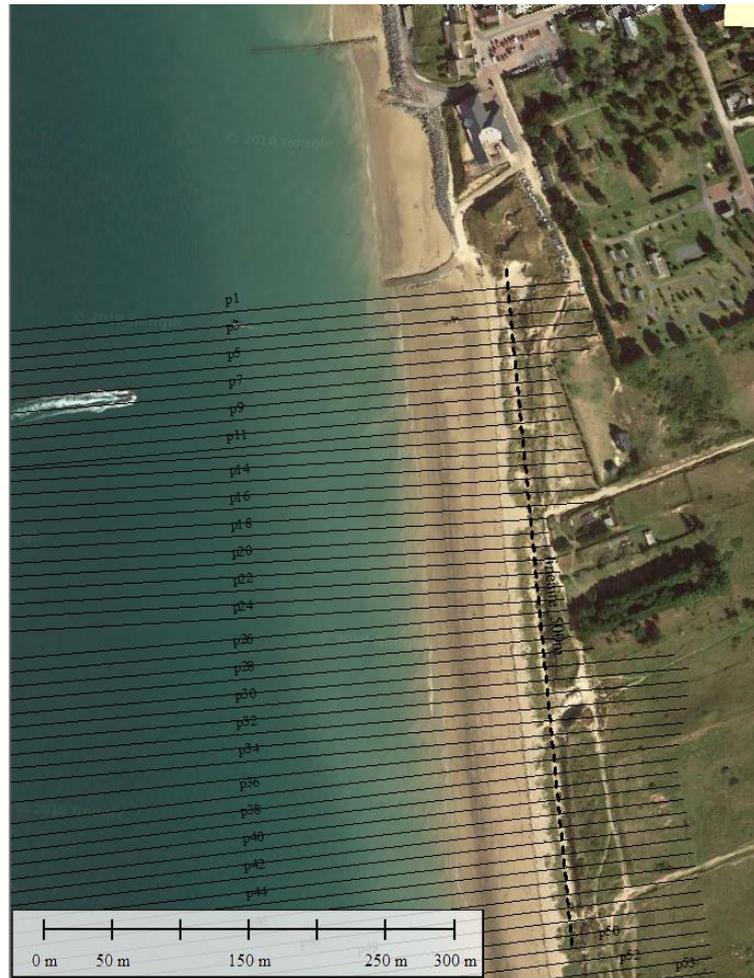


Figure 2-44 : Visualisation des profils transverses sur les 500 premiers mètres au Sud de la cale de l'école de voile.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

2.3 CARACTERISATION DES SEDIMENTS A L'EMBOUCHURE

2.3.1 A L'EMBOUCHURE

La caractérisation des sédiments à l'embouchure est essentielle pour la paramétrisation des modélisations morphodynamiques.

Les sables présentent une certaine hétérogénéité mais **il s'agit surtout de sables moyens**, comme le montrent par exemple les prélèvements de FondOuest (2002, Figure 2-45). Le LCHF mentionnait également l'hétérogénéité des sédiments, avec un affinement de l'embouchure vers l'amont ainsi que du centre vers les berges (constituées de sable fin et de tange).

On peut noter des teneurs non-négligeables en vase (fines, <63 μm, Figure 2-46) mais qui restent nettement en-deçà des teneurs limites (~30%) à partir desquelles les mélanges sables-vases deviennent cohésifs.

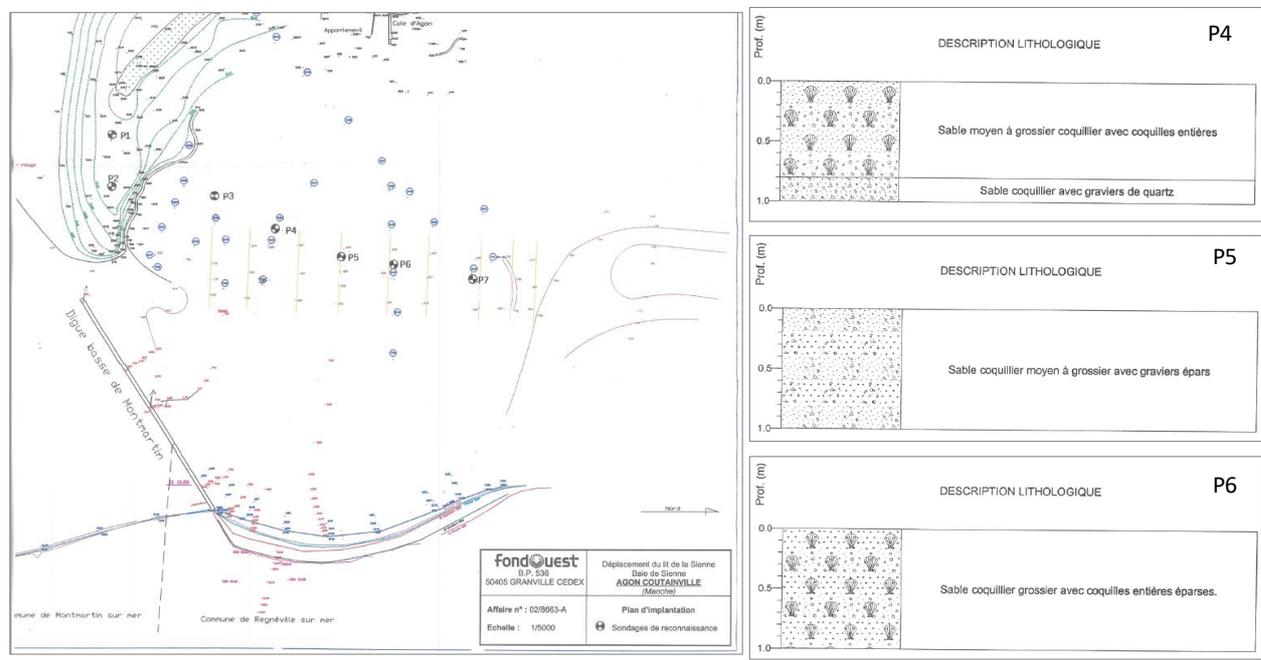


Figure 2-45 : Localisation de prélèvements et description lithologique à l'embouchure. Figure adaptée du rapport FondOuest (2002).

Paramètres	IDENTIFICATION DES ECHANTILLONS PRELEVES														
	Mélange P1	P1 - 1.5 m	P1 - 3.5 m	P1 - 5.5 m	P2 - 1.5 m	P2 - 3.5 m	P2 - 5.5 m	P3 - 1.0 m	P3 - 2.5 m	P3 - 3.8 m	P3 1.5/2 m	P4 - 1.0 m	P5 - 1.0 m	P6 - 1.0 m	P7 - 1.0 m
72665	73401	73402	73403	72668	72669	72670	72671	72672	72673	121129	72674	72675	72676	72677	
<b>Caractérisation du sédiment</b>															
% < 2mm		86.7	72.3	76.4	80.5	68.5	63.1	65.9	91.8	76.5		68.9	71.6	83.1	83.2
% > 63 μm dans la fraction < 2mm		87.1	82.1	88.3	85.5	93.4	94.2	94	80.7	93.7		93.5	94.9	96.5	95.7
% < 63 μm dans la fraction < 2mm		9.5	15.4	9.9	11.3	5.1	5.3	1.9	15.1	3.5		1.9	2.5	2.3	3.5
% < 2μm dans la fraction < 2mm		3.4	2.5	1.8	3.2	1.5	0.5	4.1	4.2	2.8		4.6	2.6	1.2	0.8
Al (mg/kg sec)	4482					3800							3896		3596
Carbone organique (g/kg sec)	< 5					< 5							< 5		< 5
Extrait sec (g/100 g)	93.1	94.55	94.05	92	94.8	90.8	89.65	93.6	83.15	82.1	77.8	90.45	85.6	84.95	83.09

Figure 2-46 : Extrait des résultats des analyses (FondOuest, 2002).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

2.3.2 A L'EXTERIEUR : DE L'ESTRAN A LA DUNE

Les prélèvements réalisés dans le cadre de la thèse de N. Robin (2007) indiquent la répartition type des sédiments le long de la pointe d'Agon, avec une granulométrie qui grossit du bas vers le haut de la plage, ce qui est classique dans un contexte macro-tidal (e.g. Masselink and Hegge, 1995).

Localement sur l'estran, les barres de « swash » qui se forment et qui peuvent migrer présentent des distributions granulométriques types (Robin, 2007) : sur le talus et le revers, c'est-à-dire sur la barre elle-même, les sables sont moyens à grossiers ( $D_{50}$  compris entre 0.3 et 1.2 mm) ; tandis que dans les creux (bâches), les sables en surface sont fins ( $D_{50}$  : 0.2 mm).

On trouve peu de données sur la granulométrie des sables qui constituent les dunes. Certains prélèvements de la thèse de Poullain (2013) peuvent correspondre au pied de dune. Les visites techniques nous ont indiqué clairement qu'il s'agit de sables fins à très fins. Le transport éolien « sélectionne » sur la plage, plus facilement sur les parties sèches (qui varient au gré des marées et des conditions de pluie), les sables qu'il est capable de mettre en mouvement.

Au Sud de l'embouchure (Montmartin, Hauteville), nous n'avons pas trouvé de données précises sur les répartitions granulométriques. Les visites de terrain ne nous ont cependant pas montré, du moins en première approche, de caractéristiques différentes de celles du secteur d'Agon.

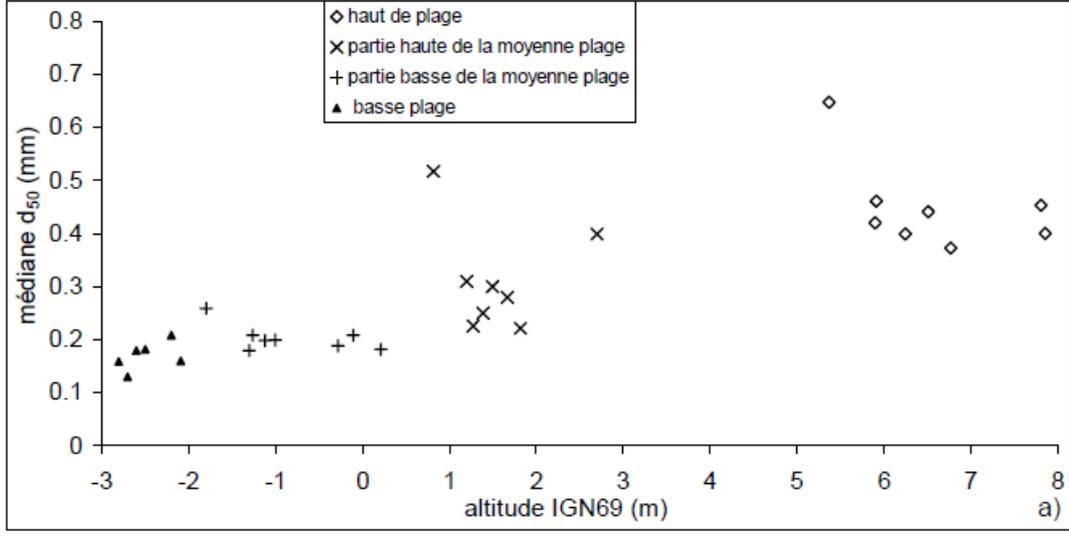


Figure 2-47 : Distribution granulométrique type le long de la pointe d'Agon (extrait de Robin, 2007).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

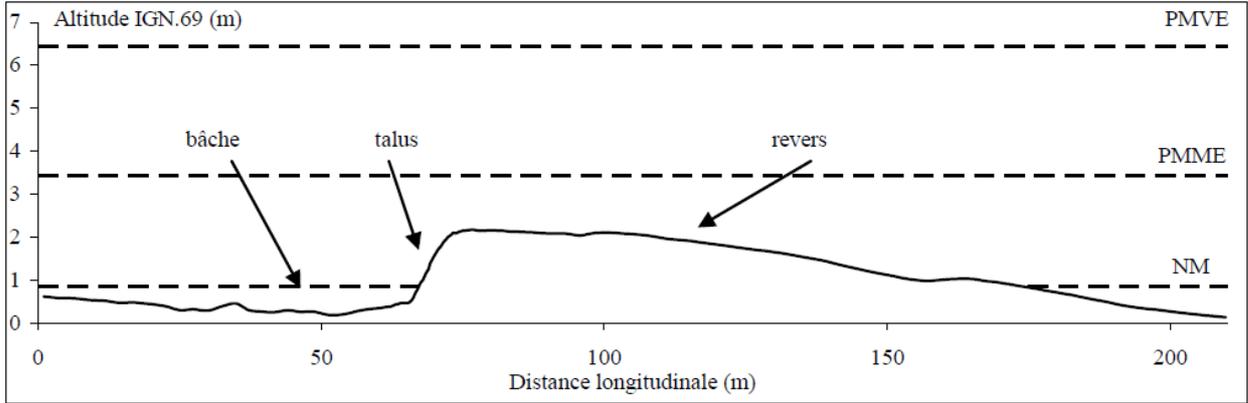


Figure 2-48 : Profil type en travers d'une barre de « swash » (Robin, 2007).

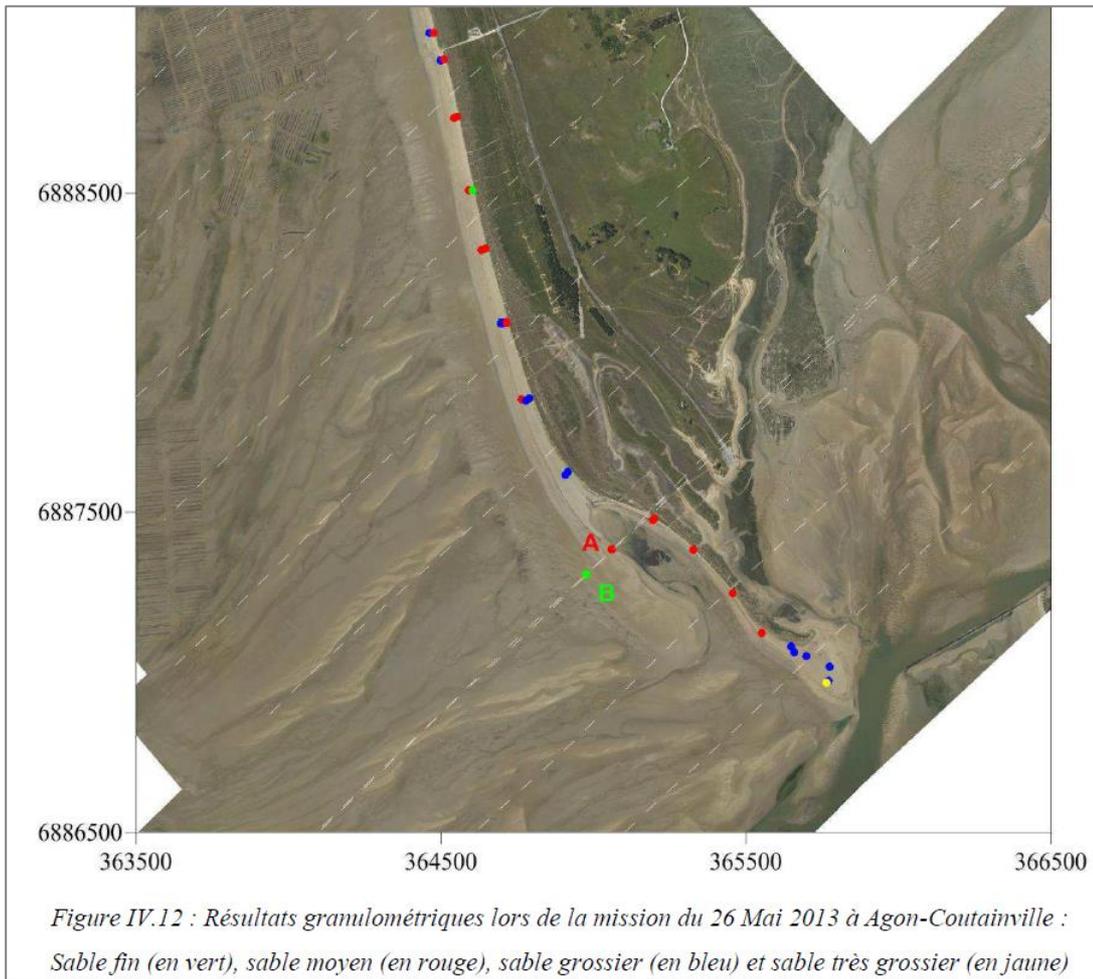


Figure 2-49 : Distribution granulométrique en haut de plage, le long de la Pointe d'Agon (figure extraite de la thèse d'E. Poullain, 2013).

## 3. CONDITIONS METEO-OCEANIQUES

### 3.1 VENT

Les conditions de vent sur la zone ont été analysées à partir d'un point de la base de données NCEP-CFSR (cf. paragraphe 4.2.1.4), à la position 48°52'N-1°55.7'O (cf. Figure 3-1). Les statistiques standards sont présentées dans ce paragraphe.

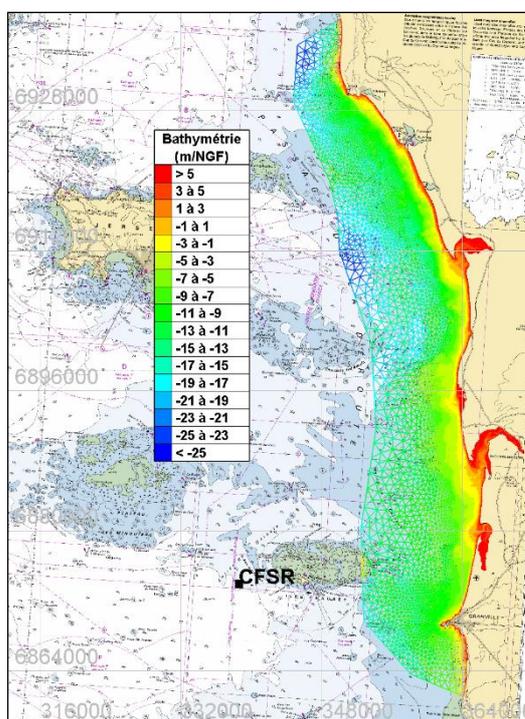


Figure 3-1 : Position du point CFSR sélectionné pour la description des conditions de vent sur la zone.

Les statistiques directionnelles annuelles sont présentées sur la Figure 3-2 :

- Les intensités de vent les plus fréquentes se répartissent autour de 6-7 m/s (Figure 3-2, en haut à gauche). Les occurrences des intensités diminuent rapidement jusqu'à 15 m/s, et plus lentement ensuite jusqu'à 20 m/s, devenant non-significatives pour des valeurs plus élevées.
- La distribution de la direction du vent (venant de) présente deux modes (Figure 3-2, en haut à droite) : SSO à NO (qui est la plus significative) ; et NE à ENE (secondaire). La rose des vents (Figure 3-2, en bas à droite) montre une autre représentation de cette distribution caractéristique des côtes Nord-Ouest de la France.

**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

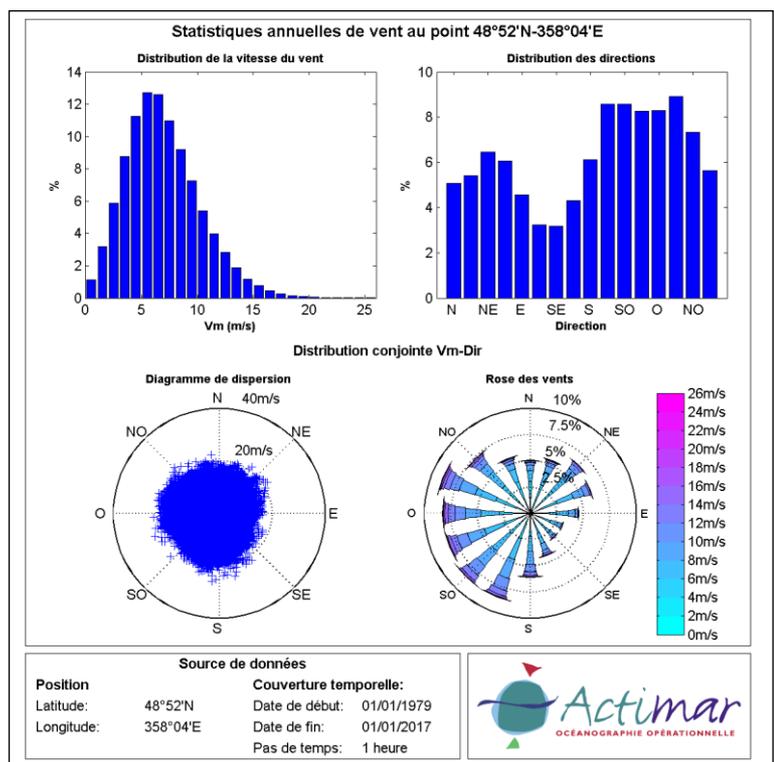


Figure 3-2 : Distributions annuelles de la vitesse et de la direction du vent (venant de). En haut : histogrammes de la vitesse du vent (à gauche) et de sa direction (à droite). En bas : roses des vents. Source : NCEP-CFSR.

Les statistiques mensuelles de la vitesse du vent sont présentées sur la Figure 3-3. L'intensité moyenne (Figure 3-3, en noir) dépasse 8 m/s de Novembre à Février et est inférieure à 6 m/s de Juin à Août. Les valeurs maximales (en rouge) atteignant ou dépassant 25 m/s ont été modélisées en Janvier, Février et Mars, pouvant être associées à un événement dont l'échantillonnage horaire peut limiter la représentation de plus fortes valeurs.

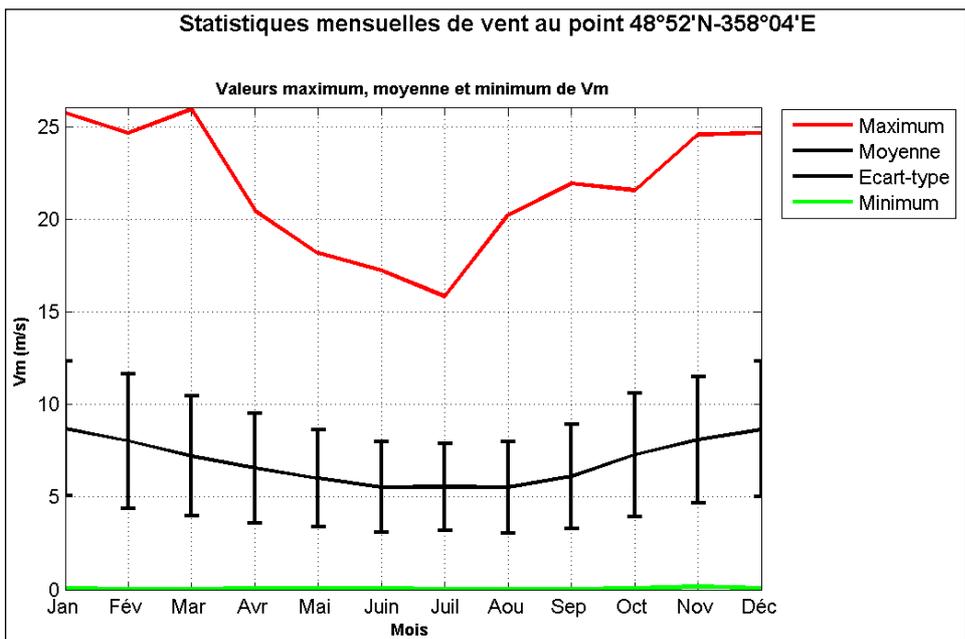


Figure 3-3 : Statistiques mensuelles de l'intensité du vent. Valeurs moyennes et écart-types (en noir) et valeurs minimales et maximales (respectivement en vert et rouge). Source : NCEP-CFSR.

### 3.2 ETATS DE MER

Les conditions d'états de mer devant l'embouchure ont été analysées pour un point de la base de données de la réanalyse fine des états de mer constituée pour les besoins de cette étude et décrite au paragraphe 4.4. Le point sélectionné est situé 364 903 E – 6 885 397 N (cf. Figure 3-4) à la cote -1.40 m NGF (environ 60% du temps en eau). Les statistiques standard associées sont présentées dans ce paragraphe.

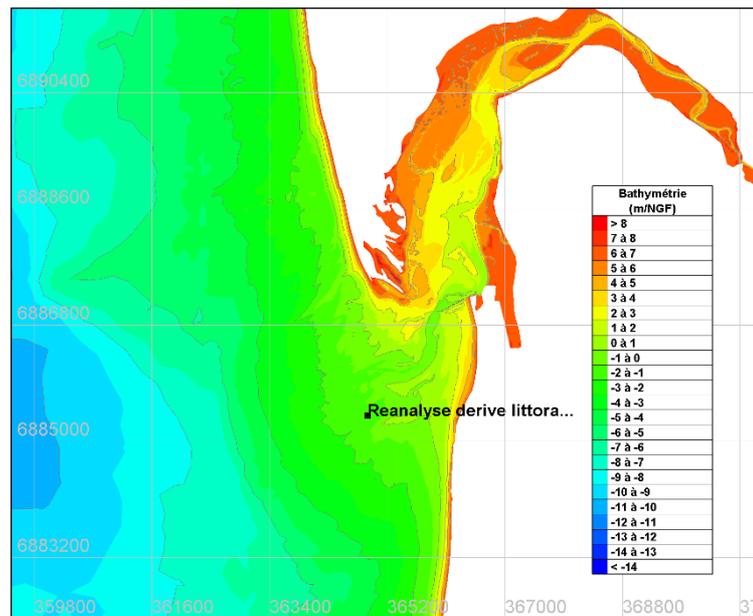


Figure 3-4 : Position du point de la réanalyse fine des états de mer sélectionné pour la description des conditions d'états de mer sur la zone.

Les statistiques annuelles sont présentées sur la Figure 3-5 :

- 88% des hauteurs significatives ne dépassent pas 1 m (Figure 3-5, en haut à gauche). La distribution des hauteurs significatives s'atténue rapidement jusqu'à 2 m, et plus lentement ensuite jusqu'à 3 m, devenant non-significative pour des valeurs plus élevées.
- La distribution de la direction des vagues (venant de) présente un seul mode (Figure 3-5, en haut au milieu et en bas) : secteur SO à NO.
- La distribution des périodes pic (Figure 3-5, en haut à droite) se répartit principalement entre 4 et 16 s, devenant moins significatives jusqu'à 20 s et quasiment insignifiante pour des valeurs plus élevées. On distingue un premier mode autour de 6 à 8 s (mer du vent) et un second autour de 10 à 12 s (houle).

Les statistiques mensuelles des hauteurs significatives sont présentées sur la Figure 3-6.

La hauteur significative moyenne (Figure 3-6, en noir) ne dépasse pas 0.75 m tout au long de l'année, atteignant quasiment 0.70 m de Décembre à Février, et vaut environ 0.45 m d'Avril à Septembre. Les valeurs comprises autour d'un écart-type (barres d'erreur en noir) dépassent 1 m de Novembre à Février. Les valeurs maximales (en rouge) dépassant 2.75 m de Janvier à Mars, des valeurs proches de 3.20 m ont été modélisées en Mars (le pas de temps horaire de la réanalyse peut toutefois « manquer » des valeurs plus élevées).

**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

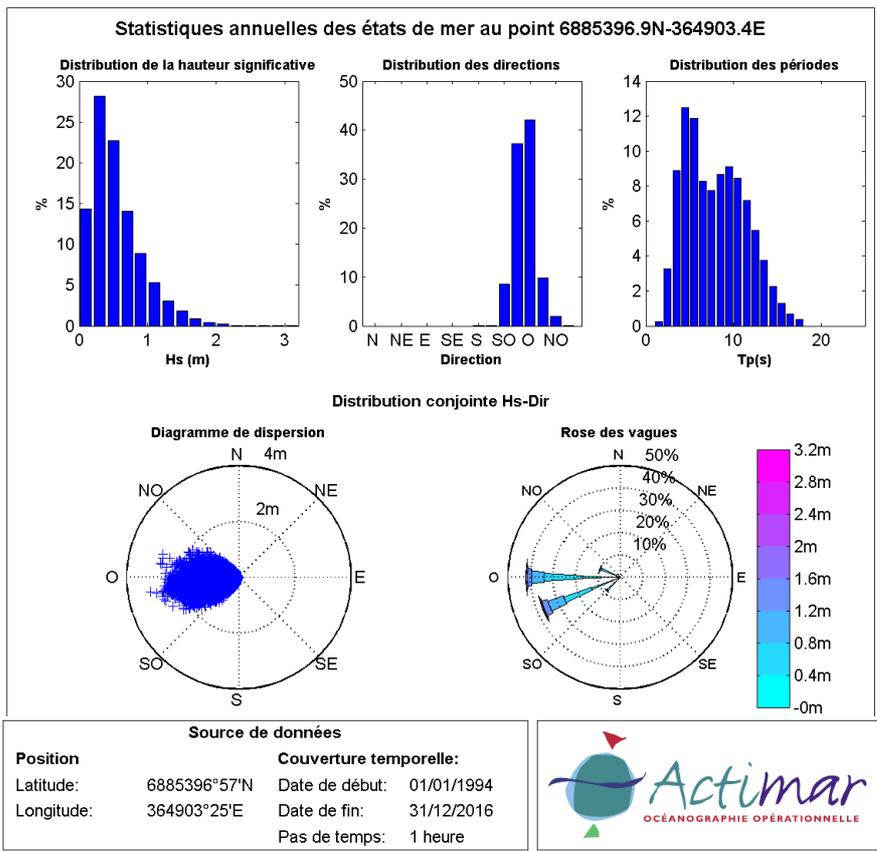


Figure 3-5 : Distributions annuelles de la hauteur significative, de la période pic et de la direction (venant de) des vagues. En haut : histogrammes de la hauteur significative (à gauche), de la direction (au milieu) et de la période pic (à droite). En bas : digramme de dispersion (à gauche) et roses des vagues (à droite).

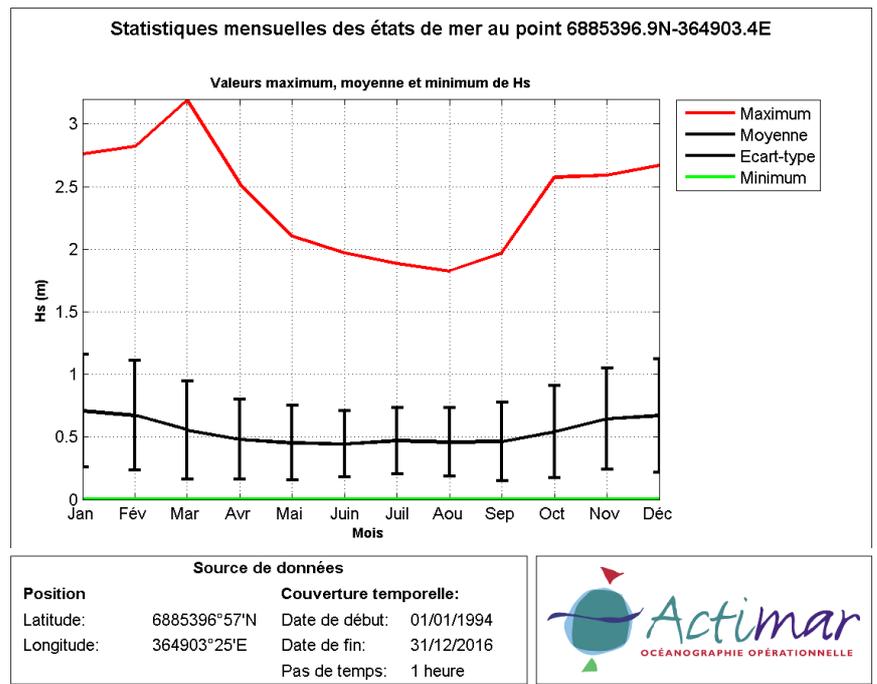


Figure 3-6 : Statistiques mensuelles de la hauteur significative : valeurs moyennes et écart-type associé (en noir) et valeurs minimales et maximales (respectivement en vert et rouge).

### 3.3 MAREE ASTRONOMIQUE

L'atlas des références altimétriques du SHOM fournit les côtes du Zéro Hydrographique (ZH) et des niveaux caractéristiques de la marée dans les ports de référence. Les informations pour le site de la Pointe d'Agon ont été extraites (48°59'N – 1°37'O).

Les niveaux d'eau référencés au zéro hydrographique pour différentes conditions de marée sont indiqués Figure 3-7. Les marées exceptionnelles (coefficient 120) représentent un marnage de près de 15 m (14.76 m). Le Niveau Moyen des mers (NM) se situe à 7.05 m au-dessus du Zéro Hydrographique. La vive-eau moyenne s'étend sur la gamme 1.55-12.7 m (marnage de 11.15 m) et la morte-eau moyenne sur la gamme 4.45-9.7 m (marnage de 5.25 m).

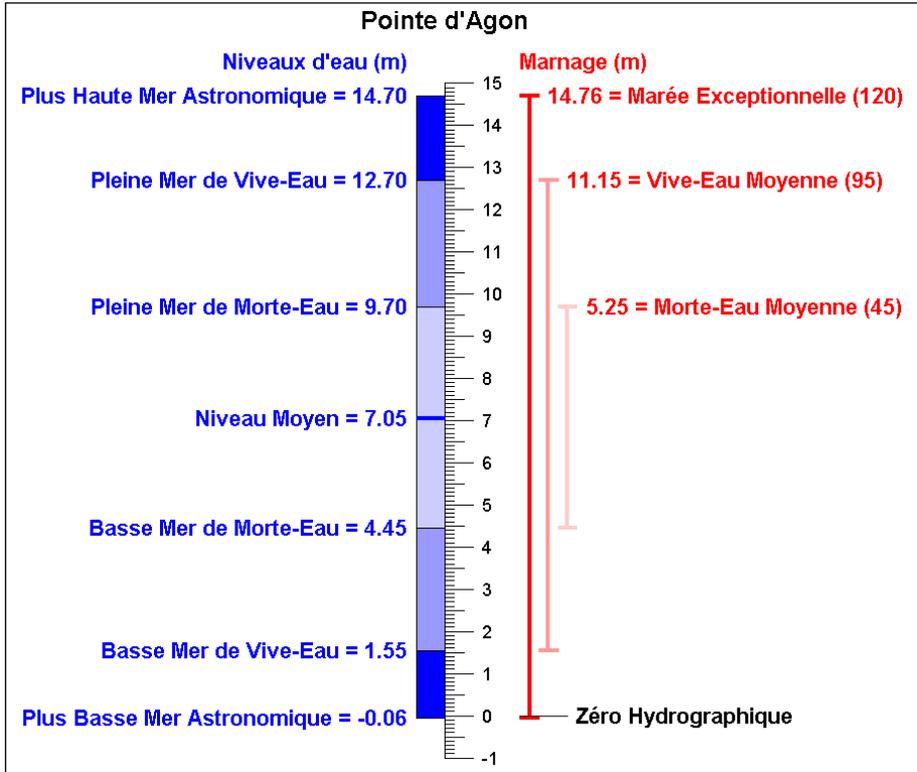


Figure 3-7 : Niveaux d'eau (en bleu) et marnages (en rouge) référencés au zéro hydrographique à la Pointe d'Agon, prédits par la marée astronomique. Source : SHOM 2017.

#### 3.4 CONDITIONS DE COURANT DE MAREE

Les conditions de courant de marée présentées dans ce paragraphe ont été extraites des modélisations Telemac-2D, construites spécifiquement pour cette étude. Il s'agit du courant barotrope (2D) moyenné sur la verticale et généré par la marée lors d'une condition de vive-eau moyenne (coefficient 94), le 8 Mars 2016. Seul un aperçu des conditions est présenté dans ce paragraphe, davantage de détails sont fournis en Annexe B : Courants de marée (cartes toutes les 30 minutes).

Le courant de marée à l'embouchure du havre de Regnéville est présenté pour deux instants du flot (Figure 3-8) et du jusant (Figure 3-9). Etant données la géométrie et la morphologie du site, on distingue une large variabilité spatiale des courants de marée.

A l'extérieur de l'embouchure, le courant de flot (Figure 3-8) est principalement orienté vers le NE au début du flot et tend à tourner vers le nord en fin de flot. Il ne dépasse pas 1 m/s à l'extérieur de l'embouchure et peut atteindre des valeurs de 1.5 m/s à proximité de la digue basse ou dans les chenaux. Le courant de jusant (Figure 3-9) porte de manière générale vers le SO ; en début de jusant, il contourne la pointe d'Agon et s'oriente davantage vers le NO. Les intensités sont similaires que celles du flot, mis à part à proximité de la digue basse et dans le chenal où elles peuvent atteindre facilement 1.5 m/s, voire dépasser 2 m/s devant la digue basse.

A l'extérieur de l'embouchure, le courant de flot domine (plus fort mais plus bref). A l'embouchure, les forts courants sont plus étalés (latéralement) en flot qu'en jusant, ce qui est assez classique pour une embouchure : les maxima de jusant se produisent pour des niveaux d'eau plus bas, ce qui fait que les courants sont plus chenalisés.

Ces valeurs peuvent être plus importantes pour des coefficients de marée plus élevés. Les effets météorologiques (principalement le vent) peuvent aussi induire une augmentation de ces vitesses et modifier légèrement leur direction.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

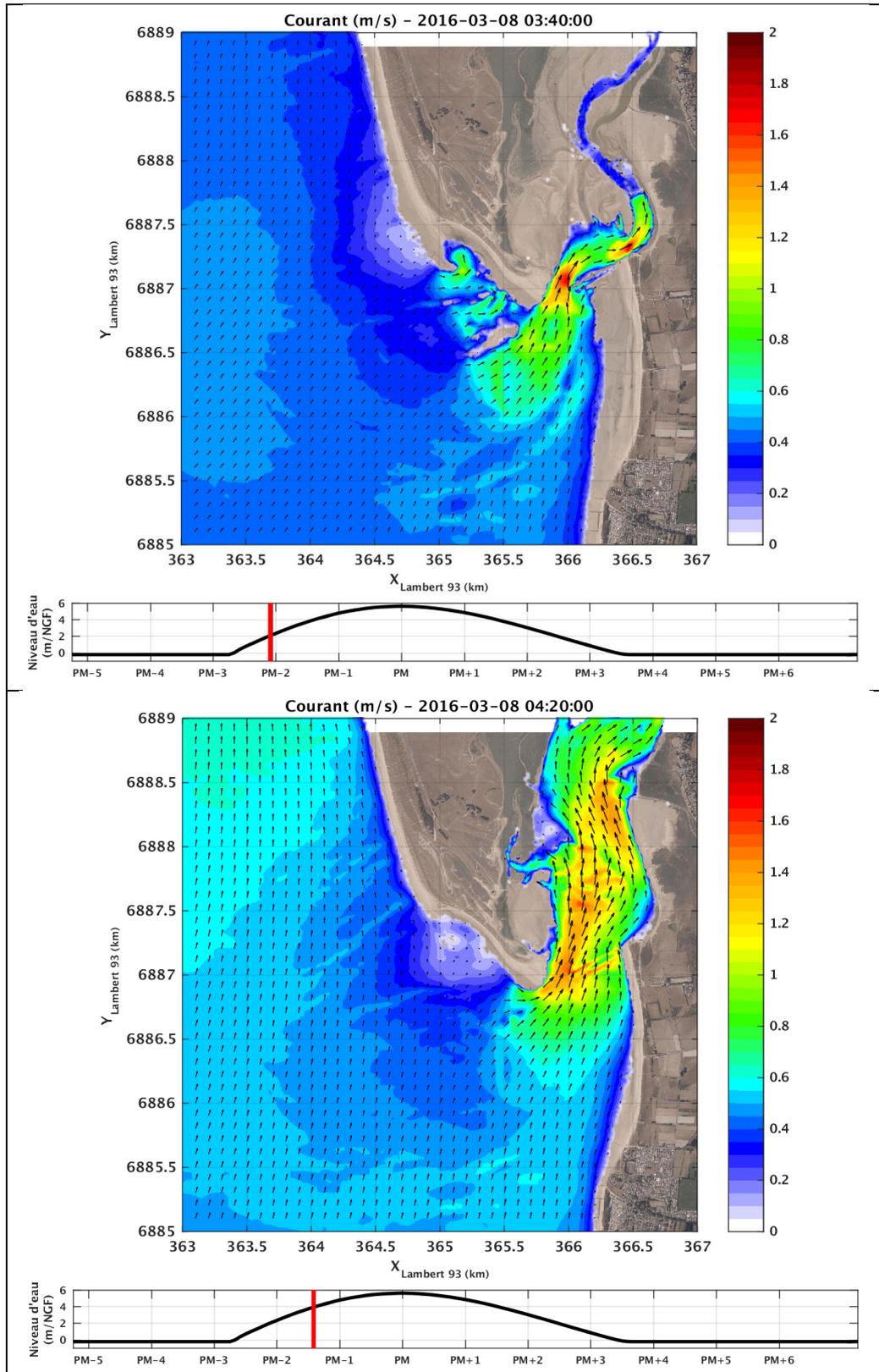


Figure 3-8 : Courants de flot à l'embouchure du havre de Regnéville, le 8 Mars 2016 (coefficient 94) modélisés à partir de Telemac-2D. En haut : 2h avant la pleine mer ; en bas : 1h30 avant la pleine mer.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

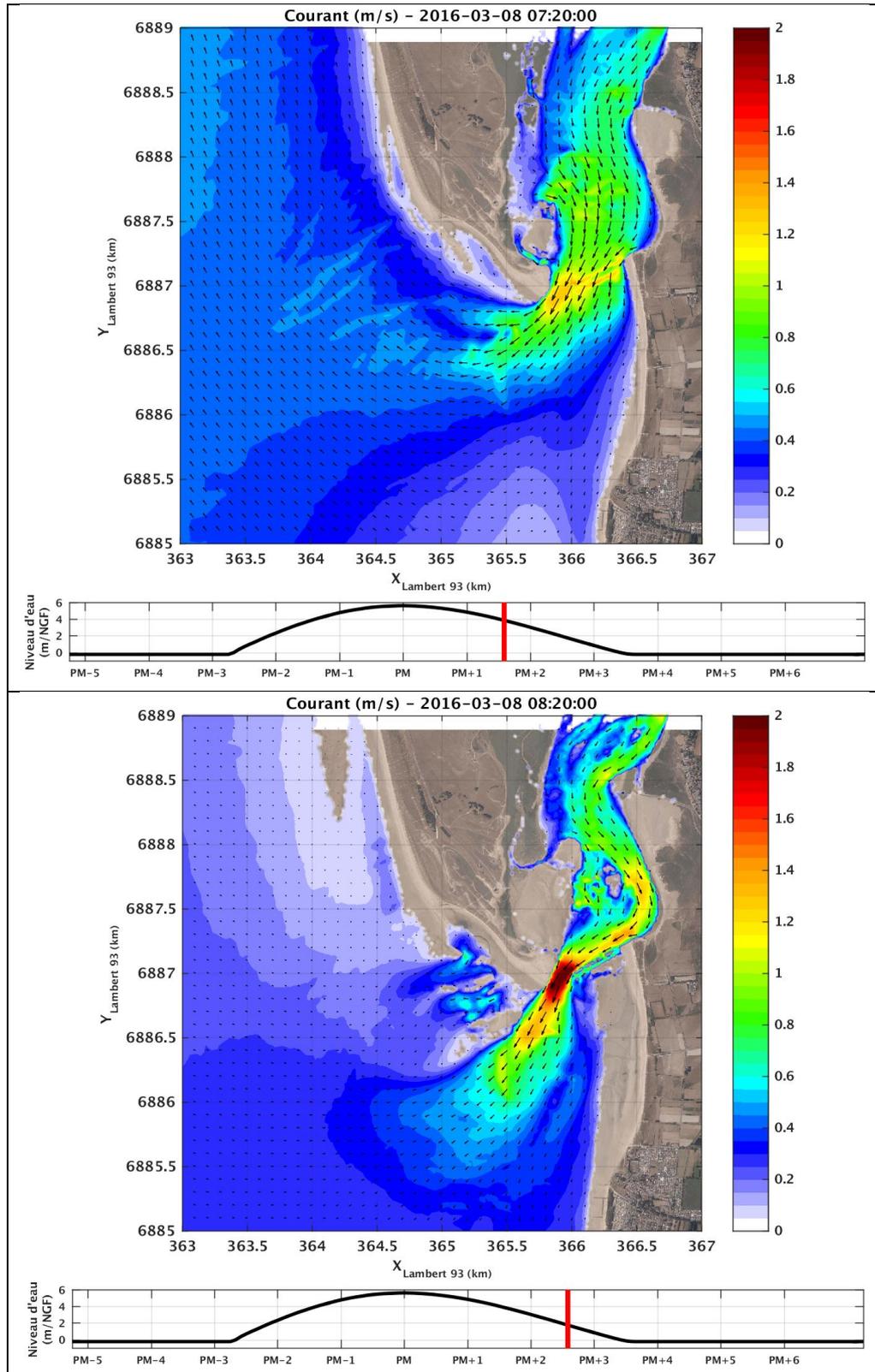


Figure 3-9 : Courants de jusant à l'embouchure du havre de Regnéville, le 8 Mars 2016 (coefficient 94) modélisés à partir de Telemac-2D. En haut : 1h30 après la pleine mer ; en bas : 2h30 après la pleine mer.

## 4. MODELISATION NUMERIQUE

---

Les modélisations ont été réalisées grâce à des calculs parallélisés sur le supercalculateur HPC (High Performance Computing) du "Pôle de Calcul et de Données pour la Mer, PCDM" (IFREMER), <https://wwz.ifremer.fr/pcdm>

### 4.1 DESCRIPTION DU MODELE

Le travail de modélisation numérique a été réalisé à l'aide des modèles de la chaîne de calcul TELEMAC<sup>1</sup>, basés sur des grilles de calcul à éléments finis triangulaires. Les trois modèles suivants ont été mis en œuvre :

- TELEMAC-2D effectue la modélisation hydrodynamique 2D, calculant les niveaux d'eau et les courants en réponse à la propagation de l'onde de marée le long des côtes et aux effets atmosphériques. En chaque point de la grille de calcul, le modèle fournit la hauteur d'eau et les deux composantes horizontales du courant barotrope (moyenné sur la colonne d'eau).
- TOMAWAC, modèle spectral d'états de mer, représente la génération, la propagation et la transformation des états de mer du large vers la côte. Il résout l'équation de conservation de la densité spectro-angulaire d'action des vagues.
- SISYPHE représente le transport sédimentaire et les évolutions morphologiques associées sous l'effet combiné des courants et des états de mer.

Une description de chacun de ces modules est fournie en Annexe A.

### 4.2 CONSTRUCTION DU MODELE

#### 4.2.1 SOURCES DE DONNEES

Ce paragraphe décrit les sources de données utilisées dans cette étude pour caractériser les conditions météo-océaniques (états de mer, vent, niveau d'eau et courant) au large du site d'étude dans le but de fournir :

- Une connaissance générale des conditions météo-océaniques à proximité du site d'étude,
- Les conditions aux limites nécessaires au fonctionnement du modèle.

##### 4.2.1.1 Données bathymétriques

Les modélisations numériques mises en place s'appuient sur un Modèle Numérique de Terrain (MNT) dont la résolution spatiale doit être en accord avec celle de la grille de calcul.

---

<sup>1</sup> <http://www.opentelemac.org/>

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

Plusieurs sources de données bathymétriques ont été utilisées pour la construction du MNT :

- Le MNT HOMONIM du SHOM fournit une description complète de la bathymétrie de la Manche et du Golfe de Gascogne sur une grille de 100 m de résolution.
- Les levés LIDAR à haute-résolution, réalisés à différentes périodes sur le site, sont utilisés pour produire des MNT représentatifs des fonds entre 2010 et 2016.
- Pour le calage et la validation du modèle morphodynamique, des MNT en 1979 et 1984 ont également été produits à partir des données mentionnées dans le rapport du LCHF (1982) et des ortho-photos qui indiquent la position des bancs et des chenaux à l'embouchure.

La référence verticale utilisée pour la construction du modèle est le niveau NGF-IGN69, situé à 0.53 m au-dessous du Niveau Moyen des mers (NM) dans cette zone, soit environ 6.50 m au-dessus du Zéro Hydrographique (ZH ou CM) représentant les plus basses mers. La projection Lambert-93 (code EPSG : 2154) est utilisée comme référentiel horizontal pour la construction du modèle.

### 4.2.1.2 La base de données d'états de mer HOMERE

HOMERE (Boudiere et al., 2013) est une base de données de rejeu d'états de mer, réalisée par l'IFREMER à l'aide du modèle WaveWatch3 (NOAA-IFREMER, version 4.09) dans le cadre du projet Energies Marines Renouvelables (EMR). Le modèle se base sur une grille non structurée couvrant la zone Manche - Golfe de Gascogne dont la résolution spatiale variable atteint environ 250 m en zone côtière (cf. Figure 4-1 : Grille de la base de données HOMERE.). Le modèle est forcé par les champs de vent horaires NCEP-CFSR (NOAA) et prend en compte les variations temporelles des niveaux d'eau et des courants de marée (issus de la base d'harmoniques PREVIMER) ayant une influence significative sur la propagation des états de mer en zone littorale. La base de données couvre la période 1994 à 2016 (23 années). En chaque point de la grille, plusieurs paramètres synthétiques sont disponibles avec une résolution horaire, dont la hauteur significative ( $H_s$ ), les périodes pic ( $T_p$ ) et moyenne ( $T_{m02}$ ), les directions pic ( $Dir_p$ ) et moyenne ( $Dir_m$ )... Les spectres d'états de mer 1D (fréquence) et 2D (fréquence/direction) sont également disponibles sur une grille à haute-résolution.

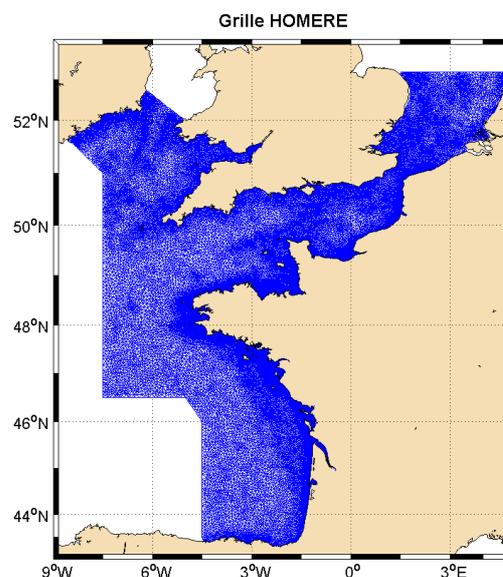


Figure 4-1 : Grille de la base de données HOMERE.

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

---

#### 4.2.1.3 Données de niveau d'eau

Les variations spatio-temporelles du niveau d'eau et potentiellement des courants doivent être imposées en chaque point de la frontière maritime du domaine de calcul. Ils sont obtenus à partir d'atlas de composantes harmoniques de marée constitués des amplitudes et des phases pour chaque constituant. Trois bases de données ont été testées : PREVIMER (IFREMER), TPXO (Oregon State University) et FES2014 (LEGOS). Elles se distinguent par leur résolution spatiale et leur nombre de constituants harmoniques. Après plusieurs tests lors de la phase de calibration du module hydrodynamique, il ressort que la base de données PREVIMER - Manche Ouest donne les meilleurs résultats.

Cette base de données de composantes harmoniques de hauteurs et courants a été produite à partir des modèles MARS2D de PREVIMER (IFREMER). Une analyse harmonique du rejeu 2008-2009 (Pineau-Guillou et al, 2013) a permis de calculer les constantes harmoniques (amplitude et phase), à partir desquelles les hauteurs et courants de marée peuvent être prédits pour n'importe quelle période. Le modèle MANW (Manche Ouest) a une résolution horizontale de 250 m et contient 38 constituants harmoniques de la marée :

- Longues périodes : Z0, Mm et Mf ;
- Semi-diurnes : Q1, O1, P1, K1, M1, J1, OO1, Ro1, Pi1, 2Q1, Phi1, Sig1, Tta1, Psi1, Ki1, MP1 et KQ1 ;
- Semi-diurnes : 2N2, N2, M2, S2, K2, Nu2, L2, T2, Mu2, E2, La2, KJ2 et R2 ;
- Quart-diurnes : M4, MS4, MK4 et MN4 ;
- Sixième-diurne : M6.

#### 4.2.1.4 La base de données météorologiques CFSR

Les statistiques d'intensité et de direction du vent sont calculées à partir des données atmosphériques produites par le NCEP (National Centers for Environmental Prediction) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA).

Depuis les années 1990, le centre NCEP a réalisé plusieurs réanalyses atmosphériques dont le but est de fournir sur plusieurs années et sur une grille régulière une description complète et détaillée des conditions atmosphériques mondiales, à l'aide d'un même modèle utilisant un système d'assimilation de données performant, alimenté par des données de forçage cohérentes et homogènes.

Depuis 2011, une nouvelle réanalyse couplée océan-atmosphère est disponible. NCEP-CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) est une base d'hindcast de données atmosphériques sur une période de 38 ans (1979 - 2016), une grille horizontale de 0.3° (~38 km), 5 niveaux de pression et un échantillonnage temporel d'une heure.

La base de données CFSR a été créée et réalisée comme un système global à haute résolution bénéficiant d'un couplage avec des modèles océanique, terrestre et glaciaire de façon à décrire les propriétés atmosphériques de la manière la plus réaliste.

Le projet de réanalyse CFSR se base sur de nombreuses sources de données mondiales pour améliorer la qualité de ses résultats en les assimilant au cours des modélisations. Les principales sources de données utilisées sont les suivantes :

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

---

- Les vents mesurés par les diffusiomètres. L'ESA a récemment retravaillé et amélioré les champs de vent de surface mesurés par les satellites ERS-1 et ERS-2, couvrant les années 1991 à 2007. Ces données sont assimilées par le système CFSR. Les champs de vent QuikSCAT SeaWinds sont également assimilés de 2001 à 2009. Les données issues du diffusiomètre NRL WindSat sont assimilées depuis septembre 2008.
- Les observations SATOB. Les champs des circulations atmosphériques provenant de l'imagerie satellite sont assimilés dans CFSR depuis 1979.
- Les champs de vent de surface SSM/I. Le capteur SSM/I (Special Sensor Microwave Imager) fournit les températures de brillance qui sont traitées de manière à déduire des champs de vent de surface. Ces données sont disponibles depuis 1997.
- La radiance. Le système CFSR assimile les données de radiance des sondes satellites (TOVS, GOES, ATOVS) disponibles depuis 1978. Plusieurs études (i.e. English et al. 2000<sup>2</sup>) suggèrent que l'utilisation des données ATOVS a conduit à une amélioration importante des prévisions à grande échelle lors des dix dernières années.

Cette liste n'est pas exhaustive. Les références <sup>3</sup> fournissent davantage de détails.

La base de données fournit des paramètres météorologiques et océanographiques toutes les heures sur la période 1979-2016, dont le vent à 10 m, la température de surface de la mer, la température de l'air, l'humidité, les précipitations, l'épaisseur de glace...

---

<sup>2</sup> English et al. 2000. A comparison of the impact of TOVS and ATOVS satellite sounding data on the accuracy of numerical weather forecasts. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 126, 2911-2931.

<sup>3</sup> The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. 2010. American Meteorological Society.

The NCEP Climate Forecast System Version 2. 2012, submitted to the Journal of Climate.

**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

**4.2.2 DOMAINE DE CALCUL**

Le domaine de calcul est présenté sur la Figure 4-2 et s'étend de Granville au sud à Carteret au Nord. Il contient les havres de la Vanlée, de la Sienne, de Blainville et de Lessay. La frontière maritime à l'ouest du domaine est située entre 5 et 10 km de la côte ; elle a été définie de manière à coïncider avec les positions des spectres d'états de mer 2D (fréquence/direction) de la base de données HOMERE (points rouges sur la Figure 4-2).

Le domaine reste le même pour toutes les simulations réalisées durant les différentes phases de l'étude ; seule la résolution spatiale est adaptée selon les besoins spécifiques de chaque phase.

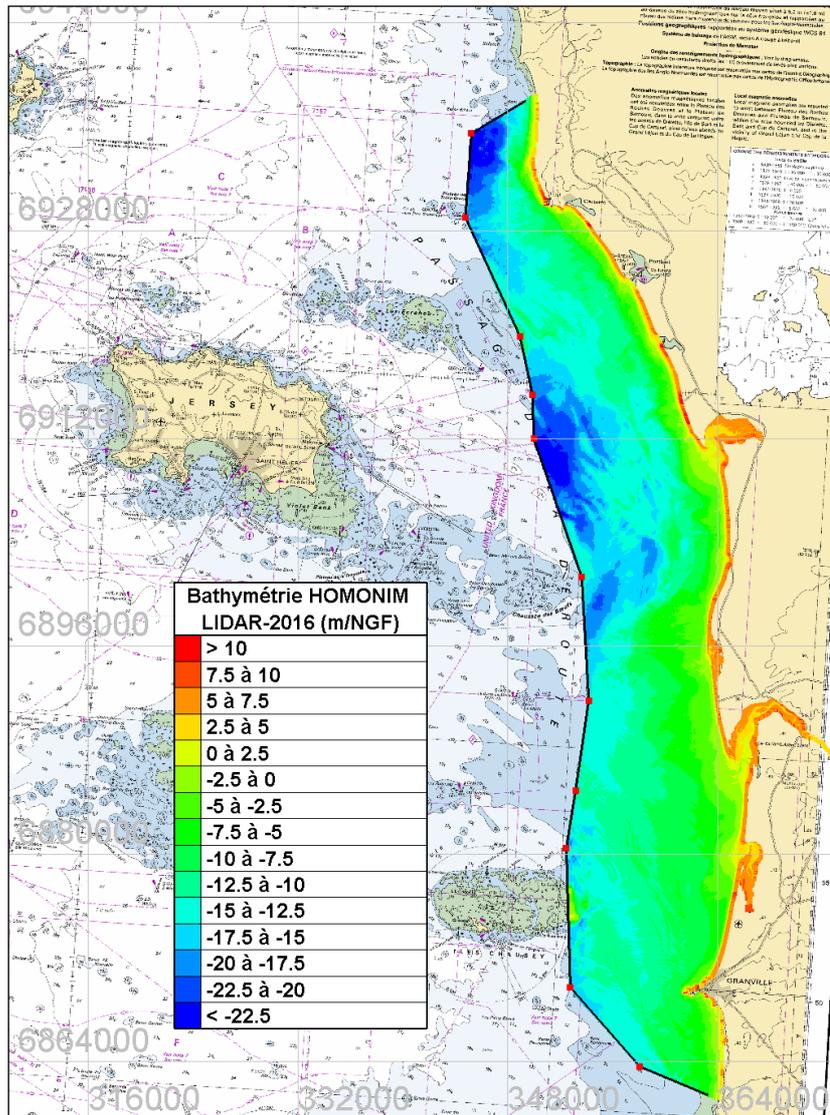


Figure 4-2 : Domaine de calcul et sa frontière maritime (ligne noire), superposés avec les positions des points de sortie spectrale 2D HOMERE (points rouges).

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

---

#### 4.2.3 MAILLAGES

A partir de l'emprise du domaine de calcul définie au paragraphe précédent, plusieurs grilles de résolution variable ont été construites pour les différentes phases de l'étude :

- Une grille à basse résolution : composée d'environ 22 500 nœuds. La taille des éléments évolue de 500 m au large jusqu'à 90 m dans la bande littorale, et 10 m au pont de la Roque (cf. Figure 4-3). La bathymétrie la plus récente, composée du MNT SHOM HOMONIM et du levé LIDAR de 2016, a été interpolée sur cette grille afin de réaliser la réanalyse fine des états de mer sur la période 1994-2016 (cf. paragraphe 4.4).

A partir de cette grille, le maillage a été raffiné pour différents besoins :

- Deux grilles à résolution intermédiaire composées d'environ 52 000 nœuds chacune, dont la résolution a été affinée dans l'estuaire pour atteindre environ 25 m :
  - Pour l'une, le trait de côte et les bathymétries de 1979, 1982 et 1984 (composées du MNT SHOM HOMONIM au large et de la digitalisation des plans du LCHF ayant servis pour la construction du modèle physique à échelle réduite) ont été interpolés sur cette grille afin de réaliser la validation morphodynamique du modèle avant l'existence de la digue basse. Il en résulte donc trois maillages différents associés à cette même grille (MNT : 1979, 1982 et 1984). Ils sont illustrés sur la Figure 4-4.
  - Pour l'autre, le trait de côte actuel et les bathymétries de 2010 et 2016 (composées du MNT SHOM HOMONIM au large et des levés LIDAR de 2010 et 2016 dans la bande littorale) ont été utilisés pour créer deux maillages illustrés sur la Figure 4-5.
- Deux grilles à haute résolution : composées respectivement de 73 000 nœuds et 151 000 nœuds pour une résolution dans l'embouchure de 10 m et 5 m. Ces grilles ont été utilisées pour évaluer la sensibilité du modèle à la résolution spatiale et donc aux processus intervenant à ces échelles.
- Une grille à haute résolution : composée d'environ 104 000 nœuds pour une résolution d'environ 2 m au niveau des ouvrages d'Hauteville. Cette grille a été utilisée pour évaluer l'incidence des ouvrages littoraux (épis, cales, enrochements le long du trait de côte) sur le transit sédimentaire littoral. La grille et la bathymétrie utilisées pour chaque ouvrage sont présentées au paragraphe 5.1 (Figure 5-1) pour la digue des Garennes et au paragraphe 5.2 (Figure 5-2) pour la cale de l'école de voile.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

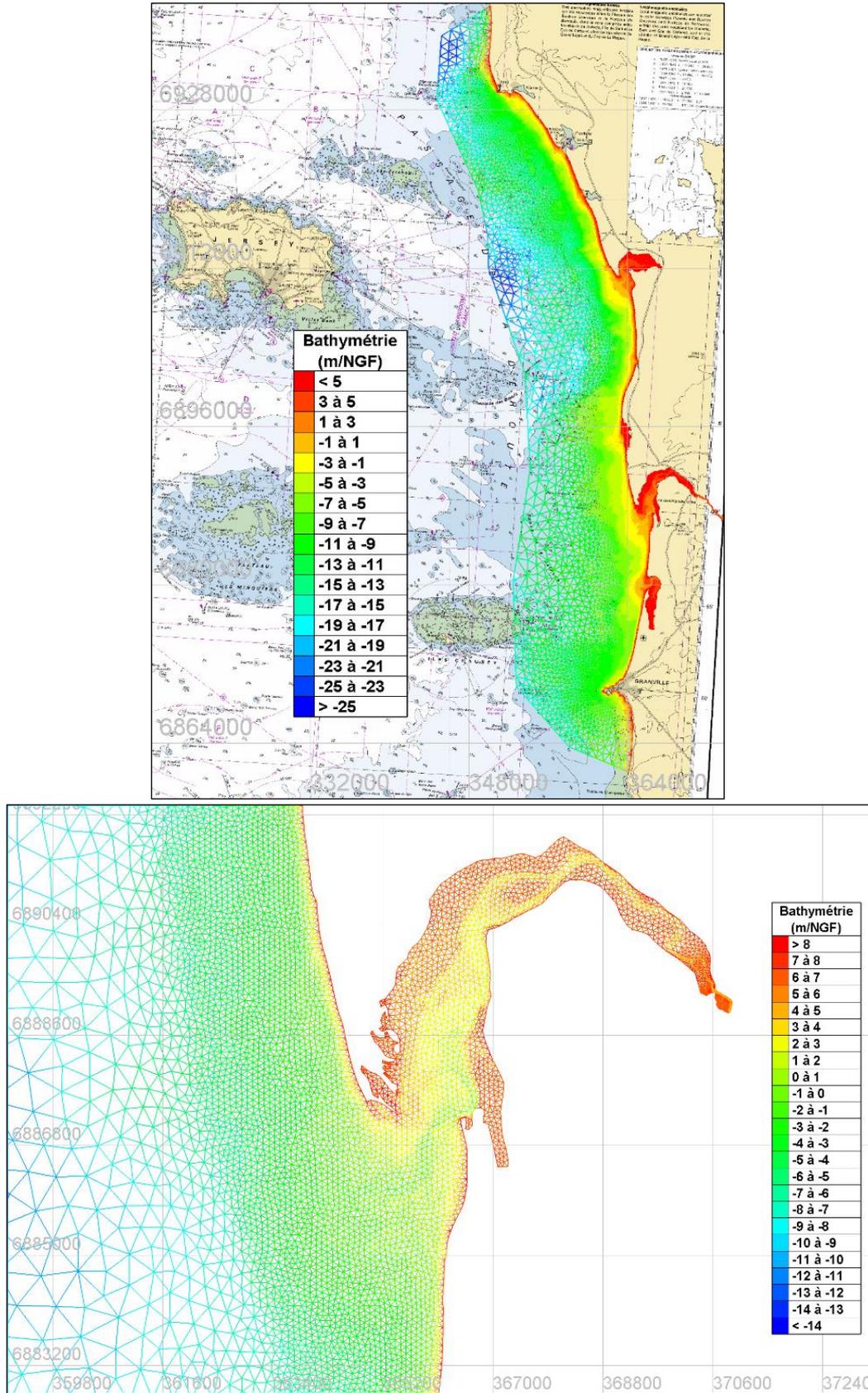


Figure 4-3 : Grille de calcul à basse résolution (90 m), illustrant la résolution du maillage au large (en haut) et dans le havre de Regnéville (en bas).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

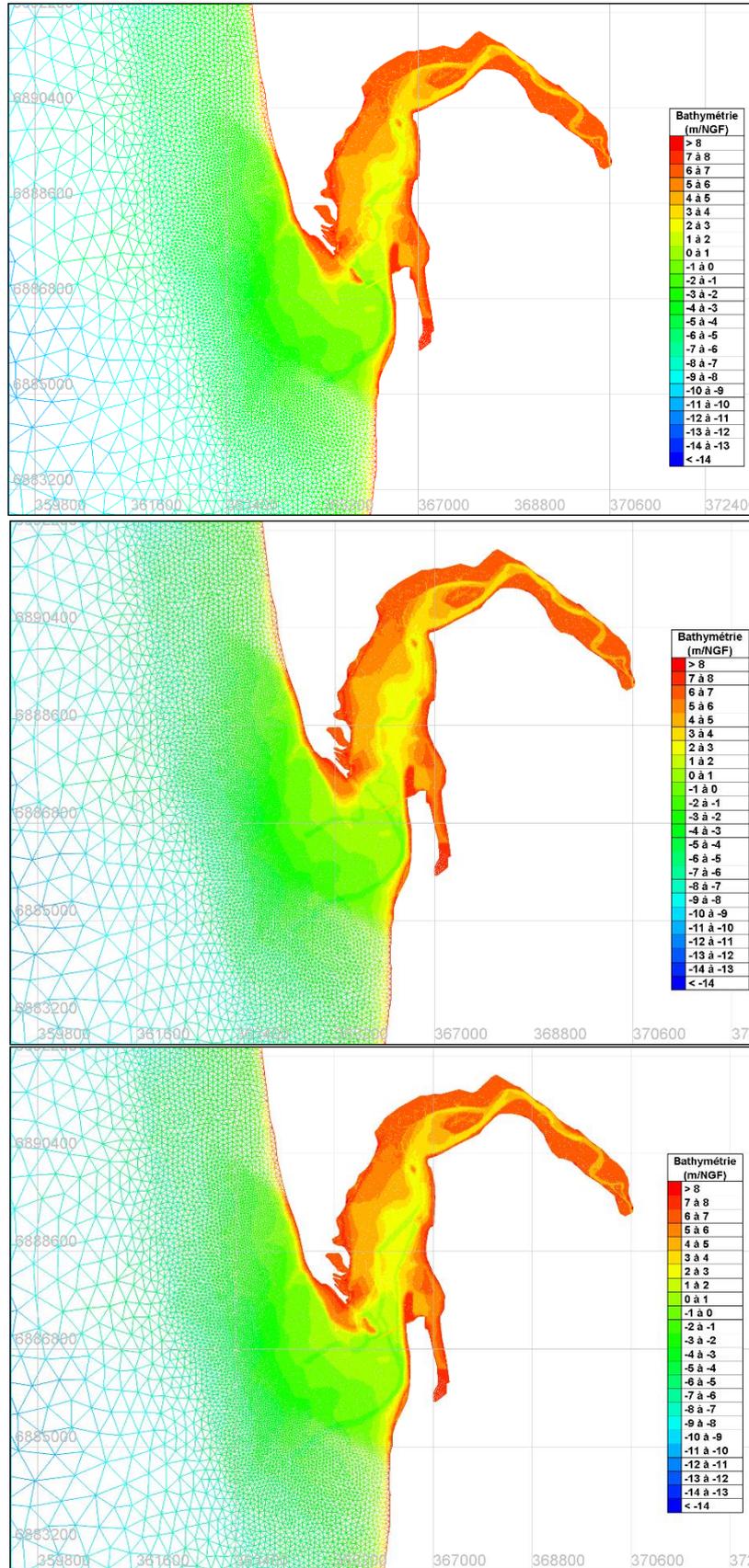


Figure 4-4 : Grilles de calcul à résolution intermédiaire (25 m), illustrant la résolution du maillage et les trois MNT utilisés dans le havre de Regnéville : 1979 (en haut), 1979 avec chenaux 1982 (au milieu) et 1984 (en bas).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

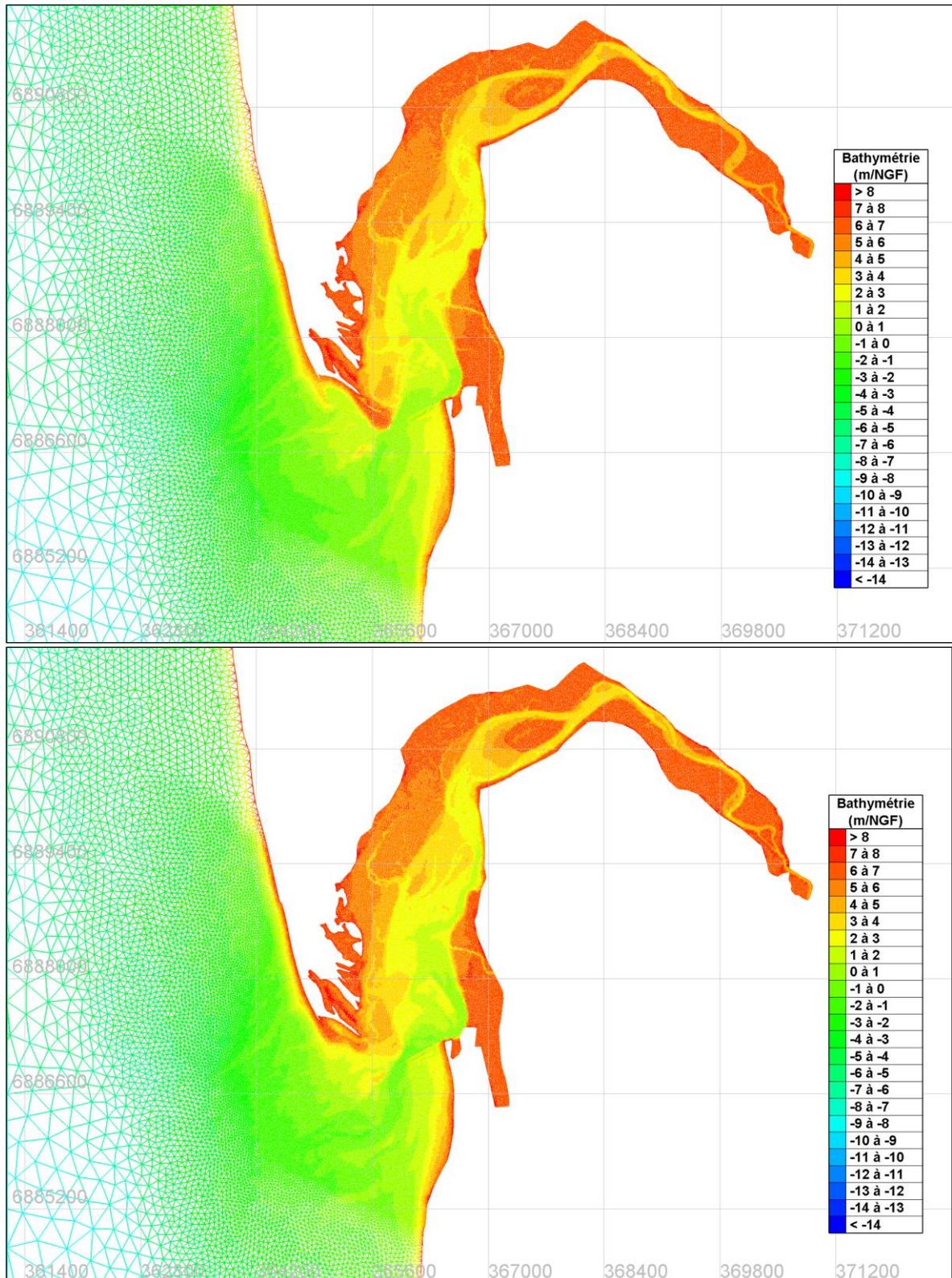


Figure 4-5 : Grilles de calcul à résolution intermédiaire (25 m), illustrant la résolution du maillage et les deux MNT utilisés dans le havre de Regnéville : 2010 (en haut) et 2016 (en bas).

#### 4.3 VALIDATION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE

L'étape de validation du modèle hydrodynamique est cruciale pour obtenir un bon comportement du modèle morphodynamique. Des tests de sensibilité ont donc été menés pour obtenir les meilleures performances du modèle par confrontation aux informations de validation disponibles.

Les données de référence sur lesquelles se base la validation hydrodynamique sont :

- Pour les niveaux d'eau :
  - Les prédictions harmoniques de marée du SHOM aux ports de référence les plus proches (cf. paragraphe 4.3.1),
  - Des mesures anciennes (1983) de niveau d'eau en 3 points dans l'embouchure de la Seine (cf. paragraphe 4.3.2).
- Pour les courants :
  - Les informations de navigation figurant sur les cartes marines du SHOM (cf. paragraphe 4.3.3),
  - L'atlas de courant de marée du SHOM issu d'un modèle numérique (cf. paragraphe 4.3.4).

La sensibilité du modèle a été évaluée par rapport à ces données de référence, et les tests réalisés ont porté sur les points suivants :

- La loi de frottement sur le fond : Chezy, Strickler, Nikuradse (longueur de rugosité) et les valeurs du coefficient de frottement associé ;
- La base de données de constantes harmoniques (PREVIMER, FES, TPXO),
- Le type de forçage aux limites maritimes (niveau, courant, niveau + courant),
- L'influence des conditions atmosphériques (vent, pression),
- L'influence du débit de la Seine,
- La résolution spatiale,
- La diffusion horizontale.

L'ensemble des tests réalisés ne sont pas détaillés ici. Cette section présente les comparaisons entre les différentes sources de données de référence et les résultats de modélisation obtenus avec le paramétrage le plus satisfaisant. Ce paramétrage est décrit au paragraphe 4.4.4.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

4.3.1 VARIATIONS DES NIVEAUX D'EAU EN MER (SHOM)

Les niveaux d'eau calculés ont été comparés aux prédictions harmoniques du SHOM pour six ports de référence : Carteret, Granville, le Senequet, la Pointe d'Agon, Portbail et St-Germain-sur-Aye (cf. Figure 4-6). La comparaison a été réalisée pendant la période allant du 1983/07/10 au 1983/07/14 (période de mesure de niveau d'eau à proximité du pont de la Roque, cf. paragraphe 4.3.2).

La Figure 4-7 présente les séries temporelles du niveau d'eau. Les résultats TELEMAC sont en bon accord avec les prédictions du SHOM pour chaque port de référence. Une légère sous-estimation est observée à Granville, sans doute à cause d'une résolution insuffisante dans cette zone ou de la proximité de la frontière sud.

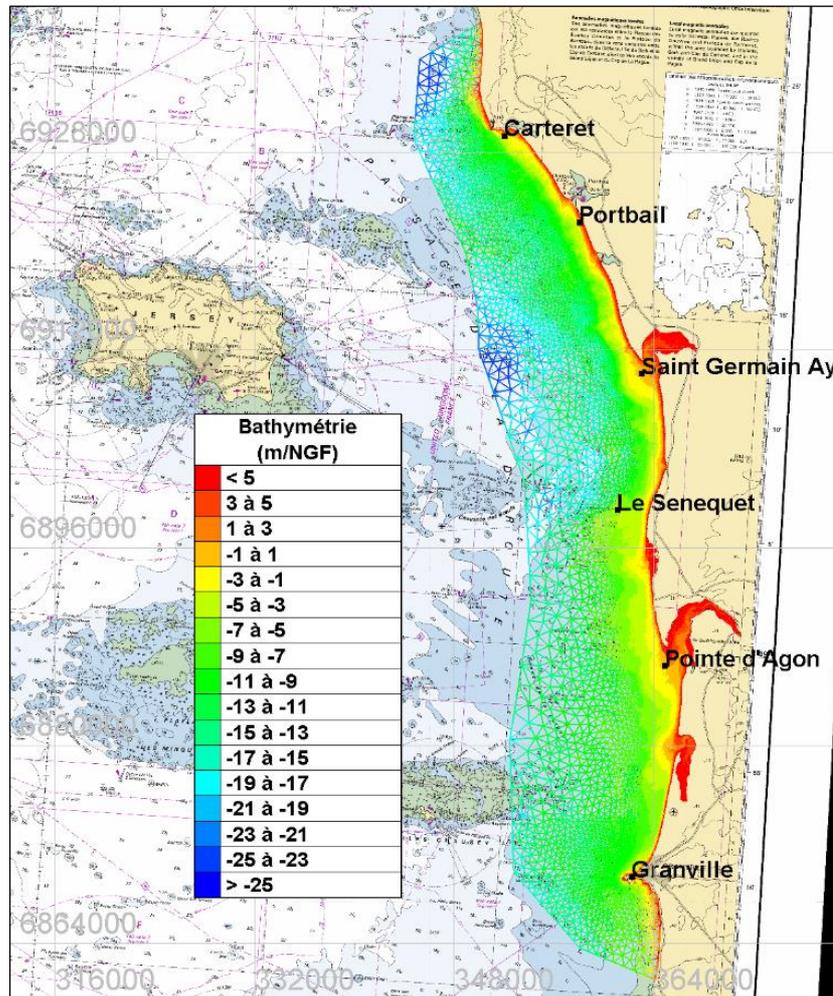


Figure 4-6 : Positions des 5 ports de référence du SHOM pour la validation en niveau d'eau.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

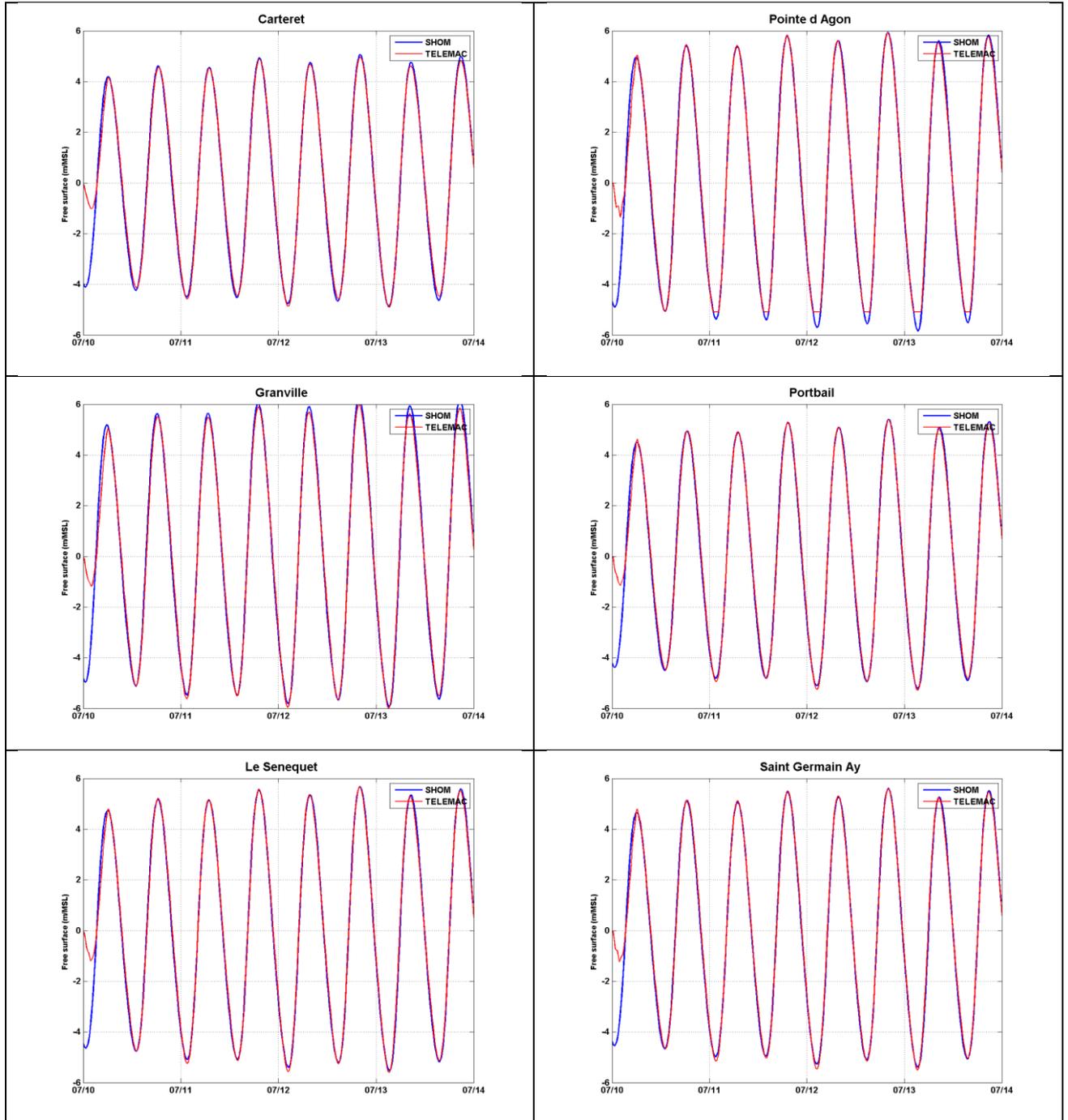


Figure 4-7 : Comparaison entre les niveaux d'eau prédits (SHOM) et modélisés (TELEMAC), pendant la période de mesure de niveau au Pont de la Roque (du 1983/07/10 au 1983/07/14). SHOM en bleu, résultats du modèle Telemac-2D en rouge.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

4.3.2 VARIATIONS DE NIVEAU D'EAU DANS LE HAVRE DE REGNEVILLE (MESURES IFREMER, 1983)

L'IFREMER a réalisé des mesures de niveaux d'eau dans le havre de Regnéville, le 12 juillet 1983, lors d'une marée de coefficient 96. Les positions des trois points de mesure sont présentées sur la Figure 4-8. Le plus en amont est situé à proximité du pont de la Roque.

La Figure 4-9 illustre la comparaison entre ces niveaux d'eau mesurés et les résultats du modèle Telemac2D obtenus dans des conditions similaires : le 12 juillet 1983, débit de la Seine nul, pas d'influence atmosphérique. Malgré une bathymétrie différente de celle de 1983 (LIDAR 2016), la comparaison met en évidence la capacité du modèle à reproduire la propagation du signal de marée dans le havre, avec un déphasage du signal au fur et à mesure qu'on remonte dans l'estuaire ainsi qu'une légère amplification du niveau en lien avec la forme en entonnoir de l'estuaire. On peut remarquer un déphasage plus important pour les résultats du modèle, peut-être lié au contexte morpho-sédimentaire différent en 1983 et en 2016, avec un schorre plus développé en 2016.

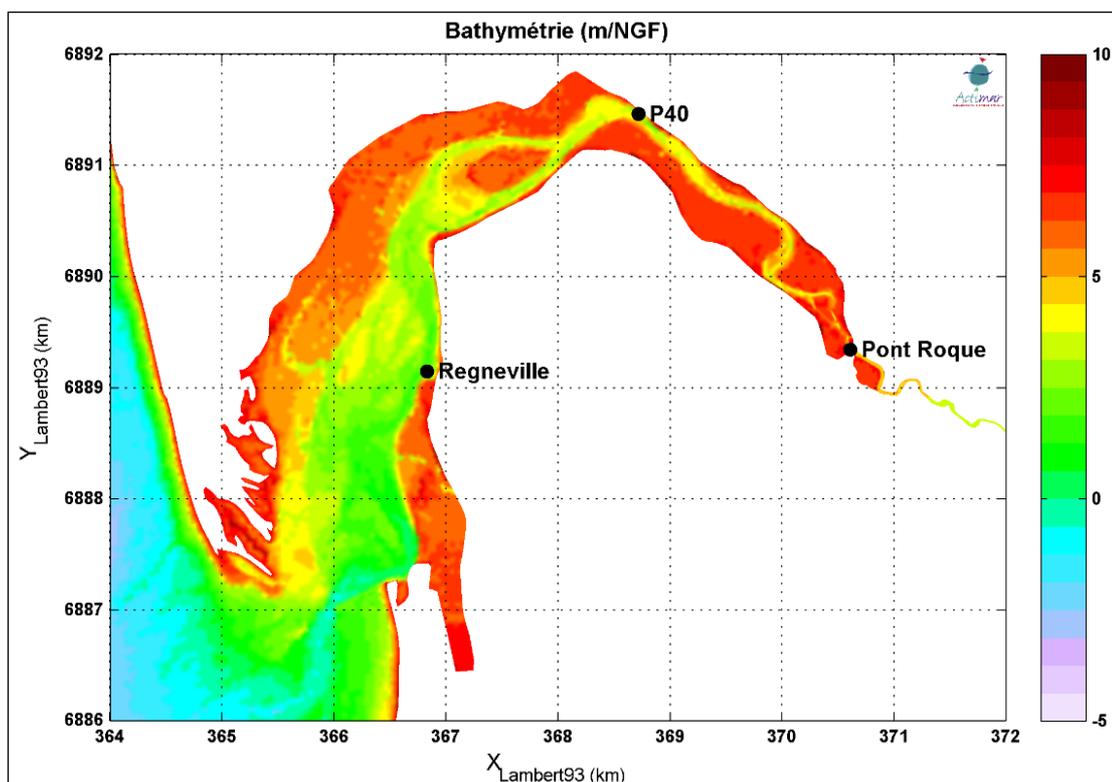


Figure 4-8 : Position des points mesures de niveaux d'eau dans le havre de Regnéville lors de la campagne réalisée par l'IFREMER en juillet 1983. La bathymétrie correspond au levé LIDAR de 2016.

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

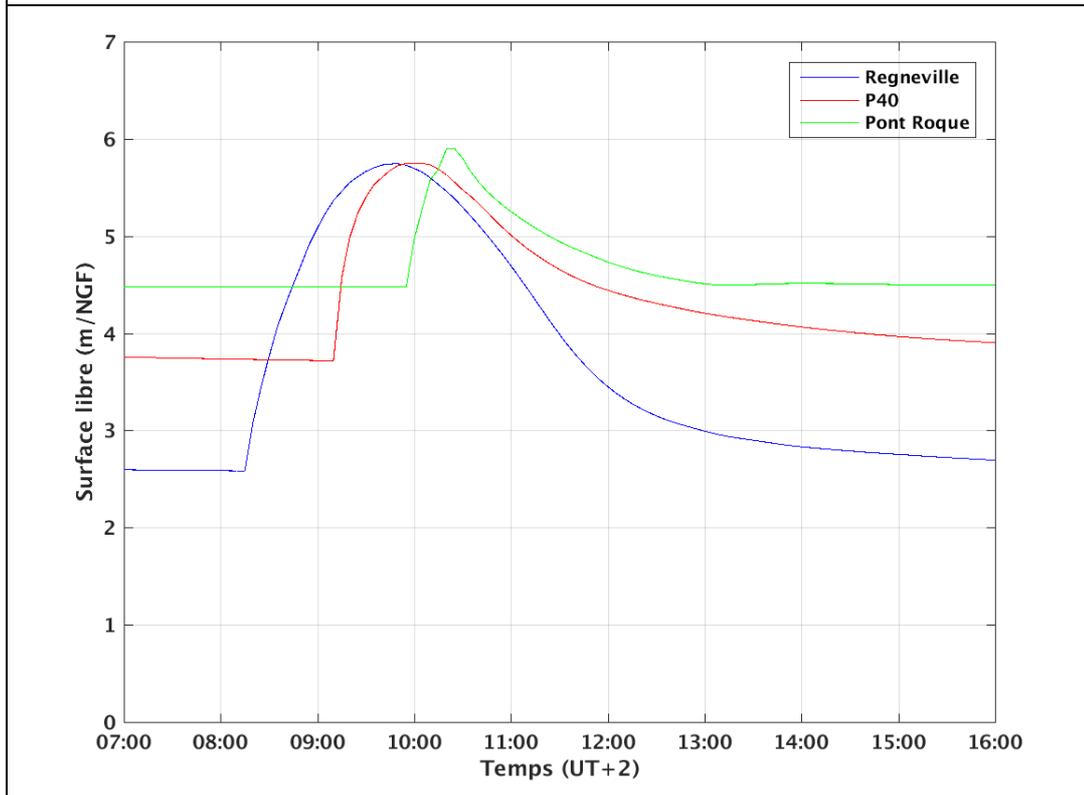
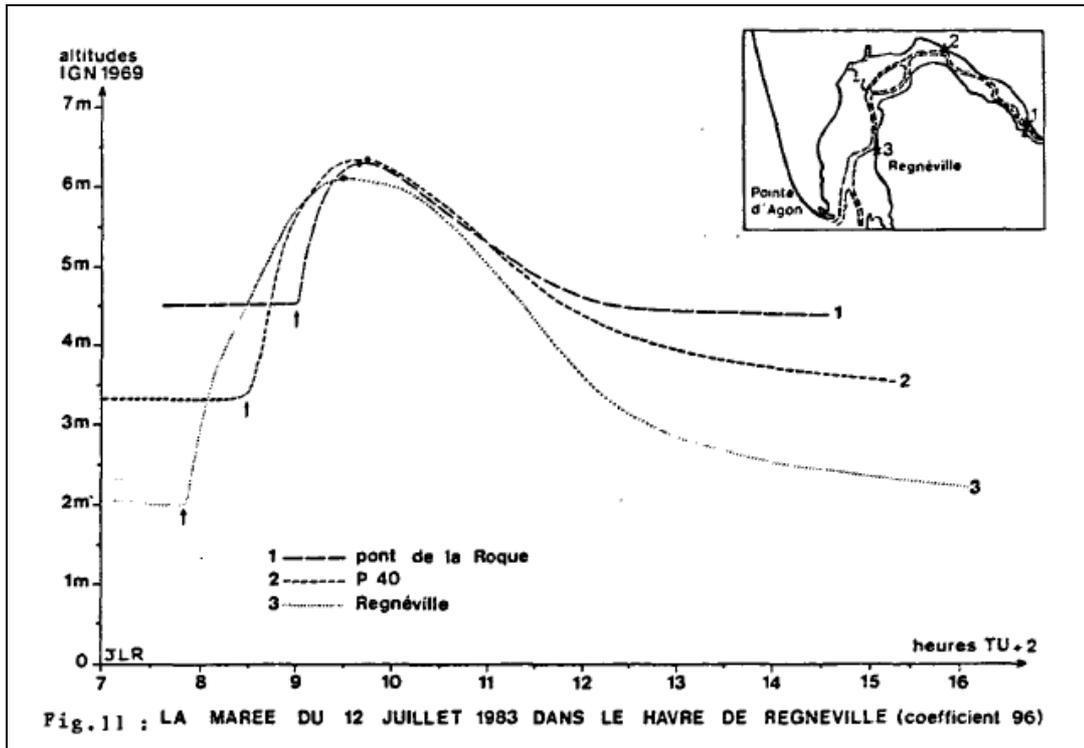


Figure 4-9 : Comparaison entre les niveaux d'eau mesurés dans le havre de Regnéville et les résultats du modèle Telemac2D, le 12 juillet 1983, pour les 3 points de mesures présentés sur la Figure 4-8.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

4.3.3 COURANT EN MER (CARTES MARINES SHOM)

Les informations de courant contenues sur les cartes marines 7156 et 7157 du SHOM sont issues de mesures in-situ et fournissent des conditions de marées moyennes de morte-eau et de vive-eau. Les points représentés sur la Figure 4-10 ont été utilisés par la comparaison avec les résultats du modèle Telemac2D. La Figure 4-11 montre les comparaisons des courants modélisés avec les informations figurant sur les cartes marines SHOM. Les résultats du modèle Telemac-2D sont en bon accord, parfois avec des intensités légèrement plus importantes (point H proche de la frontière) ou plus faibles (point F, résolution non adaptée).

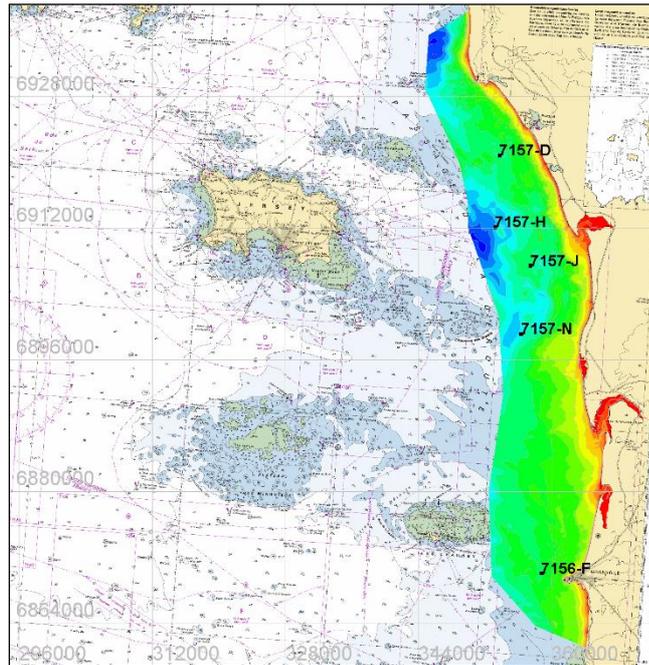


Figure 4-10 : Positions des points de courants de marée figurant sur les cartes marines SHOM 7156 et 7157 utilisés pour cette comparaison.

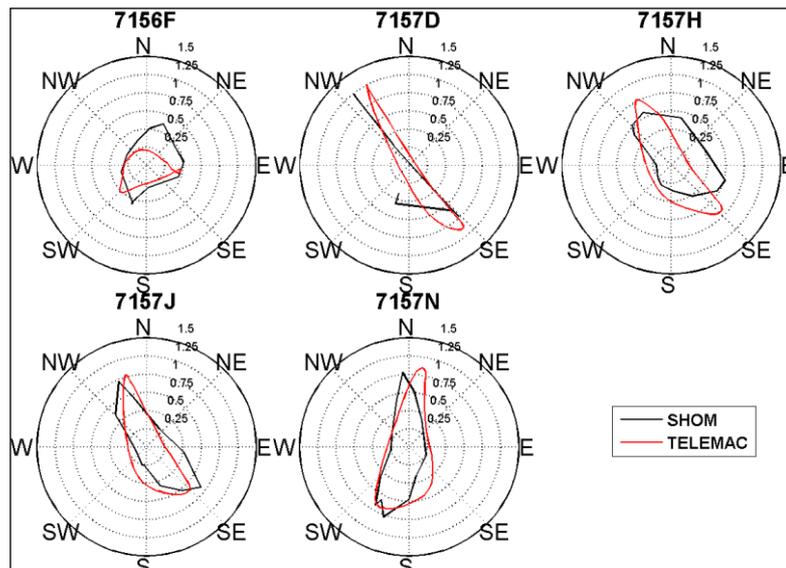


Figure 4-11 : Comparaison des roses de courant de marée issues des cartes marines SHOM (en noir) et issues des résultats du modèle Telemac-2D (en rouge), pour une marée moyenne de vive-eau, aux points localisés sur la Figure 4-10.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

4.3.4 COURANT EN MER (ATLAS SHOM)

L'atlas de courant de marée du SHOM est réalisé à partir de courants barotropes (2D) issus de modélisations 3D et validé par le SHOM avec les mesures disponibles. Il contient uniquement les valeurs de courants associées aux marées moyennes de morte-eau (C45) et de vive-eau (C95). Les points les plus proches, représentés sur la Figure 4-12, ont été sélectionnés pour la validation. La Figure 4-13 montre les comparaisons des résultats du modèle Telemac-2D avec les courants extraits de l'atlas de courant de marée du SHOM, pour les points sélectionnés devant le havre de Regnéville et pour une marée moyenne de vive-eau. Les résultats du modèle Telemac-2D sont en très bon accord avec cette source de données pour tous les points de comparaison, ce qui révèle à nouveau la validité du modèle dans la zone d'étude dont la particularité est d'avoir des courants de flot qui dominent largement (points 4 et 6).

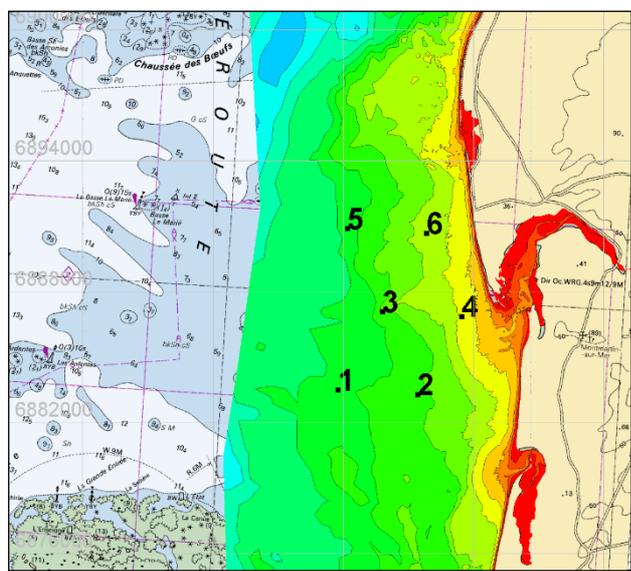


Figure 4-12 : Positions des points de grille de l'atlas de courants de marée du SHOM sélectionnés pour cette comparaison.

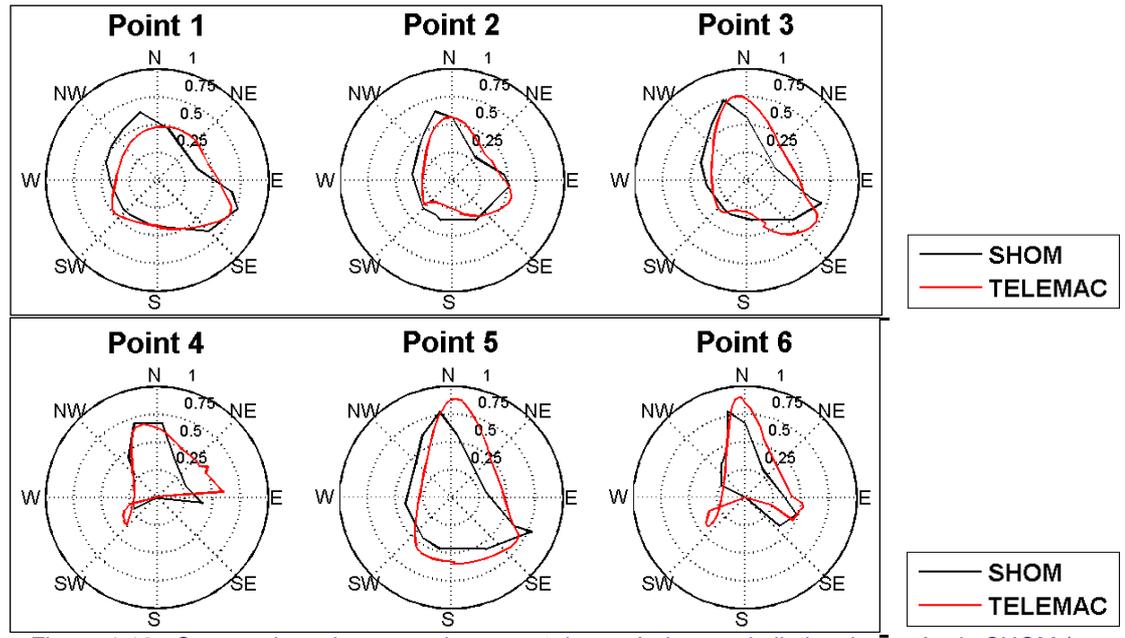


Figure 4-13 : Comparaison des roses de courant de marée issues de l'atlas de marée du SHOM (en noir) et issues des résultats du modèle Telemac-2D (en rouge), pour une marée moyenne de vive-eau, aux points localisés sur la Figure 4-12.

## 4.4 REANALYSE FINE DES CONDITIONS D'ETATS DE MER A LA COTE SUR LA PERIODE 1994-2016

### 4.4.1 PRINCIPE ET OBJECTIFS

Bien que la base de données HOMERE (cf. 4.2.1.2) permette de forcer le modèle par des spectres d'états de mer au large, elle ne possède toutefois pas une résolution spatiale suffisante pour être exploitée directement aux abords du havre de Regnéville. En effet, dans cette zone, la résolution spatiale d'HOMERE n'est que de 600-800 mètres et le havre n'est pas inclus dans la grille de calcul.

Par conséquent, afin de représenter correctement la propagation des états de mer, et le courant de dérive littorale qu'ils induisent dans cette région où le niveau d'eau varie très rapidement à cause du fort marnage, une base de données longue durée a été constituée. Le maillage à 90 m de résolution (cf. Figure 4-3) a été utilisé pour rejouer la période 1994-2016 et ainsi améliorer la précision des informations aux abords du havre. Sur ces 23 ans, les paramètres hydrodynamiques (courant, niveau d'eau), d'états de mer (Hs, Tp, direction) et sédimentaires (transport littoral) ont été calculés, puis sauvegardés toutes les heures. Ils permettent :

- de dégager des premières tendances sur le comportement hydrodynamique et sédimentaire du site,
- de caractériser des périodes plus ou moins longues d'évènements caractéristiques pour l'étude morphodynamique par la suite.

### 4.4.2 INTERACTIONS VAGUES-COURANT

Dans les régions côtières, les processus dominants sont principalement la marée, les états de mer et les surcotes (tempêtes). Les interactions se produisent entre ces différentes ondes dans la mesure où la marée et les surcotes modifient le niveau d'eau et les courants sur lesquels se propagent les vagues. La marée est une onde longue dont la période est de plusieurs heures. Les houles et mers du vent ont des périodes de plusieurs secondes. Donc, du point de vue des états de mer, les courants de marée sont perçus comme des variations quasi stationnaires.

#### ➤ Effets des vagues sur le courant

Les transferts d'énergie des vagues vers le plan d'eau se produisent au travers des tensions de radiation. Cette énergie additionnelle induit un courant de dérive littorale (et une surélévation du niveau moyen) ; cet effet n'est perceptible que très près du rivage, dans la bande de déferlement des vagues.

#### ➤ Effets des courant sur les vagues

Les effets des courants sur les vagues sont assez complexes et plusieurs mécanismes d'interactions sont impliqués :

- Le décalage Doppler. L'effet d'un courant stationnaire sur la fréquence intrinsèque (relative) des vagues. Les vagues ayant la même période apparente (absolue) auront une période intrinsèque plus longue pour un courant dans le même sens de propagation et plus courte pour un courant opposé.

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

---

- La réfraction par le courant. Les effets de la réfraction bathymétrique sont simples à identifier, faisant tourner les vagues perpendiculairement au rivage. Mais la réfraction par le courant a un effet plus subtil ; elle dépend de la variation spatiale des courants, selon leur augmentation ou leur diminution vers la côte. Les vagues tendent à s'orienter selon la direction des courants.
- La modulation de la fréquence absolue par des courants instationnaires et la modulation de la fréquence intrinsèque par propagation sur des gradients spatiaux de courant.
- L'augmentation de la cambrure des vagues pour un courant opposé induite par une longueur d'onde plus courte et une augmentation de la hauteur significative par conservation de l'action des vagues.
- L'effet du cisaillement vertical du courant sur le déferlement des vagues. Pour la présente étude, le courant de marée n'est pas concerné par ces interactions puisqu'il n'a pas de cisaillement vertical.
- La génération des vagues par le vent : le vent effectif qui s'applique est la vitesse relative du vent par rapport au plan d'eau (qui tient compte du courant de surface).

Dans TOMAWAC, le champ de courant est fourni par TELEMAC à une fréquence donnée (toutes les 30 secondes ici étant donné le fort marnage, induisant une rapide montée du niveau de la mer qui influence fortement la propagation des états de mer) et en chaque point de la grille de calcul. TOMAWAC représente les principaux processus présentés précédemment (décalage Doppler, réfraction, modulation de fréquence). La dissipation par forts courants (wave-blocking) est paramétrée selon la formulation de Van der Westhuysen (2012). En effet, un courant opposé ralentit les vagues, ce qui conduit à une augmentation de leur cambrure, voire même au déferlement. Un comportement étrange des spectres de vagues peut alors être observé dans les zones de forts courants, conduisant à une augmentation de l'énergie des vagues pour les hautes fréquences et à une instabilité de la période. L'amélioration des résultats du modèle est significative : les spectres sont mieux représentés et les périodes sont plus réalistes. Cependant, cette paramétrisation introduite pour représenter la dissipation des vagues par forts courants est une approche empirique qui nécessiterait des efforts de validation supplémentaires avec des mesures appropriées.

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

### 4.4.3 VALIDATION DE LA REANALYSE FINE DES ETATS DE MER

Tout comme l'étape de validation du modèle hydrodynamique (cf. paragraphe 4.3), la validation de la réanalyse fine des états de mer est également cruciale pour représenter correctement les interactions vagues/courant influençant les processus morphodynamiques littoraux à l'embouchure du havre de Regnéville. Des tests de sensibilité ont donc été menés pour obtenir les meilleures performances du modèle par confrontation aux informations de validation disponibles.

Les données de référence sur lesquelles se base la validation de la réanalyse fine des états de mer sont :

- La campagne de mesures AGMD01 réalisée du 5 juin au 6 juillet 2004 et exploitée pour les besoins des travaux de thèse de Nicolas Robin (2007). Un houlographe/courantomètres a mesuré les paramètres hydrodynamiques et d'états de mer sur cette période. Les données brutes n'étant pas disponibles, elles ont été digitalisées à partir du manuscrit de thèse pour les besoins de cette étude. La position exacte de l'appareil de mesure n'est pas connue ; le point présenté sur la Figure 4-14 a été utilisé pour les comparaisons.
- La réanalyse numérique MARS2D Manche-Ouest, réalisée par l'IFREMER sur la période 2006-2018, fournit les paramètres hydrodynamiques toutes les 15 minutes à une résolution de 250 m. Les données n'étant pas disponibles lors de la période de mesure en 2004, la comparaison a été réalisée en 2014, du 4 juin au 4 juillet.

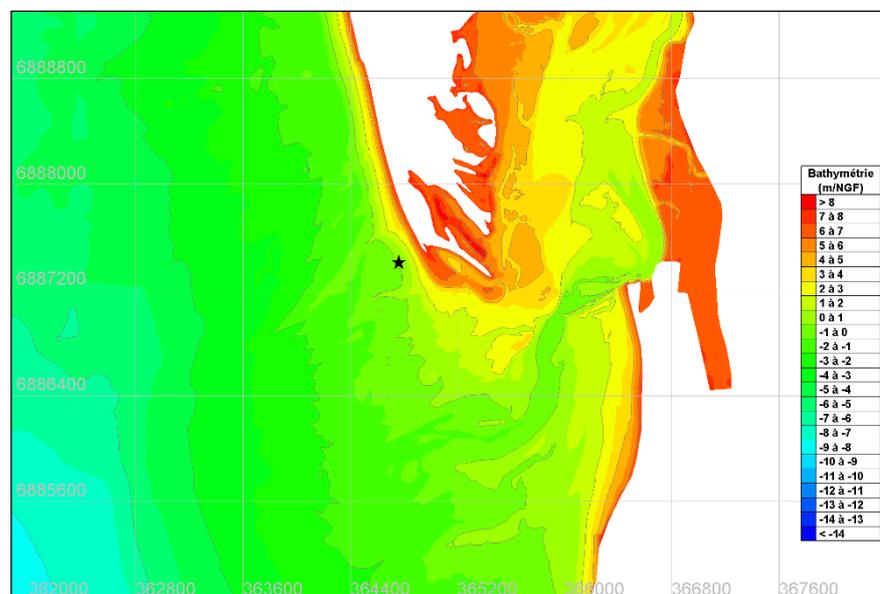


Figure 4-14 : Position du point de comparaison pour la validation de la réanalyse fine des états de mer (étoile noire).

La sensibilité du modèle a été évaluée par rapport à ces données de référence, et en complément des tests de sensibilité réalisés lors de l'étape de calibration hydrodynamique (cf. paragraphe 4.3). Des tests additionnels spécifiques au couplage entre les courants et les états de mer ont été menés avant de produire cette base de données longue durée. Ils portent principalement sur :

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

- La période de couplage entre le courant et les états de mer,
- La réfraction des états de mer par les courants,
- La résolution spatiale,
- La diffusion horizontale,
- L'influence du vent.

L'ensemble des tests réalisés ne sont pas détaillés ici. Cette section présente les comparaisons entre les différentes sources de données de référence et les résultats de modélisation obtenus avec le paramétrage optimal. Ce paramétrage est décrit au paragraphe 4.4.4.

4.4.3.1 Courant de marée (réanalyse MARC-IFREMER)

La Figure 4-15 illustre la comparaison réalisée entre d'une part les résultats de la réanalyse fine des états de mer Telemac2D produite pour cette étude, et d'autre part les résultats de la réanalyse MARC-IFREMER. On remarque une différence dans la bathymétrie des modèles car les hauteurs d'eau ne sont pas exactement identiques, ce qui peut provenir soit de la différence de résolution entre les deux modèles, soit des sources de données utilisées. Les évolutions du courant sont cohérentes avec cet écart de bathymétrie et l'intensité et la direction du courant sont en phase et en accord entre les deux modèles.

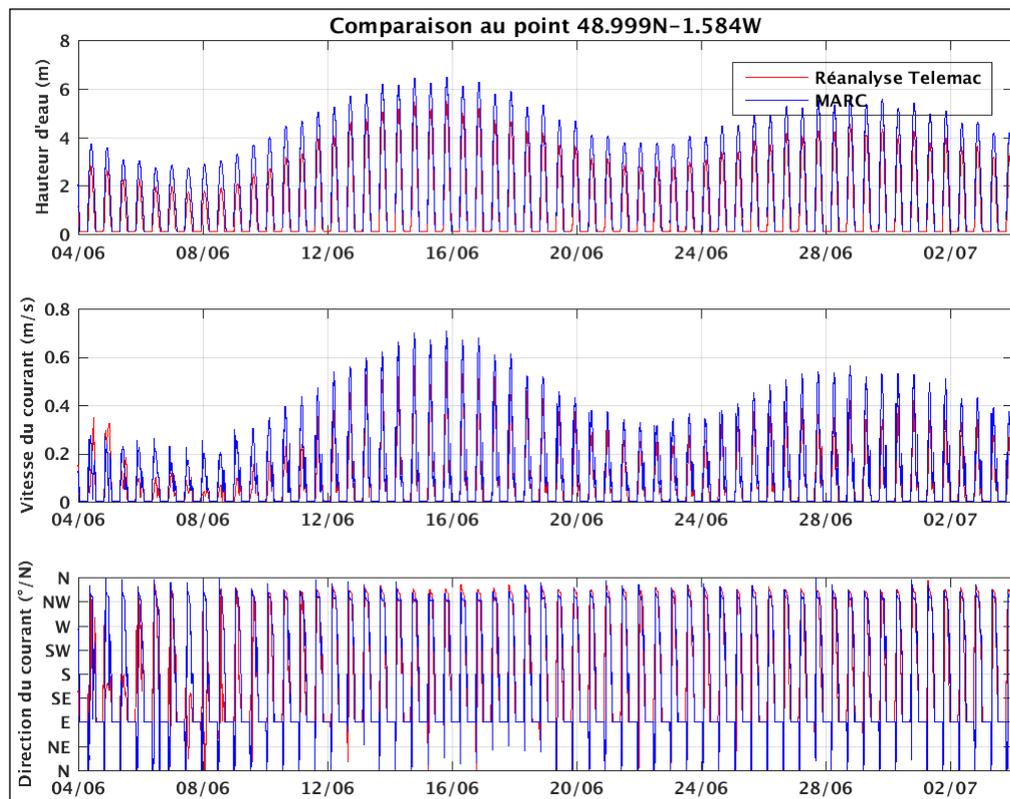


Figure 4-15 : Comparaison hydrodynamique au point de mesure du 04/06/2014 au 04/07/2014. Evolutions temporelles de la hauteur d'eau (en haut, en mètres), de l'intensité du courant (au milieu, en m/s) et de sa direction (en bas, portant vers). Les résultats de la réanalyse fine des états de mer Telemac2D sont en rouge, les résultats de la réanalyse MARC-IFREMER sont en bleu.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

4.4.3.2 Courant de marée et états de mer (mesures thèse N. Robin 2007)

Les Figure 4-16 et Figure 4-17 illustrent les comparaisons réalisées entre les mesures in-situ acquises dans le cadre de la thèse de N. Robin et les résultats de la réanalyse fine des états de mer produite pour cette étude.

En ce qui concerne l'hydrodynamique (Figure 4-16), il semble également y avoir une différence dans la bathymétrie, ce qui peut s'expliquer par la position inconnue du point de mesure et/ou provenir soit de la résolution du modèle, soit d'une bathymétrie non représentative de la période d'acquisition des mesures (2004). Les évolutions du courant sont cohérentes avec cet écart de bathymétrie et l'intensité et la direction du courant sont en phase et en accord. Le modèle semble toutefois sous-estimer le courant aux alentours du 8-9 juin et le surestimer le 24 juin.

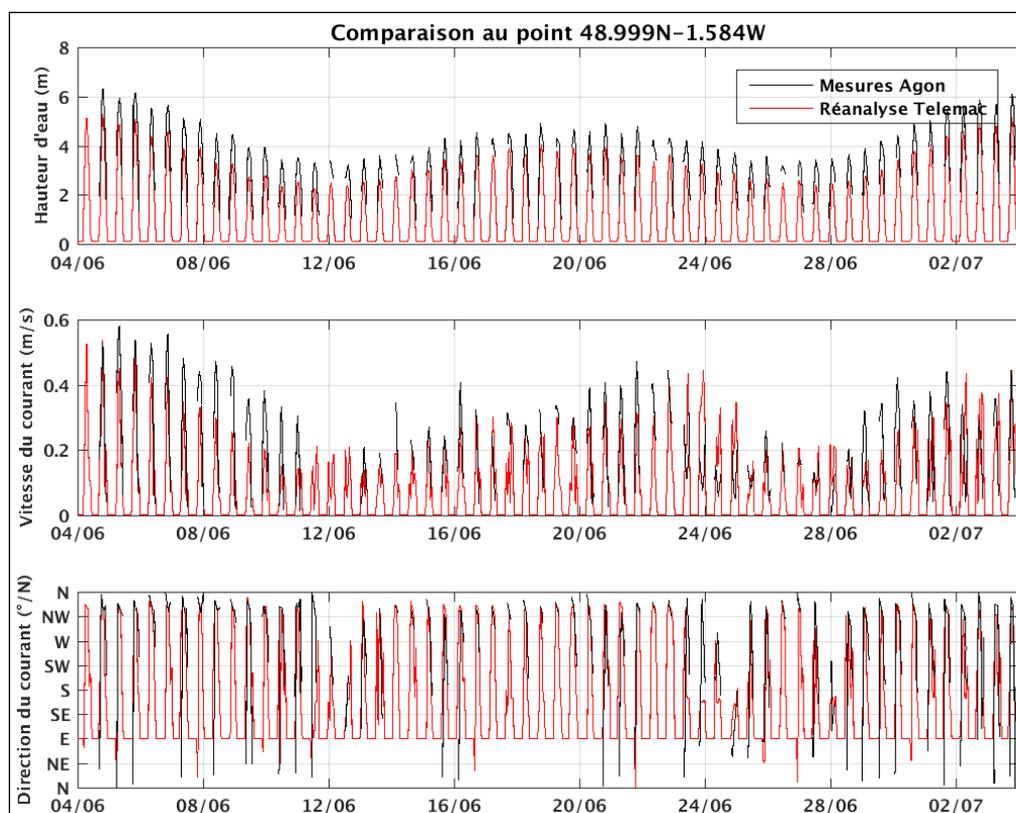


Figure 4-16 : Comparaison hydrodynamique au point de mesure du 04/06/2004 au 04/07/2004. Evolutions temporelles de la hauteur d'eau (en haut, en mètres), de l'intensité du courant (au milieu, en m/s) et de sa direction (en bas, portant vers). Les résultats de la réanalyse fine des états de mer Telemac2D sont en rouge, les mesures in-situ en noir.

Pour les états de mer (Figure 4-17), on constate un très bon accord de la réanalyse fine des états de mer avec les mesures : la hauteur significative et la direction sont correctement représentées, avec la modulation par le signal de marée. C'est un peu moins évident pour les périodes, qui est un paramètre plus délicat à comparer (plusieurs définitions et méthodes de traitement de la mesure). La réanalyse HOMERE de l'IFREMER sous-estime certains événements intenses (autour du 24 juin) du fait de sa résolution spatiale insuffisante dans cette zone.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

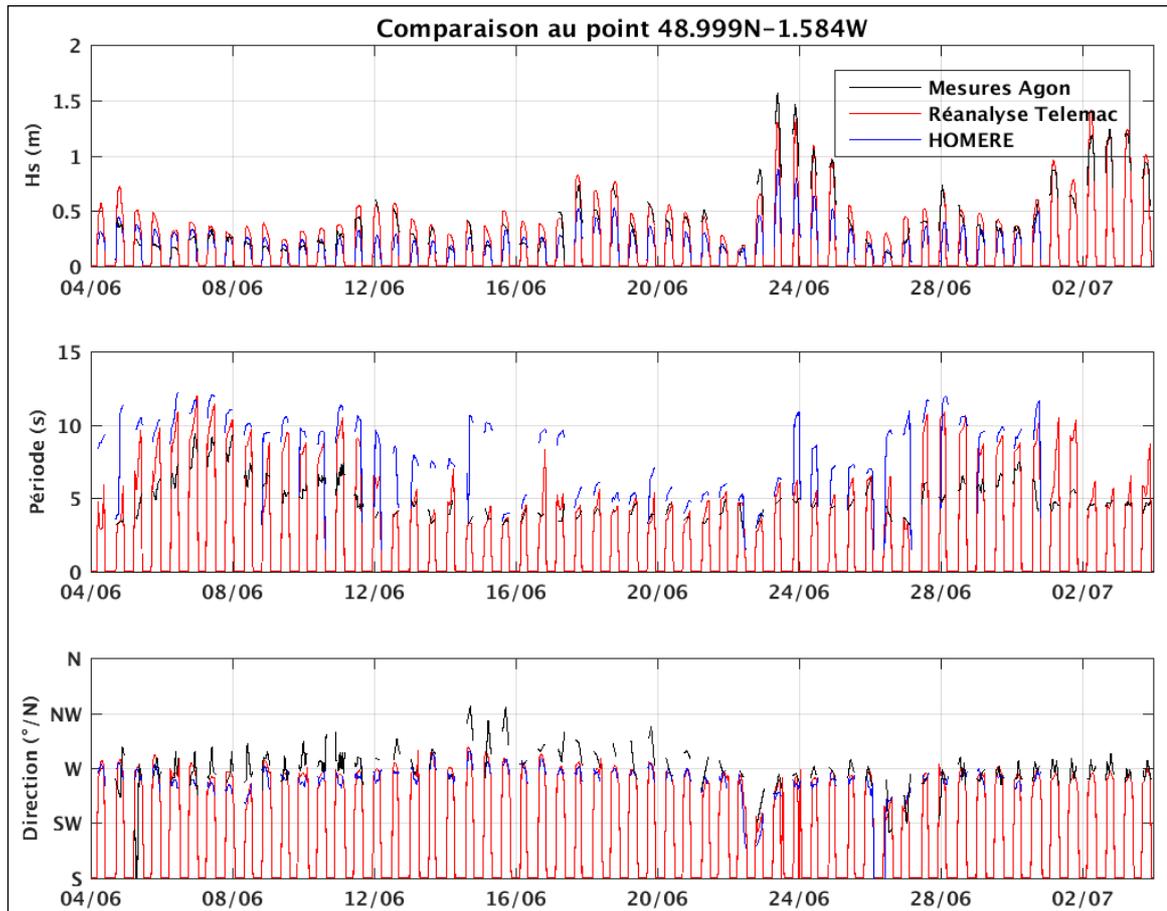


Figure 4-17 : Comparaison des états de mer au point de mesure du 04/06/2004 au 04/07/2004. Evolutions temporelles de la hauteur significative (en haut, en mètres), de la période des vagues (au milieu, en secondes) et de la direction de provenance (en bas). Les résultats de la réanalyse fine des états de mer Telemac2D sont en rouge, les mesures in-situ en noir et les résultats de la réanalyse HOMERE en bleu.

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

---

#### 4.4.4 PARAMETRAGE FINAL DES MODELES HYDRODYNAMIQUE ET D'ETATS DE MER

A l'issue des tests réalisés durant la phase de calibration du modèle hydrodynamique et de la réanalyse fine des états de mer, le paramétrage final adopté pour la suite de l'étude est le suivant :

- Conditions aux limites de marée : les variations spatio-temporelles du niveau d'eau sont calculées à partir de l'atlas PREVIMER Manche-Ouest (IFREMER, cf. 4.2.1.3) et imposées en chaque point de la frontière maritime du modèle à chaque pas de temps.
- Conditions atmosphériques : les champs horaires de vent (intensité et direction) et de pression atmosphérique (baromètre inverse) sont imposés en chaque point de la grille de calcul et à chaque pas de temps (interpolations spatio-temporelles) à partir de la base de données CFSR.
- La paramétrisation du frottement est de type longueur de rugosité, bien adaptée dans le cadre de la modélisation hydro-sédimentaire. Le paramètre de Nikuradse ( $k_s$ ) est de 1 cm sur tout le domaine d'étude.
- La viscosité turbulente horizontale est calculée selon le modèle de Smagorinsky.

Le pas de temps numérique est déterminé selon la résolution du maillage utilisé et la vitesse maximale des courants de manière à satisfaire les conditions de stabilité numérique du critère CFL (Courant-Friedrichs-Levy).

Le paramétrage du modèle d'états de mer est le suivant :

- Conditions aux limites : les spectres 2D (fréquence/direction) horaires sont imposés en chaque point de la frontière maritime du modèle et à chaque pas de temps, à partir des 11 spectres extraits de la base de données HOMERE (interpolations spatio-temporelles) présentés sur la Figure 4-2.
- Conditions atmosphériques : les champs horaires de vent (intensité et direction) sont imposés en chaque point de la grille de calcul et à chaque pas de temps (interpolations spatio-temporelles) à partir de la base de données CFSR. Les échanges atmosphériques incluent la génération des états de mer par le vent, les interactions non-linéaires et la dissipation d'énergie par moutonnement.
- Frottement sur le fond.
- Déferlement bathymétrique.
- Réfraction / shoaling.
- Réfraction par les courants (« wave blocking »).

**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

La Figure 4-18 présente le schéma de principe du système de modélisation mis en place.

Il s'est avéré que la fréquence de couplage entre les modèles hydrodynamique et d'états de mer est un paramètre crucial vis-à-vis de la représentativité des résultats et de la stabilité numérique du modèle. Le modèle d'états de mer est appelé toutes les 30 secondes, ce qui très fréquent mais nécessaire dans cette zone caractérisée par un fort marnage et donc par une montée très rapide du niveau d'eau sur lequel se propage les états de mer. Ces variations très rapides et simultanées des profondeurs et des états de mer confèrent une difficulté supplémentaire pour leur simulation à proximité de la ligne d'eau. Cette condition particulière implique des temps de calcul importants qui peut contraindre la durée des simulations morphologiques.

Le couplage entre les modèles hydrodynamique et sédimentaire est réalisé à chaque pas de temps (quelques secondes), dépendant de la résolution du maillage utilisé.

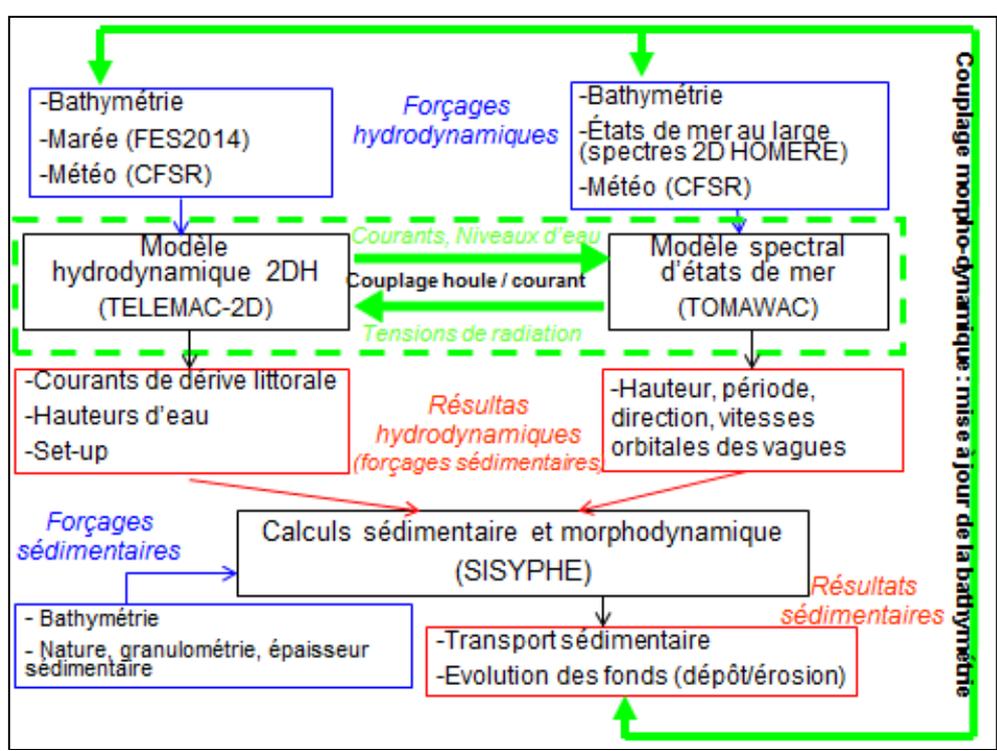


Figure 4-18 : Schéma de principe du système de modélisation, illustrant les couplages (en vert) entre les différents modèles (en noir), les données nécessaires à leur fonctionnement (en bleu) et les résultats produits (en rouge).

#### 4.4.5 ESTIMATION DE LA VARIABILITE DES CONDITIONS DE DERIVE LITTORALE

A partir de la réanalyse fine des états de mer mise en place et validée dans les paragraphes précédents, plusieurs points de la grille de calcul ont été sélectionnés pour estimer la variabilité des conditions de dérive littorale : en particulier les points 1, 2, 5 et 6 représentés sur la Figure 4-19. La formulation empirique suivante a été utilisée pour réaliser cette estimation, et fournit au premier ordre une quantité proportionnelle au transport solide induit par la dérive littorale. Cette formulation fait apparaître la hauteur significative des vagues  $H_s$  et leur angle d'incidence par rapport au trait de côte  $\alpha$  :

$$= \text{fonction} \left( H_s^5 * \sin(2\alpha) \right)$$

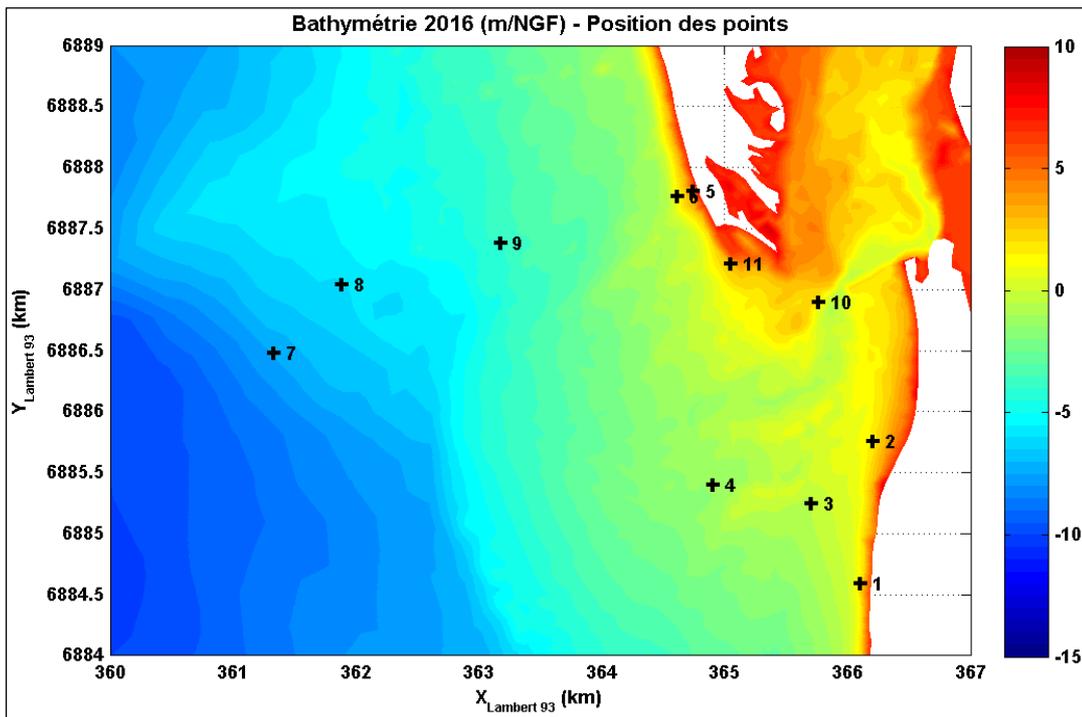


Figure 4-19 : Position des points de la grille de calcul sélectionnés pour estimer la variabilité des conditions de dérive littorale.

Les figures suivantes illustrent l'estimation horaire du transport solide obtenue à partir de cette formulation pour les points 1 (Figure 4-20), 2 (Figure 4-21), 5 (Figure 4-22) et 6 (Figure 4-23) et pour différentes incidences perpendiculaires au trait de côte selon la position des points par rapport à l'orientation du trait de côte. Les moyennes glissantes sur 365 jours appliquées au transport instantané (courbes rouges) permettent d'évaluer la variabilité saisonnière et/ou interannuelle. On peut voir qu'elle est relativement marquée à certaines périodes. Le transport solide résiduel ou cumulé est représenté par des courbes vertes qui donnent une indication sur la tendance à l'orientation des déplacements sédimentaires.

Pour les points 1 et 2, on retrouve bien un transport résiduel orienté vers le Nord le long du littoral d'Hauteville vers l'embouchure, tandis que pour les points 5 et 6, il est orienté vers le Sud, vers la pointe d'Agon.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

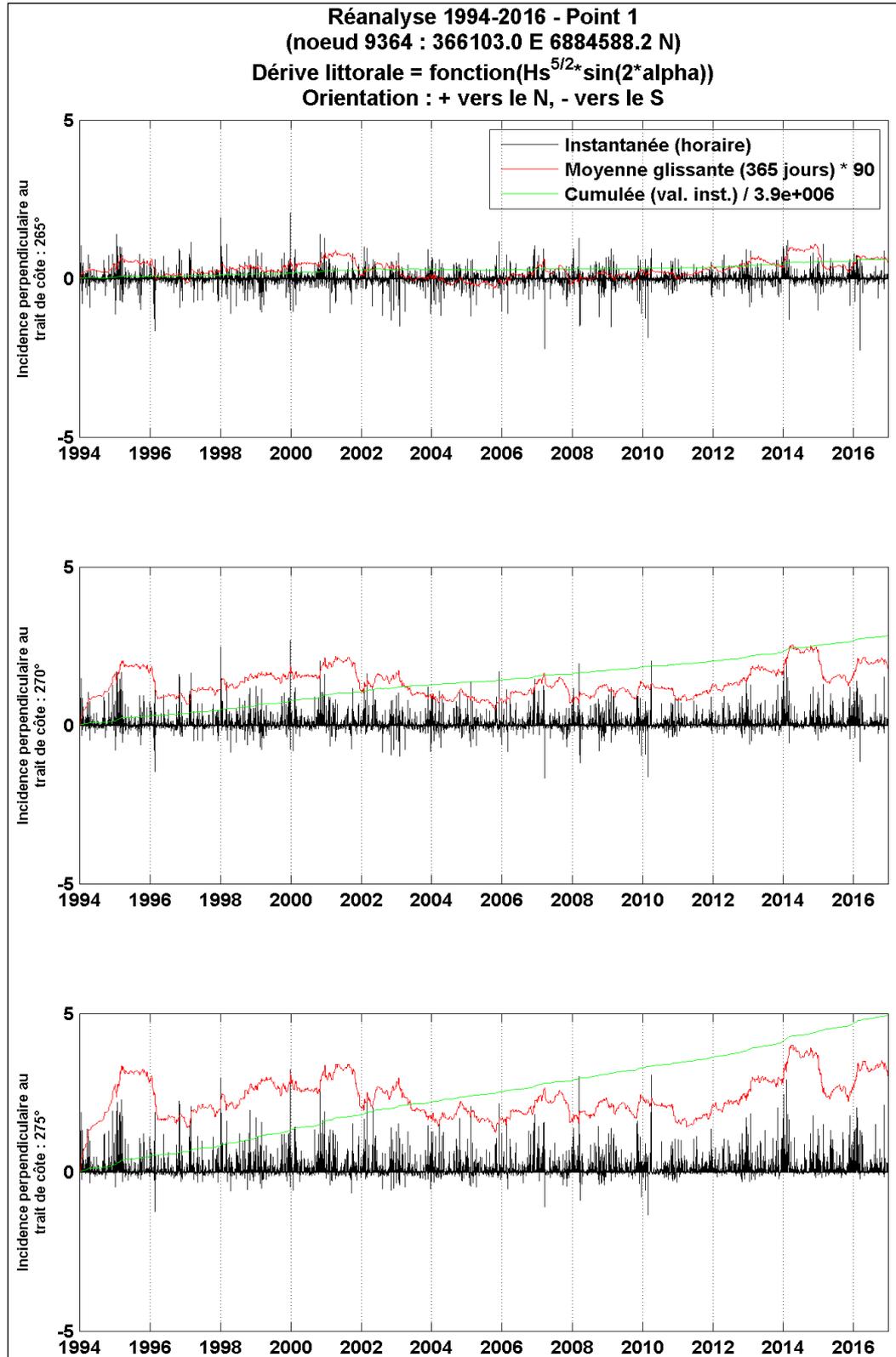


Figure 4-20 : Estimation de la variabilité des conditions de dérive littorale à partir de la réanalyse fine des états de mer (1994-2016) pour le point 1 (cf. Figure 4-19) et pour différentes incidences perpendiculaires au trait de côte : 265° (en haut), 270° (au milieu) et 275° (en bas). En noir : estimation du transport solide instantané ; en rouge : moyenne glissante sur 365 jours du transport solide instantané ; en vert : transport solide instantané cumulé. Transport positif vers le Nord, négatif vers le Sud.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

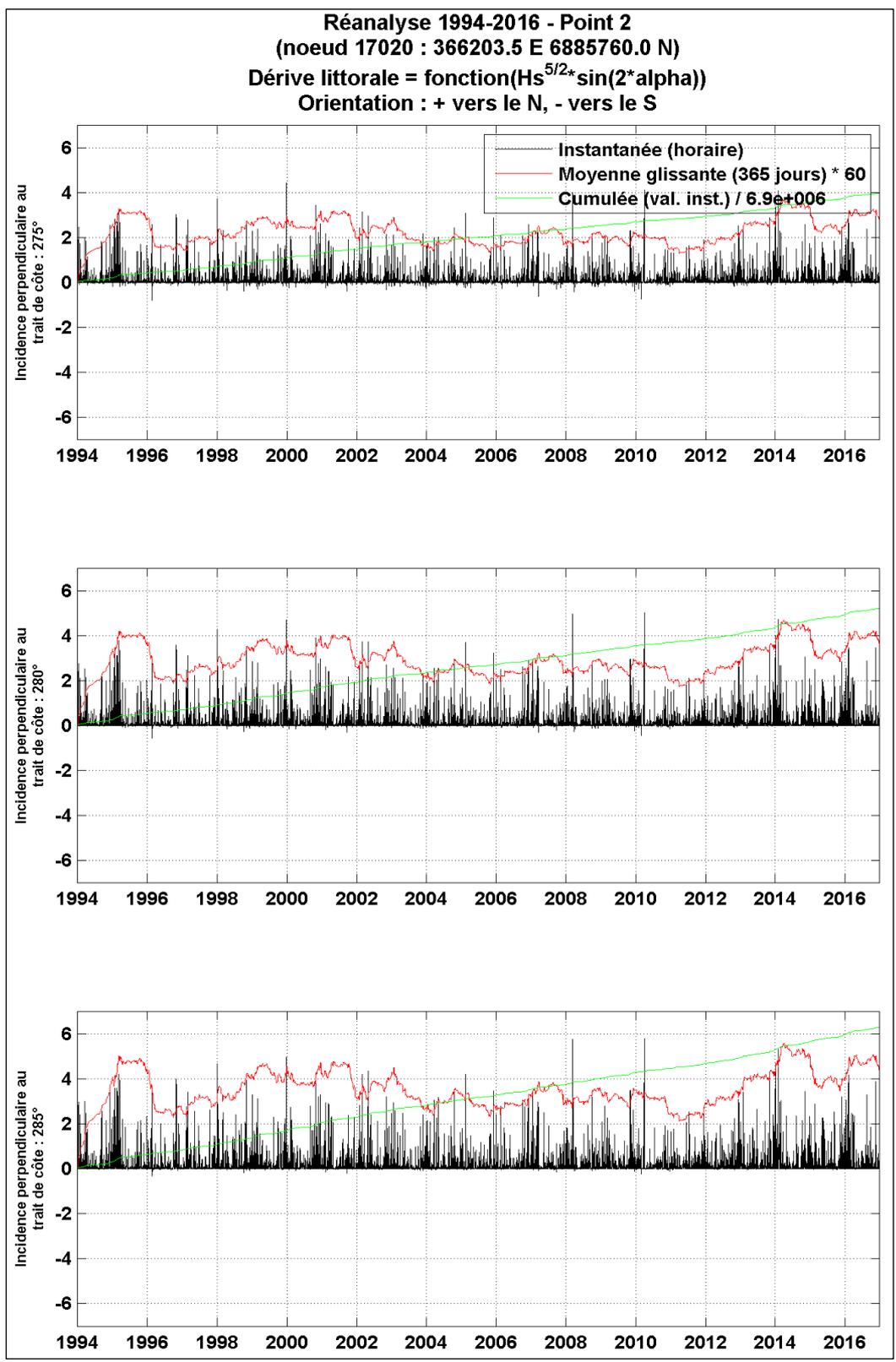


Figure 4-21 : Estimation de la variabilité des conditions de dérive littorale à partir de la réanalyse fine des états de mer (1994-2016) pour le point 2 (cf. Figure 4-19) et pour différentes incidences perpendiculaires au trait de côte centrées sur le secteur Ouest : 275° (en haut), 280° (au milieu) et 285° (en bas). En noir : estimation du transport solide instantané ; en rouge : moyenne glissante sur 365 jours du transport solide instantané ; en vert : transport solide instantané cumulé. Transport positif vers le Nord, négatif vers le Sud.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

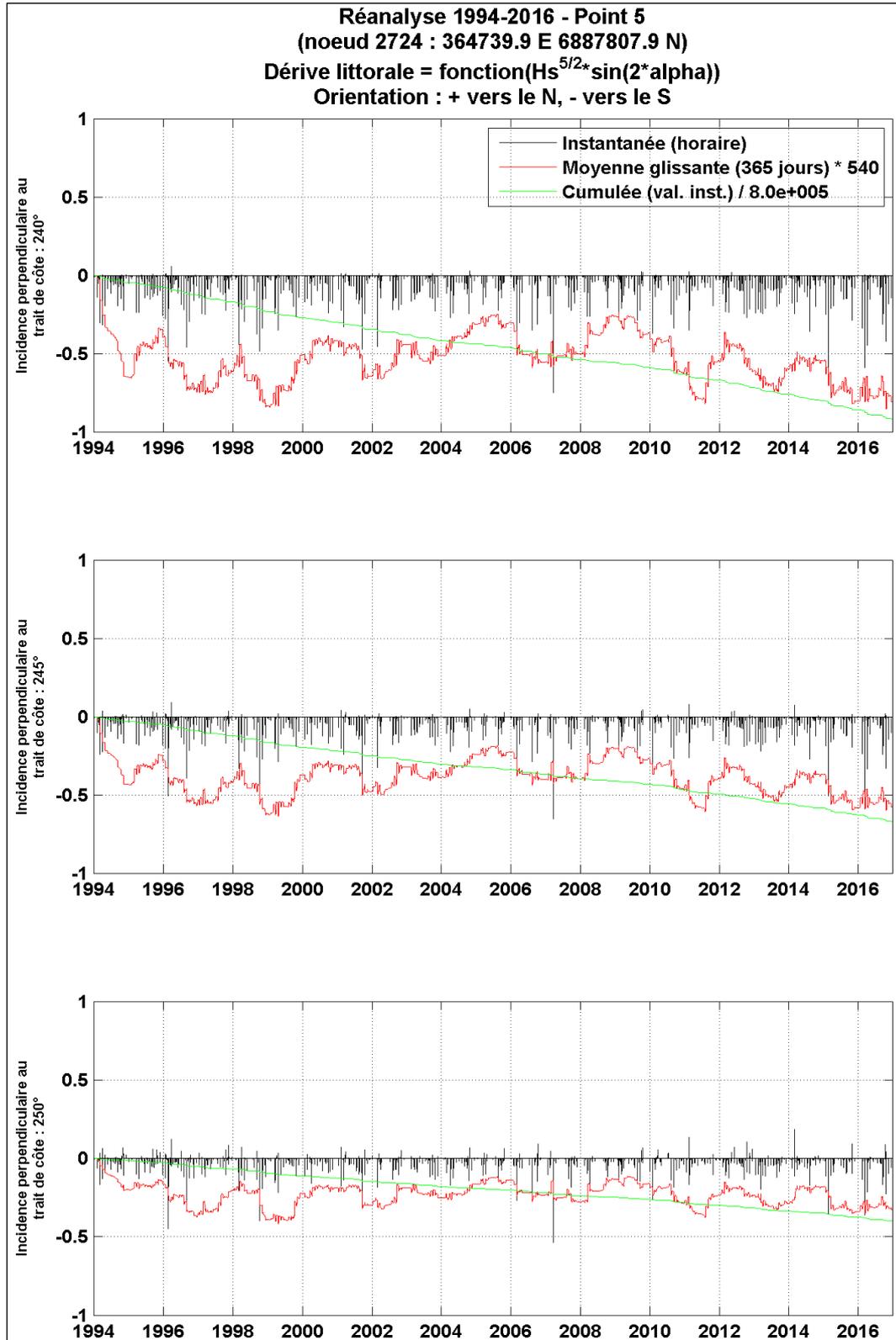


Figure 4-22 : Estimation de la variabilité des conditions de dérive littorale à partir de la réanalyse fine des états de mer (1994-2016) pour le point 5 (cf. Figure 4-19) et pour différentes incidences perpendiculaires au trait de côte centrées sur le secteur Ouest : 240° (en haut), 245° (au milieu) et 250° (en bas). En noir : estimation du transport solide instantané ; en rouge : moyenne glissante sur 365 jours du transport solide instantané ; en vert : transport solide instantané cumulé. Transport positif vers le Nord, négatif vers le Sud.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

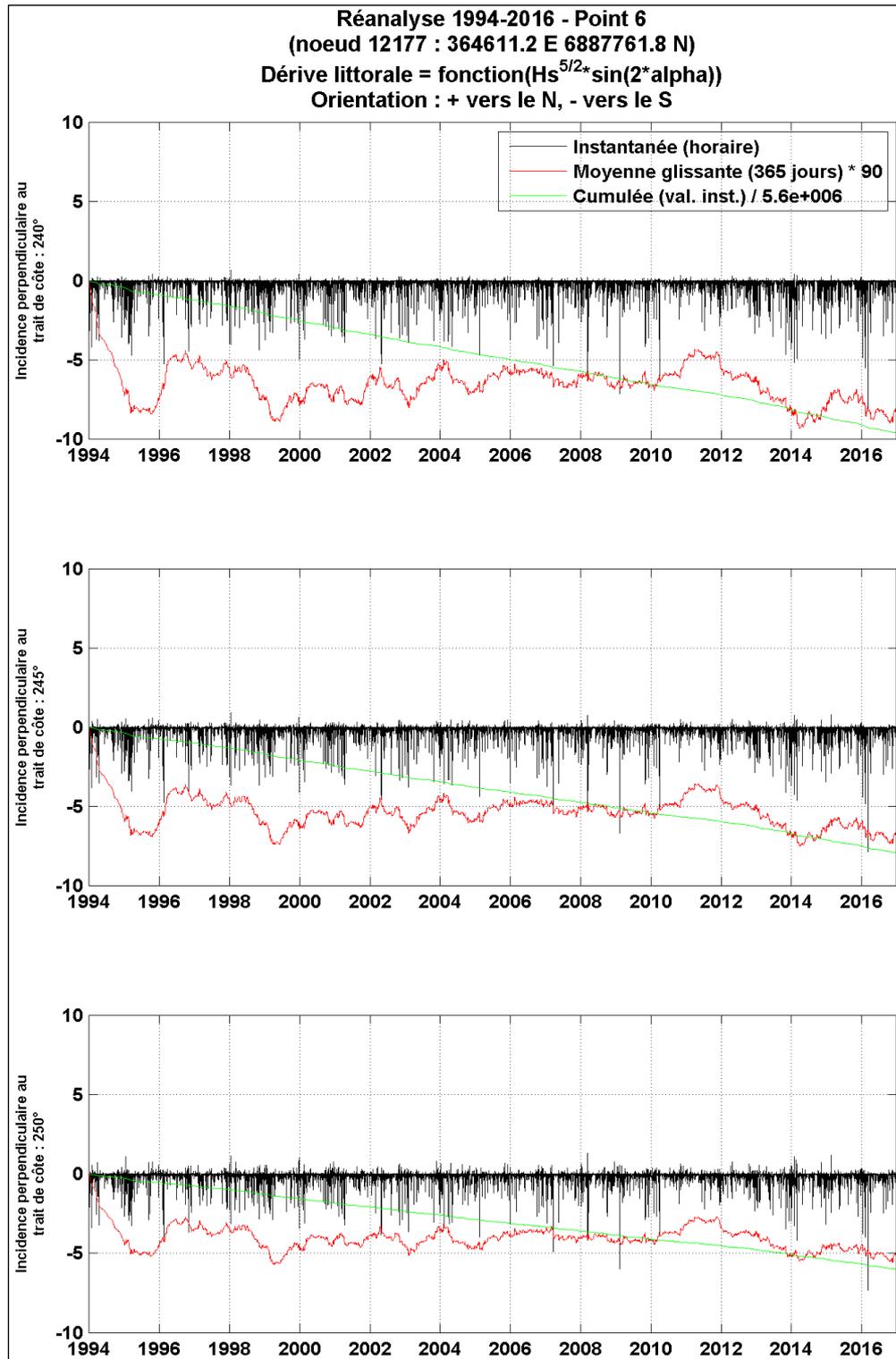


Figure 4-23 : Estimation de la variabilité des conditions de dérive littorale à partir de la réanalyse fine des états de mer (1994-2016) pour le point 6 (cf. Figure 4-19) et pour différentes incidences perpendiculaires au trait de côte centrées sur le secteur Ouest : 240° (en haut), 245° (au milieu) et 250° (en bas). En noir : estimation du transport solide instantané ; en rouge : moyenne glissante sur 365 jours du transport solide instantané ; en vert : transport solide instantané cumulé. Transport positif vers le Nord, négatif vers le Sud.

#### 4.5 VALIDATION DU MODELE SEDIMENTAIRE : EVOLUTIONS MORPHODYNAMIQUES PASSEES (RECENTES)

Cette étape vise à valider et éventuellement à calibrer la modélisation morphodynamique, pour reproduire les évolutions morphologiques de l'embouchure au cours de périodes passées.

Elle concerne principalement l'embouchure du havre de Regnéville où l'installation de la digue basse en 1988 a pu significativement modifier la dynamique sédimentaire du site et contraindre les évolutions morphologiques à l'embouchure. Cette période, qui a suivi la mise en place de la digue basse, est la plus intéressante pour la validation du modèle puisque les effets induits sont importants.

Ensuite, le modèle peut être exploité pour évaluer l'influence de différents aménagements sur les évolutions morphologiques futures de la zone de l'embouchure.

##### 4.5.1 PRINCIPE DU FACTEUR MORPHOLOGIQUE

Le facteur (accélérateur) morphologique est une approche largement utilisée pour simuler l'équivalent de longues périodes (typiquement plusieurs années) à partir de périodes plus courtes (typiquement plusieurs semaines). Une telle méthodologie est bien entendu une condition *sine qua non* de la modélisation physique dédiée aux évolutions morphologiques du fond marin au fil des années ou des décennies. Pour les modèles numériques, la méthodologie consiste à appliquer un facteur (morphologique) aux quantités d'érosion ou de dépôt calculées à chaque pas de temps morphodynamique (c'est-à-dire à chaque mise à jour du fond marin) du modèle. Les références de publications scientifiques sont généralement les suivantes (par exemple dans Cayocca, 1996, Modélisation morphodynamique d'une embouchure tidale : application aux passes d'entrée du bassin d'Arcachon, thèse de doctorat de l'université de Bordeaux) :

- Latteux, B., 1987, Modélisation du transport solide ; Méthodologie à long terme de l'évolution des fonds. Rapport LNHE-42/87.25, 85 pp.
- Latteux B., 1995. Techniques for long-term morphological simulation under tidal action, Marine Geology, Vol. 126, pp. 129-141.
- de Vriend H.J., 1993. Long term modelling of coastal Morphology, Coastal Engineering, N° 21, pp. 225- 269.

##### 4.5.2 SELECTION STATISTIQUES DES PERIODES MODELISEES

A partir d'une période de référence choisie, de durée relativement longue (période que l'on souhaite représenter), la méthode utilisée ici consiste à identifier une période cible plus courte, présentant statistiquement les mêmes caractéristiques hydrodynamiques (combinaisons marée/états de mer, tant en intensité qu'en direction) pour la dynamique des sédiments.

Pour chaque échéance de la réanalyse fine des états de mer, le calcul du transport solide selon Van Rijn (1993) est réalisé. Il fait intervenir les principales grandeurs hydrodynamiques et d'états de mer (niveau d'eau, courant, vitesse orbitale sur le fond, période pic, incidence de la houle).

Les distributions statistiques de ce transport solide sont calculées pour 2 incidences (NNO et SSE) pour la période de référence. Puis, nous recherchons une période cible de durée allant généralement de 15 jours à plusieurs mois, ayant la distribution statistique la plus proche de la période de référence, par balayage de la période de référence par fenêtre glissante (de largeur égale à celle de la période cible, avec un pas de glissement de 1 jour).

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

---

Une fois cette période cible identifiée, les forçages hydrodynamiques réalistes peuvent être utilisés pour alimenter une simulation morphodynamique sur cette période. Un facteur morphologique, correspondant au rapport entre la durée de référence et la durée de la période cible, est appliqué pour reproduire les évolutions morphologiques qui se seraient produites au cours de la période de référence.

#### 4.5.3 SCENARIOS SELECTIONNES

La méthode décrite dans le paragraphe précédent a été appliquée à un point de la base de données de la réanalyse fine des états de mer situé à l'ouest de la pointe d'Agon, à 364 611 E – 6 887 762°N. A cet endroit, la cote du modèle est d'environ 1.1 m NGF, et il a été sélectionné selon ce critère de faible profondeur de manière à avoir une approche conservatrice concernant les événements à fort coefficient de marée où la ligne atteint largement ce point. En effet, la morphodynamique de la flèche, mais aussi de toute l'embouchure, se produit principalement sur des niveaux d'eau hauts.

Etant donné que la réanalyse fine des états de mer ne couvre pas la période antérieure à l'installation de la digue basse, la méthode a été appliquée pour une période de référence couvrant toute la durée de la réanalyse fine des états de mer, soit 23 ans (de 1994 à 2016) pour des périodes cible de 15 jours, 1 mois, 2 mois et 3 mois. Un compromis entre la résolution spatiale du maillage, la stabilité numérique du modèle et les temps de calcul nous a conduit à travailler principalement avec une période cible de 1 mois et un facteur morphologique de 40, ce qui représente une durée équivalente morphologique de 3 ans et 4 mois.

Pour la première période de référence de 23 ans et une période cible d'un mois, la période cible identifiée s'étend du 3 janvier au 3 février 2010 (cf. Figure 4-24).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

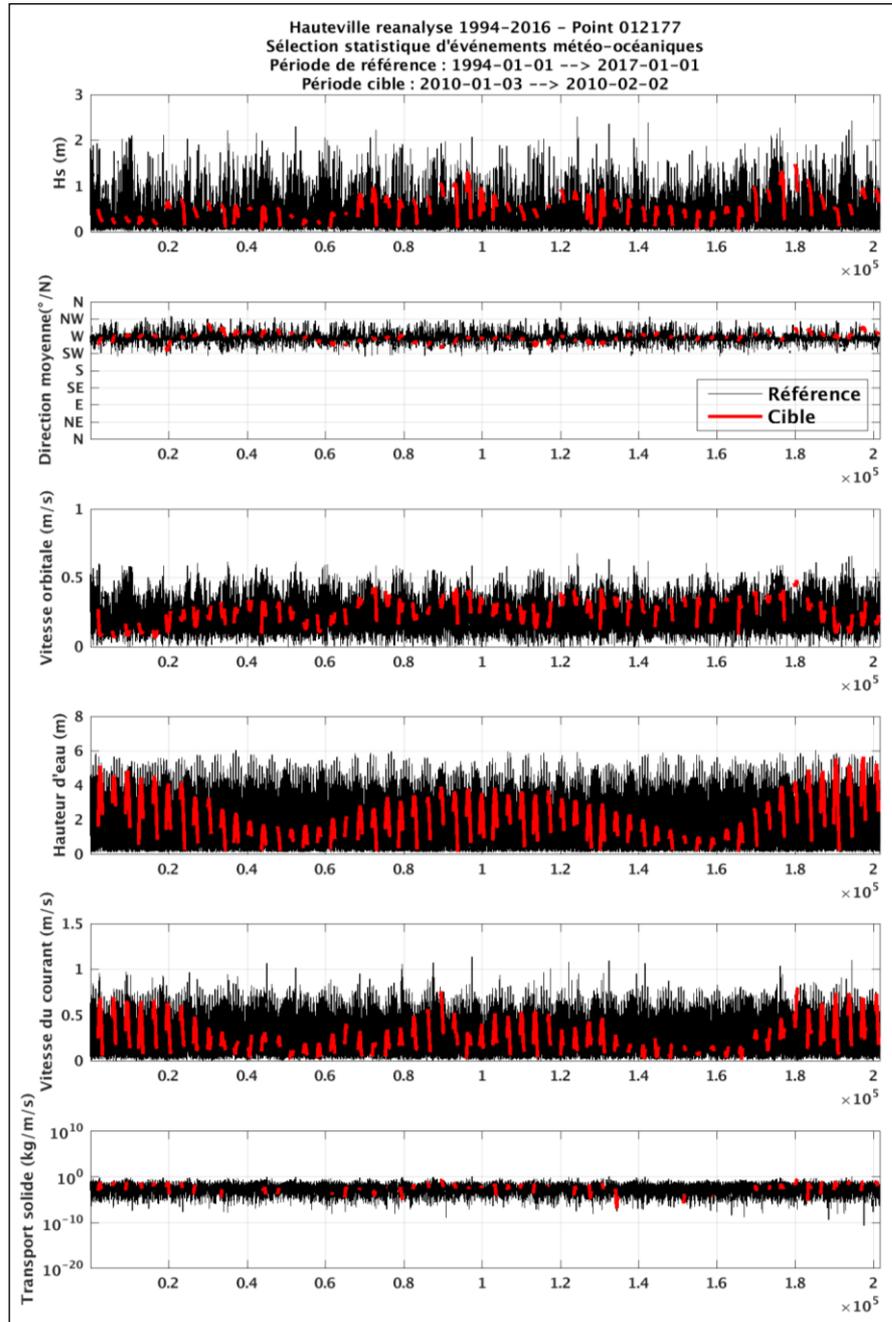


Figure 4-24 : Evolutions temporelles des principaux paramètres (de haut en bas : hauteur significative, incidence des vagues, vitesse orbitale au fond, hauteur d'eau, vitesse du courant, transport solide) pour la période de référence allant du 01/01/1994 au 31/12/2016 (courbes noires) et pour la période cible 1 (courbes rouges, allant du 03/01/2010 au 03/02/2010).

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

---

#### 4.5.4 TESTS DE SENSIBILITE REALISES

La sensibilité du modèle morphodynamique a été évaluée par rapport aux évolutions morphologiques observées sur le terrain, et les tests réalisés ont porté sur les points suivants :

- La résolution spatiale (25, 10 et 5 m dans l'embouchure entre la digue basse et la pointe d'Agon),
- La période cible : 1<sup>ère</sup> et 2<sup>nde</sup> période cible ayant les statistiques hydrodynamiques les plus proches de la période de référence,
- Le facteur morphologique,
- La formule de transport solide :
  - Capacité de transport :
    - Wu & Lin 2014,
    - Bailard 1981,
    - Dibajnia & Watanabe 1992,
    - Soulsby & Van Rijn 1997, Bijker 1968),
  - Suspension explicite (équation d'advection / diffusion).
- La granulométrie : 1 mm, 500  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ ,
- La période de couplage pour les interactions vagues/courant,
- L'influence du débit de la Seine.

L'ensemble des tests réalisés ne sont pas détaillés ici. Cette section présente les résultats de modélisation obtenus avec le paramétrage le plus satisfaisant pour des situations morphologiques initiales différentes remontant avant la mise en place de la digue basse. Le but était ici de démontrer la capacité du modèle à reproduire les évolutions morphologiques induites depuis la mise en place de cet ouvrage.

Le paramétrage retenu pour la suite de l'étude est le suivant :

- Maillage à 25 m de résolution,
- Un facteur morphologique en accord avec la stabilité du modèle, sa résolution spatiale et permettant des temps de calcul raisonnables : soit des valeurs comprises entre 10 et 70,
- $D_{50} = 500 \mu\text{m}$ ,
- Formule de transport solide : Soulsby & Van Rijn 1997,
- Interactions houle/courant prises en compte toutes les 30 secondes,
- Pas de débit de la Seine.

#### 4.5.5 RESULTATS

Cette section présente les résultats des simulations morphodynamiques réalisées pour la validation du modèle. Elles visent à montrer la capacité du modèle à reproduire les mouvements sédimentaires depuis la mise en place de la digue basse.

A partir du paramétrage hydrodynamique retenu, présenté au paragraphe précédent (4.5.4), plusieurs simulations ont été menées à partir d'un MNT initial différent, représentatif des années 1979, 1982 et 1984. Au large, les données du MNT SHOM HOMONIM ont été utilisées. Pour l'embouchure, les plans du LCHF ayant servis pour la construction du modèle physique à échelle réduite ont été digitalisés et permettent la création du MNT de 1979. Il faut toutefois rappeler que l'étude du LCHF a duré un certain temps, et qu'il s'est encore écoulé du temps avant la construction de la digue basse en 1988. C'est pourquoi les images aériennes ont été utilisées de manière à positionner correctement les chenaux sur les MNT de 1982 et 1984. Il n'y a pas d'images aériennes exploitables entre 1984 et 1988.

Il en résulte donc trois MNT différents associés à cette même grille (MNT : 1979, 1982 et 1984). Ils sont présentés sur la Figure 4-4 et ont permis de réaliser la validation morphodynamique du modèle avant l'existence de la digue basse dont les résultats sont détaillés dans ce paragraphe.

##### 4.5.5.1 MNT 1979 + digue basse

La Figure 4-25 présente les MNT au début et à la fin de la simulation d'un mois avec un facteur morphologique de 40, soit une durée équivalente de 3 ans et 4 mois. Le MNT initial (Figure 4-25 à gauche) est représentatif de la topo-bathymétrie en 1979, en intégrant la digue basse. On rappelle que cette configuration correspond à la configuration de base du modèle physique mis en place par le LCHF (1982) pour tester différents types d'aménagements, et que le dernier levé topographique avant la mise en place de la digue basse (1988) est celui de 1979. La Figure 4-26 présente l'évolution du fond correspondant à l'ensemble de cette simulation.

Les évolutions à l'embouchure sont marquées par l'accentuation de deux méandres à l'Ouest et à l'Est. Ce dernier vient rejoindre une érosion qui s'est produite le long de la digue basse (côté amont). Le modèle simule bien la tendance qui résulte de la mise en place de la digue basse. L'érosion le long de celle-ci forme un tronçon de chenal susceptible de renforcer un méandre à l'Est qui peut éroder latéralement la flèche de Montmartin.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

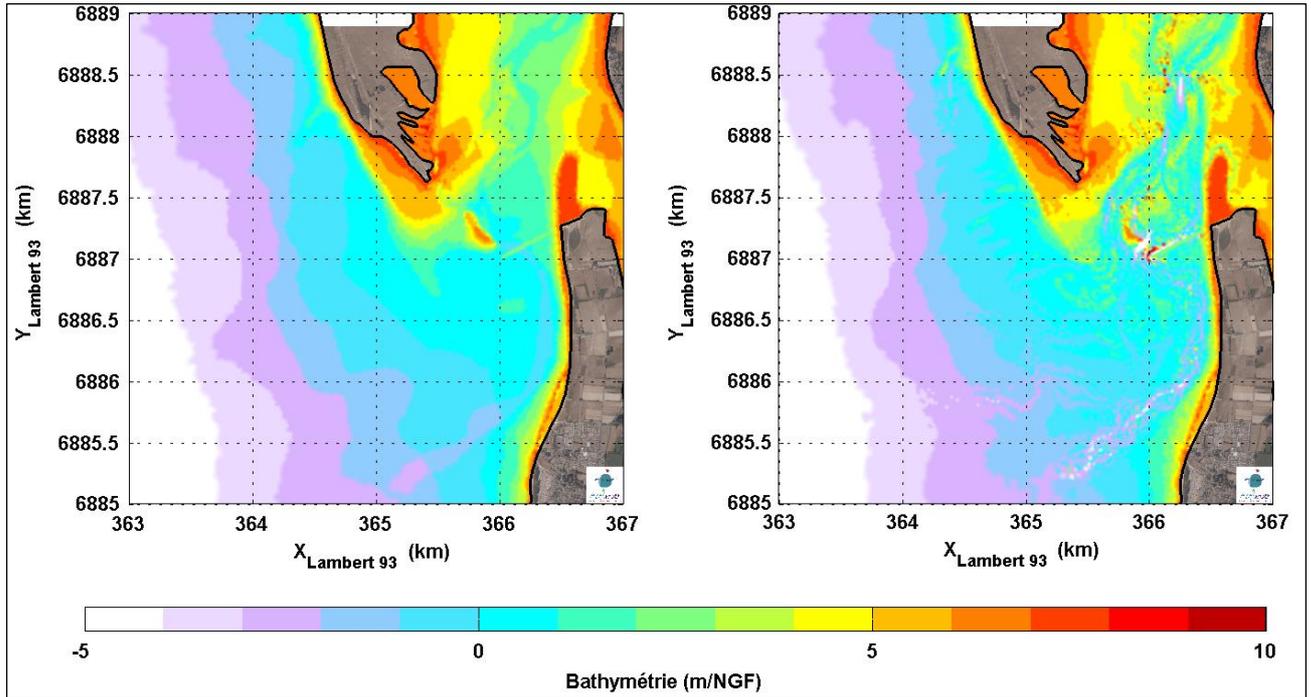


Figure 4-25 : MNT au début (à gauche) et à la fin (à droite) de la simulation (durée équivalente de 3 ans et 4 mois) réalisée à partir d'un MNT représentatif de la bathymétrie en 1979 et avec la digue basse.

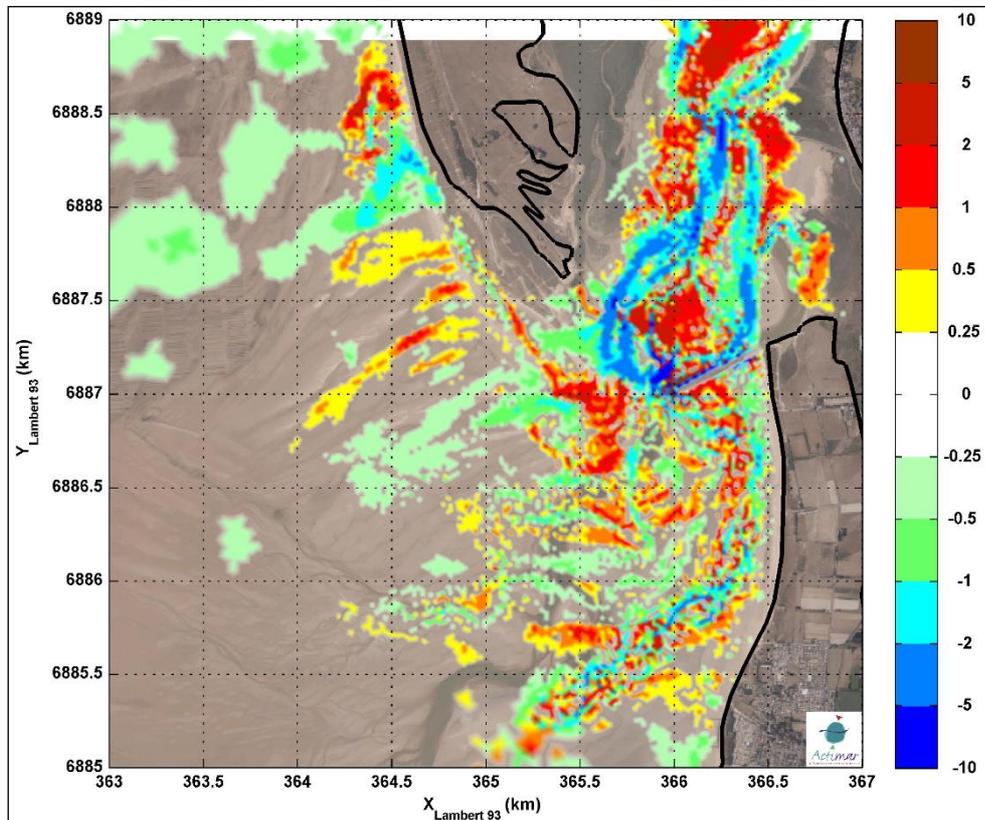


Figure 4-26 : Evolution du fond (en mètre) à la fin de la simulation (durée équivalente de 3 ans et 4 mois) réalisée à partir d'un MNT représentatif de la bathymétrie en 1979 et avec la digue basse.

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

---

#### 4.5.5.2 MNT 1979, chenaux 1982

La Figure 4-27 présente les MNT au début et à la fin de la simulation d'un mois avec un facteur morphologique de 40, soit une durée équivalente de 3 ans et 4 mois. Le MNT initial (Figure 4-27 à gauche) est représentatif de la topo-bathymétrie en 1979, avec des chenaux correspondant à la situation de 1982. Une première simulation a été réalisée avec la digue basse. La seconde simulation, sans la digue basse, est censée reproduire les tendances évolutives observées entre 1982 et 1988. La Figure 4-28 présente l'évolution du fond correspondant à l'ensemble de cette simulation.

La comparaison du résultat de la simulation chenaux 1982 + digue avec celle de la section précédente (chenaux 1979 + digue) indique une sensibilité marquée des évolutions aux tracés initiaux des chenaux, ce qui suggère que les effets de la digue basse sur la morphodynamique de l'embouchure dépend des positions des bancs et des tracés des chenaux.

Les résultats avec et sans digue basse permettent d'évaluer l'influence de l'ouvrage sur la morphodynamique de l'embouchure. La Figure 4-29 présente le différentiel de l'évolution du fond entre les simulations réalisées avec et sans digue basse, et pour un MNT représentatif de la bathymétrie en 1979 et des chenaux de 1982. La modification des chenaux à l'intérieur de l'embouchure est bien marquée. On remarque également la zone d'accrétion au sud de la digue basse, limitant ainsi le recul du trait de côte. L'extérieur de l'embouchure présente des résultats plus bruités.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

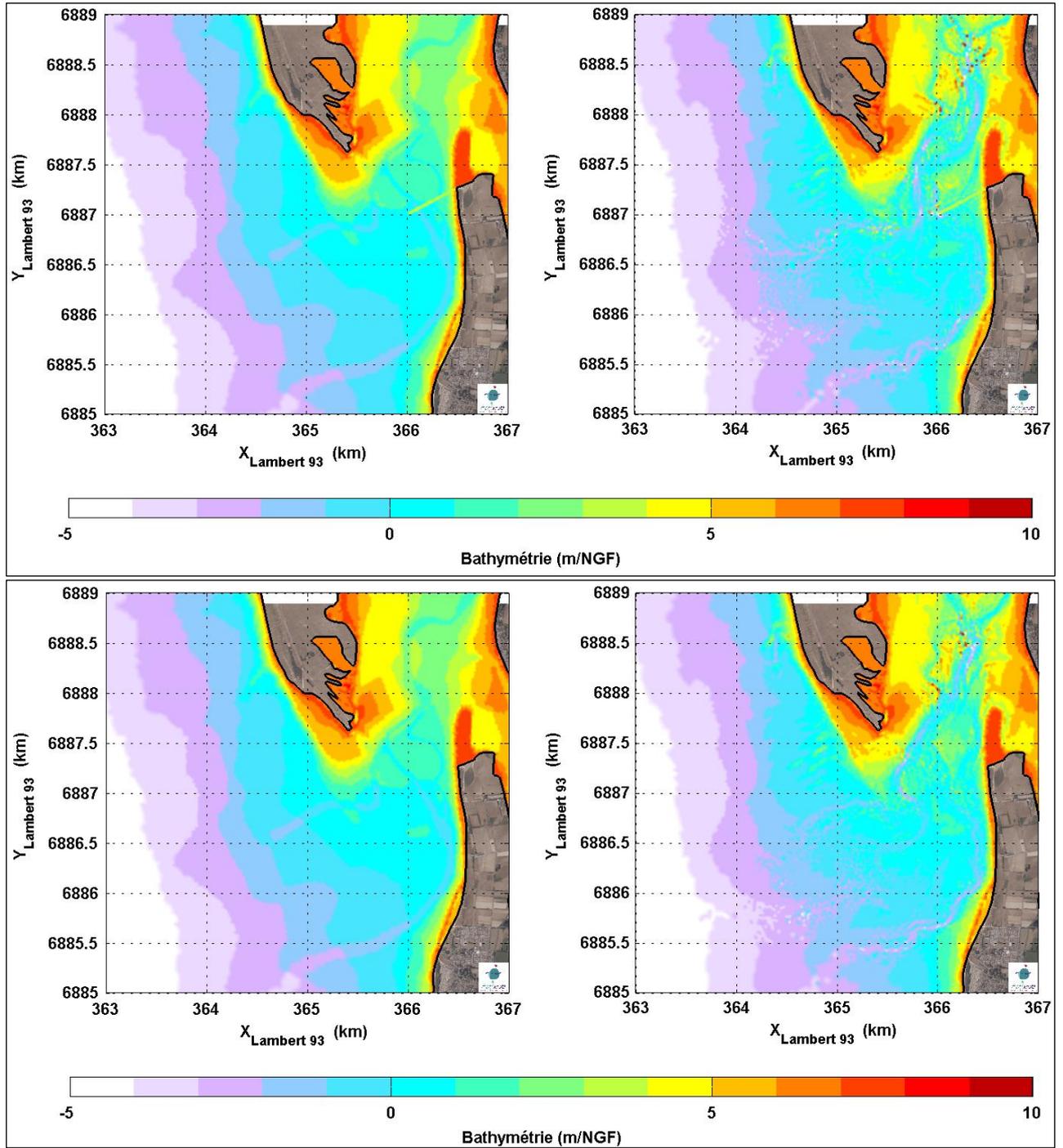


Figure 4-27 : MNT au début (à gauche) et à la fin (à droite) de la simulation (durée équivalente de 3 ans et 4 mois) réalisée à partir d'un MNT représentatif de la bathymétrie en 1979 et des chenaux de 1982, avec la digue basse (en haut) et sans (en bas).

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

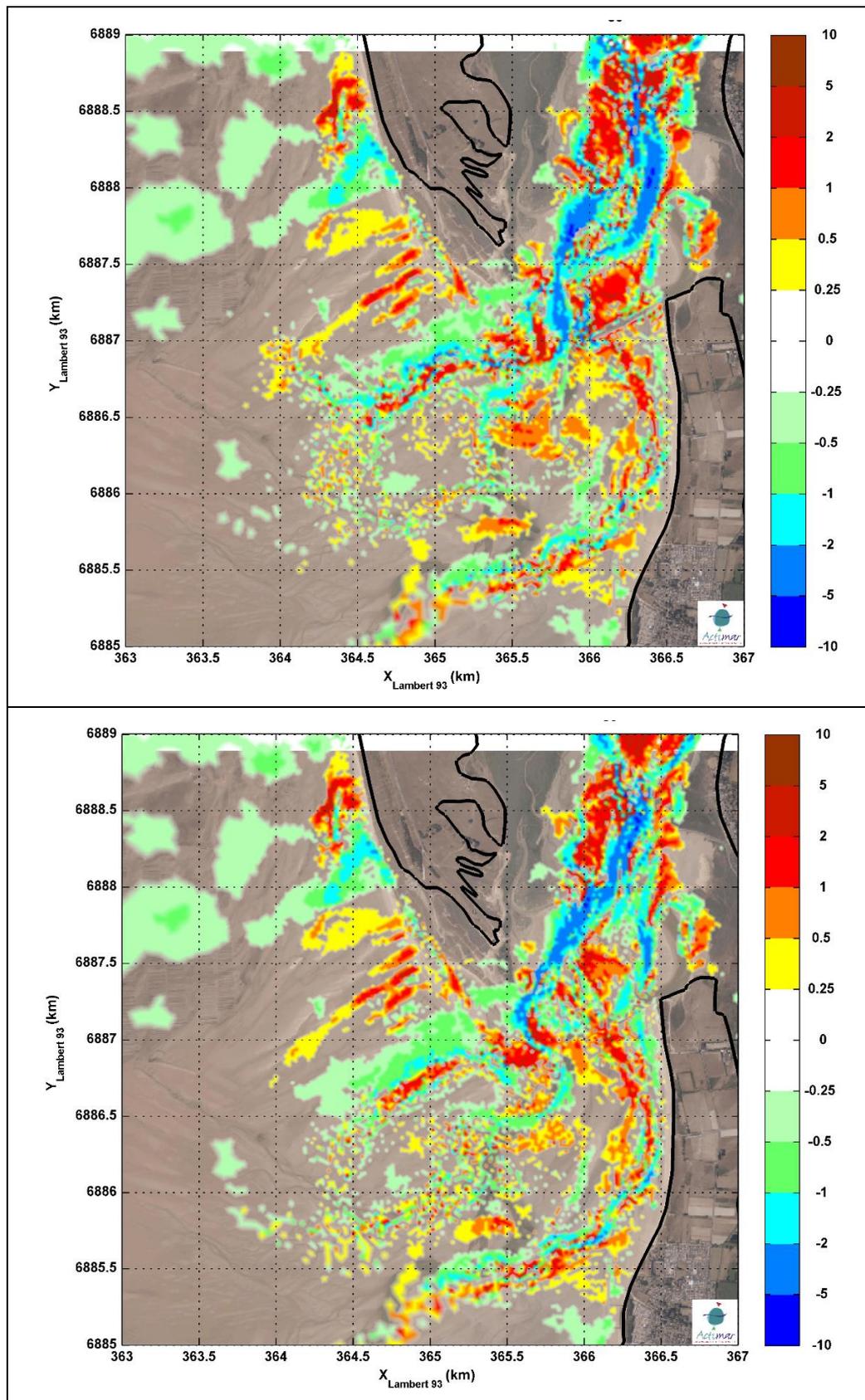


Figure 4-28 : Evolution du fond (en mètre) à la fin de la simulation (durée équivalente de 3 ans et 4 mois) réalisée à partir d'un MNT représentatif de la bathymétrie en 1979 et des chenaux de 1982, avec la digue basse (en haut) et sans (en bas).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

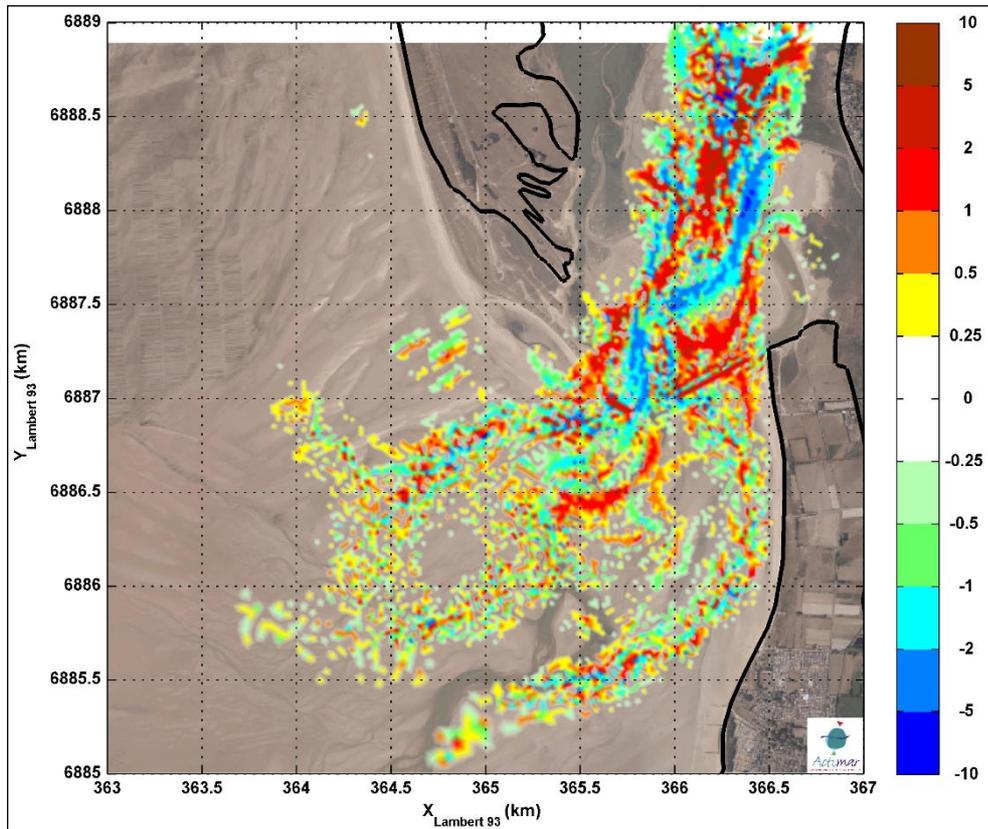


Figure 4-29 : Différentiel de l'évolution du fond (en mètre) entre la simulation avec et sans digue basse, et pour un MNT représentatif de la bathymétrie en 1979 et des chenaux de 1982.

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

---

#### 4.5.5.3 MNT 1979, chenaux 1984

La Figure 4-30 présente les MNT au début et à la fin de la simulation d'un mois avec un facteur morphologique de 40, soit une durée équivalente de 3 ans et 4 mois. Le MNT initial (Figure 4-27 à gauche) est représentatif de la bathymétrie en 1984. Deux simulations ont été réalisées : avec et sans digue basse. La Figure 4-31 présente les évolutions du fond correspondant à l'ensemble de cette simulation.

Ces résultats montrent à nouveau la sensibilité des résultats aux conditions topo-bathymétriques initiales, c'est-à-dire à la position des bancs et aux tracés des chenaux. En particulier, l'accentuation du méandre à l'Est est marquée à partir de la situation de 1984. L'érosion le long de la digue basse se fait sur une largeur plus importante que pour les situations de 1979 et 1982, et on conçoit bien les effets que cela a pu avoir, en rejoignant le méandre déjà formé le long de la flèche de Montmartin sur l'érosion de celle-ci. C'est un résultat important qui montre que les effets (positifs ou négatifs) de la digue basse dépendent fortement de la situation des bancs et des chenaux à l'embouchure, qu'il s'agisse d'ailleurs des évolutions passées ou des évolutions à venir. Ce constat est important pour les aménagements à prévoir, puisqu'on pourra chercher à optimiser les effets d'une digue basse déjà en place.

La Figure 4-32 présente le différentiel de l'évolution du fond entre les simulations réalisées avec et sans digue basse, et pour un MNT représentatif de la bathymétrie en 1984. L'action de la digue basse pour limiter l'érosion au Sud, en « coupant » le chenal qui s'écoulait auparavant le long du littoral de Montmartin voire d'Hauteville, est bien visible avec cette représentation des résultats. On rappelle que cette tendance à conforter le littoral de Montmartin était le principal effet escompté de la digue, et que les observations le confirment avec un recul du trait de côte qui a été rapidement contenu.

Enfin, on peut noter une zone d'érosion significative autour de l'extrémité de la digue, où l'intensification des courants, notamment en jusant, approfondit localement le chenal.

A l'extérieur de l'embouchure, sur le delta de jusant, les résultats sont globalement très bruités, ce qui est assez classique pour des modélisations morphodynamiques, à partir d'une certaine durée simulée, en dehors des secteurs où les évolutions sont franches.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

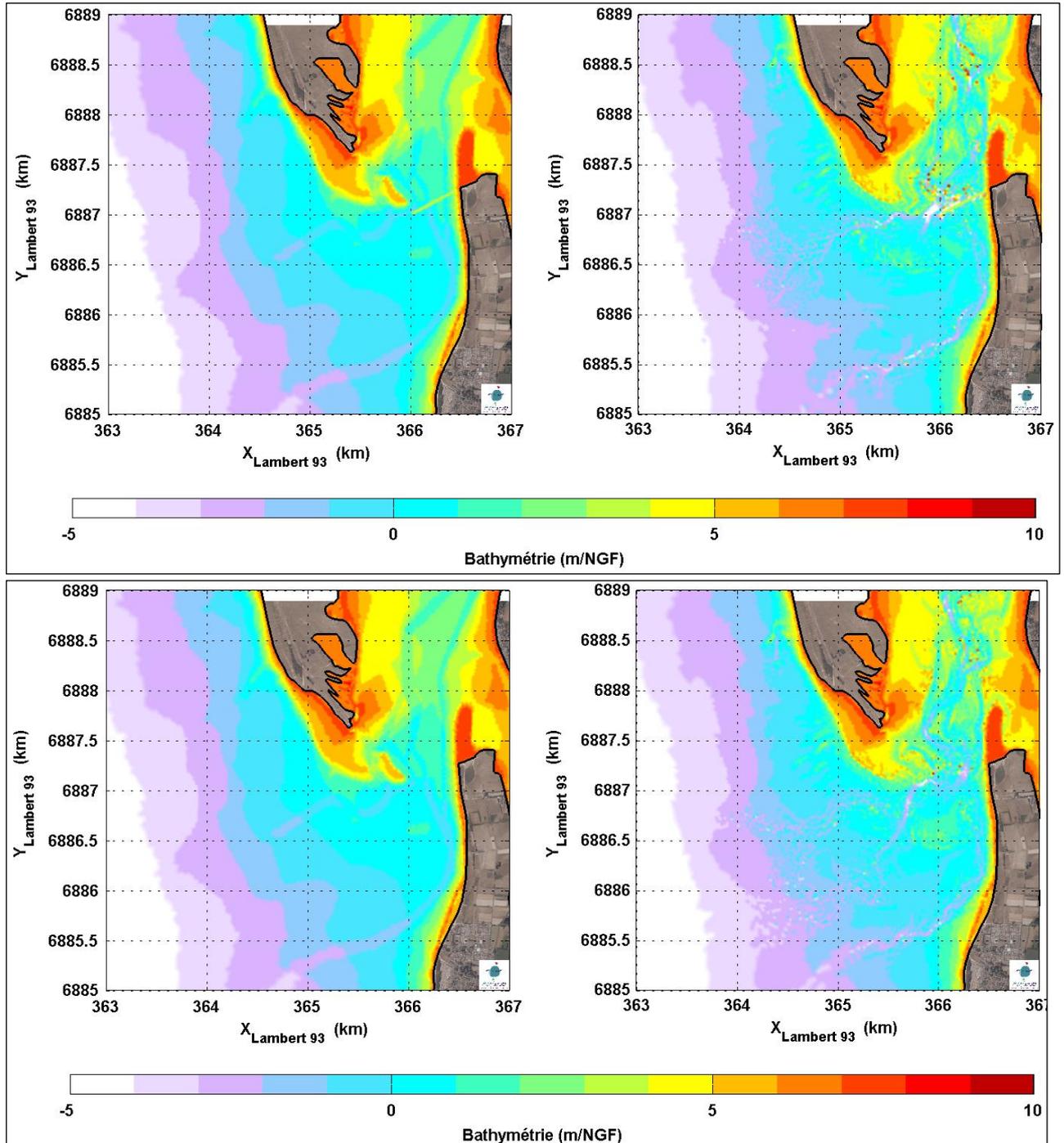


Figure 4-30 : MNT au début (à gauche) et à la fin (à droite) de la simulation (durée équivalente de 3 ans et 4 mois) réalisée à partir d'un MNT représentatif de la bathymétrie en 1984, avec la digue basse (en haut) et sans (en bas).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

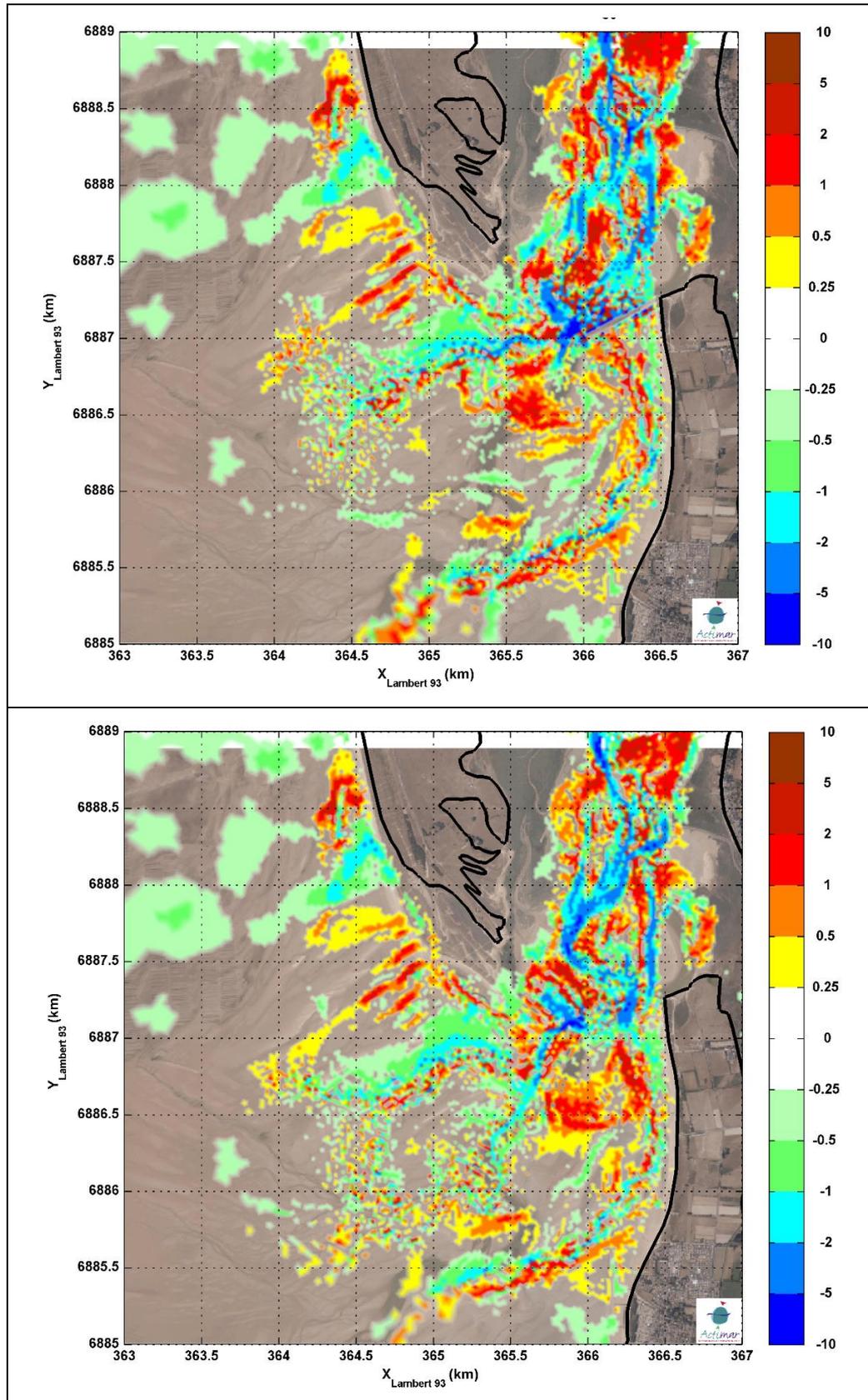


Figure 4-31 : Evolution du fond (en mètre) à la fin de la simulation (durée équivalente de 3 ans et 4 mois) réalisée à partir d'un MNT représentatif de la bathymétrie en 1984, avec la digue basse (en haut) et sans (en bas).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

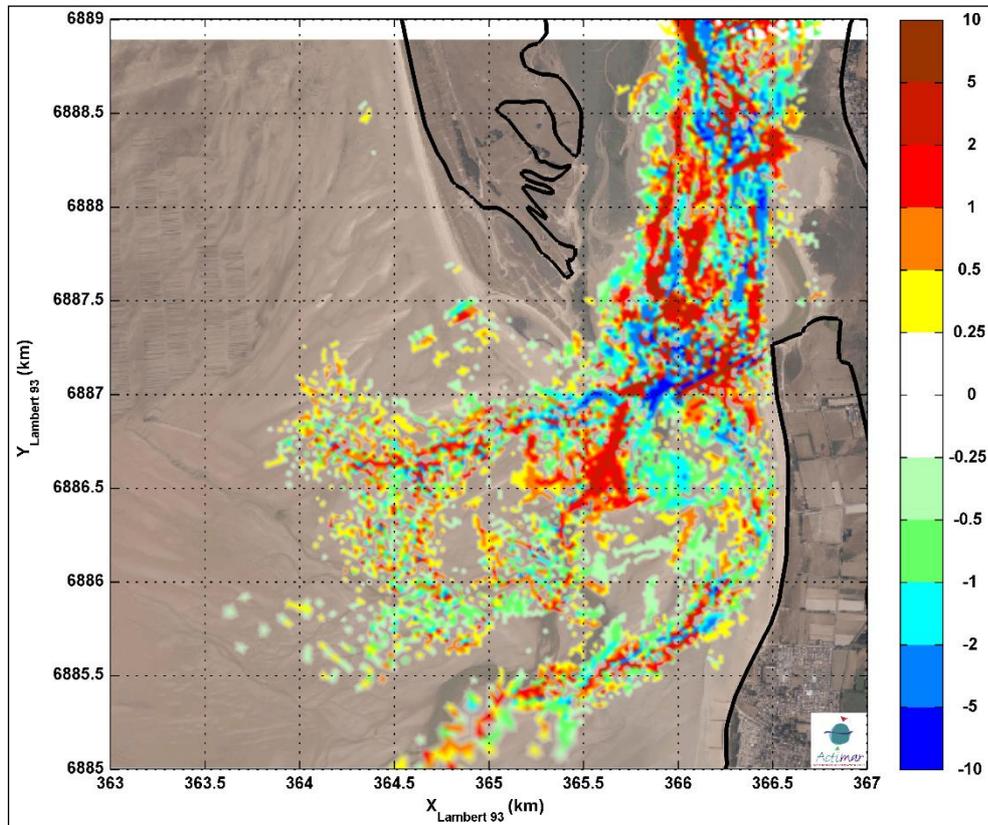


Figure 4-32 : Différentiel de l'évolution du fond (en mètre) entre la simulation avec et sans digue basse, et pour un MNT représentatif de la bathymétrie en 1984.

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

---

#### 4.5.5.4 MNT 1979, chenaux 1984 – Suite de calcul

A partir des résultats de modèle présentés au paragraphe précédent et obtenus avec un MNT initial représentatif de la situation morphologique de 1984, le calcul a été prolongé à l'identique, c'est-à-dire avec les mêmes conditions de forçage et le même facteur morphologique, en partant de la bathymétrie calculée à la fin de la première simulation. Cela revient donc à réaliser 2 mois de calcul effectif, soit une durée équivalente morphologique de 6 ans et 8 mois à partir d'un MNT représentatif de la bathymétrie de 1984.

La Figure 4-33 présente les MNT au début et à la fin de la simulation.

La Figure 4-34 présente les évolutions du fond à la fin de chaque simulation (avec et digue basse).

La Figure 4-35 présente le différentiel de l'évolution du fond entre les simulations réalisées avec et sans digue basse, et pour un MNT représentatif de la bathymétrie en 1984.

Les résultats montrent globalement, après une certaine durée simulée, des résultats bruités et la difficulté à exploiter le modèle au-delà de quelques années.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

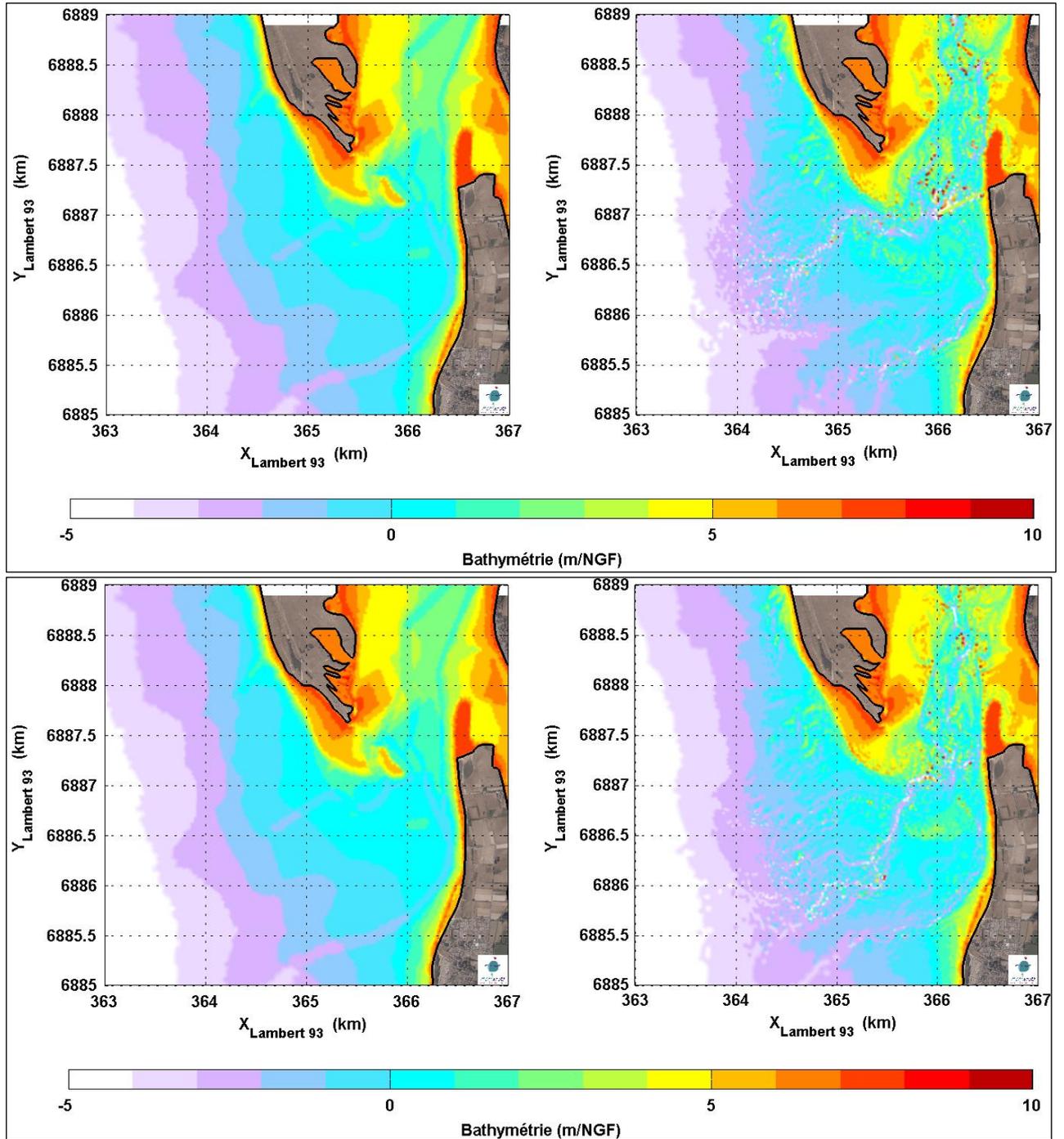


Figure 4-33 : MNT au début (à gauche) et à la fin (à droite) de la simulation (durée équivalente de 6 ans et 8 mois) réalisée à partir d'un MNT représentatif de la bathymétrie en 1984, avec la digue basse (en haut) et sans (en bas).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

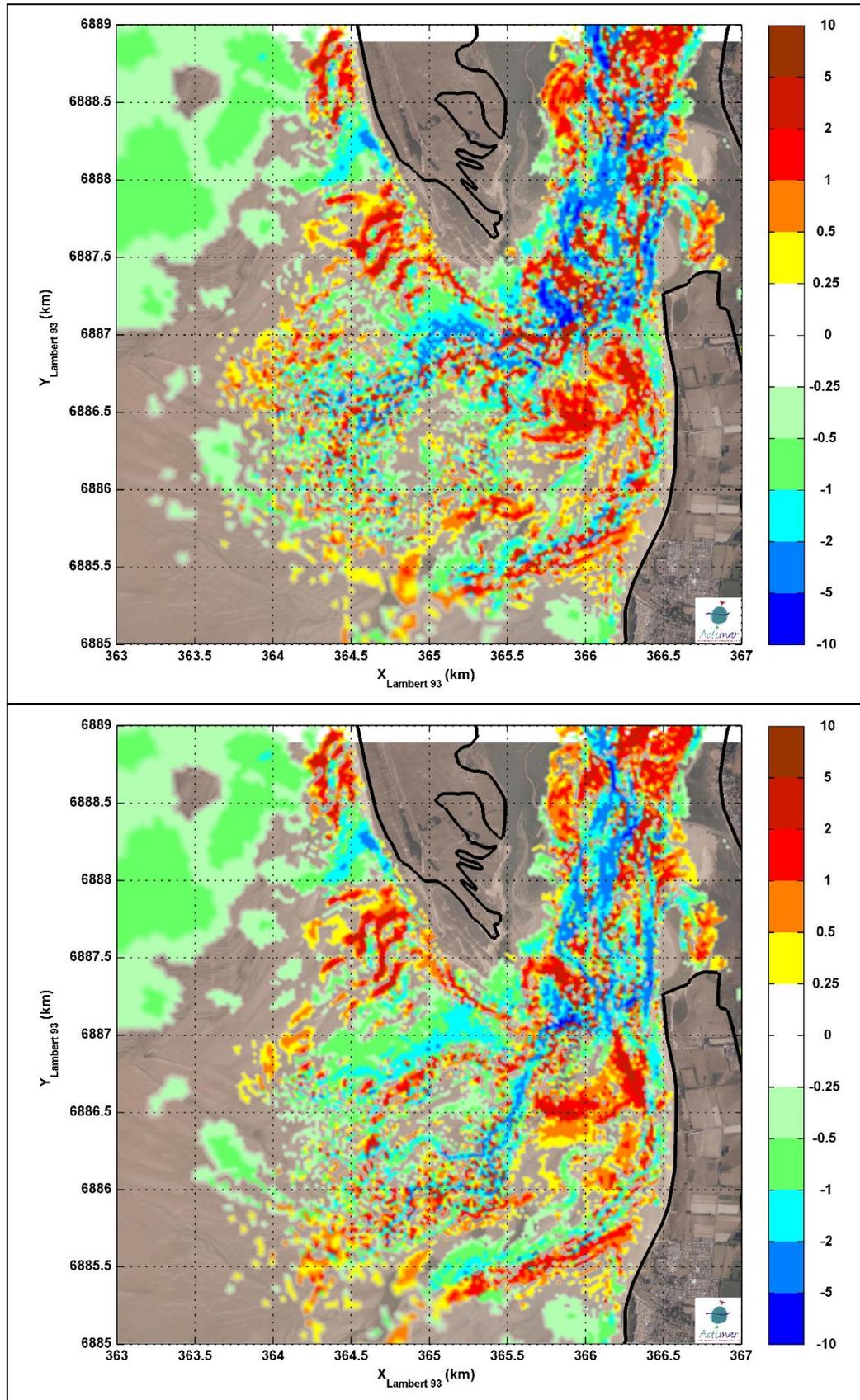


Figure 4-34 : Evolution du fond (en mètre) à la fin de la simulation (durée équivalente de 6 ans et 8 mois) réalisée à partir d'un MNT représentatif de la bathymétrie en 1984, avec la digue basse (en haut) et sans (en bas).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

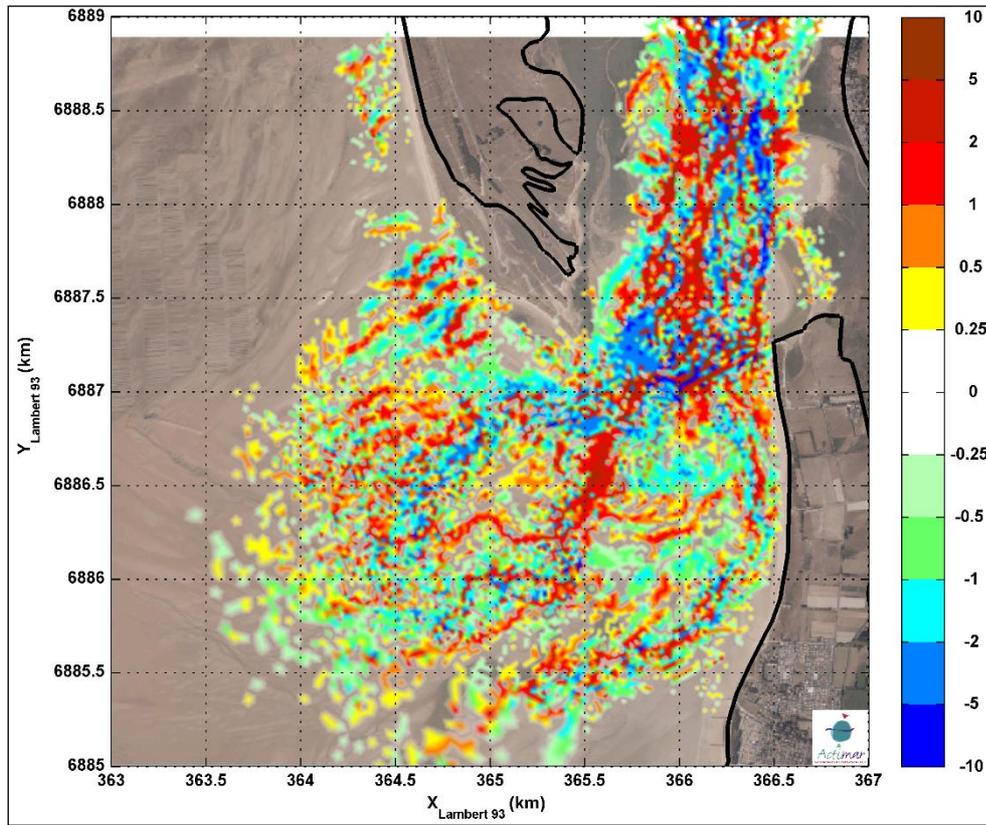


Figure 4-35 : Différentiel de l'évolution du fond (en mètre) entre la simulation avec et sans digue basse, et pour un MNT représentatif de la bathymétrie en 1984, avec suite de calcul.

## 5. EVALUATION DES EFFETS D'OUVRAGES SUR LE TRAIT DE COTE

---

Pour le littoral d'Hauteville, deux ouvrages ont fait l'objet de simulations spécifiques (avec un maillage suffisamment fin pour bien représenter leur géométrie en tant qu'obstacle aux écoulements) :

- La digue des Garennes : il s'agit d'un ouvrage de protection longitudinal, projeté dans le prolongement du front de mer d'Hauteville, pour conforter un cordon dunaire dont la tenue en cas de tempête n'est pas garantie et en arrière duquel des enjeux sont présents,
- La cale de l'école de voile, au Sud de la commune. Il s'agit d'analyser les effets de la cale sur la dérive littorale.

Afin d'évaluer l'incidence de ces ouvrages sur le transport sédimentaire, deux scénarios ont été sélectionnés. Ils correspondent à des scénarios de vive-eau exceptionnelle, puisque ces ouvrages sont positionnés tout en haut de l'estran. Deux incidences de la houle ont été considérées :

- Scénario 1 : 29 mars 1998, coefficient 119 – houle d'incidence NNE
- Scénario 2 : 20 février 1996, coefficient 113 – houle d'incidence S

Ces simulations ont été réalisées avec un maillage à haute résolution (environ 2 m à proximité des ouvrages) présenté sur les Figure 5-1 et Figure 5-2 pour la digue des Garennes et sur les Figure 5-7 et Figure 5-8 pour la cale de l'école de voile. Les simulations durent 4 jours (2 jours avant et 2 jours après la date cible) et sont répétées à l'identique en situation initiale et dans la situation aménagée de manière à évaluer l'influence des ouvrages.

### 5.1 DIGUE DES GARENNES

La Figure 5-1 illustre les bathymétries utilisées pour évaluer l'incidence de la digue des Garennes sur le transit littoral. Les MNT en situations initiale et aménagée sont présentés ainsi qu'un différentiel bathymétrique sur la Figure 5-2. La digue des Garennes est absente du MNT initial, qui a été modifié (en conservant le maillage) pour représenter la géométrie de l'ouvrage (mise en évidence sur la Figure 5-2).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

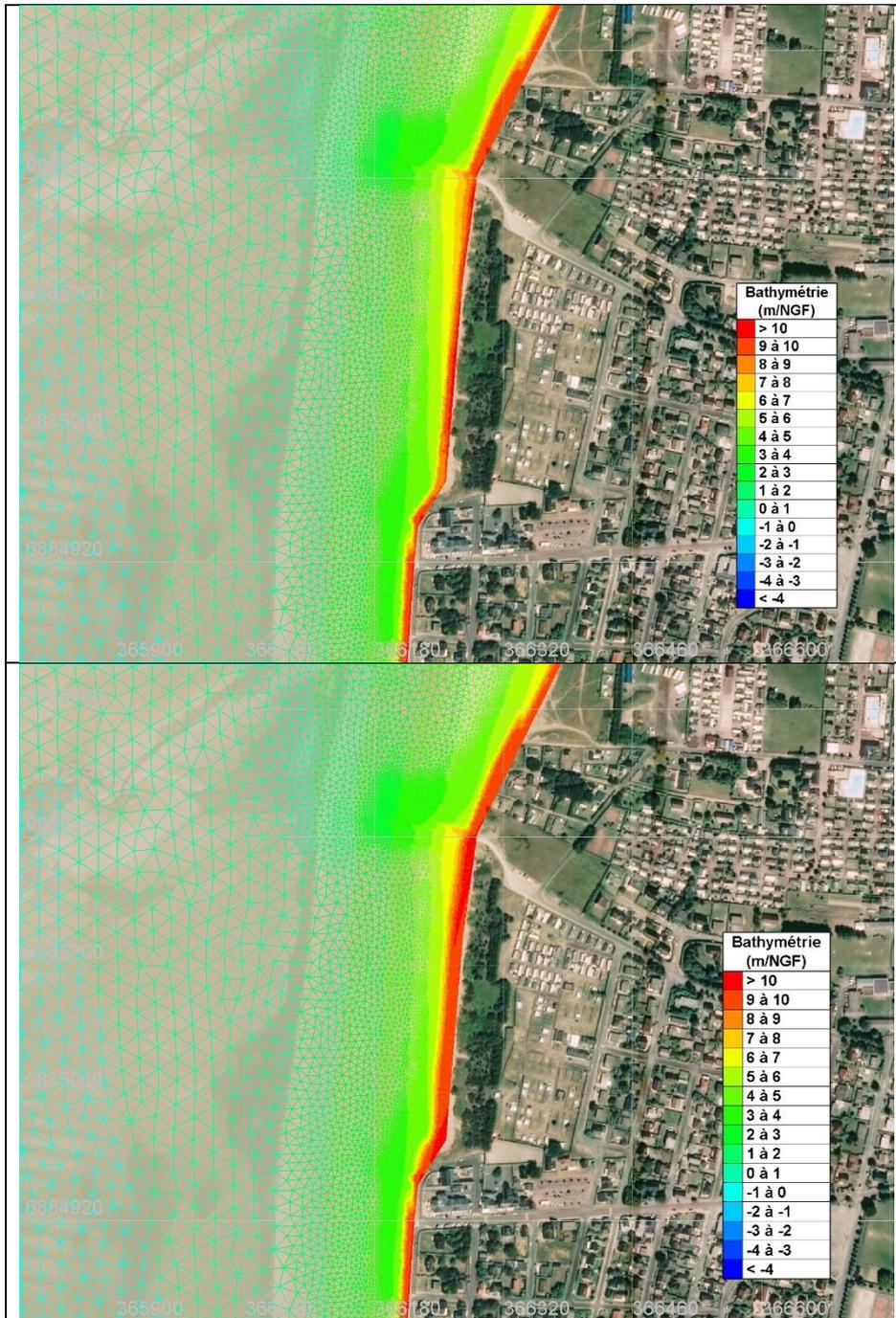


Figure 5-1 : Bathymétries (en m) utilisées pour évaluer l'incidence de la digue des Garennes sur le transit littoral, pour l'état initial (en haut) et pour l'état aménagé (en bas).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

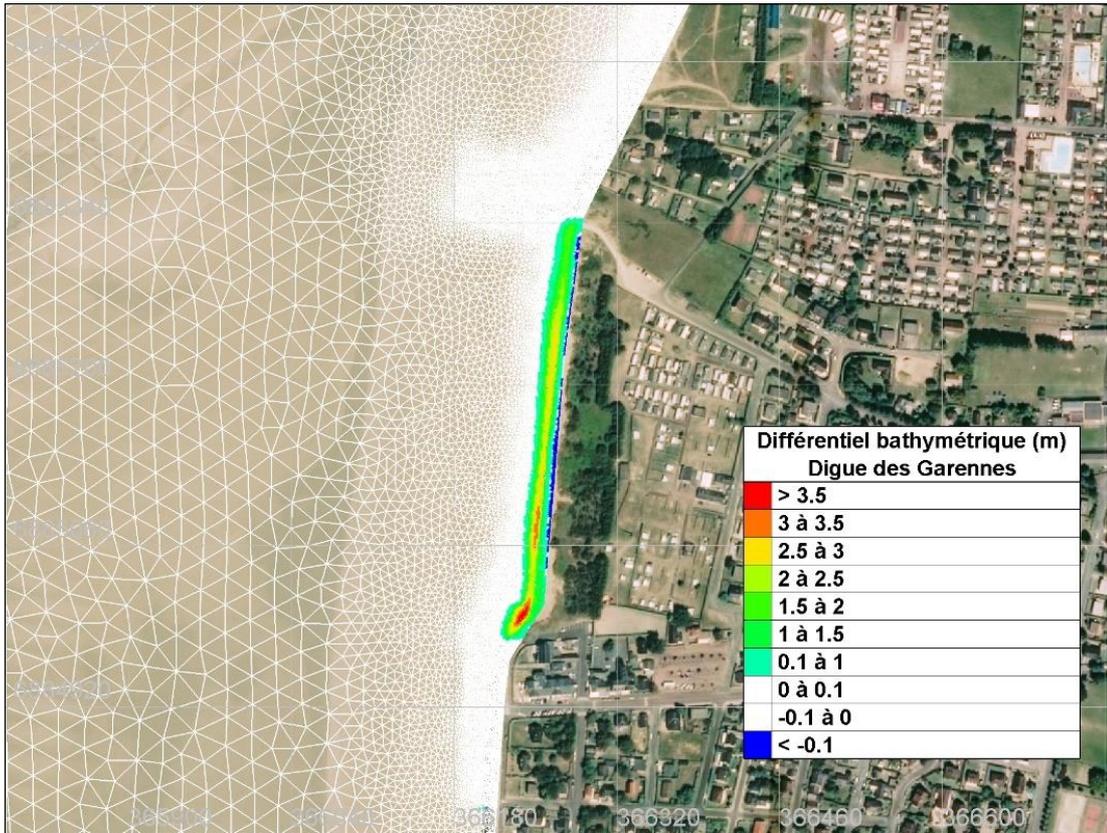


Figure 5-2 : Différentiel bathymétrique (en m) entre les bathymétries de l'état aménagé et de l'état initial pour la digue des Garennes.

Les Figure 5-3 et Figure 5-4 présentent les champs de transport solide instantané pour le scénario 1 au moment de la pleine mer. L'équivalent pour le scénario 2 est présenté sur les Figure 5-5 et Figure 5-6.

Pour les deux scénarios, les caractéristiques du transport solide sont très proches pour les deux états (initial et aménagé) aussi bien en intensité qu'en direction, ce qui indique que l'ouvrage n'aura pas d'incidence sur la dérive littorale et donc sur l'estran et la plage en aval de celle-ci.

Bien entendu, l'ouvrage pourra avoir des effets sur les transports dans le profil (perpendiculairement au trait de côte) puisque les vagues peuvent être réfléchies sur celui-ci lors des grandes marées. Ces effets seront comparables à ceux de la digue du front de mer.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

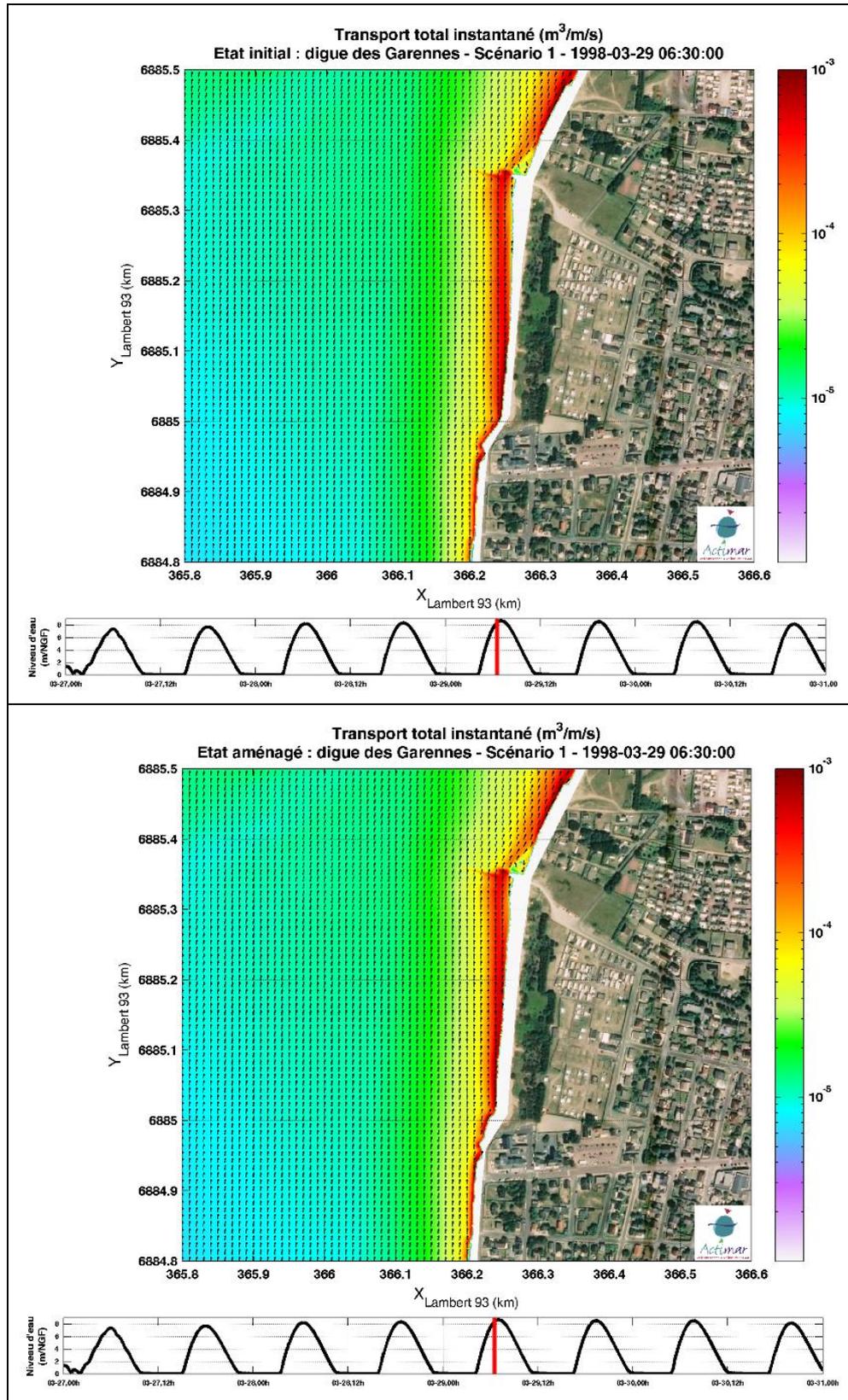


Figure 5-3 : Cartes de transport solide instantané ( $m^3/m/s$ ) pour le scénario 1 au moment de la pleine mer, dans l'état initial (en haut) et pour l'aménagement de la digue des Garennes (en bas).

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

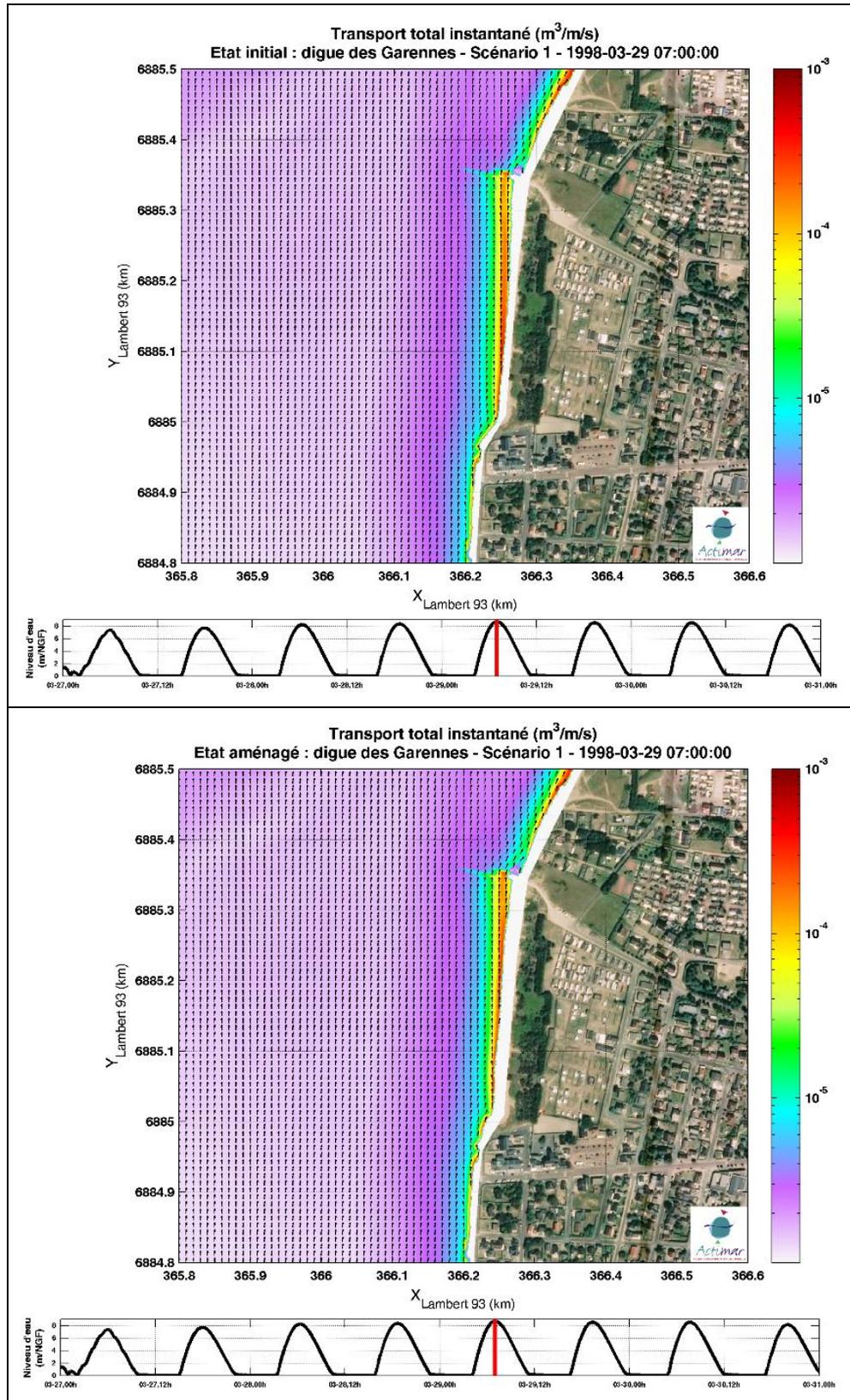


Figure 5-4 : Cartes de transport solide instantané ( $m^3/m/s$ ) pour le scénario 1 au moment de la pleine mer, dans l'état initial (en haut) et pour l'aménagement de la digue des Garennes (en bas).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

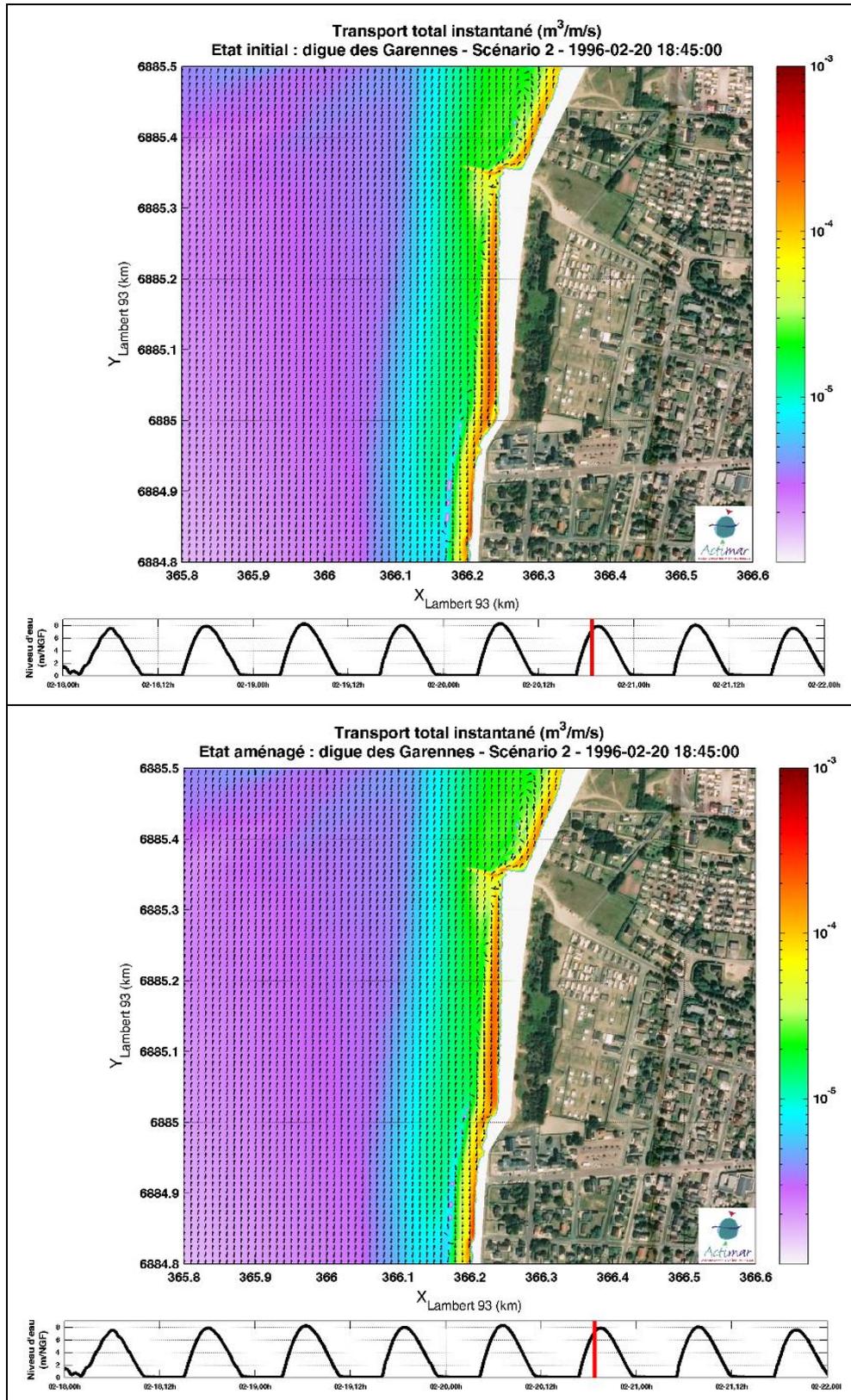


Figure 5-5 : Cartes de transport solide instantané ( $m^3/m/s$ ) pour le scénario 2 au moment de la pleine mer, dans l'état initial (en haut) et pour l'aménagement de la digue des Garennes (en bas).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

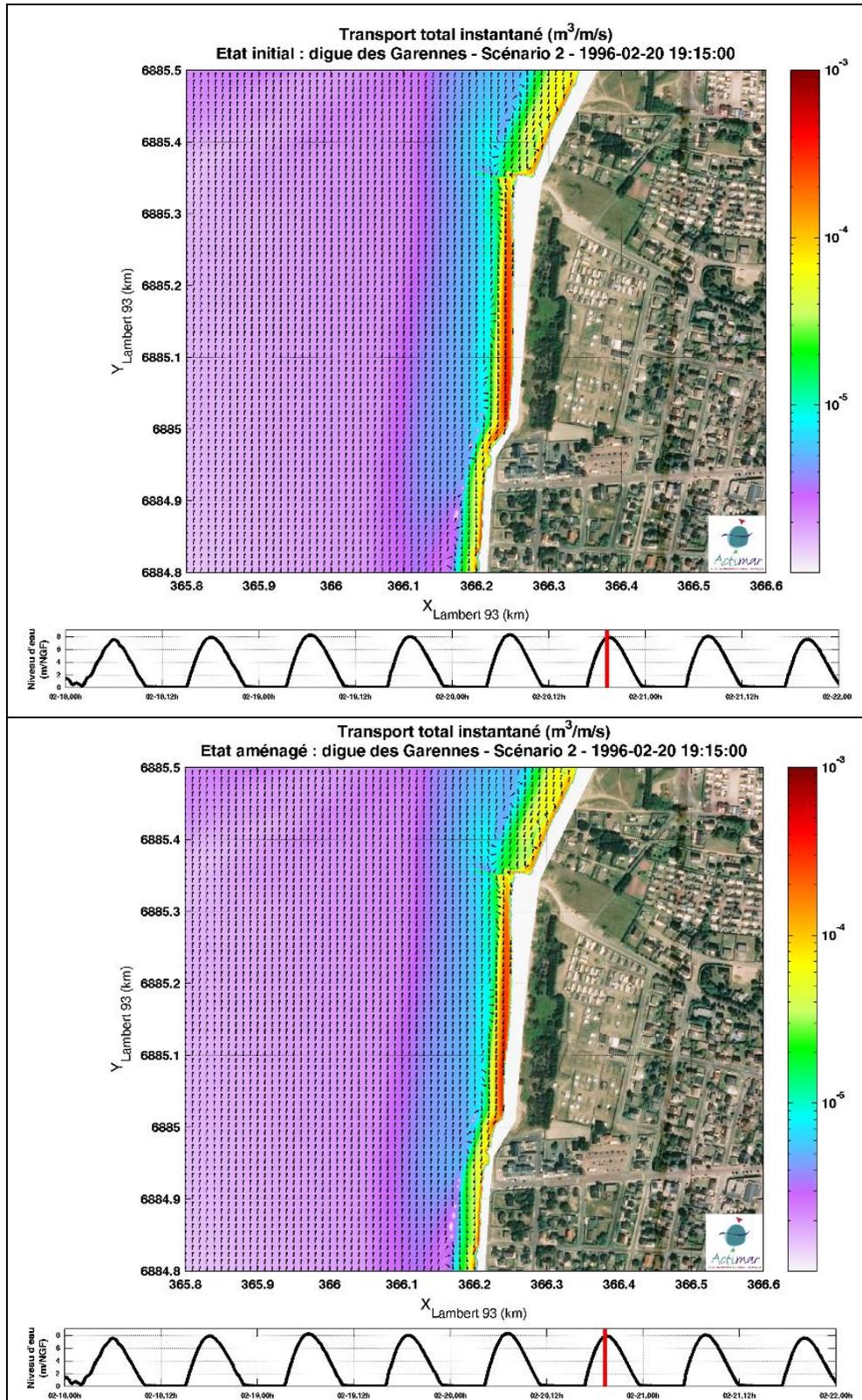


Figure 5-6 : Cartes de transport solide instantané ( $m^3/m/s$ ) pour le scénario 2 au moment de la pleine mer, dans l'état initial (en haut) et pour l'aménagement de la digue des Garennes (en bas).

## 5.2 CALE DE L'ECOLE DE DE VOILE

La Figure 5-7 illustre les bathymétries utilisées pour évaluer l'incidence de la cale de l'école de voile sur le transit littoral. Les MNT en situations initiale et aménagée sont présentés ainsi qu'un différentiel bathymétrique sur la Figure 5-8. La cale est présente dans le MNT de la situation initiale et a été enlevée pour la situation aménagée.

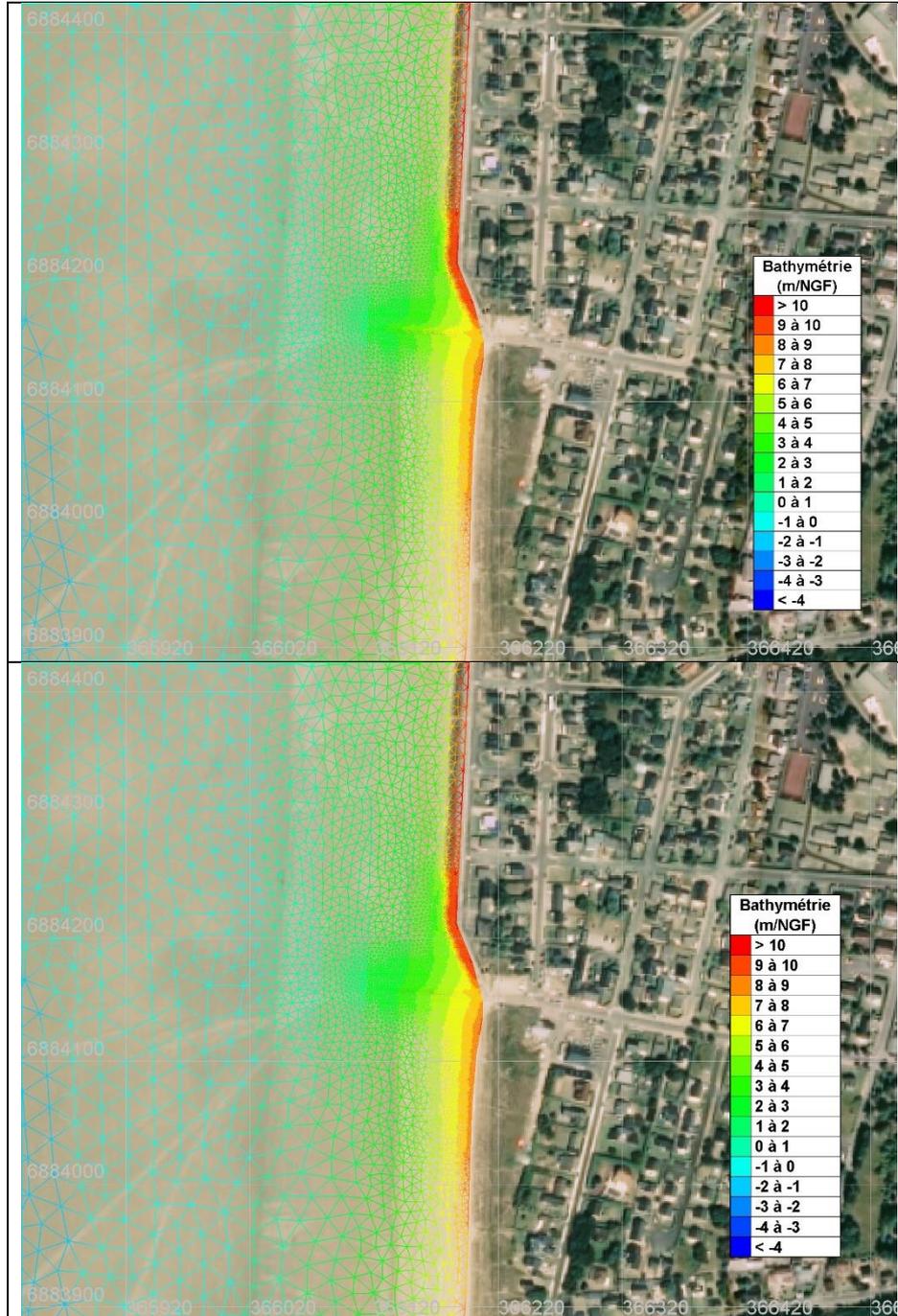


Figure 5-7 : Bathymétries (en m) utilisées pour évaluer l'incidence de la cale de l'école de voile sur le transit littoral, pour l'état initial (en haut) et pour l'état aménagé (en bas).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

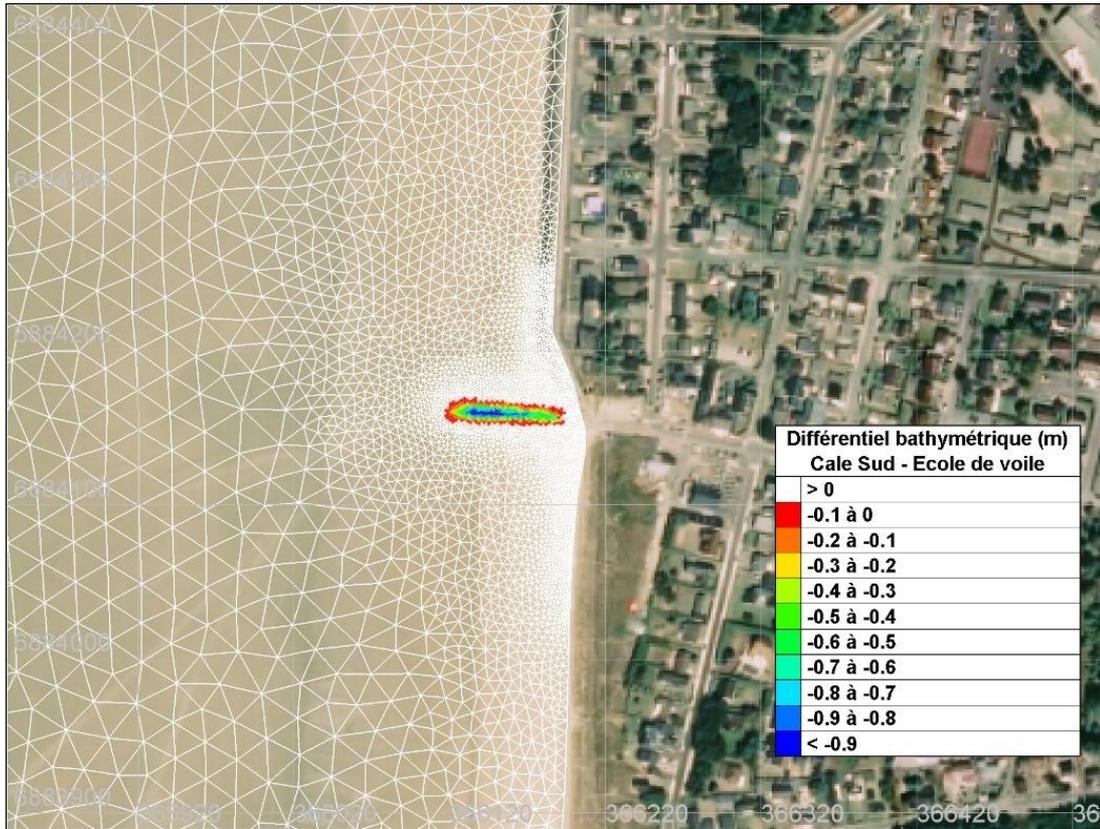


Figure 5-8 : Différentiel bathymétrique (en m) entre les bathymétries de l'état aménagé et de l'état initial pour la cale de l'école de voile.

Les Figure 5-9 et Figure 5-10 présentent les champs de transport solide instantané pour le scénario 1 au moment de la pleine mer. Les illustrations équivalentes pour le scénario sont présentées sur les Figure 5-11 et Figure 5-12.

Pour les deux scénarios, les caractéristiques du transport solide sont très proches pour les deux états (initial et aménagé), excepté très localement à proximité de la cale. La cale représente un obstacle très local au transit littoral mais qui n'influe toutefois pas sur le transit de sédiment à plus grande échelle. D'autre part, la cale n'étant pas un ouvrage haut, les quantités de sable interceptées restent forcément limitées.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

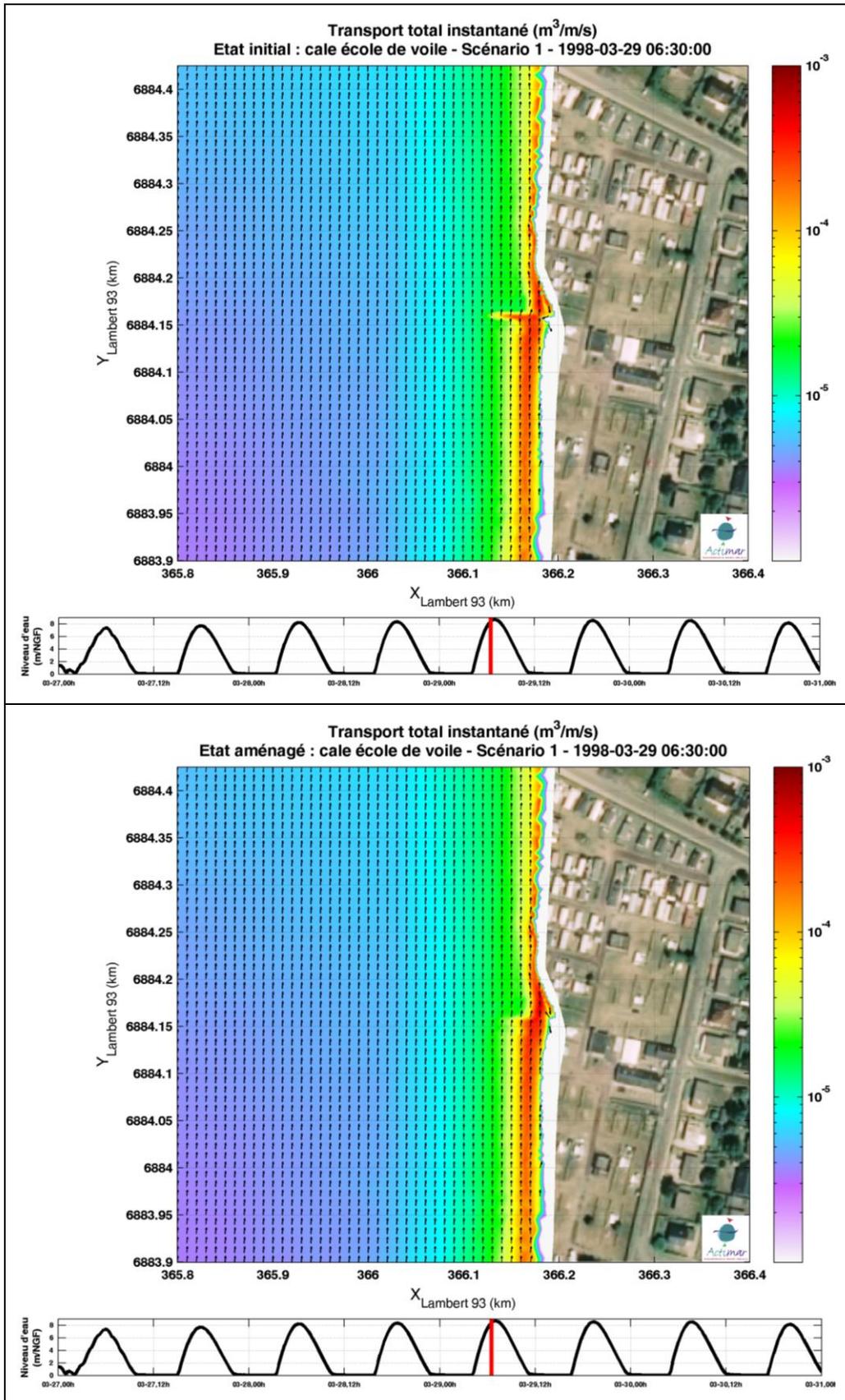


Figure 5-9 : Cartes de transport solide instantané ( $m^3/m/s$ ) pour le scénario 1 au moment de la pleine mer, dans l'état initial (en haut) et pour l'aménagement de la cale de l'école de voile (en bas).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

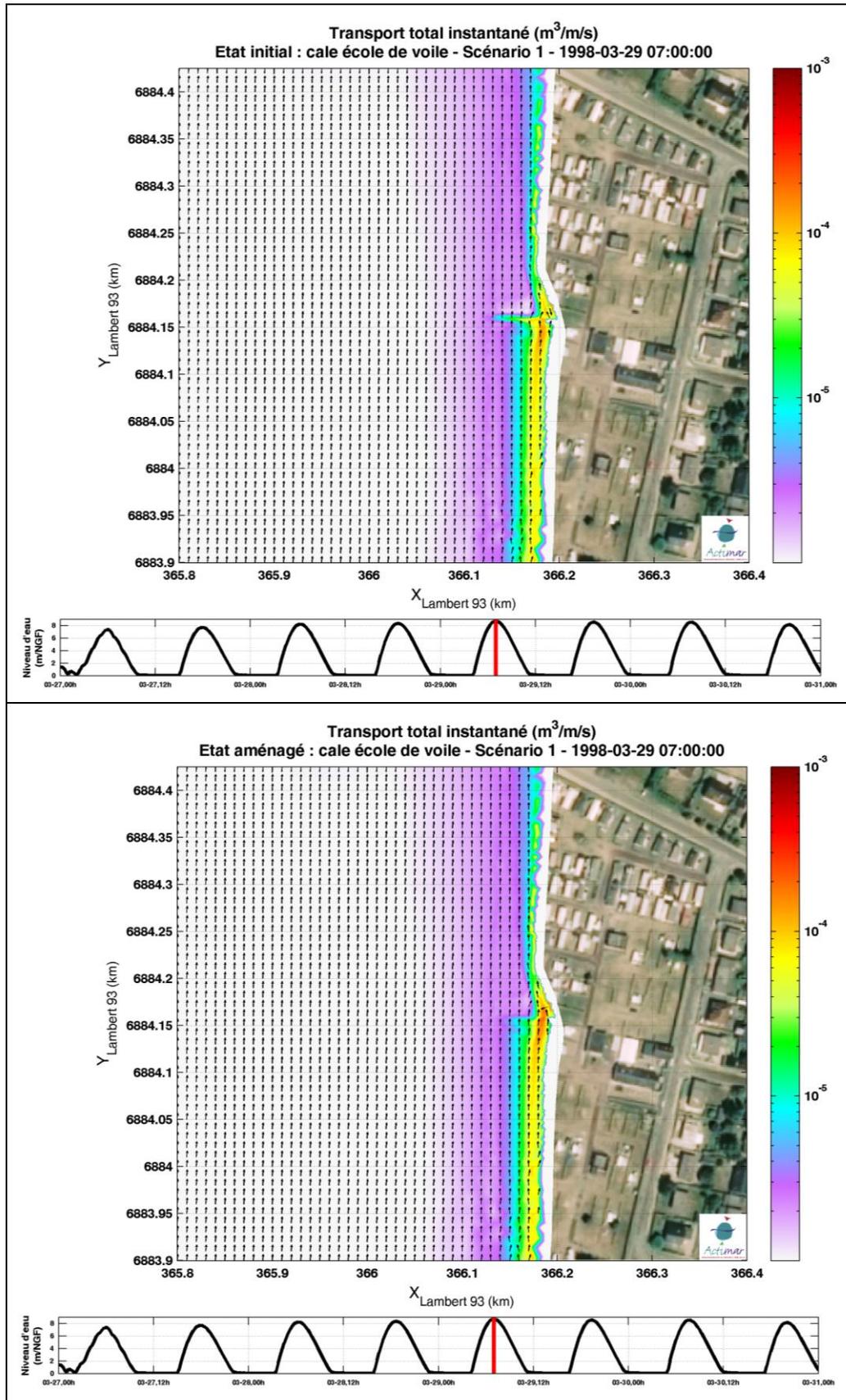


Figure 5-10 : Cartes de transport solide instantané ( $m^3/m/s$ ) pour le scénario 1 au moment de la pleine mer, dans l'état initial (en haut) et pour l'aménagement de la cale de l'école de voile (en bas).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

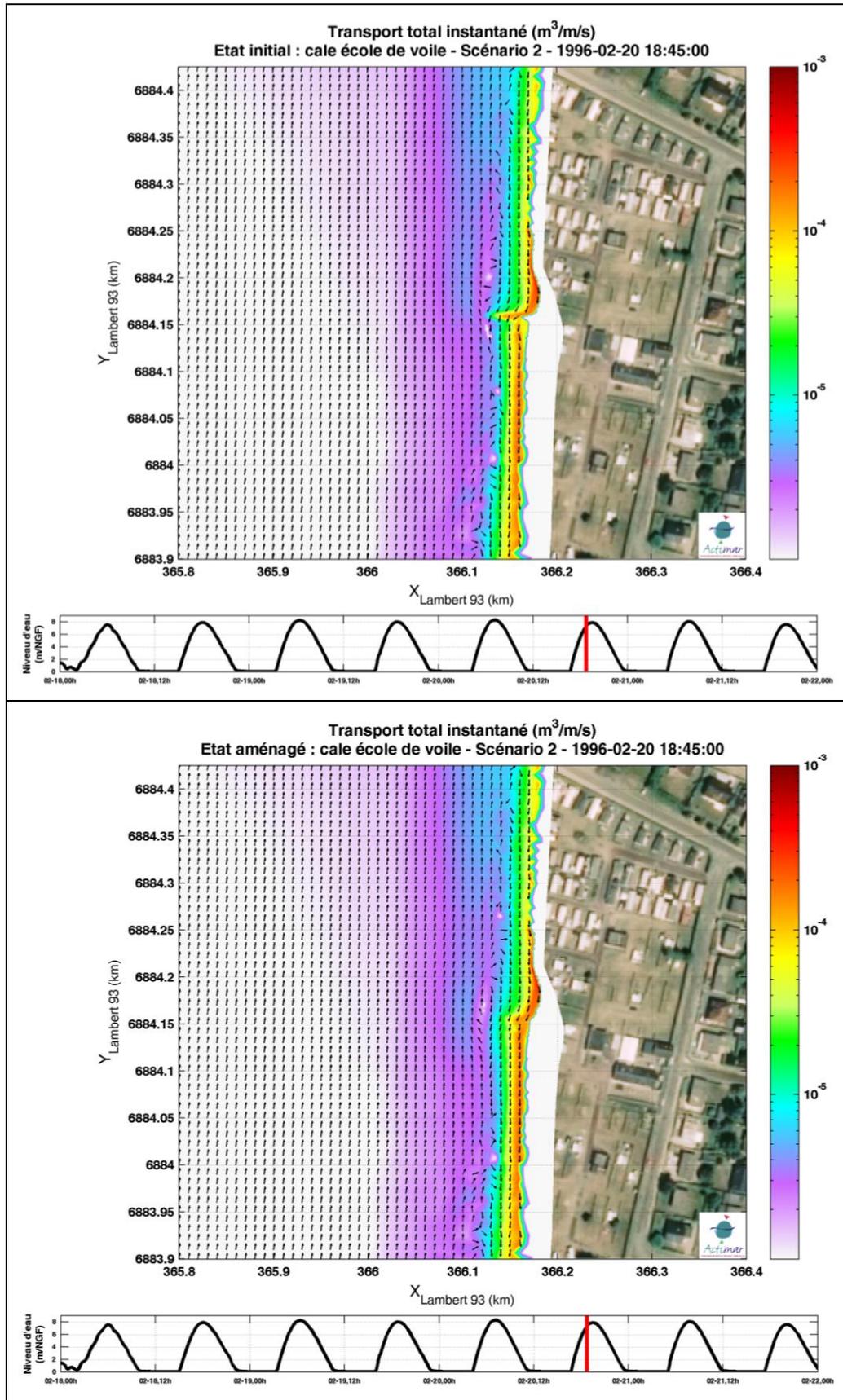


Figure 5-11 : Cartes de transport solide instantané ( $m^3/m/s$ ) pour le scénario 2 au moment de la pleine mer, dans l'état initial (en haut) et pour l'aménagement de la cale de l'école de voile (en bas).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

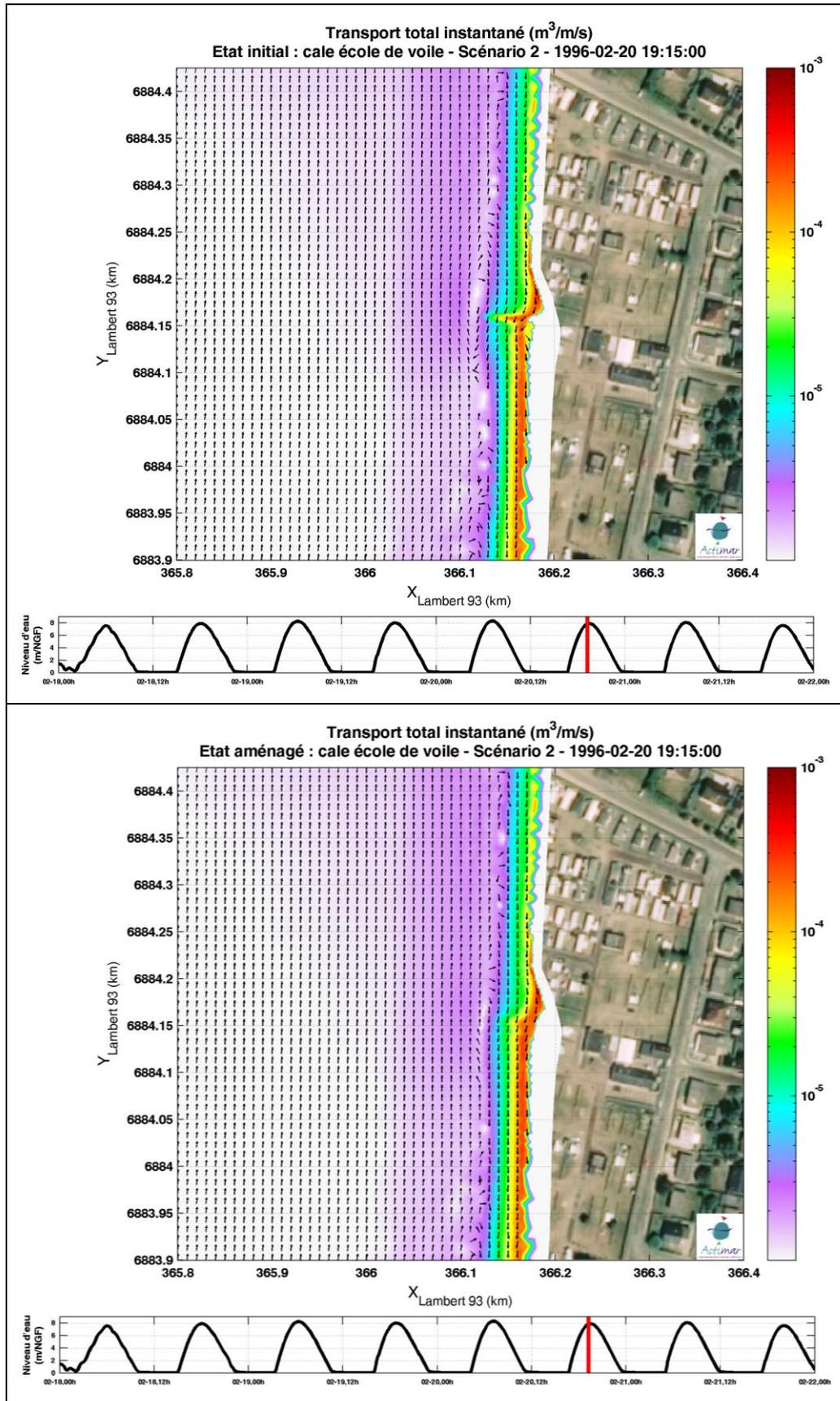


Figure 5-12 : Cartes de transport solide instantané ( $m^3/m/s$ ) pour le scénario 2 au moment de la pleine mer, dans l'état initial (en haut) et pour l'aménagement de la cale de l'école de voile (en bas).

# 6. INVESTIGATIONS DE SOLUTIONS D'AMENAGEMENT

## 6.1 EMBOUCHURE

### 6.1.1 REVUE DES SOLUTIONS PRECEDEMMENT ENVISAGEES

#### 6.1.1.1 LCHF (1982)

L'étude du LCHF (1982), basée sur un modèle physique, concernait différents types d'aménagement à l'embouchure :

- Le dragage d'un chenal dans une position relativement Nord à l'embouchure, pour limiter le développement du chenal au Sud qui participait à l'érosion le long du trait de côte sur le secteur Montmartin/Hauteville,
- Un épi d'arrêt vers l'extrémité de la flèche d'Agon,
- La digue basse côté Sud-Est de l'embouchure.

Préalablement aux tests de ces solutions, le modèle physique (qui tient compte des effets combinés de la marée et des vagues sur la dynamique sédimentaire) a été calé et validé sur une période de 10 ans précédant l'étude (1969 à 1979, Figure 6-1).

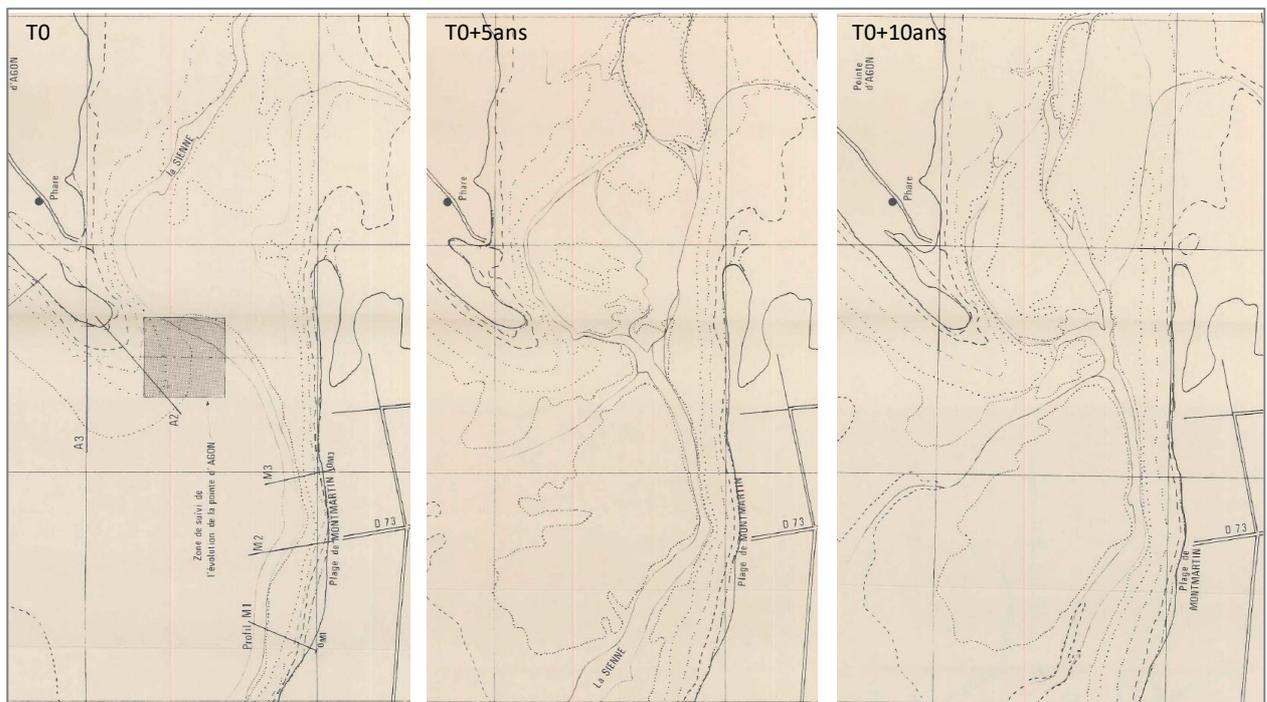


Figure 6-1 : Evolutions morphodynamiques simulées par modèle physique sur la période 1969-1979 (LCHF, 1982).

**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

**Le 1<sup>er</sup> test d'aménagement a porté sur l'aménagement d'un chenal « Nord rectiligne », qui nécessitait un dragage de 150 000 m<sup>3</sup>. L'essai a été abandonné après une évolution équivalente à 3 années, compte tenu d'un engraissement (et, le cas échéant, de dragages d'entretien) du chenal de l'ordre de 20 000 m<sup>3</sup>/an qui avait été considéré comme excessif pour un entretien régulier. Bien entendu, les essais en bassin sont plus courts que la réalité, selon la technique de l'allongement du pas de temps morphodynamique de la modélisation.**

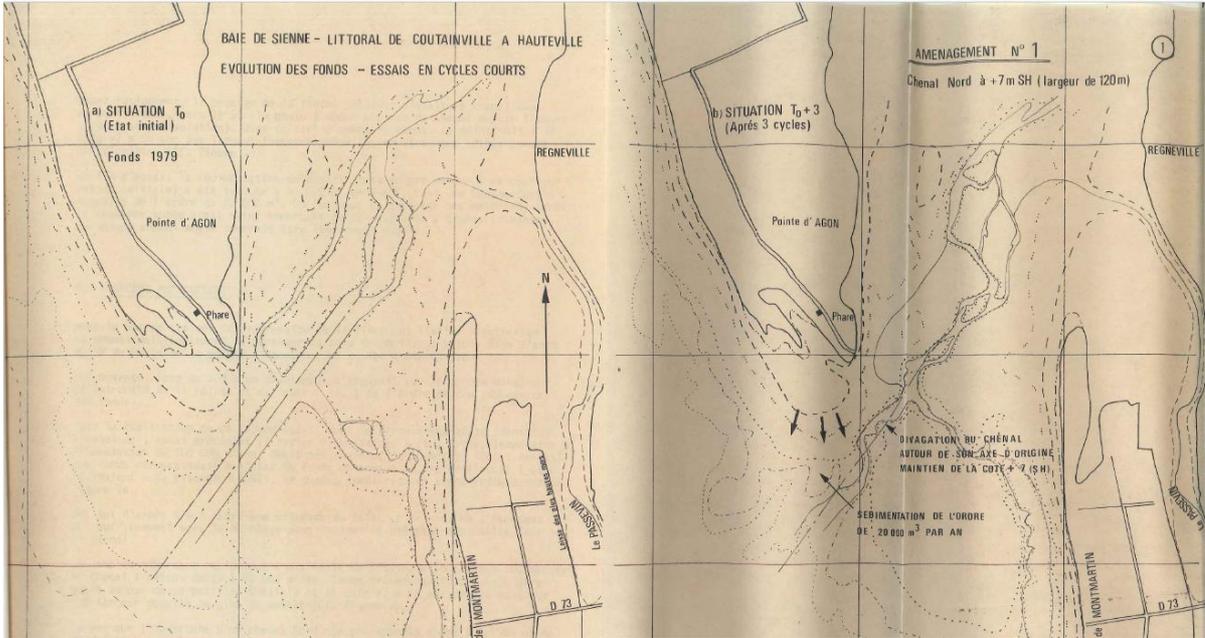


Figure 6-2 : Etat des fonds à T0 et àT0+3ans - solution N°1 (chenal « Nord rectiligne »).

**Le 2<sup>ème</sup> test d'aménagement reprenait le dragage d'un chenal « rectiligne Nord » de 150 000 m<sup>3</sup>, et prévoyait un épi d'arrêt de 300 m de long vers l'extrémité de la Pointe d'Agon. Cet épi, de 300 m de long pour arrêter les sables de la dérive littorale, s'est avéré peu efficace car rapidement débordé et contourné.**

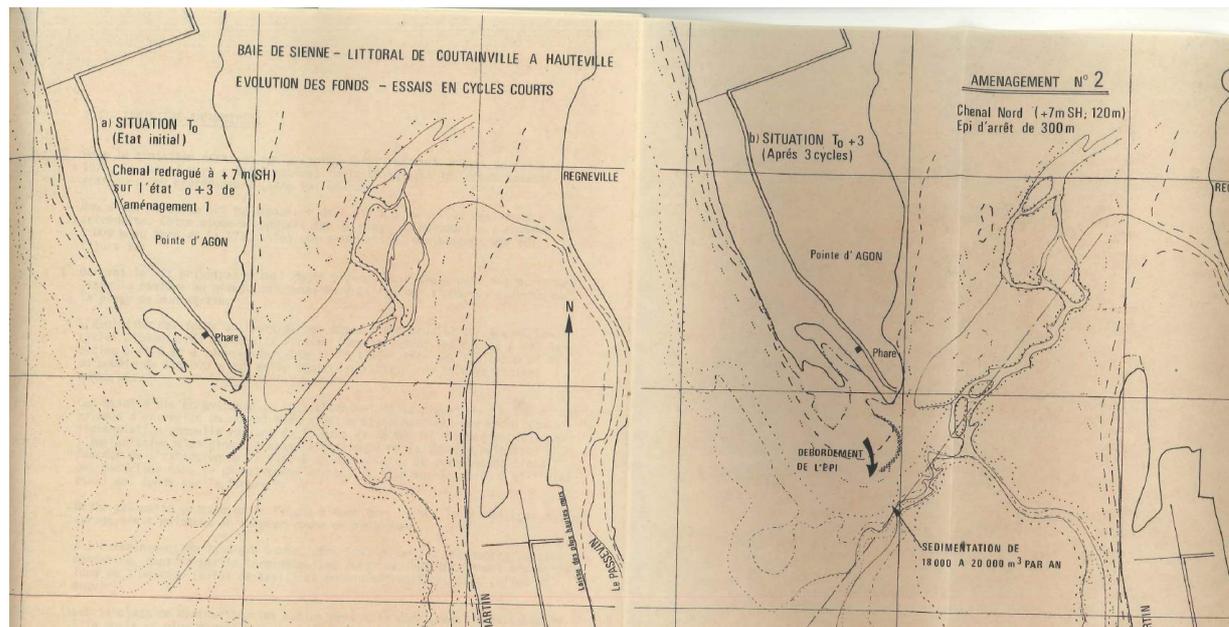


Figure 6-3 : Etat des fonds à T0 et àT0+3ans - solution N°2 (chenal « Nord rectiligne » + épi d'arrêt).

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

**Le 3<sup>ème</sup> aménagement** reprenait également le chenal rectiligne Nord (150 000 m<sup>3</sup>), et prévoyait une digue basse côté Montmartin et dont les caractéristiques géométriques étaient les suivantes : 1.5 à 2 m de hauteur (au-dessus du fond) ; 500 m de long.

Cet essai (sur 4 ans) avait mis en évidence le rôle essentiel de la digue basse de 500 m, vis-à-vis de l'érosion du littoral de Montmartin. On peut noter également une diminution sensible de l'engraissement du chenal (18 000 m<sup>3</sup> au lieu de 20 000 m<sup>3</sup> dans le cas de la solution N°1).

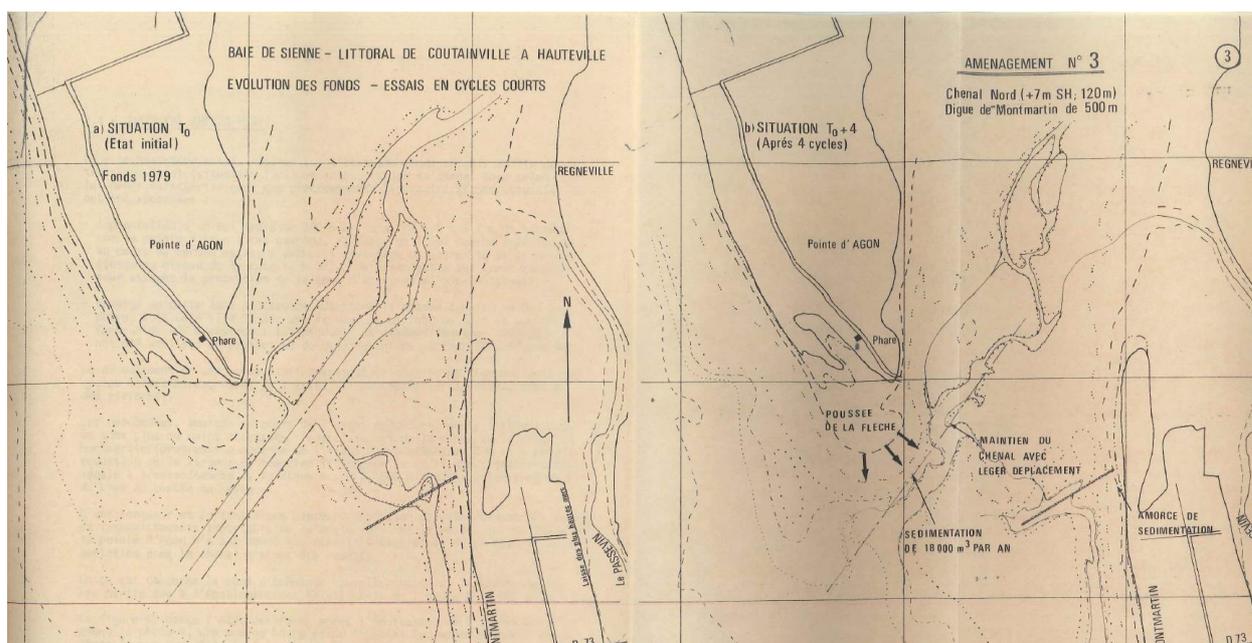


Figure 6-4 : Etat des fonds à T0 et à T0+3ans - solution N°3 (chenal « Nord rectiligne » + digue basse côté Montmartin).

**4<sup>ème</sup> aménagement : chenal Nord rectiligne (dragage 150 000 m<sup>3</sup>) + digue basse Montmartin 500 m + épi droit à la pointe d'Agon (1,5 à 2 m de haut et 300 m de long).**

D'une longueur et surtout d'une hauteur insuffisante (débordement des sables et franchissements importants de la houle par PM), le nouvel épi de 300 m sur la pointe d'Agon n'a pas donné les résultats espérés et, de ce fait, la sédimentation dans le chenal n'a pas été réduite.

A partir des résultats des essais en cycle court (durée équivalente à 3 à 4 ans), un **essai en cycle long (durée équivalente à 8 ans)** a été réalisé pour une combinaison d'aménagements (Figure 6-5). Les résultats de cet essai ont surtout permis de **confirmer l'intérêt de la digue basse vis-à-vis de l'érosion du littoral de Montmartin**. Le dragage du chenal était surtout mis en avant pour faciliter les conditions d'accès au havre.

**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

3 - ESSAI EN CYCLE LONG

Les essais précédents ont permis d'orienter le choix de l'aménagement final à expérimenter au cours de l'essai en cycle long sur une durée équivalente à 8 ans.

Cet aménagement comprend :

- le chenal Nord, dragué suivant l'amorce du bras qui s'est ouvert, en nature, en extrémité de la pointe d'Agon au début des années 1980<sup>®</sup> à la cote +7 m SH, sur une longueur d'environ 1 200 m, la largeur au plafond étant maintenue à 120 m,
- la digue basse de 500 m (hauteur 2 m) sur la plage de Montmartin comme expérimentée en cycles courts 3 et 4,
- l'épi droit enraciné sur la pointe d'Agon, allongé (longueur portée à 400 m) et rehaussé (hauteur de 4 m au-dessus des fonds),
- le dragage de la zone d'échouage, dans l'anse située devant le phare, à +7 m SH sur une largeur au plafond de 40 m avec des berges consolidées de pente 1/2 et une profondeur de 400 m (débordant le phare d'une cinquantaine de mètres), les produits de dragage étant réutilisés en confortement du cordon dunaire,
- une batterie de 4 épis de 200 m de longueur, de 1 m de hauteur disposés tous les 350 m environ au Sud de la digue basse sur la plage de Montmartin-Hauteville.

Le schéma de la figure 5 donne les différents ouvrages ou travaux réalisés, l'échelonnement de ces interventions étant précisé ci-après.

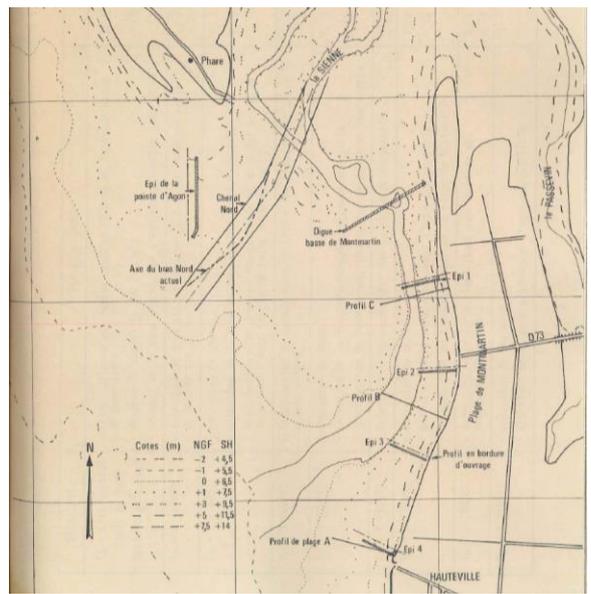


Figure 6-5 : Descriptif des aménagements pour l'essai en cycle long (durée équivalente à 8 ans).

**6.1.1.2 GRESARC (2001) : épis et rechargement devant le front de mer d'Hauteville**

L'étude du GRESARC (2001) concernait le confortement du front de mer d'Hauteville, selon deux types d'aménagement qui se combinent (Figure 6-6) :

- La mise en place d'épis (perpendiculaires au trait de côte) en enrochement de 100 m de long,
- Un rechargement de 255 à 280 000 m<sup>3</sup> de sable.

Le montant des travaux avait été estimé à 1.4 millions d'euros HT selon la répartition suivante :

- 45% pour le rechargement, soit 600 à 650 000 euros, avec un coût au m<sup>3</sup> de 2.3 euros HT,
- 55% pour la construction des 5 épis, soit 800 000 euros HT, avec un coût moyen de 1 700 euros HT/m linéaire d'ouvrage

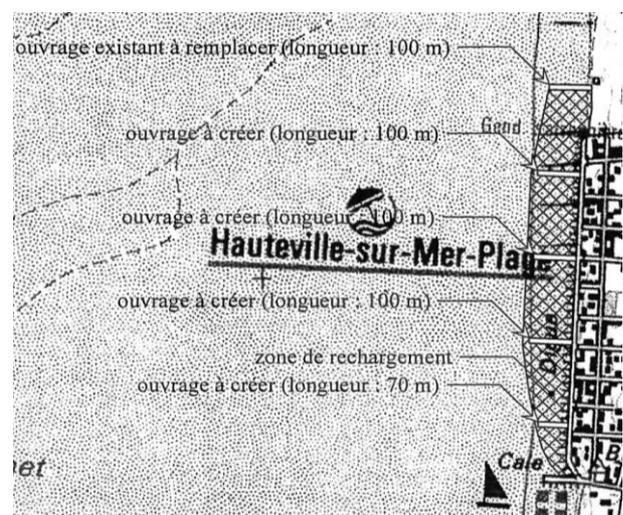


Figure 6-6 : Localisation des épis et des rechargements en sable, projet de confortement du front de mer d'Hauteville (GRESARC, 2001).

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

#### 6.1.1.3 GRESARC (2002) : Elargissement de la passe d'entrée et creusement d'un chenal

A l'embouchure, l'étude du GRESARC (2002) a porté sur des opérations de dragage pour créer un chenal plus à l'Ouest qu'il ne l'est actuellement, rejoignant ainsi les recommandations du LCHF (1982) mais avec des volumes moins importants (115 000 m<sup>3</sup> vs. 150 000 m<sup>3</sup>). Le projet prévoyait de réutiliser les matériaux extraits pour combler ce qui tendrait à devenir « l'ancien chenal ».

TRAVAUX DE DEFENSE CONTRE LA MER	
SYNDICAT INTERCOMMUNAL D'AMENAGEMENT DE LA BAIE DE SIENNE	
ELARGISSEMENT DE LA PASSE D'ENTREE ET CREUSEMENT D'UN CHENAL	
AVANT PROJET SOMMAIRE	
<u>Estimation sommaire</u>	
- Installation de chantier	15 500,00 €
- Creusement du nouveau chenal et comblement de l'ancien lit 50 000 m <sup>3</sup> + 65 000 m <sup>3</sup> = <u>115 000 m<sup>3</sup> × 2,3 €</u>	264 500,00 €
Total travaux	280 000,00 €
- Etudes, honoraires technicien	38 600,00 €
Total HT	318 600,00 €
TVA	62 445,60 €
Total TTC	381 045,60 €
Arrondi à	381 122,54 € (2 500 000 F)

Figure 6-7 : Extrait de l'AVP (GRESARC, 2002).

On peut noter au passage que le GRESARC estime que les aménagements du site (digue basse et, dans une moindre mesure, les épis de haut de plage plus au Sud), d'après les évolutions constatées entre 1988 et 2002, que cet ensemble d'ouvrages a permis d'obtenir une bonne stabilisation du trait de côte au Sud de la digue basse, voire de constater une reconstitution partielle des espaces dunaires en haut de plage.

#### 6.1.1.4 Avis de R. Paskoff et F. Verger sur les aménagements (oct. 2002)

Etonnamment, Paskoff et Verger (2002) indiquent que la mise en place de la digue basse n'a pas permis d'enrayer le recul du trait de côte au Sud de celle-ci. Cette interprétation est contradictoire avec celle du GRESARC (2002) et avec les analyses des évolutions récentes (Liteau, 2012, et analyses des évolutions du trait de côte, et du chenal le long du littoral de Montmartin dans le cadre de la présente étude).

Ils soulignent d'autre part le rôle qu'a joué la digue basse sur l'érosion de la flèche de Montmartin.

Leurs recommandations portent sur :

- un chenal rectiligne plus à l'Ouest (que son tracé en 2002), pour recouper artificiellement le méandre de la Sienne dont la présence est la cause première de l'érosion de la partie distale de la flèche de Montmartin.
- Le comblement du méandre de La sienne avec les matériaux extraits pour le tracé d'un chenal rectiligne plus à l'Ouest.

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

---

#### 6.1.2 PROPOSITIONS DE SOLUTIONS

Il peut s'agir soit de :

- Reprendre des solutions déjà étudiées, et dont on estime, au regard des évolutions récentes, de la configuration actuelle et de la compréhension des phénomènes hydro-sédimentaires, qu'elles restent pertinentes et intéressantes à tester avec le modèle.
- D'autres types de solutions, non investiguées dans les études précédentes (par exemple parce que ce sont les évolutions les plus récentes qui en montrent l'intérêt ou les imposent).

Les différentes solutions peuvent être testées seules ou en combinaison en fonction de leur complémentarité.

##### 6.1.2.1 A l'embouchure

A l'issue de la réunion d'avancement du 14 mai 2018, il a été décidé en concertation avec la DDTM50 et le Maître d'ouvrage de tester les solutions d'aménagement suivantes :

- **Aménagement n°1 (AME 1)** : creusement d'un chenal plus à l'Ouest qu'il ne l'est actuellement, avec un tracé rectiligne, pour limiter le développement du chenal actuel caractérisé par un méandre à l'Est très marqué.
- **Aménagement n°2 (AME 2)** : suppression de la digue basse.
- **Aménagement n°3 (AME 3)** : prolongement vers l'Est de l'enracinement de la digue pour contraindre le méandre et éviter le percement d'un chenal au travers du cordon dunaire.
- **Hypothèse n°4 (AME 4)** : brèche à l'enracinement de la digue basse afin d'évaluer les risques de contournement de l'ouvrage par le chenal principal.

Pour le creusement d'un chenal, une première hypothèse de travail est une quantité draguée de 120 000 m<sup>3</sup>. Compte tenu de la situation critique du méandre à l'Est, cette solution prévoit de réutiliser les sédiments dragués pour le combler (et favoriser implicitement, de fait, le nouveau chenal). Le dépôt des matériaux vise d'abord à conforter la zone érodée en amont de l'enracinement de la digue basse, et le sable restant est ensuite positionné pour cloisonner le chenal actuel et favoriser le nouveau chenal.

##### 6.1.2.2 Littoral Agon-Coutainville

Faut-il intégrer ici les préconisations de la note sur les pieux hydrauliques ? (cf. NT à destination de la DDTM50).

L'analyse sera complétée en janvier dans le cadre de l'avenant sur le système d'endiguement d'Agon-Coutainville.

##### 6.1.2.3 Littoral Hauteville

###### 6.1.2.3.1 Rechargements :

Les rechargements en sable constituent une solution technique adaptée sur ce secteur, même pour les linéaires de front de mer déjà enrochés. A noter que jusqu'à présent la stratégie a consisté à recharger selon une pente déjà proche d'une pente d'équilibre, mais que pour le prochain rechargement, la stratégie pourrait consister à remonter le sable le plus haut possible contre les enrochements. Un retour d'expérience récent sur la plage de la Boirie à Oléron, sur laquelle les deux types de rechargement ont été testés, tend à montrer que la stratégie à privilégier est celle pour laquelle le sable est rechargé le plus haut possible en appui contre les enrochements qui constituent le trait de côte. Une interprétation intuitive est que la tenue

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

(rémanence) du rechargement est allongée puisqu'on repassera forcément par une situation avec une pente plus faible (pente en équilibre avec les conditions hydrodynamiques).

A plus long terme, et en fonction de l'analyse de la rémanence du rechargement de 30 000 m<sup>3</sup> réalisé en 2018, des rechargements plus importants peuvent être prévus. On montre quelques exemples de profils pour un rechargement équivalent à ce qui avait été proposé par le GRESARC, voire au-delà si on considère que l'ensemble du budget (rechargement + épis) peut être consacré à un rechargement massif, compte tenu des réserves sur le rapport coût/efficacité des épis par rapport à un contexte très favorable pour le rechargement (forte disponibilité en sable à proximité immédiate, opérations de prélèvement/rechargement par moyen terrestre, donc intéressant financièrement et d'un point de vue environnemental compte tenu de l'absence de turbidités induites).

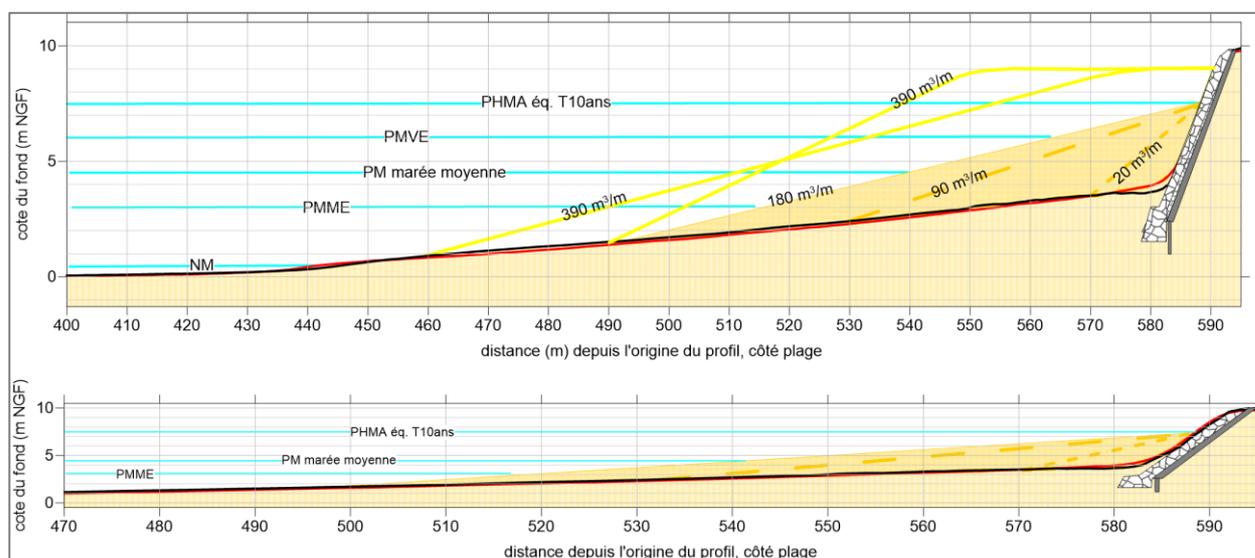


Figure 6-8 : Exemple de projets de rechargement devant le front de mer d'Hauteville.

### 6.1.2.3.2 Préconisations pour les zones d'emprunt de sable

La disponibilité en sable sur la zone d'étude est importante, y compris en se limitant à des opérations par moyen terrestre compte tenu d'un estran très large. Les localisations possibles pour l'emprunt du sable, pour des opérations de rechargement, sont donc multiples.

Pour les premières opérations de rechargement, relativement modestes (30 000 m<sup>3</sup> au plus, pour le dernier rechargement en 2018), le choix de la zone d'emprunt, du point de vue de la dynamique sédimentaire le long du littoral, importait peu. Dans la mesure bien entendu où l'emprunt ne se faisait pas directement à proximité du trait de côte.

Pour des opérations plus conséquentes (au-delà de 100 000 m<sup>3</sup> par exemple), il convient de définir la zone d'emprunt en fonction de certains critères. D'une manière générale, du point de vue uniquement de la dynamique sédimentaire, les prélèvements sont à privilégier :

- le plus bas possible sur l'estran
- des sables les plus grossiers (dans une certaine mesure de l'attractivité de la plage)
- soit au droit de la zone à recharger, soit au droit d'un secteur où les accumulations représentent un inconvénient
- en-dehors des points hauts qui participent à l'atténuation des vagues qui se propagent vers la côte; ce qui va quelque peu à l'encontre d'une approche intuitive qui consiste à prélever du sable sur les zones d'accumulations (on peut à ce propos mentionner des

**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

approches d'ingénierie côtière qui consiste à recharger les barres d'avant-côte, c'est à dire à privilégier les point hauts qui sont, de fait, des zones d'accumulation).

Plus spécifiquement sur la zone d'étude, en dehors du bas d'estran, un secteur à investiguer est le delta de jusant du havre, c'est à dire son embouchure externe. Des dragages depuis le musoir de la digue basse, qui est un " point d'appui" du chenal, vers le large contribuerait à maintenir le chenal dans un tracé et une position qui limite un méandrement vers le littoral de Montmartin et d'Hauteville. De fait, l'allongement de la flèche de Montmartin, qui force l'exutoire de La Sienne vers le Sud, serait également réduit.

Un exemple de surface type à définir comme zone d'emprunt est indiquée en Figure 6-9. Les caractéristiques géométriques (longueur, largeur, orientation) de la zone d'emprunt restent bien entendu à définir mais la figure montre une surface de l'ordre de 300 000 m<sup>2</sup> ; soit, par exemple, une épaisseur moyenne de 30-40 cm à extraire pour atteindre un volume de 100 000 m<sup>3</sup>.

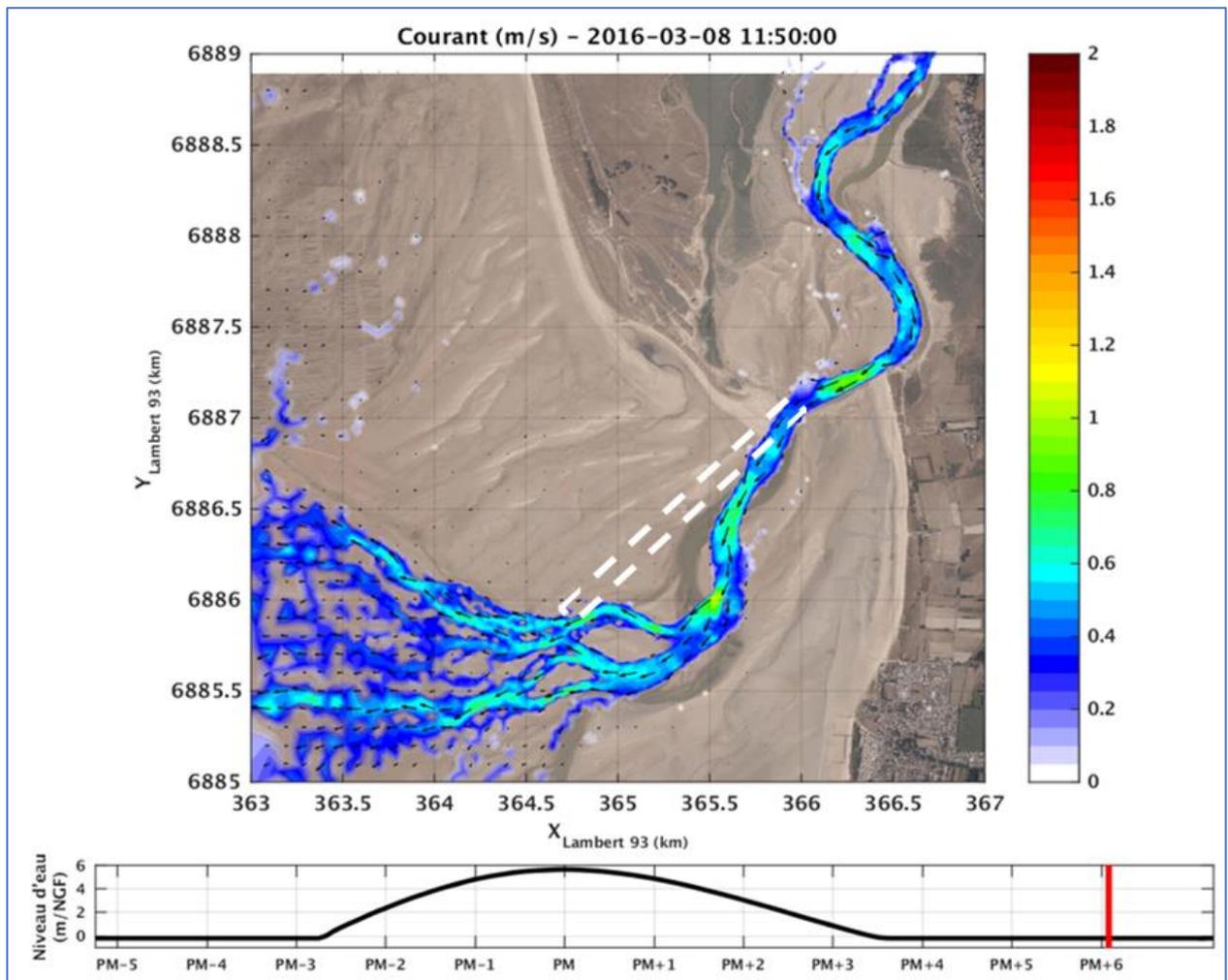


Figure 6-9 : Surface type (contour blanc en pointillés) à définir comme zone d'emprunt pour les sables de rechargement.

6.1.2.3.3 Digue des garennes

La digue des garennes a pour objectif de conforter le trait de côte situé devant une zone urbanisée où le terrain est relativement bas. Localement, sur une partie du terrain de camping situé juste derrière la dune le terrain dépasse à peine 6 m NGF. C'est-à-dire 2.5 m en-dessous du niveau

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

centennal du PPRL à un horizon 2020 (8.5 m NGF) et près de 3 m en-dessous d'un niveau équivalent à un horizon 2100 (8.9 m NGF).

Les quantités de sable au-dessus du niveau 9 m NGF sont indiquées, à partir des levés LIDAR 2010 et 2016, ci-après :



Figure 6-10 : Quantités de sable au-dessus de la cote +9m NGF en 2010 (marron) et en 2016 (bleu) – les traits (marron, bleu) sont les contours +9 m NGF (2010, 2016).

Compte tenu :

- D'une topographie particulièrement basse de certains secteurs de la zone urbanisée en arrière du cordon dunaire.
- De quantités de sables qui pourraient s'avérer insuffisantes en cas de tempête exceptionnelle ou d'une succession de tempêtes très énergétiques. Au Nord du tronçon des garennes, les quantités peuvent être inférieures au seuil critique de 50 m³/ml (critère

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

---

FEMA, qui reste très approximatif). Certes pour un niveau relativement élevé (+9 m NGF), qui correspond à peu près à l'hypothèse PPRL T100ans ; mais il faut également tenir compte des incertitudes possibles sur les niveaux PPRL. Des analyses récentes d'un comité scientifique de spécialistes (Ifremer, SHOM, CNRS...) a par exemple estimé que les niveaux centennaux en baie du Mont-Saint-Michel (dans le cadre du PPRL du Marais de Dol) pouvaient être sous-estimé de plus d'un mètre selon l'approche classique des PPRL (basés sur les cartes de niveaux extrêmes SHOM/CETMEF).

Un confortement conséquent du trait de côte, de type digue à talus en enrochement, est une solution adaptée vis-à-vis du risque submersion marine en arrière du tronçon des garennes.

D'autre part, les essais récents de rechargement le long de la digue d'Hauteville, indique qu'un ouvrage de ce type autorise, malgré la réflexion des vagues lors de certains événements, un niveau de plage relativement haut.

#### 6.1.2.4 Littoral Regnéville

Les parcelles urbanisées et les routes en dessous de la cote +9 m NGF, en prise directe avec la mer (en cas de pleine mer à un tel niveau), ont été contournées sur les base des données LIDAR de 2010 (Figure 6-11).

Il s'avère que, sur une bande plus ou moins large, presque tout le littoral de Regnéville peut être considéré comme à risque. On rappelle qu'un niveau de +9 m NGF correspond, selon les hypothèses du PPRL, à un niveau centennal à un horizon 2100. Mais il pourrait s'agir d'un niveau centennal à un horizon plus immédiat, voire actuel, compte tenu d'une possible sous-estimation des niveaux extrêmes des cartes SHOM/CETMEF (cf. section 6.1.2.3.3).

Un système d'endiguement le long du trait de côte est a priori une solution adaptée, compte tenu de :

- L'absence d'effets, en cas de niveaux extrêmes, sur le risque submersion marine d'autres secteurs urbanisés.
- L'absence d'effets sur la dynamique sédimentaire (notamment sur les vasières à proximité, cf. demande du cahier des charges).

Les résultats des simulations de submersion marine sur le secteur Montmartin/Hauteville (cf. section 7.1.3), ne laissent aucun doute sur les absences d'effets qui sont mentionnés sur le secteur d'Hauteville.

La zone d'expansion que pourrait constituer, en l'absence de protection, la zone basse du littoral de Regnéville est trop réduite pour que les volumes d'eau qui la submergent aient un quelconque effet sur des secteurs urbanisés voisins.

Et il est certain que le rôle que jouerait une digue le long du trait de côte serait très épisodique et ne peut avoir d'effet notable sur la dynamique sédimentaire des vasières en contrebas.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville



Figure 6-11 : Parcelles urbanisées et routes en-dessous de la cote +9 m NGF – littoral de Regnéville.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

6.1.2.5 Secteur amont : Les Vandais, La Duranderie, Manoir d'Urville

Un examen des surfaces situées en-dessous de la cote +9 m NGF montrent des surfaces qui sont très réduites en arrière du trait de côte (Figure 6-12 et Figure 6-13).

Compte tenu de surfaces très réduites au regard de la section de la Sienne autour de la pleine mer, la dépoldérisations des champs en bordure du trait de côte ne constitue pas un aménagement pertinent pour réduire le risque de submersion marine sur un secteur voisin. Les volumes qui submergerait la zone d'expansion créée seraient en effet beaucoup trop faibles.

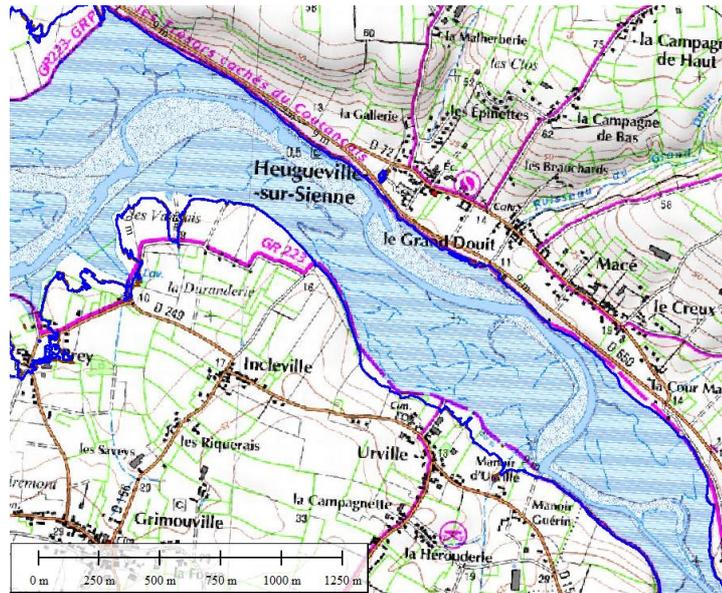


Figure 6-12 : Superposition de la ligne +9m NGF (trait bleu continu) sur la carte IGN - secteur amont : Les Vandais, La Duranderie, Manoir d'Urville.



Figure 6-13 : Superposition de la ligne +9m NGF (trait bleu continu) sur l'ortho-photo IGN - secteur amont : Les Vandais, La Duranderie, Manoir d'Urville.

## 6.2 MODELISATIONS DE LA MORPHODYNAMIQUE A L'EMBOUCHURE

### 6.2.1 REMARQUES PREALABLES

Les premiers résultats présentés sont ceux d'une simulation des évolutions futures depuis une configuration initiale dite de référence, sans aménagement.

N.B. : les évolutions futures, même si une analyse statistique importante des conditions hydrodynamiques (successions d'événements de marée et de vagues) a été réalisée, ne peuvent être considérées que comme des évolutions possibles. Il faut bien garder à l'esprit que les conditions de vagues futures, et leurs concomitances avec les conditions de marée, ne sont pas connues a priori.

L'exercice de modélisation morphodynamique des évolutions futures vaut surtout pour évaluer les effets de solutions d'aménagement. On rappelle que les modélisations physiques du LCHF dans les années 1980, qui se limitaient pour la plupart à une durée de 3 ou 4 ans, ont surtout permis de retenir l'aménagement de la digue basse comme efficace vis-à-vis de l'érosion au Sud de celle-ci (littoraux de Montmartin et d'Hauteville). Les évolutions à l'embouchure, même pour la simulation la plus longue (8 ans), ne reflètent bien entendu pas l'ensemble des évolutions qui ont été observées. Le site est très dynamique et les méandrements des différents chenaux relèvent de phénomènes particulièrement complexes. Même si le modèle mis en place est sophistiqué, il faut rester modeste quant à sa capacité à reproduire toute cette complexité. En particulier les effets de forts courants de marée sur la propagation des vagues restent encore simulés avec difficulté par les différents modèles utilisés par les bureaux d'études ou les centres de recherche. C'est par exemple la raison pour laquelle l'équipe du CNRS/Université de La Rochelle s'est limitée à une durée d'un an pour des simulations morphodynamiques du système flèche sableuse d'Arçay/embouchure du Lay (cf. thèse de Thomas Guérin, 2016). Il s'agissait de travaux pionniers en France. Pour aller plus loin dans le temps (plusieurs dizaines d'années), le modèle de la flèche d'Arçay a nécessité une schématisation importante : isoler le forçage des vagues sur la dynamique, sans tenir compte des effets de marée ; ce qui n'est pas envisageable dans notre cas, le marnage étant plus du double de celui du Sud-Vendée. Aucune schématisation jugée pertinente, du point de vue des phénomènes et des objectifs (dont les aménagements à tester), n'a pu être retenue pour simuler les évolutions morphodynamiques de l'embouchure de La Sienne.

Les simulations ont été prolongées jusqu'à 10 ans, même si au-delà de 3 ou 4 ans d'évolution, le niveau de « bruit » des cartes d'érosion et de dépôt commence à être significatif au regard des évolutions des chenaux et des bancs.

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

### 6.2.2 ETAT DE REFERENCE (SITUATION ACTUELLE, SANS AMENAGEMENT)

La Figure 6-14 présente les MNT au début de la simulation morphodynamique pour l'état de référence (situation actuelle, sans aménagement). Pour cette simulation, la Figure 6-15 illustre les MNT obtenus à T0+3.5 ans et T0+10 ans. La Figure 6-16 présente les évolutions des fonds associées pour ces deux échéances, obtenues par différentiel entre les bathymétries à T0+3.5 ans et à T0+10 ans avec la bathymétrie initiale.

Les évolutions passées se retrouvent dans ces résultats, notamment l'érosion vers l'Est du méandre de la Sienne entre Regnéville et l'enracinement de la digue basse. On retrouve également une dynamique marquée à l'embouchure, avec des méandres qui sont conditionnés par la présence de la digue basse.

Les évolutions le long de deux profils sont analysées (cf. Figure 6-17 pour leur localisation) :

- Un profil au Sud de la digue basse, perpendiculaire au trait de côte : « profil cross-shore »,
- Un profil qui couvre le chenal et l'enracinement de la digue basse : « profil enracinement ».

Ces deux profils ont été choisis dans des secteurs jugés critiques, et où une analyse des évolutions en fonction des aménagements pourra être détaillée.

La Figure 6-18 présente les résultats de la simulation de référence le long de ces deux profils aux échéances T0, T0+3.5 ans, T0+7 ans et T0+10 ans.

Les résultats de cette simulation servent de situation de référence pour mieux appréhender les effets des aménagements décrits dans les paragraphes suivants.

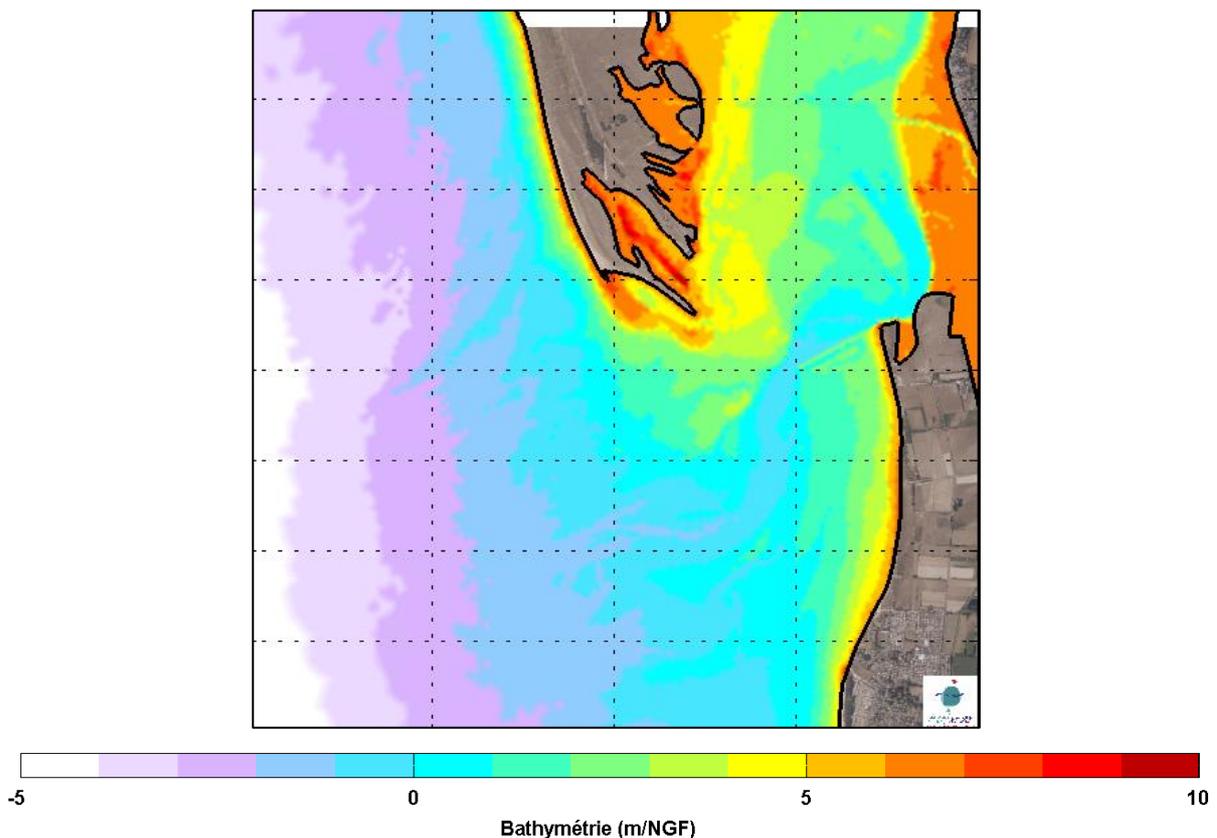


Figure 6-14 : Etat de référence (situation actuelle) : MNT initial à T0 de la simulation morphodynamique.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

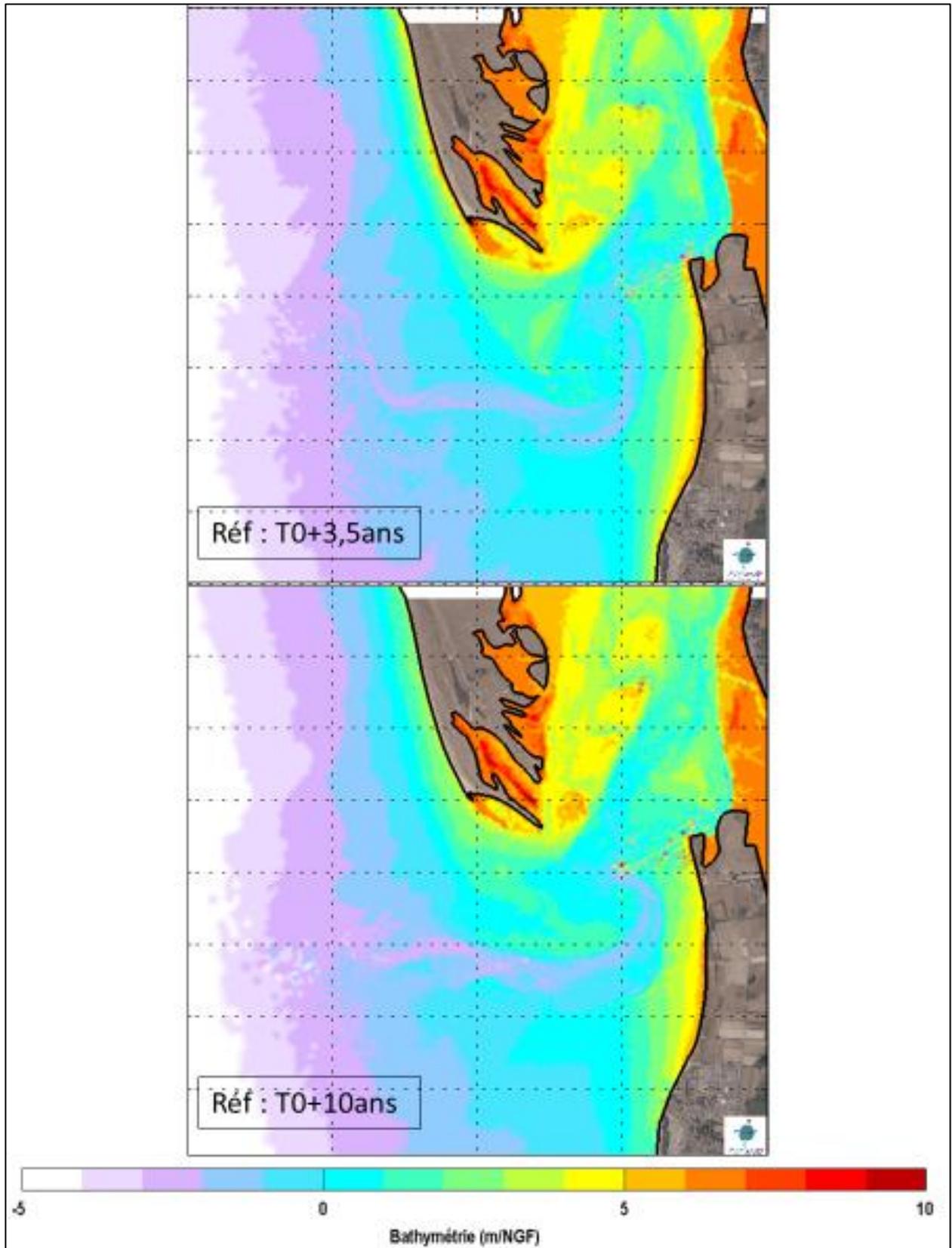


Figure 6-15 : Evolutions simulées à partir de l'état de référence (situation actuelle, sans aménagement) – fonds aux échéances T0+3.5 ans (en haut) et à T0+10 ans (en bas).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

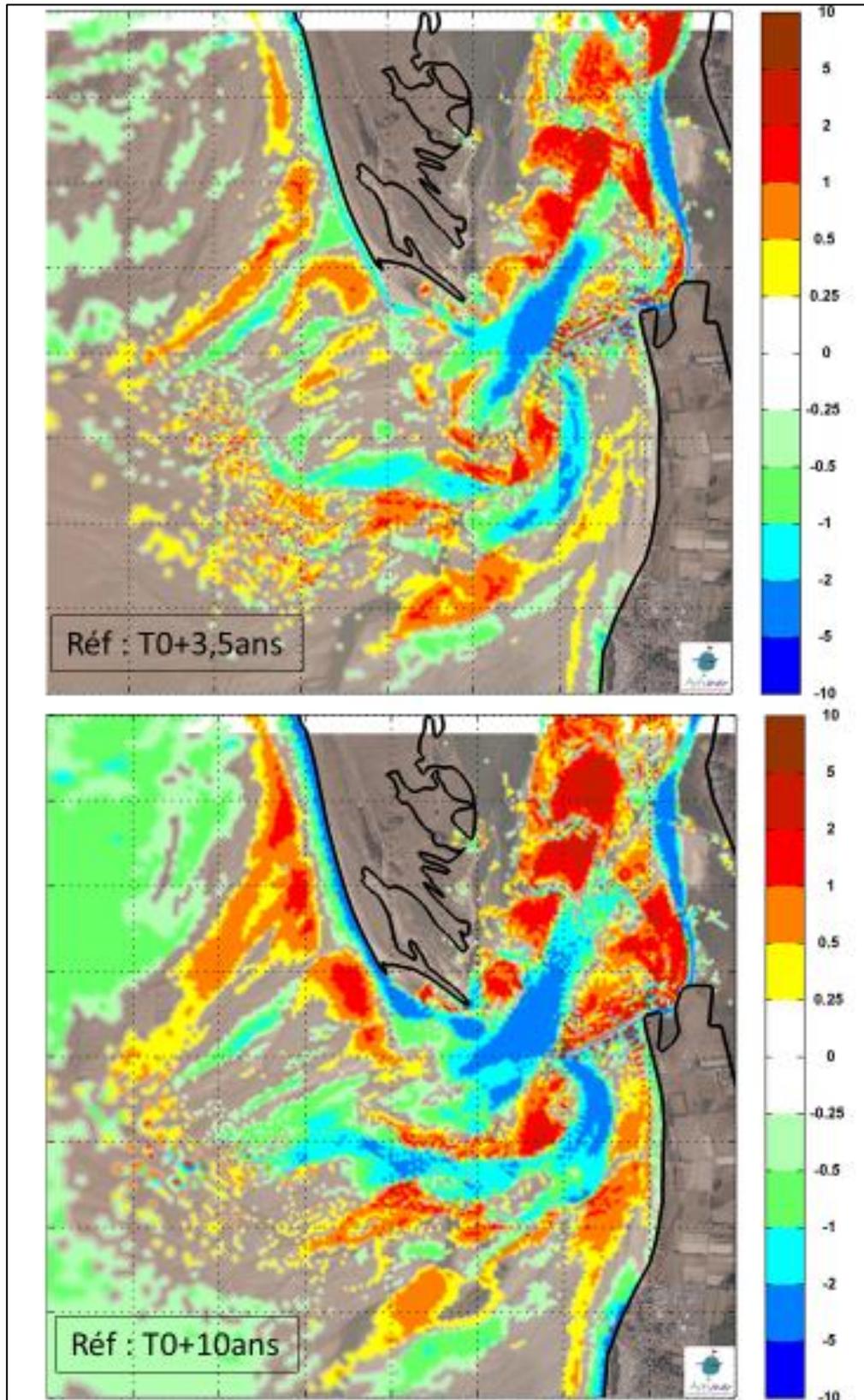


Figure 6-16 : Evolutions simulées à partir de l'état de référence (situation actuelle, sans aménagement) – bilans des érosions et des dépôts aux échéances T0+3.5 ans (en haut) et à T0+10 ans (en bas).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

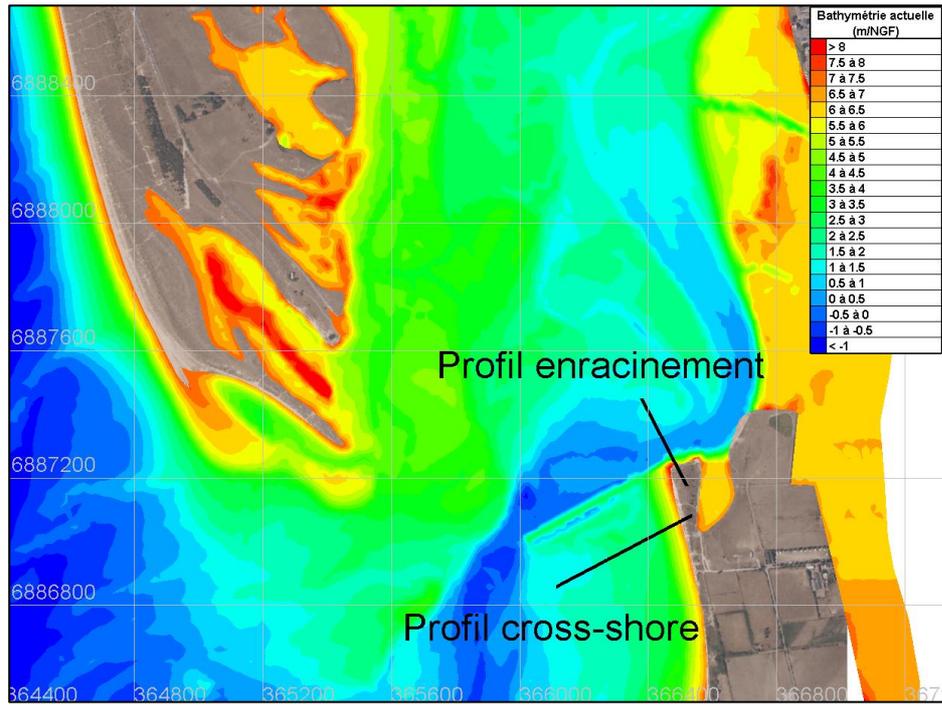


Figure 6-17 : Tracés des deux profils le long desquels les évolutions morphodynamiques simulées sont analysées au cours du temps.

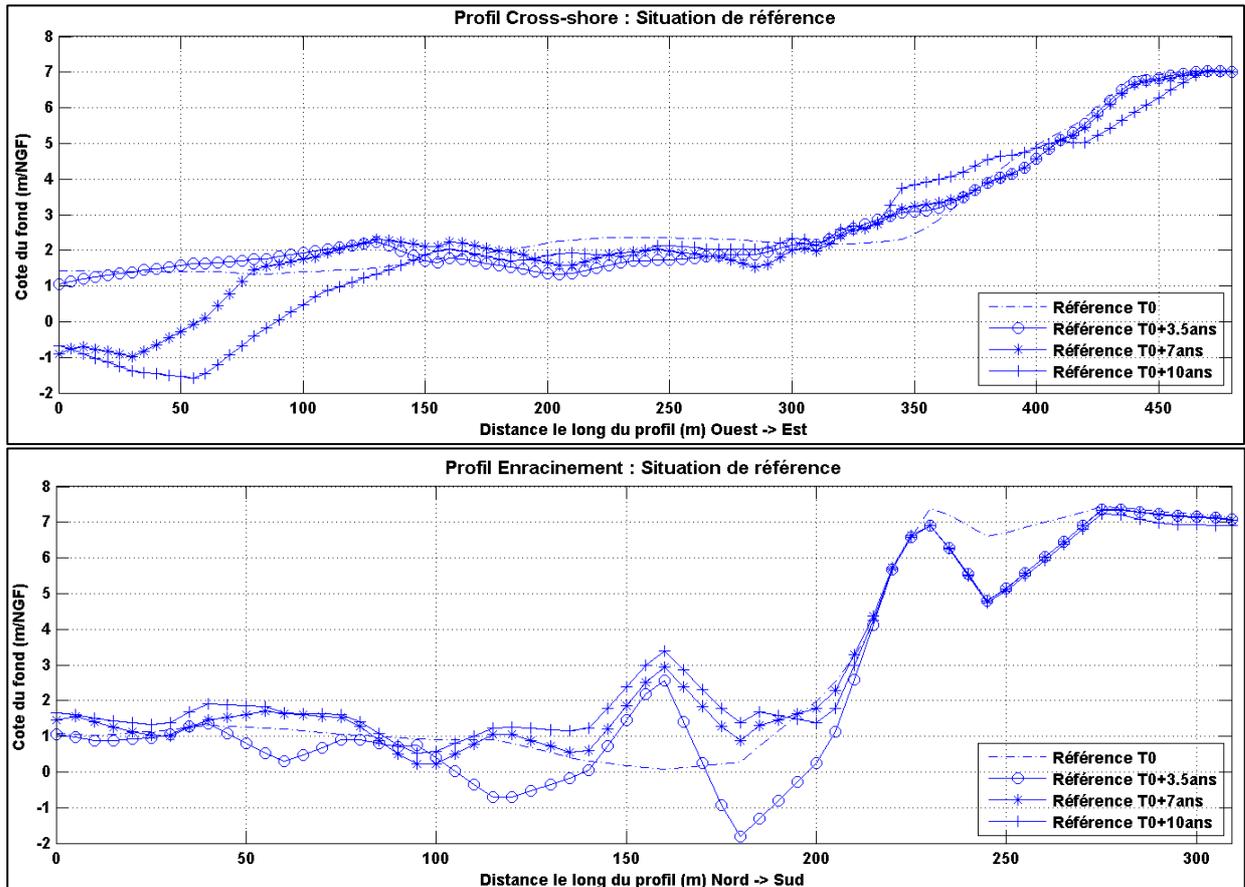


Figure 6-18 : Evolutions simulées à partir de l'état de référence (situation actuelle, sans aménagement)  
- profils simulés à T0, T0+3.5 ans, T0+7 ans et T0+10 ans. Profil « cross-shore » (en haut) et à  
« l'enracinement » (en bas).

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

#### 6.2.3 AMENAGEMENT N°1 : CREUSEMENT D'UN CHENAL AU CENTRE (120 000 m<sup>3</sup>) ET DEPOTS DANS LE MEANDRE A L'EST.

L'aménagement n°1 consiste à creuser un chenal plus à l'Ouest qu'il ne l'est actuellement avec un tracé rectiligne, afin de limiter le développement du chenal actuel caractérisé par un méandre à l'Est très marqué et qui tend à s'accroître. Sur la base du MNT de la situation actuelle, un volume de 120 000 m<sup>3</sup> a été dragué selon un axe Nord-Nord-Est/Sud-Sud-Ouest pour constituer ce chenal. Ce volume de sédiments a été intégralement re-déposé plus à l'Est, principalement dans le prolongement de la flèche de Montmartin afin de limiter le développement du méandre tout en confortant l'enracinement de la digue basse. Le MNT correspondant à cet aménagement ainsi que le différentiel bathymétrique entre cet aménagement et la situation actuelle de référence (LIDAR 2016) sont présentés sur la Figure 6-19.

La Figure 6-20 présente les MNT obtenus au cours de la simulation morphodynamique, à T0+3.5 ans et T0+10 ans pour la situation de référence et pour cet aménagement n°1. La Figure 6-21 illustre les évolutions des fonds associées à ces deux échéances par différentiel des MNT simulés avec la bathymétrie initiale.

La boucle qui méandre vers l'Est est moins développée que pour l'évolution de référence qu'il s'agisse de l'échéance à 3.5 ans ou à 10 ans. Les dépôts devant la flèche de Montmartin ont été étalés d'Est en Ouest : une partie en arrière de la digue basse ; une autre partie dans le méandre à l'Est.

Les résultats de modélisation indiquent que cette solution permet de limiter sensiblement l'extension latérale du méandre vers l'Est.

Les profils obtenus le long de la section « cross-shore » au Sud de la digue basse (Figure 6-22) montrent une situation identique à la situation de référence, ce qui signifie que cette solution ne modifie pas la dynamique sédimentaire le long du littoral de Montmartin.

Les profils obtenus le long de la section « enracinement » (Figure 6-23 et Figure 6-24) montrent que le confortement de l'enracinement de la digue basse par du sable est une solution qui convient pour conforter la berge du chenal en amont de celui-ci. Même si au bout de 3.5 ans de simulation, une part des dépôts provenant du dragage du chenal a été déplacée soit à l'Ouest derrière la digue basse ou à l'Est vers le méandre, ces dépôts permettent de maintenir dans le temps le profil. Même après 5 à 10 ans d'évolution, le comportement initial en sable est tel que la situation est comparable à celle de 2010 (i.e. moins dégradée qu'elle ne l'est actuellement).

Toutefois, les évolutions montrent qu'il existe a priori des tracés de chenaux (et des re-dépôts de sable associés) pouvant s'avérer plus judicieux. Il pourrait par exemple s'agir d'un chenal plus large et plus court, depuis le musoir de la digue basse jusqu'au secteur du débouché du Passevin. L'ajustement d'une solution de type dragages/dépôts résulte de nombreux paramètres :

- Volume total (plusieurs stratégies pouvant être envisagées : des dragages importants espacés dans le temps ou des dragages moindres plus fréquents) ;
- Caractéristiques géométriques du chenal : longueur, largeur, profondeur ;
- La position de ce chenal à l'entrée du havre et orientation en direction de Regnéville ;
- La répartition spatiale des dépôts dans le prolongement de la flèche de Montmartin et dans le méandre à l'Est.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

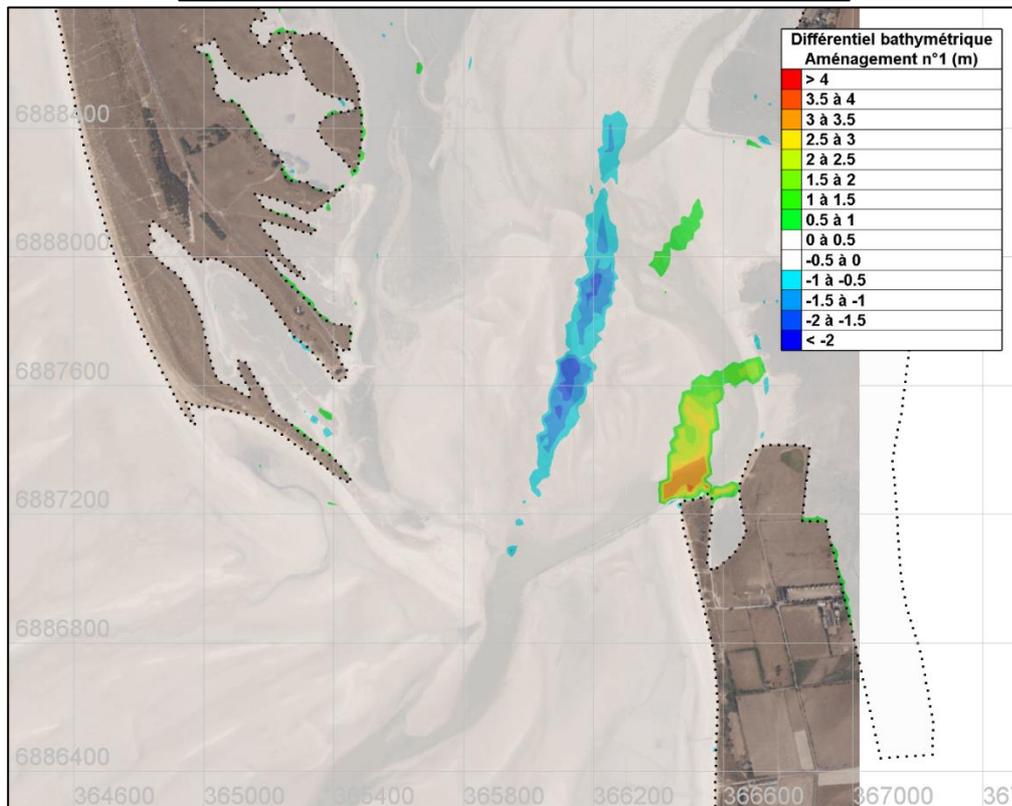
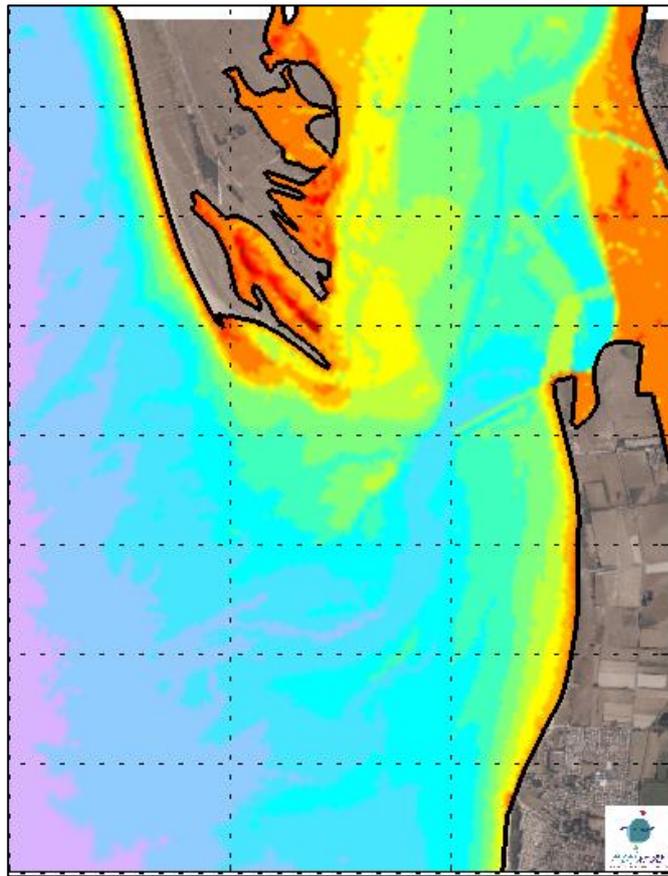


Figure 6-19 : Aménagement n°1 (creusement d'un chenal + dépôt dans le prolongement de la flèche de Montmartin) : MNT initial à T0 de la simulation morphodynamique (en haut). Différentiel bathymétrique (en bas, en m) entre cet aménagement et la situation actuelle.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

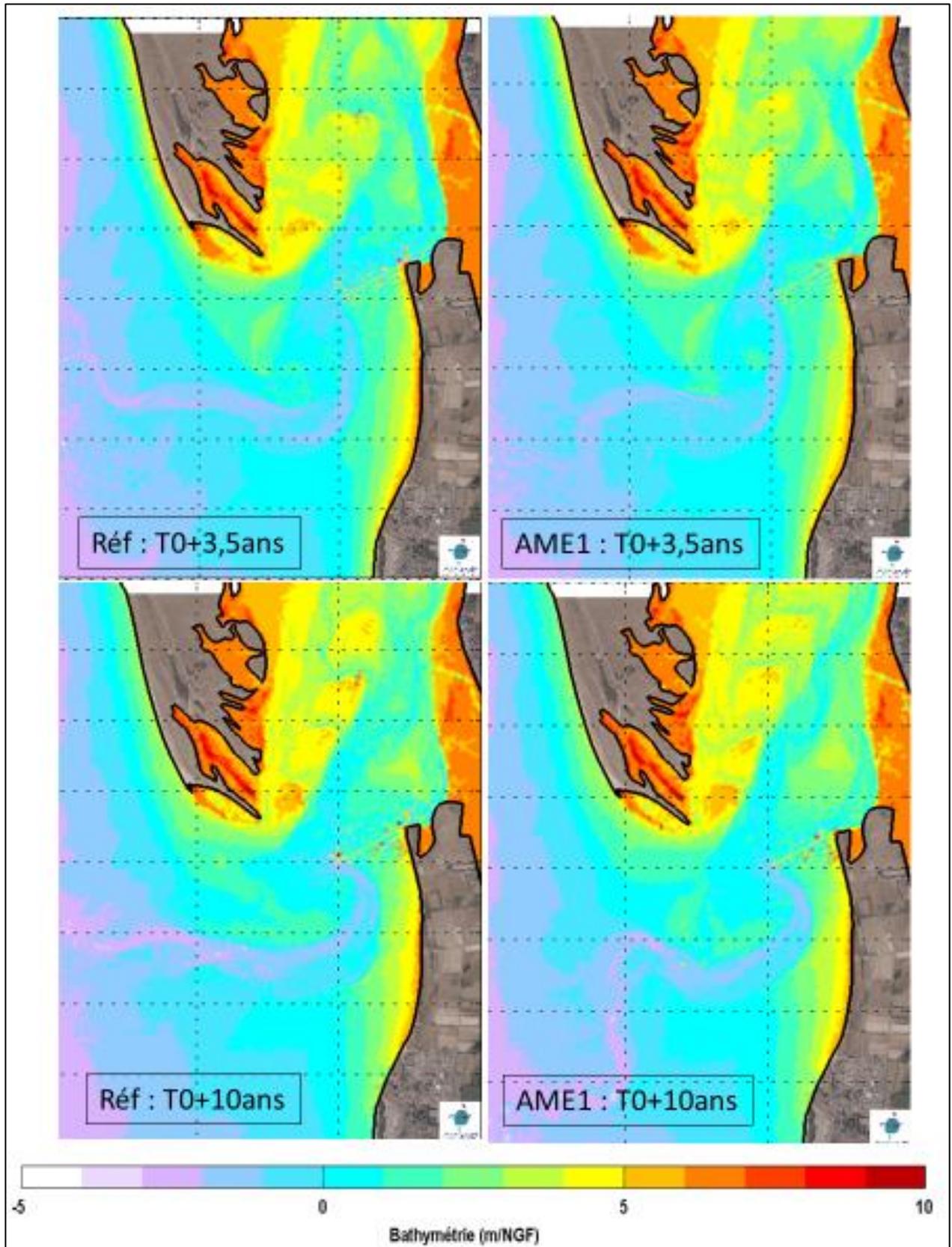


Figure 6-20 : Aménagement n°1 (creusement d'un chenal + dépôt dans le prolongement de la flèche de Montmartin) : MNT simulés au cours de la simulation morphodynamique pour l'état de référence (à gauche) et pour l'aménagement n°1 (à droite), à T0+3.5 ans (en haut) et à T0+10 ans (en bas).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

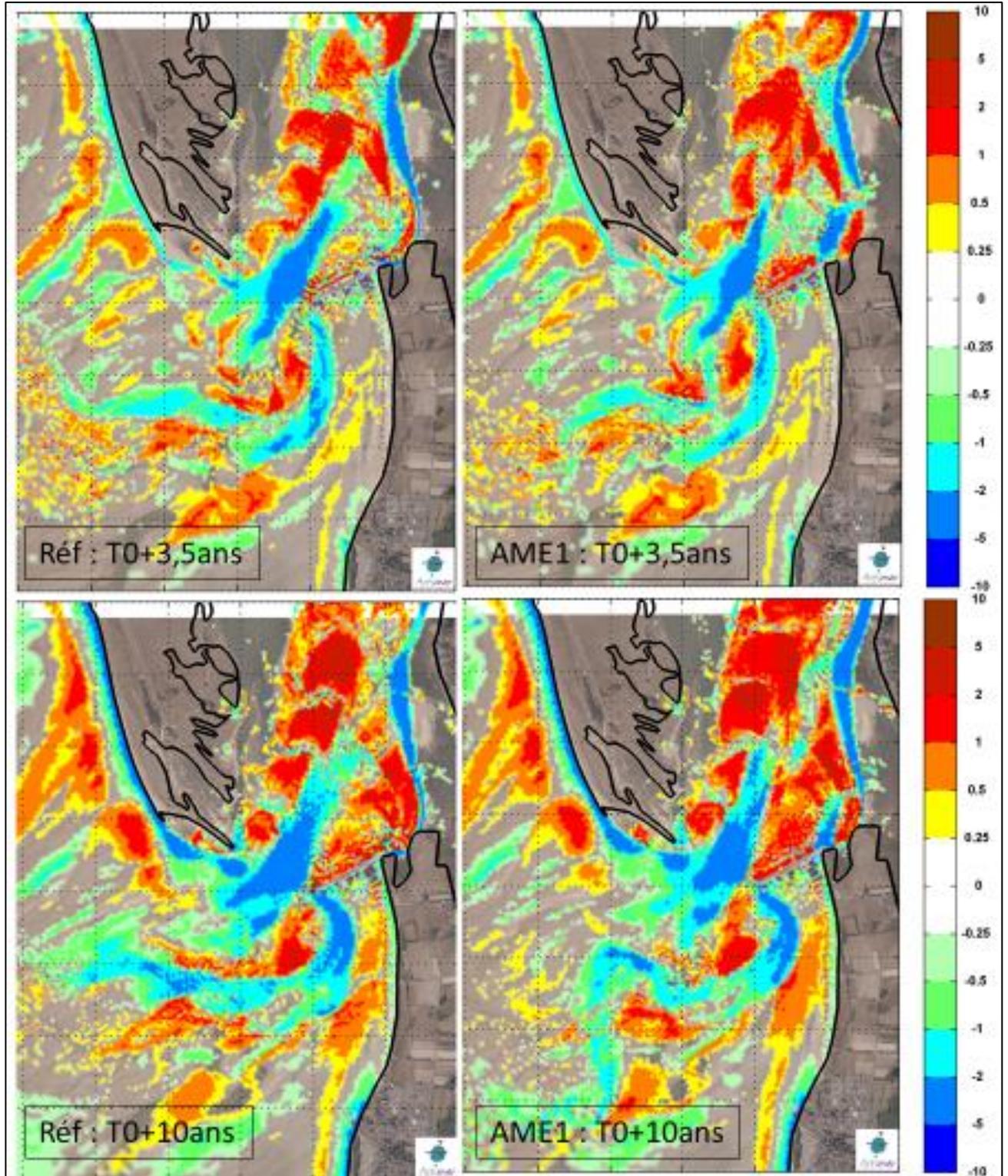


Figure 6-21 : Aménagement n°1 (creusement d'un chenal + dépôt dans le prolongement de la flèche de Montmartin) : évolutions des fonds au cours de la simulation morphodynamique pour l'état de référence (à gauche) et pour l'aménagement n°1 (à droite), à T0+3.5 ans (en haut) et à T0+10 ans (en bas).

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

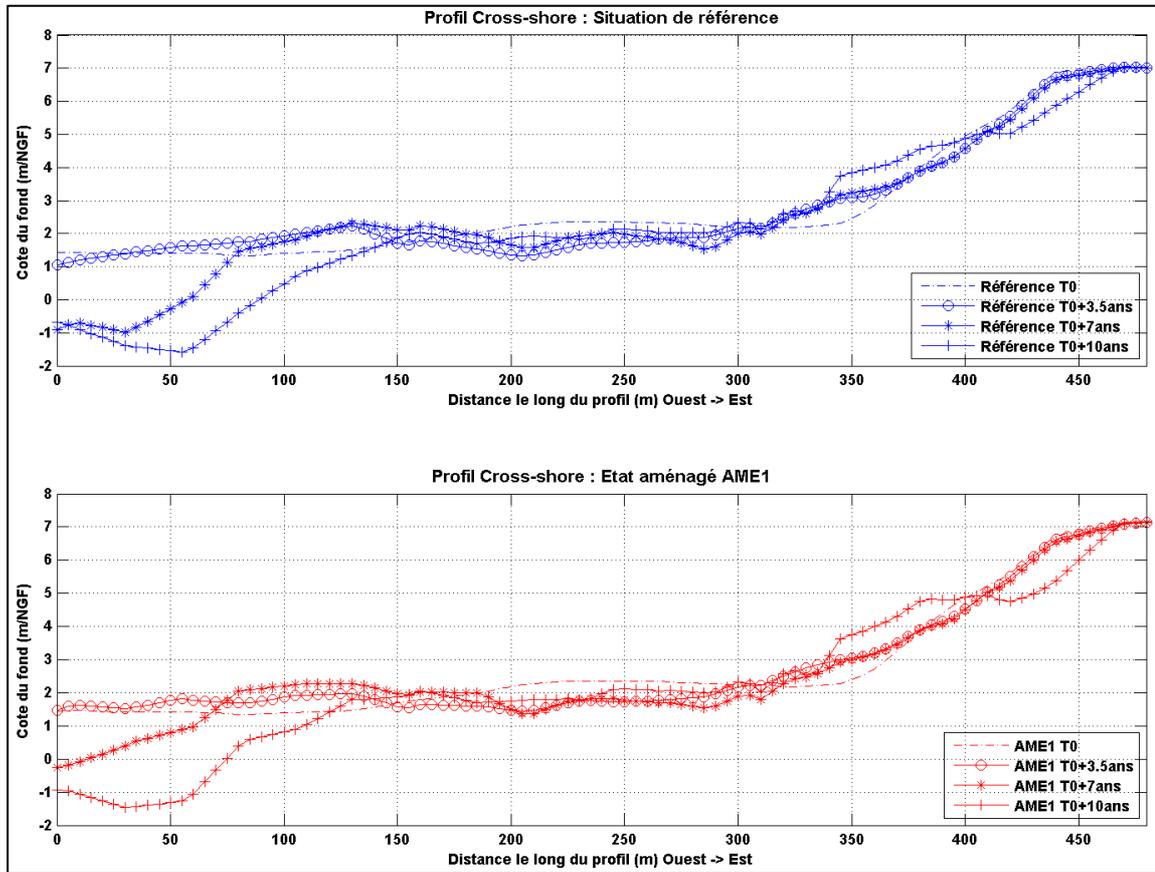


Figure 6-22 : Aménagement n°1 (creusement d'un chenal + dépôt dans le prolongement de la flèche de Montmartin) : profils obtenus le long de la section « cross-shore » représentée sur la Figure 6-17, à T0, T0+3.5 ans, T0+7 ans et T0+10 ans pour la situation de référence (en haut, en bleu) et pour l'aménagement n°1 (en bas, en rouge).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

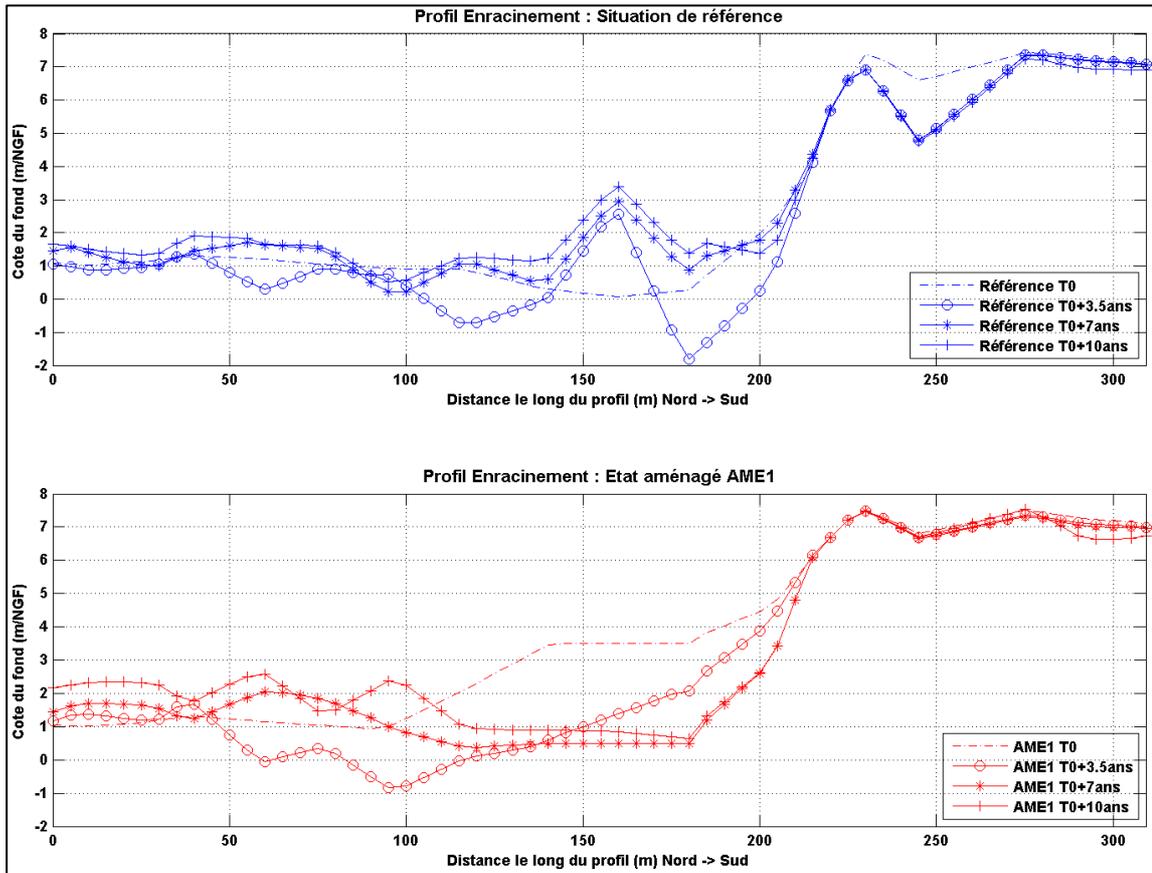


Figure 6-23 : Aménagement n°1 (creusement d'un chenal + dépôt dans le prolongement de la flèche de Montmartin) : profils obtenus le long de la section « enracinement » représentée sur la Figure 6-17, à T0, T0+3.5 ans, T0+7 ans et T0+10 ans pour la situation de référence (en haut, en bleu) et pour l'aménagement n°1 (en bas, en rouge).

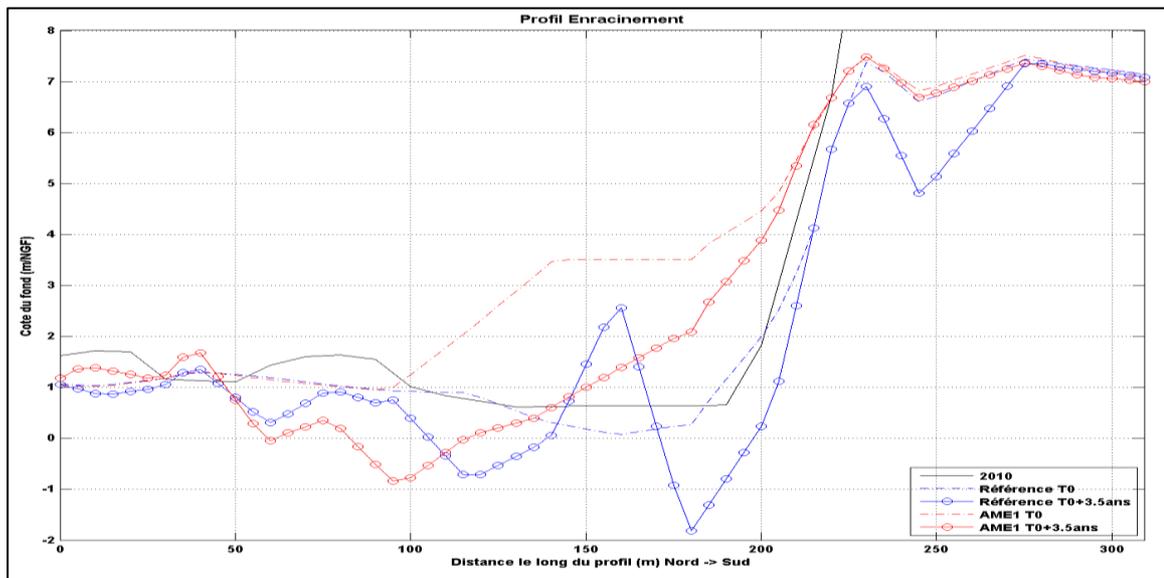


Figure 6-24 : Aménagement n°1 (creusement d'un chenal + dépôt dans le prolongement de la flèche de Montmartin) : profils obtenus le long de la section « enracinement » représentée sur la Figure 6-17, en 2010 (courbe noire) et à T0 et T0+3.5 ans pour la situation de référence (en bleu) et pour l'aménagement n°1 (en rouge).

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

---

#### 6.2.4 AMENAGEMENT N°2 : SUPPRESSION DE LA DIGUE BASSE

L'aménagement n°2 consiste en la suppression totale de la digue basse. Le MNT correspond à cette situation ainsi que le différentiel bathymétrique entre cet aménagement et la situation actuelle de référence (LIDAR 2016) sont présentés sur la Figure 6-25.

La Figure 6-26 présente les MNT obtenus au cours de la simulation morphodynamique, à T0+3.5 ans et à T0+10 ans pour la situation de référence et pour cet aménagement n°2. La Figure 6-27 illustre les évolutions des fonds associées à ces deux échéances par différentiel des MNT simulés avec la bathymétrie initiale.

Après 3.5 ans de simulation, un chenal s'amorce vers le Sud le long du trait de côte, depuis l'enracinement de la digue basse actuelle. Il se prolonge vers le Sud-Ouest et tend à rejoindre le chenal principal qui méandrite depuis le musoir de la digue basse. Après 10 ans de simulation, un chenal unique et large s'est formé devant le littoral de Montmartin.

Les profils obtenus le long de la section « cross-shore » au Sud de la digue basse (Figure 6-28) montrent clairement la formation du chenal au Sud de la digue basse avec un recul marqué des profils bathymétriques : près de 25 m en 3.5 ans, environ 30 m au bout de 7 ans, et plus de 50 m en 10 ans. Les profils obtenus le long de la section « enracinement » (Figure 6-29) confirment cette analyse avec un recul marqué les 3.5 premières années. Au-delà de cette durée, l'extension du modèle sur la partie terrestre n'est pas suffisante pour pouvoir juger.

Les résultats de modélisation montrent la suppression de la digue basse tendrait à induire une érosion marquée du littoral au Sud de celle-ci, et évoluer rapidement vers une situation qui pourrait être préoccupante pour les littoraux urbanisés de Montmartin, et dans une moindre mesure d'Hauteville. A noter que l'érosion induite le long du littoral est associée à une chenalisation (par les courants), qui peut être plus compliquée à enrayer qu'une action érosive des vagues (pour laquelle des ouvrages longitudinaux de confortement du trait de côte conviennent).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

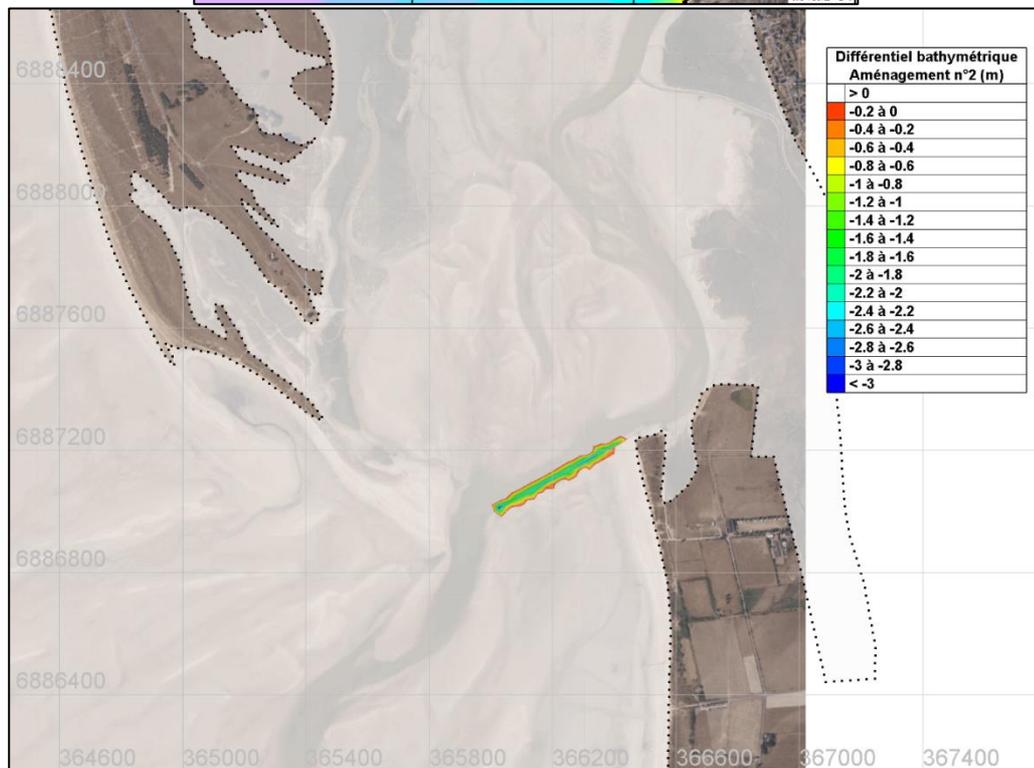
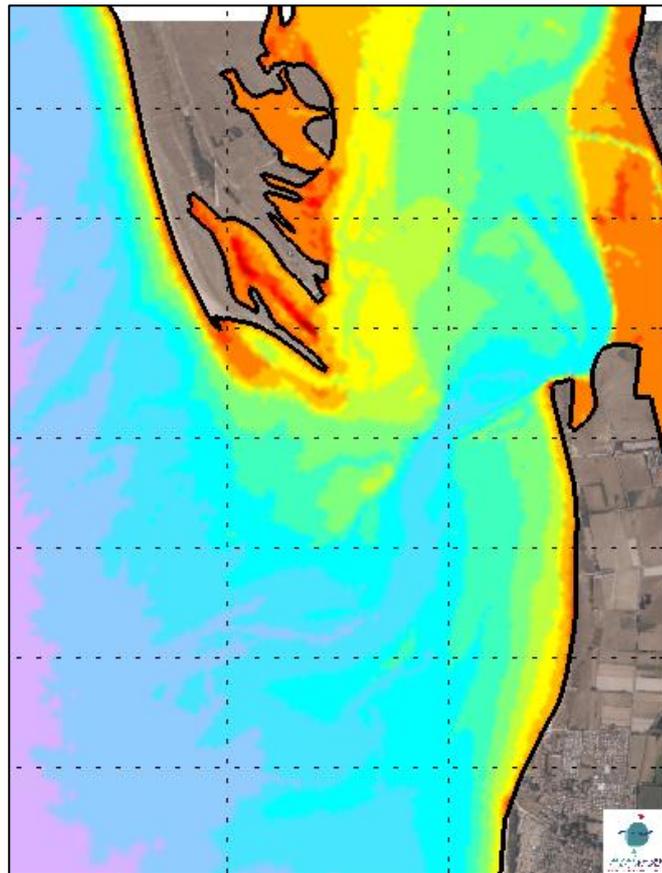


Figure 6-25 : Aménagement n°2 (suppression de la digue basse) : MNT initial à T0 de la simulation morphodynamique (en haut). Différentiel bathymétrique (en bas, en m) entre cet aménagement et la situation actuelle.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

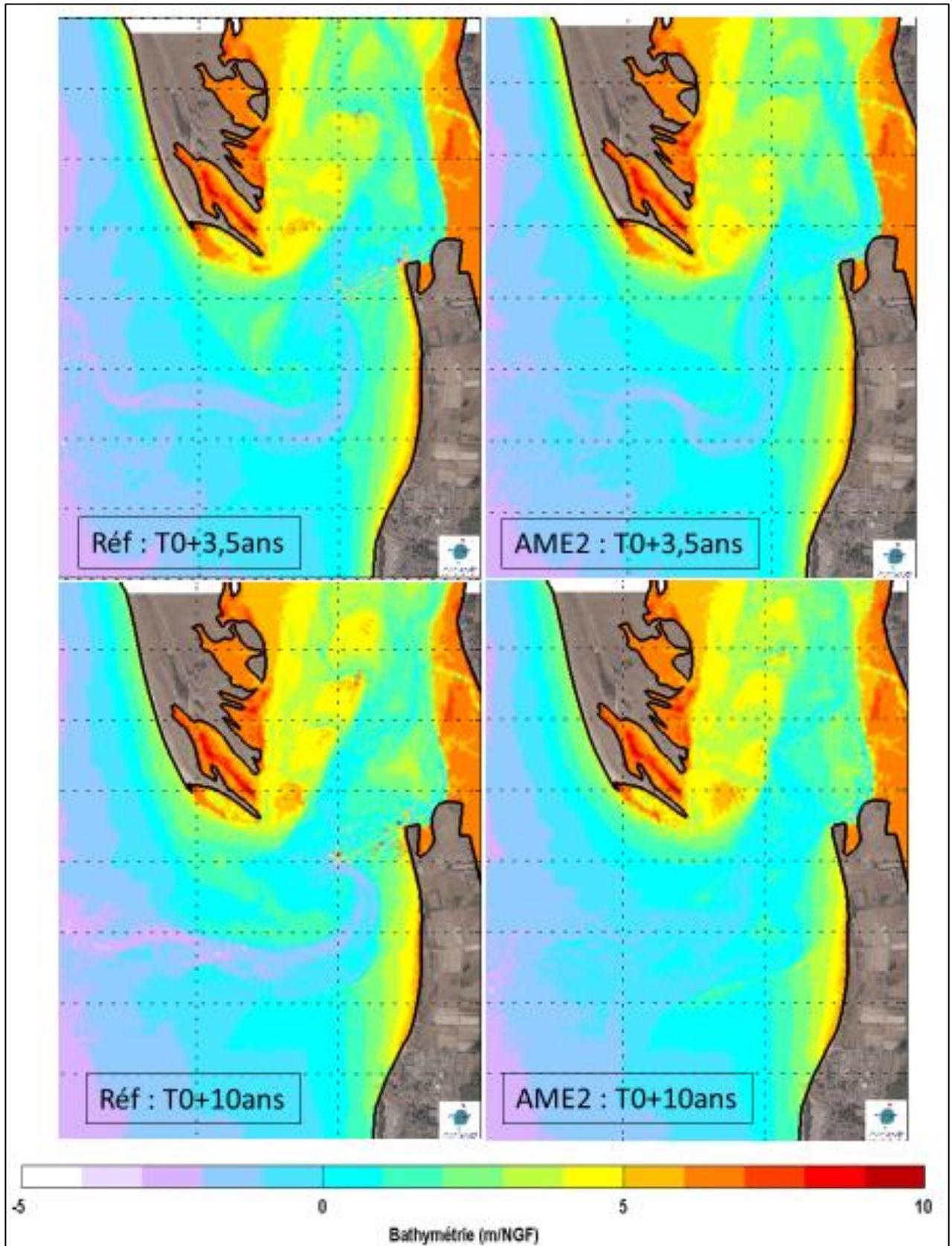


Figure 6-26 : Aménagement n°2 (suppression de la digue basse) : MNT simulés au cours de la simulation morphodynamique pour l'état de référence (à gauche) et pour l'aménagement n°2 (à droite), à T0+3.5 ans (en haut) et à T0+10 ans (en bas).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

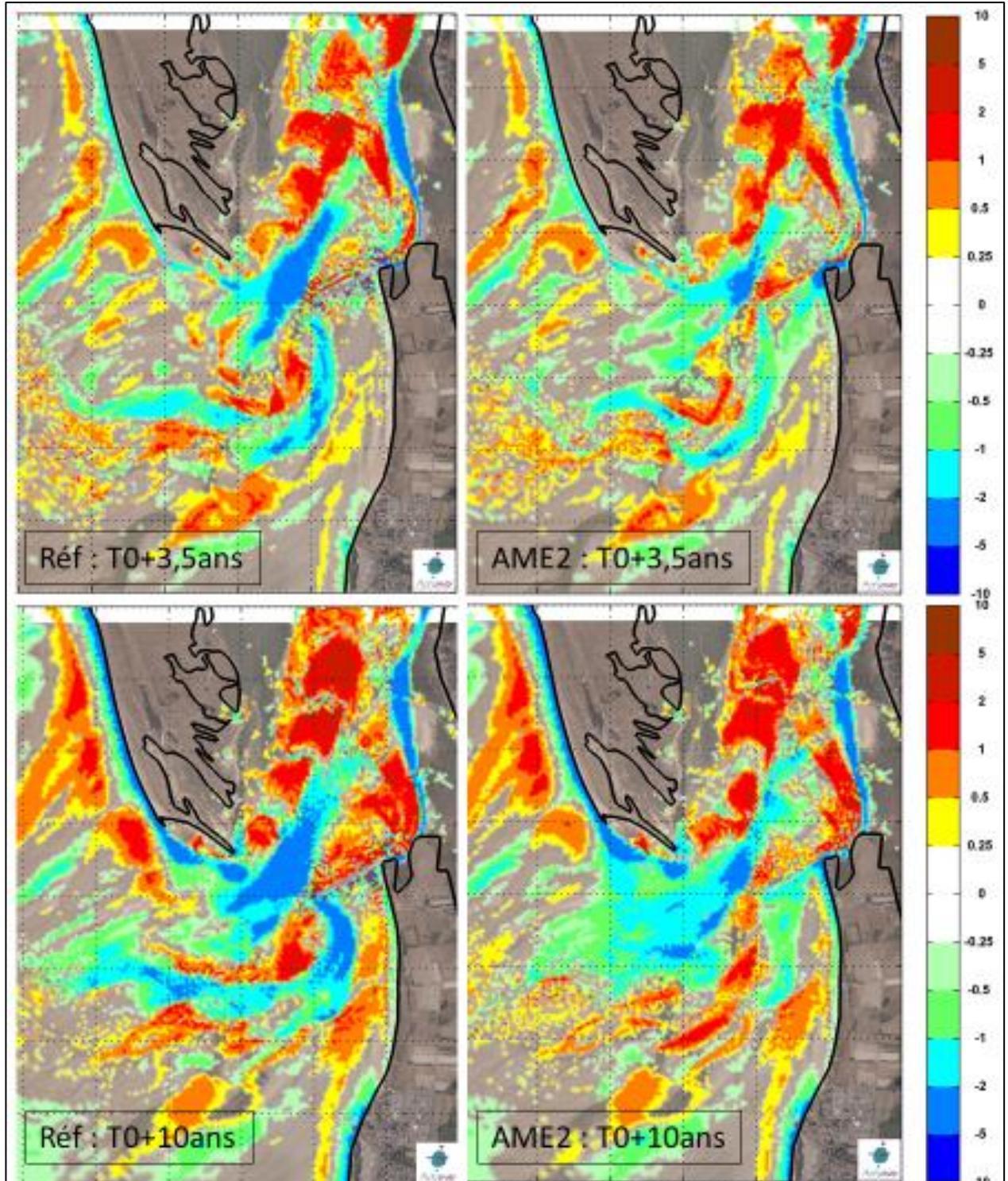


Figure 6-27 : Aménagement n°2 (suppression de la digue basse) : évolutions des fonds au cours de la simulation morphodynamique pour l'état de référence (à gauche) et pour l'aménagement n°2 (à droite), à T0+3.5 ans (en haut) et à T0+10 ans (en bas).

**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

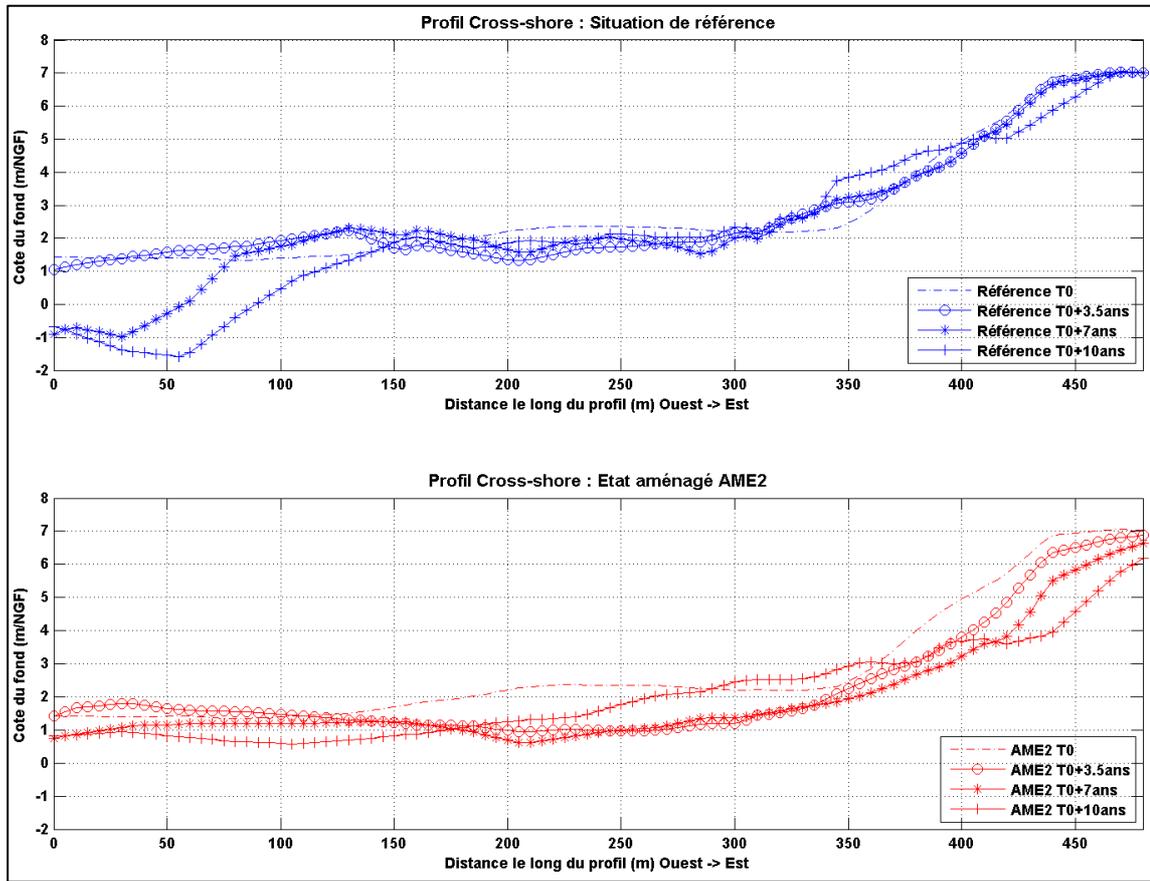


Figure 6-28 : Aménagement n°2 (suppression de la digue basse) : profils obtenus le long de la section « cross-shore » représentée sur la Figure 6-17, à T0, T0+3.5 ans, T0+7 ans et T0+10 ans pour la situation de référence (en haut, en bleu) et pour l'aménagement n°2 (en bas, en rouge).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

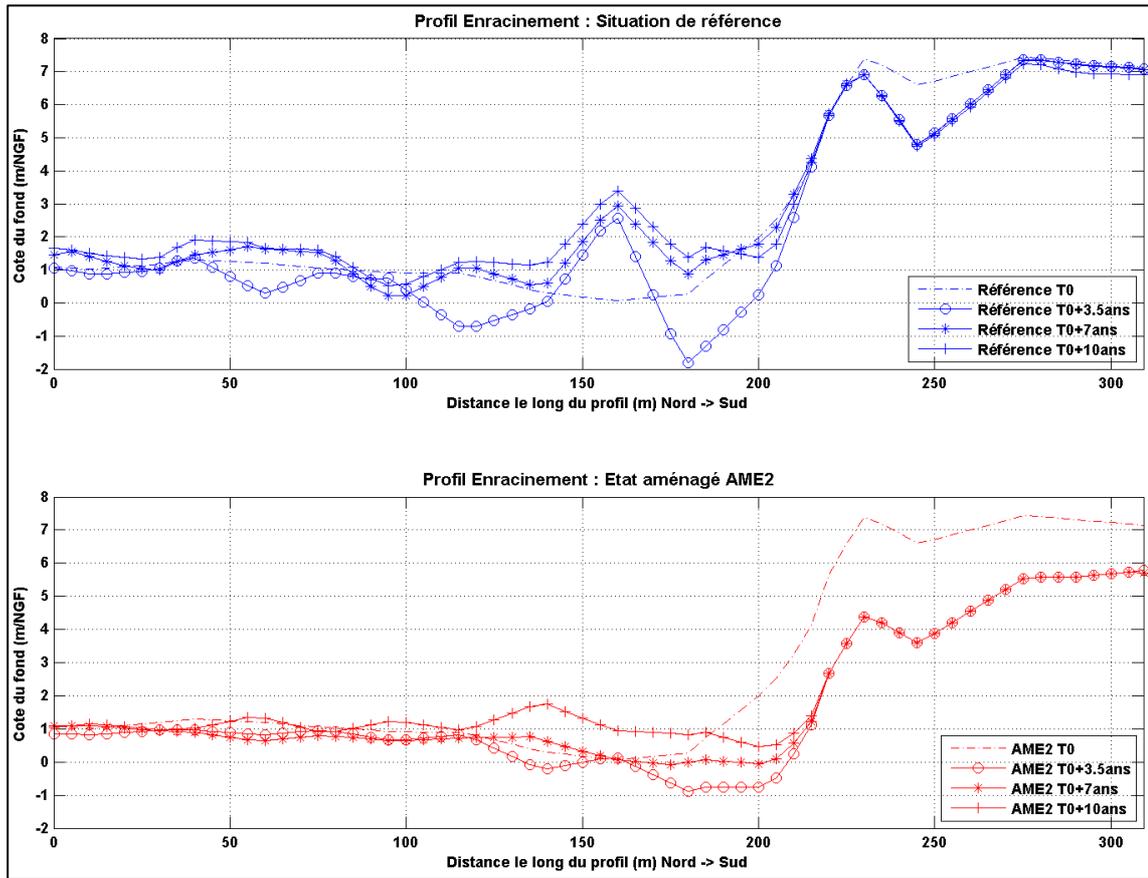


Figure 6-29 : Aménagement n°2 (suppression de la digue basse) : profils obtenus le long de la section « enracinement » représentée sur la Figure 6-17, à T0, T0+3.5 ans, T0+7 ans et T0+10 ans pour la situation de référence (en haut, en bleu) et pour l'aménagement n°2 (en bas, en rouge).

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

---

#### 6.2.5 AMENAGEMENT N°3 : PROLONGEMENT DE LA DIGUE BASSE VERS L'EST DEPUIS SON ENRACINEMENT

L'aménagement n°3 consiste à prolonger la digue basse depuis son enracinement et à l'étendre vers l'Est le long du méandre sur une distance d'environ 175 m. La côte d'arase prise en compte pour le prolongement est de 6 m NGF, ce qui correspond à un niveau légèrement inférieur à celui d'une pleine mer d'une marée de vive-eau moyenne (C95, 6.20 m NGF). Le MNT correspondant à cet aménagement ainsi que le différentiel bathymétrique entre cet aménagement et la situation actuelle de référence (LIDAR 2016) sont présentés sur la Figure 6-30.

La Figure 6-31 présente les MNT obtenus au cours de la simulation morphodynamique, à T0+3.5 ans et à T0+10 ans pour la situation de référence et pour cet aménagement n°3. La Figure 6-32 illustre les évolutions des fonds associées à ces deux échéances par différentiel des MNT simulés avec la bathymétrie initiale.

Après 3.5 ans de simulation, l'état des fonds est relativement proche de celui qui a été simulé à partir de la situation de référence (cf. paragraphe 6.2.2), avec toutefois une érosion vers le Sud, en amont de l'enracinement actuel, qui est limitée. A plus long terme, en fonction du méandrement vers l'Est, il faudra peut-être poursuivre ce prolongement de l'enracinement. A noter cependant qu'un enracinement de la digue basse plus à l'Est sera moins soumis à l'action des vagues.

Les profils obtenus le long de la section « cross-shore » au Sud de la digue basse (Figure 6-33) montrent des évolutions identiques à celle de la configuration de référence. Les profils obtenus le long de la section « enracinement » (Figure 6-34) montrent qu'au bout de 3.5 ans de simulation, l'érosion de la berge a atteint le prolongement de la digue, qui contient, par principe, une érosion qui irait au-delà.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

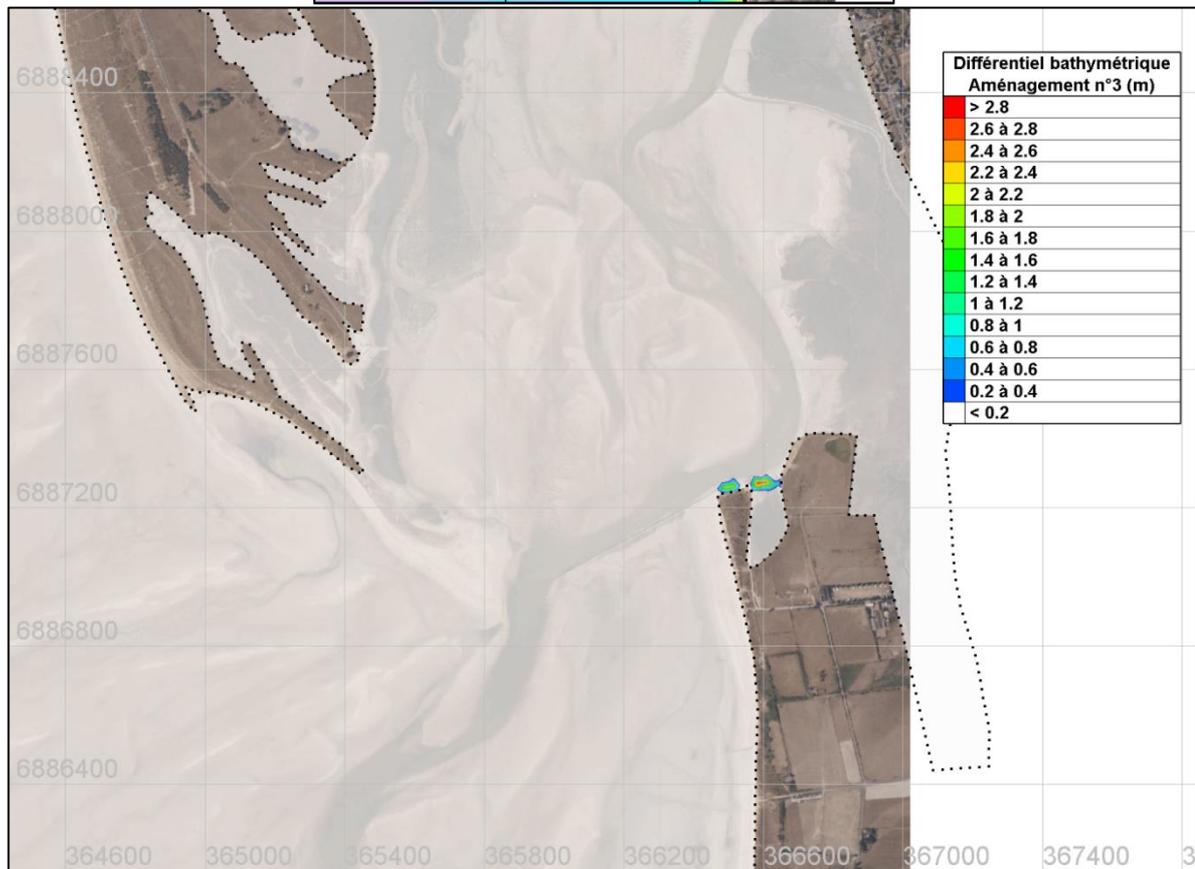
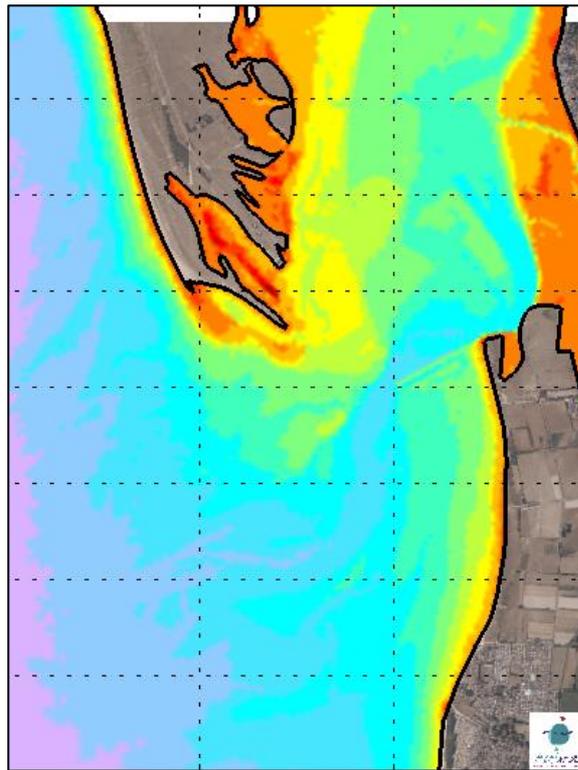


Figure 6-30 : Aménagement n°3 (prolongement de la digue basse depuis son enraccinement) : MNT initial à T0 de la simulation morphodynamique (en haut). Différentiel bathymétrique (en bas, en m) entre cet aménagement et la situation actuelle.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

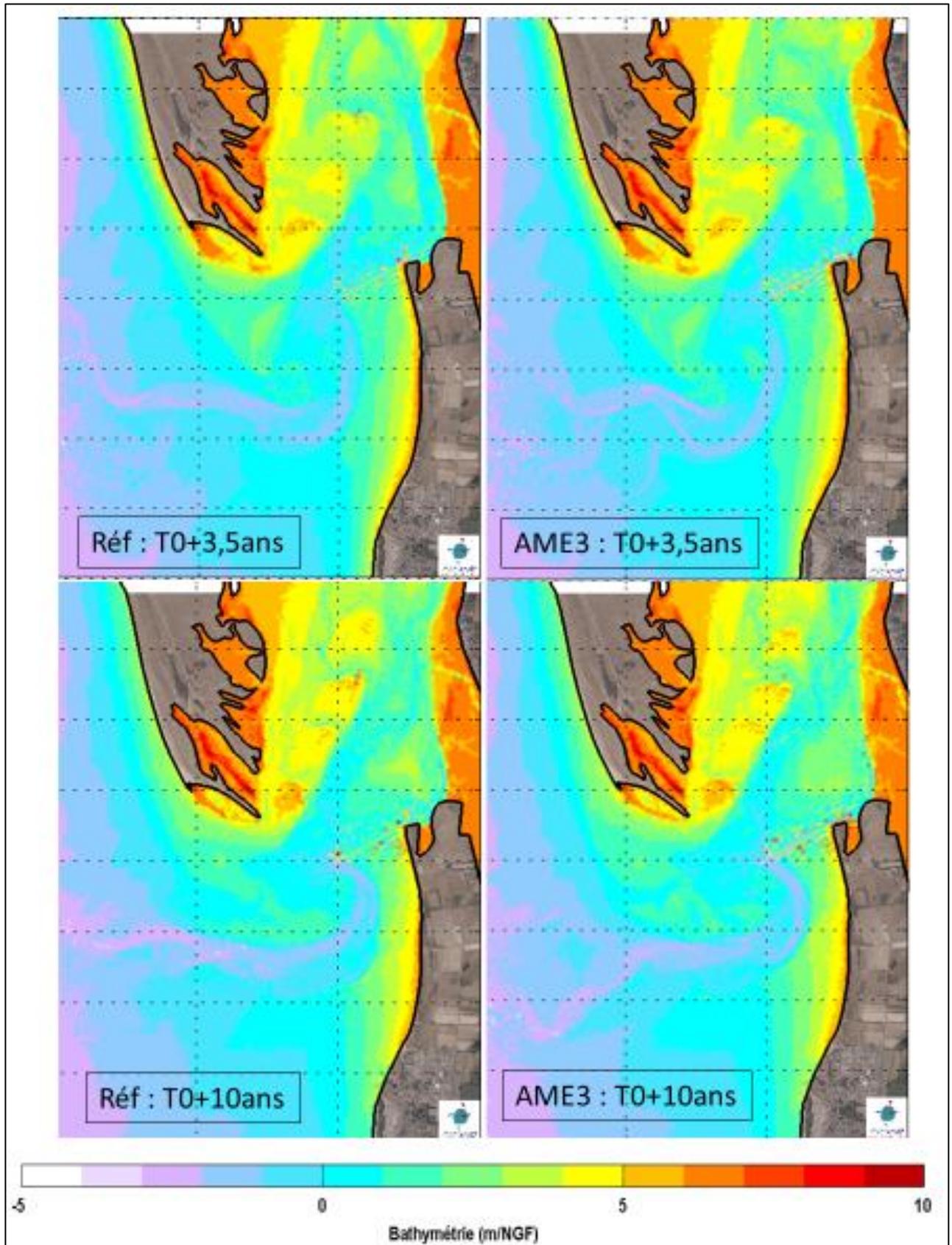


Figure 6-31 : Aménagement n°3 (prolongement de la digue basse depuis son enracinement) : MNT simulés au cours de la simulation morphodynamique pour l'état de référence (à gauche) et pour l'aménagement n°3 (à droite), à T0+3.5 ans (en haut) et à T0+10 ans (en bas).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

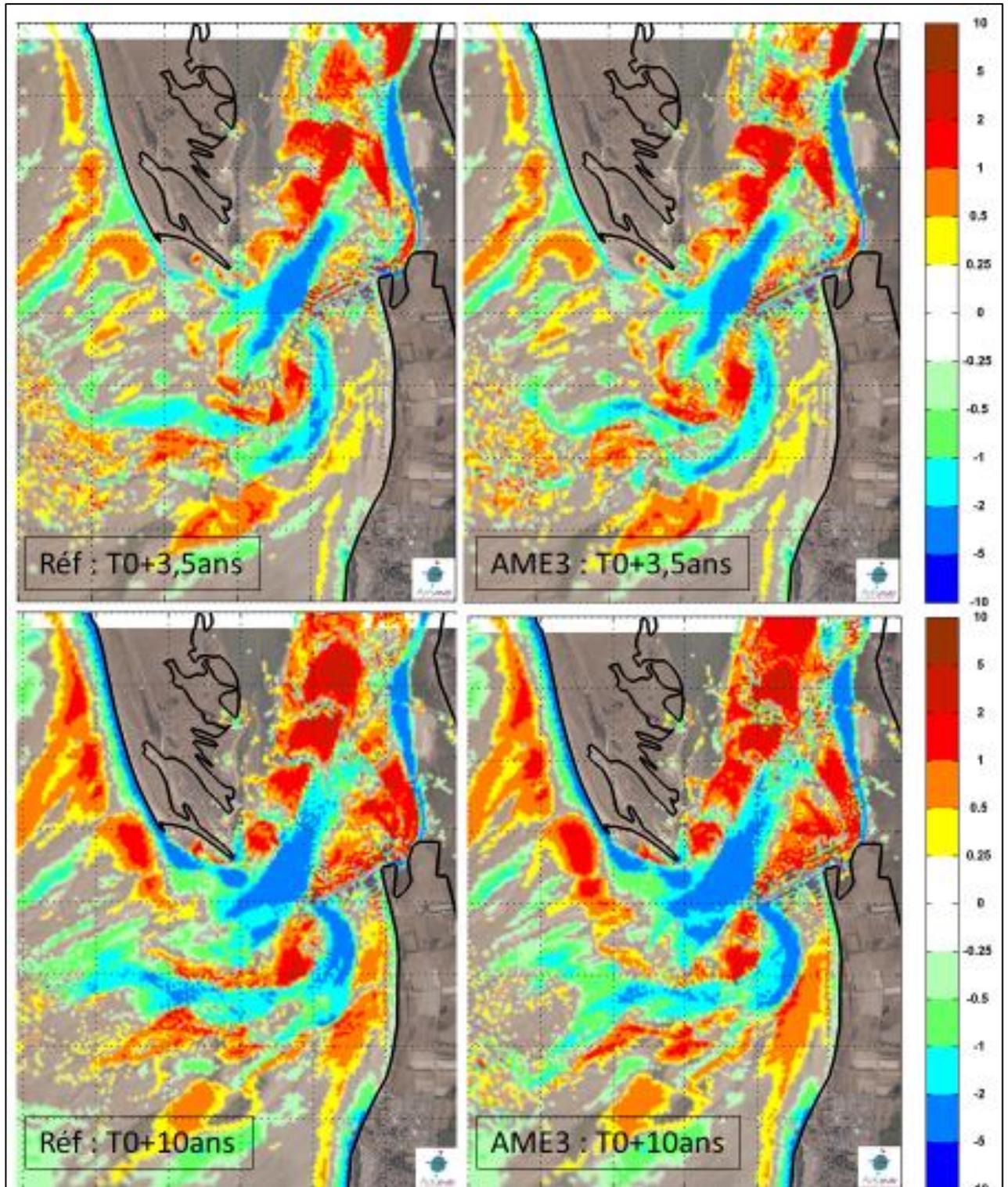


Figure 6-32 : Aménagement n°3 (prolongement de la digue basse depuis son enracinement) : évolutions des fonds au cours de la simulation morphodynamique pour l'état de référence (à gauche) et pour l'aménagement n°3 (à droite), à T0+3.5 ans (en haut) et à T0+10 ans (en bas).

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

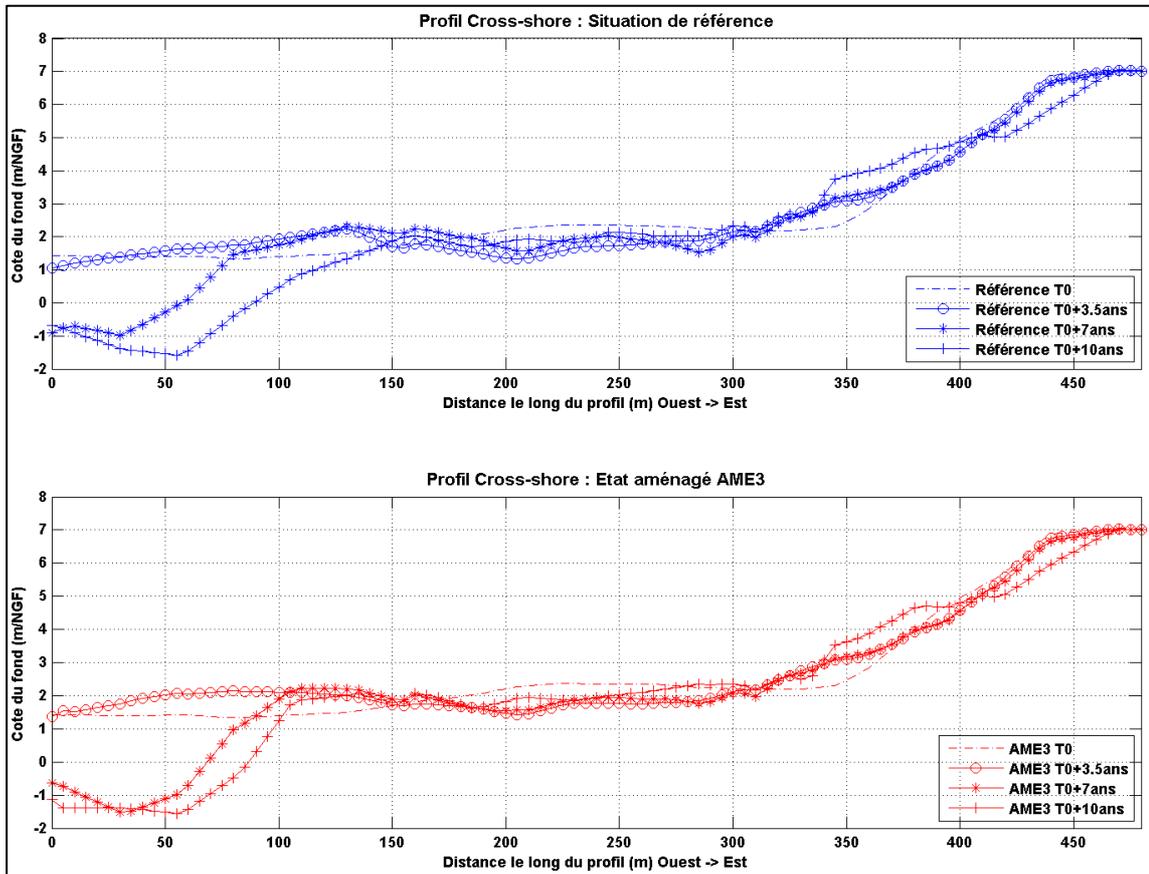


Figure 6-33 : Aménagement n°3 (prolongement de la digue basse depuis son enracinement) : profils obtenus le long de la section « cross-shore » représentée sur la Figure 6-17, à T0, T0+3.5 ans, T0+7 ans et T0+10 ans pour la situation de référence (en haut, en bleu) et pour l'aménagement n°3 (en bas, en rouge).

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

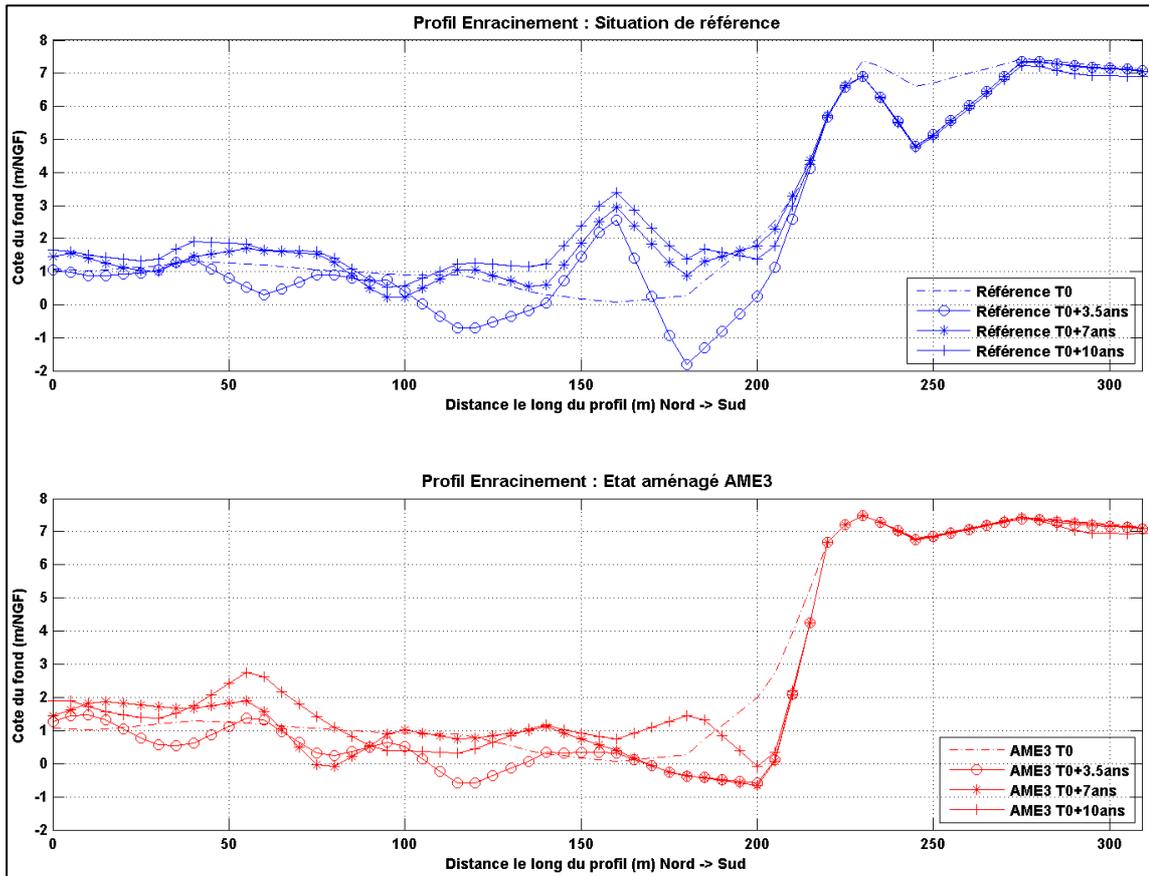


Figure 6-34 : Aménagement n°3 (prolongement de la digue basse depuis son enracinement) : profils obtenus le long de la section « enracinement » représentée sur la Figure 6-17, à T0, T0+3.5 ans, T0+7 ans et T0+10 ans pour la situation de référence (en haut, en bleu) et pour l'aménagement n°3 (en bas, en rouge).

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

---

#### 6.2.6 HYPOTHESE N°4 : BRECHE A L'ENRACINEMENT DE LA DIGUE BASSE

Une hypothèse de brèche au niveau de l'enracinement de la digue basse a été envisagée. L'objectif des simulations morphodynamiques sont alors d'évaluer les évolutions consécutives à une telle brèche, pour appréhender un risque de non-confortement de l'enracinement.

La Figure 6-35 présente le MNT correspondant à cette hypothèse ainsi qu'une coupe bathymétrique selon un axe Nord-Ouest/Sud-Est au milieu de la brèche (ligne rouge). Le recul du trait de côte pris en compte pour cette hypothèse est une projection réalisée à l'horizon 2022-2025, à partir du recul observé de la berge entre 2010 et 2016 (levés LIDAR). La côte de la brèche considérée pour cette simulation est de +5 m NGF.

La Figure 6-36 présente les MNT obtenus au cours de la simulation morphodynamique, à T0+3.5 ans et à T0+10 ans pour la situation de référence et pour cette hypothèse n°4. La Figure 6-37 illustre les évolutions des fonds associées à ces deux échéances par différentiel des MNT simulés avec la bathymétrie initiale.

Les résultats de modélisation montrent que cette situation n'entraînerait pas une érosion rapide de la flèche de Montmartin. Une amorce d'un chenal vers le Sud le long du trait de côte est visible sur les résultats, mais qui est sans commune mesure avec les évolutions qui résulteraient d'une suppression de la digue basse (cf. paragraphe 6.2.4).

Les profils obtenus le long de la section « cross-shore » au Sud de la digue basse (Figure 6-38) confirment cette analyse avec un recul moindre que dans le cas de la suppression de la digue basse : une dizaine de mètres après 3.5 ans et 20-25 m au bout de 7 ans. Les profils obtenus le long de la section « enracinement » (Figure 6-39) confirment cette tendance avec un élargissement de la brèche d'environ 2 à 3 m durant les 3.5 premières années. Les processus d'érosion latérale dans la brèche sont complexes et le modèle pourraient les sous-estimer. Au-delà de cette durée, il faut donc considérer les résultats avec précaution. Le modèle rappelle cependant que la digue basse contraint largement le chenal au Nord de celle-ci. Le chenal est bien marqué et à marée descendante, lorsque le havre se vide, la continuité de la quantité de mouvement des courants depuis le méandre à l'Est ne peut être défléchie par une brèche dont les dimensions sont très inférieures à celles du chenal.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

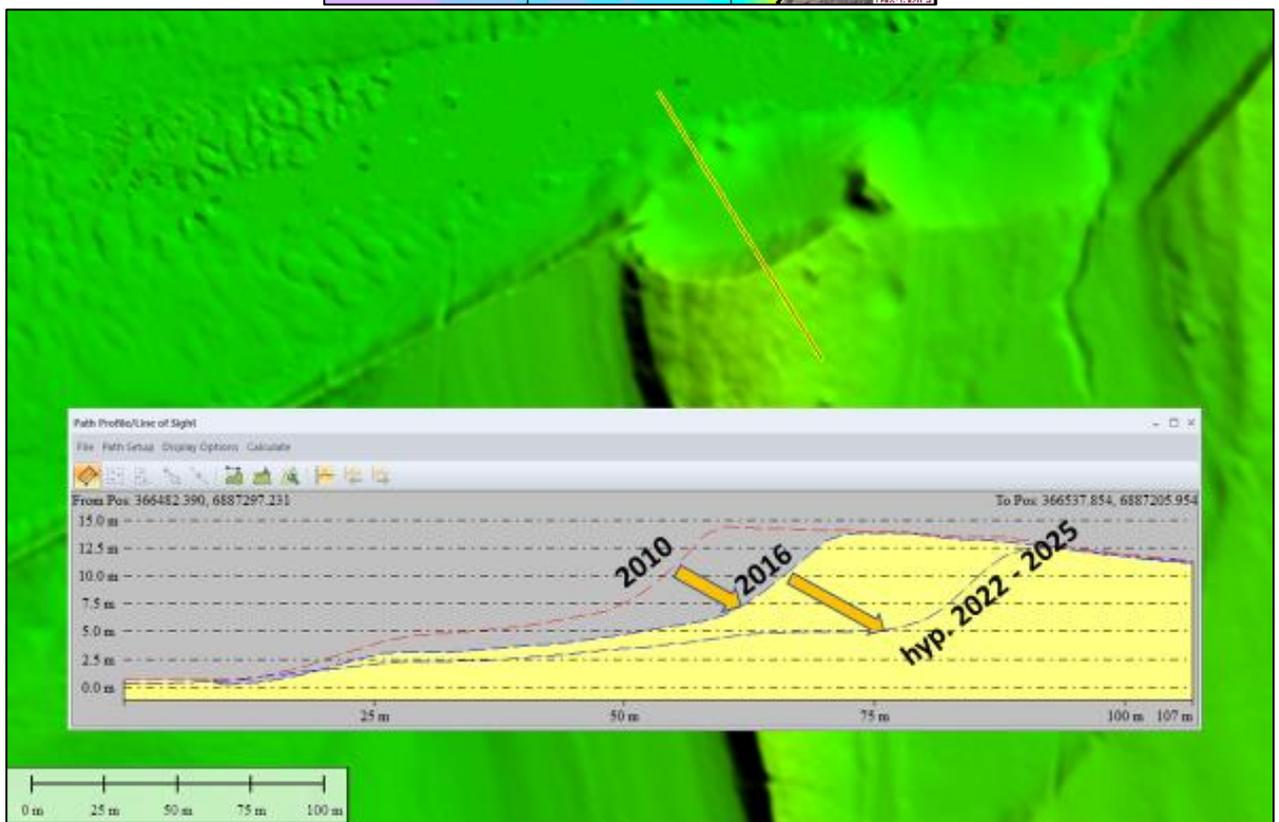
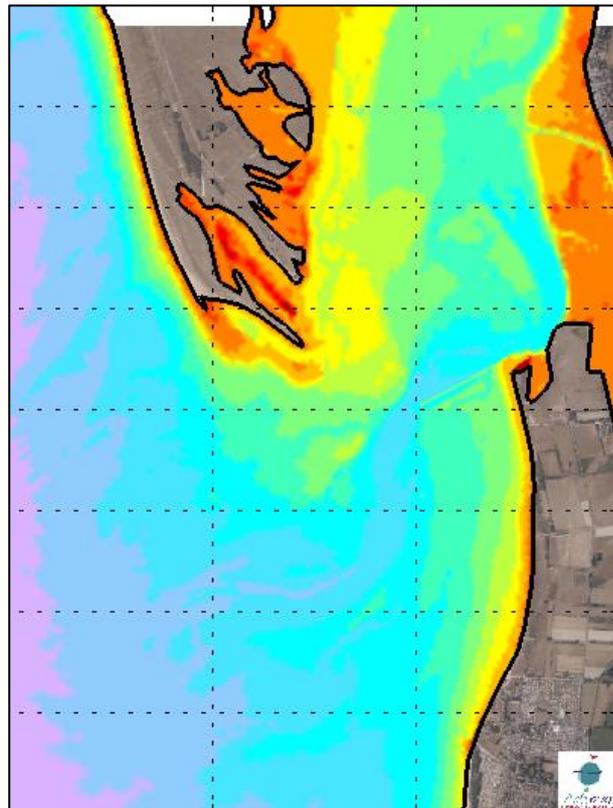


Figure 6-35 : Hypothèse n°4 (brèche à l'enracinement de la digue basse) : MNT à T0 de la simulation morphodynamique (en haut). En bas : coupe bathymétrique selon un axe Nord-Ouest/Sud-Est de la brèche (ligne rouge). Les profils représentés en bas illustrent le recul observé de la berge entre 2010 et 2016 (LIDAR) et le recul projeté à l'horizon 2022-2025 qui a été pris en compte pour cette hypothèse n°4.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

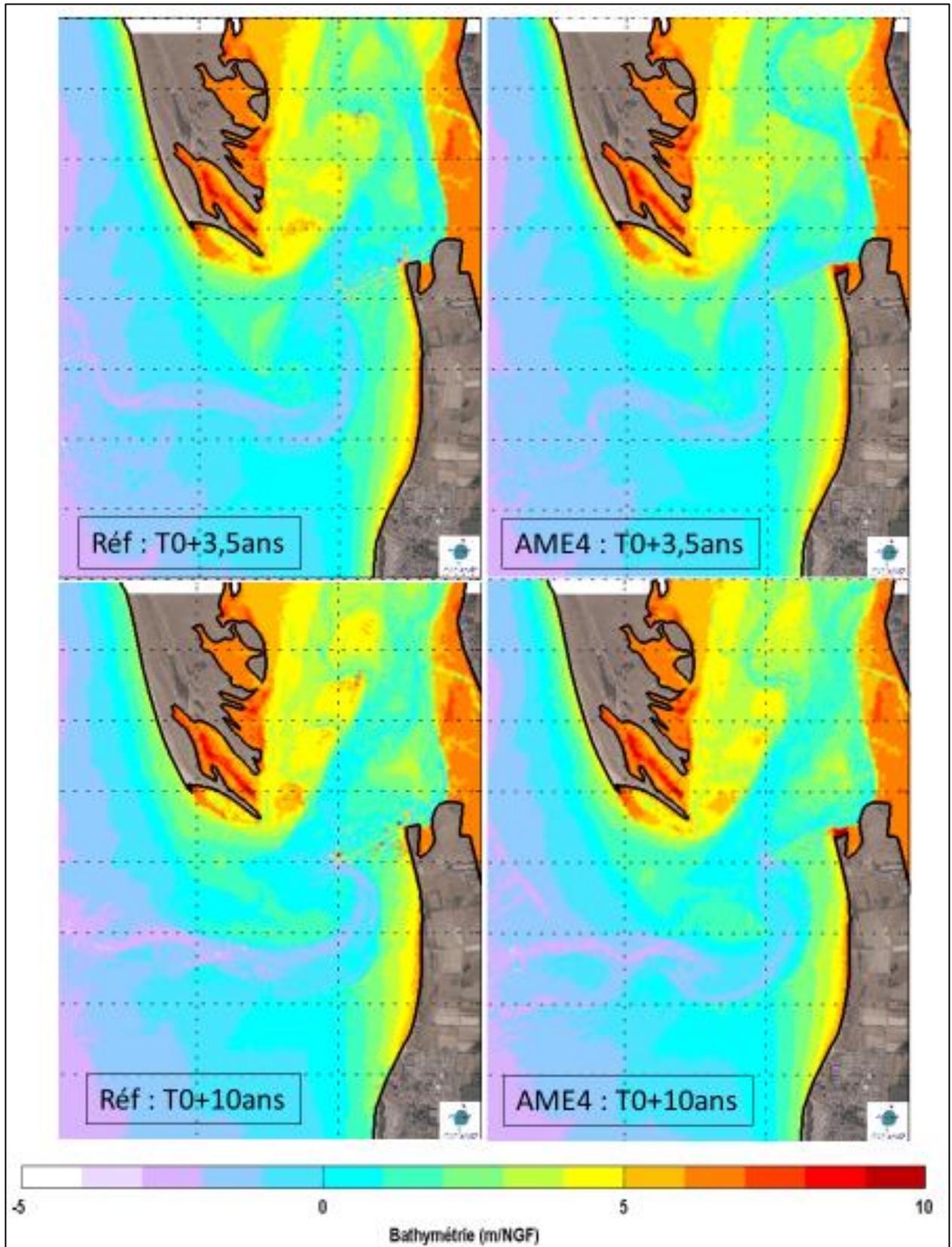


Figure 6-36 : Hypothèse n°4 (brèche à l'enracinement de la digue basse) : MNT simulés au cours de la simulation morphodynamique pour l'état de référence (à gauche) et pour l'hypothèse n°4 (à droite), à T0+3.5 ans (en haut) et à T0+10 ans (en bas).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

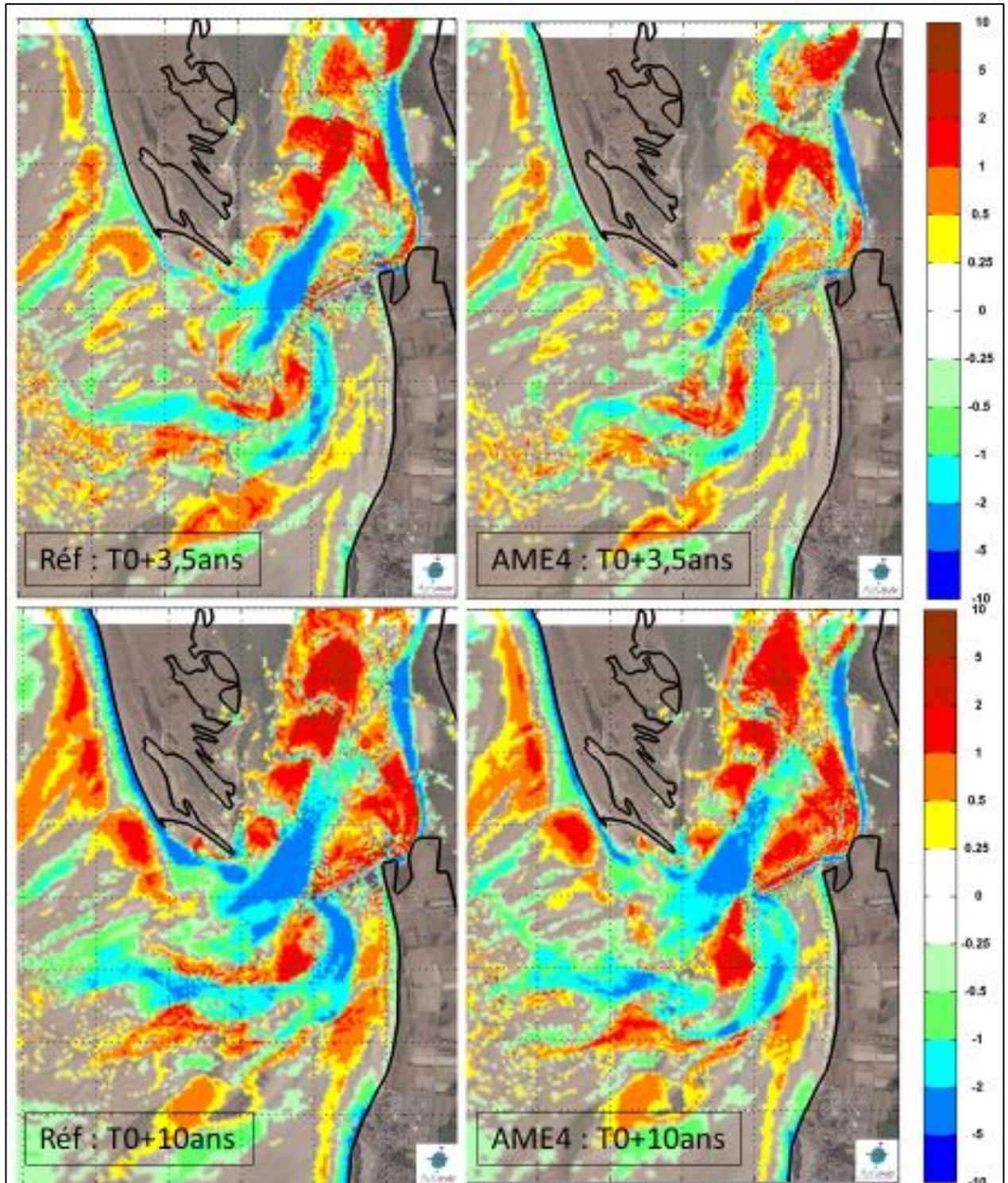


Figure 6-37 : Hypothèse n°4 (brèche à l'enracinement de la digue basse) : évolutions des fonds au cours de la simulation morphodynamique pour l'état de référence (à gauche) et pour l'hypothèse n°4 (à droite), à T0+3.5 ans (en haut) et à T0+10 ans (en bas).

## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

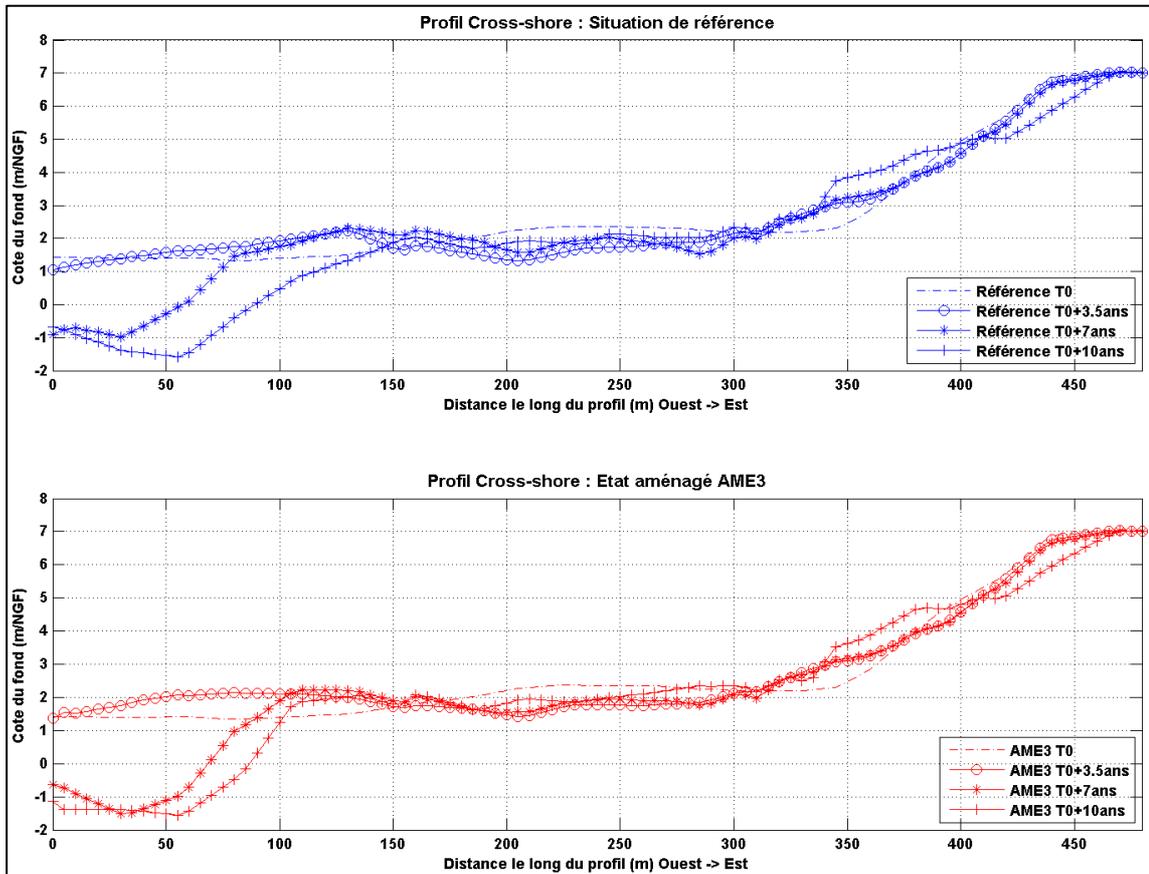


Figure 6-38 : Hypothèse n°4 (brèche à l'enracinement de la digue basse) : profils obtenus le long de la section « cross-shore » représentée sur la Figure 6-17, à T0, T0+3.5 ans, T0+7 ans et T0+10 ans pour la situation de référence (en haut, en bleu) et pour l'hypothèse n°4 (en bas, en rouge).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

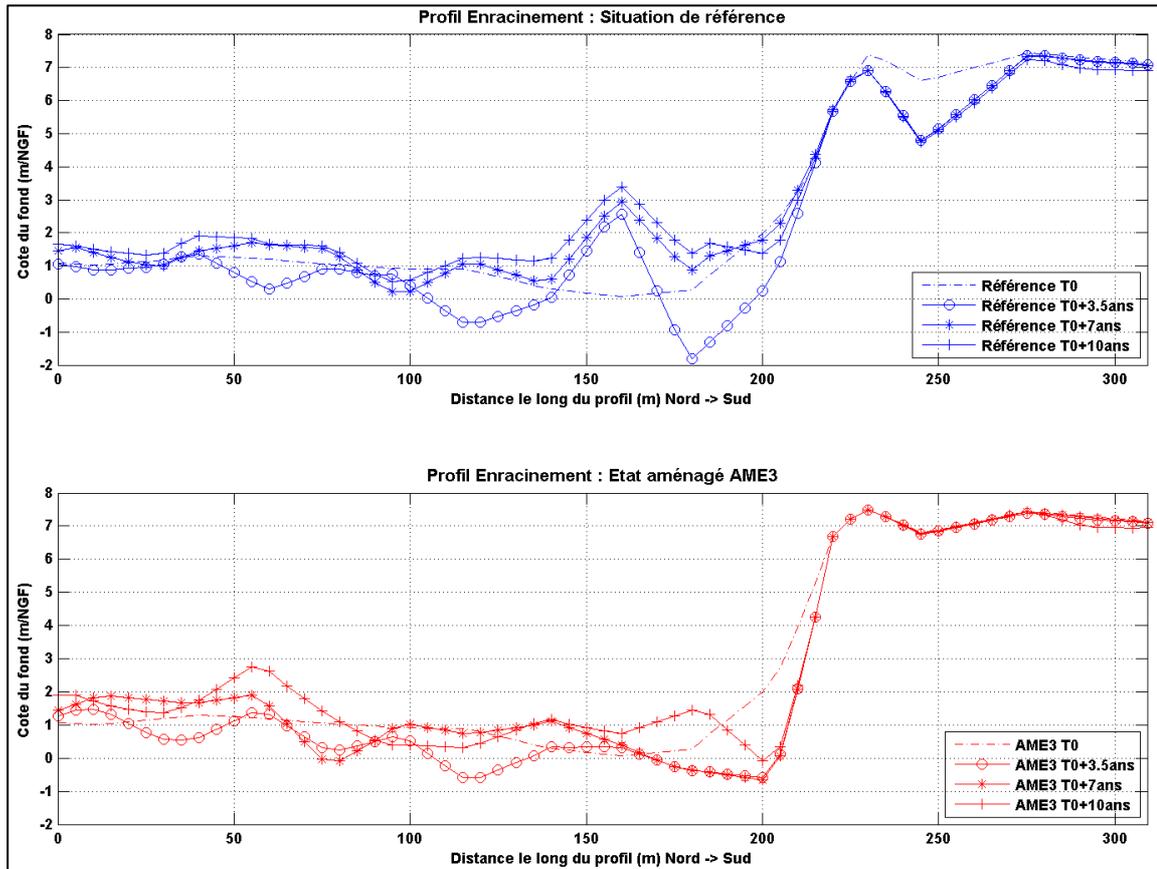


Figure 6-39 : Hypothèse n°4 (brèche à l'enracinement de la digue basse) : profils obtenus le long de la section « enracinement » représentée sur la Figure 6-17, à T0, T0+3.5 ans, T0+7 ans et T0+10 ans pour la situation de référence (en haut, en bleu) et pour l'hypothèse n°4 (en bas, en rouge).

#### 6.3 SYNTHÈSE DES TESTS DES SOLUTIONS D'AMÉNAGEMENT A L'EMBOUCHURE

**Aménagement n°1** : Creusement d'un chenal au centre et dépôts devant l'enracinement de la digue basse et dans le méandre à l'Est

- Le déplacement du sable (creusement d'un chenal et dépôts des quantités draguées) a permis de limiter le méandrement vers l'Est ;
- Un entretien récurrent du chenal et une répartition des dépôts associés sont à prévoir ;
- Il existe a priori des tracés de chenaux et des localisations des dépôts plus judicieux.

**Ce type d'aménagement est jugé intéressant** (vis-à-vis de l'aléa érosion).

**Aménagement n°2** : Suppression de la digue basse

- Tendance (retour) à la chenalisation le long du littoral de Montmartin (situation antérieure à 1988).

**Ce type d'aménagement présente un risque important de déstabilisation des littoraux de Montmartin et Hauteville.**

**Aménagement n°3** : Prolongation de la digue basse vers l'Est depuis son enracinement

- Confortement local du méandre ;
- En dehors de la zone confortée, évolutions équivalentes à la situation de référence ;
- Déplacement probable du méandre plus à l'Est.

**Ce type d'aménagement est jugé intéressant** (vis-à-vis de l'aléa érosion).

**Hypothèse n°4** : Brèche à l'enracinement de la digue basse

- Chenalisation sensible vers le Sud mais sans commune mesure avec celle résultant d'une suppression de la digue basse (aménagement n°2);

**Le risque de contournement de la digue basse par le chenal principal de la Sienne n'est pas considéré comme critique**

# 7. EVALUATION DES EFFETS DES OUVRAGES ENVISAGES SUR L'ALEA SUBMERSION MARINE

## 7.1 OUVRAGES RETRO-LITTORAUX

### 7.1.1 OBJECTIFS ET PRINCIPE

Pour réduire le risque de submersion marine des zones urbanisées de Montmartin et Hauteville, deux aménagements majeurs sont à investiguer :

- La surélévation d'un ouvrage, orienté Est-Ouest, depuis la zone dunaire à l'Ouest jusqu'à 300 m à l'Est de la porte à flot du Passevin. Il s'agit d'un ouvrage insubmersible, pour contenir un risque de submersion par débordement depuis le Nord (par le bras de mer entre la flèche de Montmartin et la côte à l'Est) ;
- La dépoldérisation des bas-champs de la flèche de Montmartin, pour créer une zone d'expansion de l'onde de submersion et limiter les niveaux atteints devant les zones sensibles (y compris les digues qui visent à contenir la submersion).

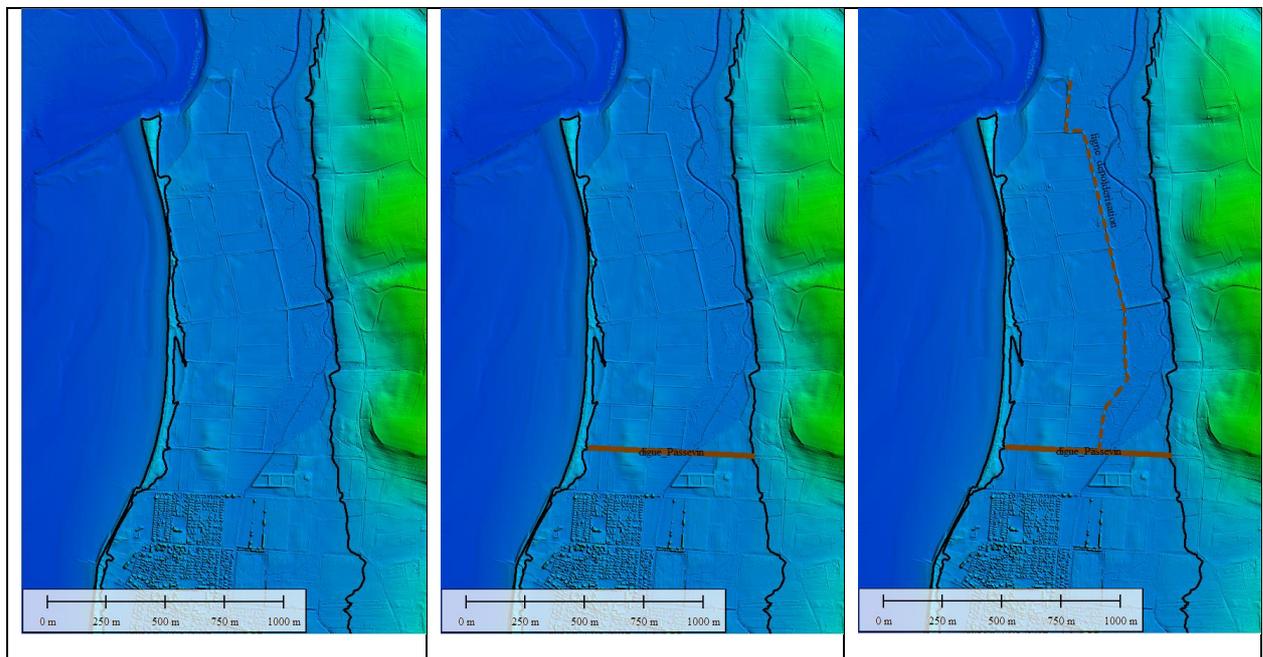


Figure 7-1 : Visualisation des aménagements à tester - gauche : référence ; centre : digue pour contenir la submersion ; droite : digue + ligne de dépoldérisation. Trait noir : niveau +9.5 m NGF.

Pour tester ces aménagements, le modèle hydrodynamique a été adapté pour rendre submersibles les zones basses en arrière du trait de côte. Les phénomènes de submersion sont simulés pour différentes hypothèses de marée (marée astronomique + surcote + surélévation du niveau marin avec le changement climatique) extrême, conformes aux hypothèses du PPRL. La comparaison des résultats des simulations des configurations aménagées avec ceux de l'état de référence (sans aménagements) permet alors d'évaluer les effets des ouvrages (ou des suppressions d'ouvrages) envisagés.

#### 7.1.2 METHODOLOGIE DE MODELISATION

##### 7.1.2.1 Adaptation du maillage

L'emprise du domaine modélisé a été étendue de manière à inclure les zones basses en arrière du trait de côte. Le maillage couvre donc une large partie terrestre que la marée est susceptible de submerger lors d'épisodes exceptionnels (cf. Figure 7-2).

La résolution de la grille de calcul a été raffinée afin de représenter plus précisément la topographie, en particulier les points hauts (e.g. levés de terres) qui constituent un obstacle aux écoulements. Plusieurs tests (non présentés dans ce rapport) ont été réalisés avec des maillages de résolution différente. Afin de conserver une qualité de résultats compatibles avec les temps de calcul, le maillage retenu est présenté sur les figures suivantes : sa résolution est de 10 m dans toute l'embouchure de la Seine (Figure 7-2) et atteint localement 1 m aux endroits où la topographie peut contraindre les écoulements. Ces zones à 1 m de résolution sont représentées sur la Figure 7-3.

Des zooms locaux sur les zones « Hauteville/Montmartin » (Figure 7-4) et « Regnéville » (Figure 7-5) sont également présentés.

La grille de calcul comporte un total de 999 964 nœuds et 1 993 224 éléments triangulaires.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

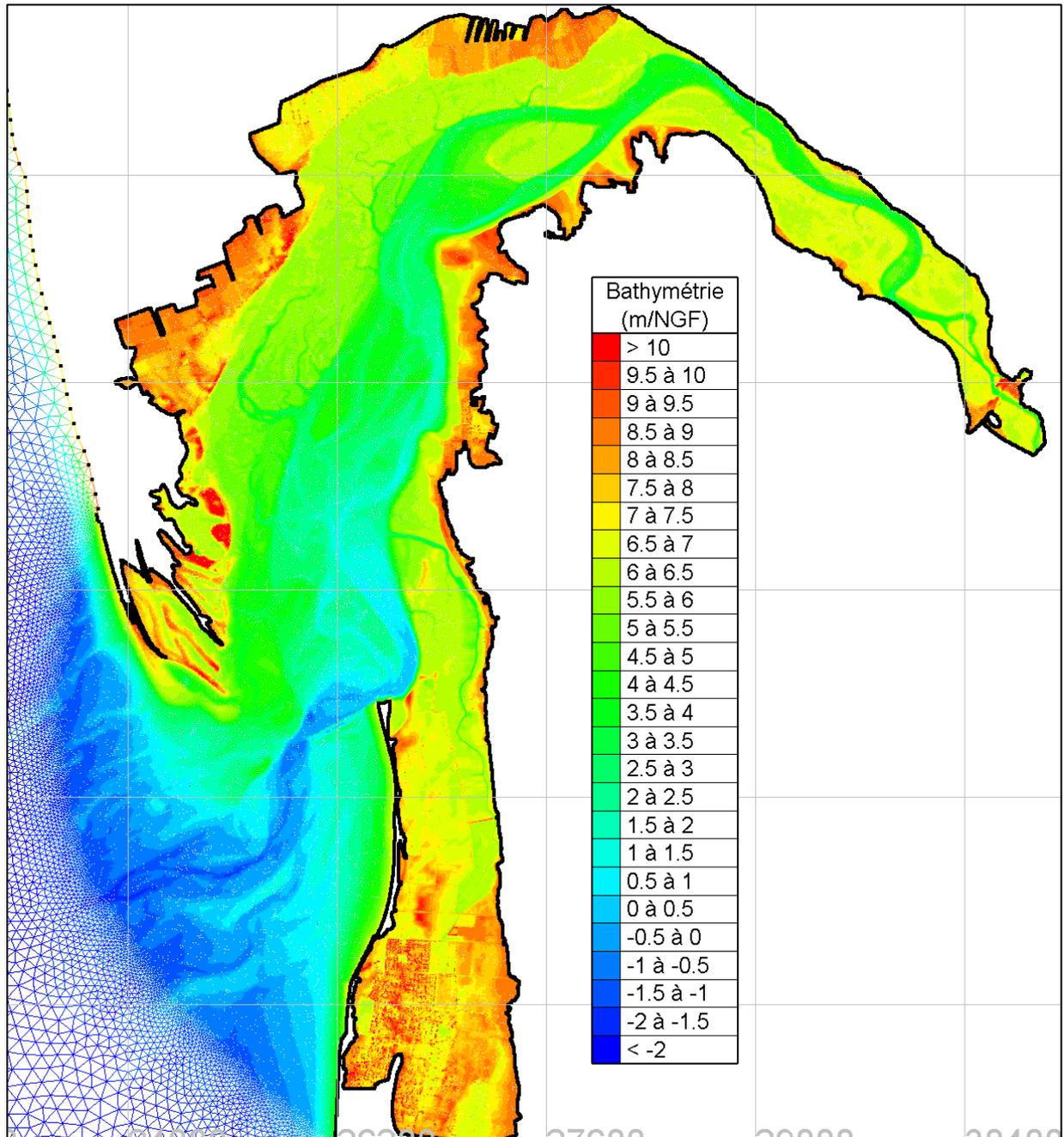


Figure 7-2 : Grille de calcul à haute résolution définie pour simuler les phénomènes de submersion. La résolution est de 10 m dans toute l'embouchure et 1 m localement au niveau de certaines levées de terre (cf. Figure 7-3). MNT (LIDAR) de 2016.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

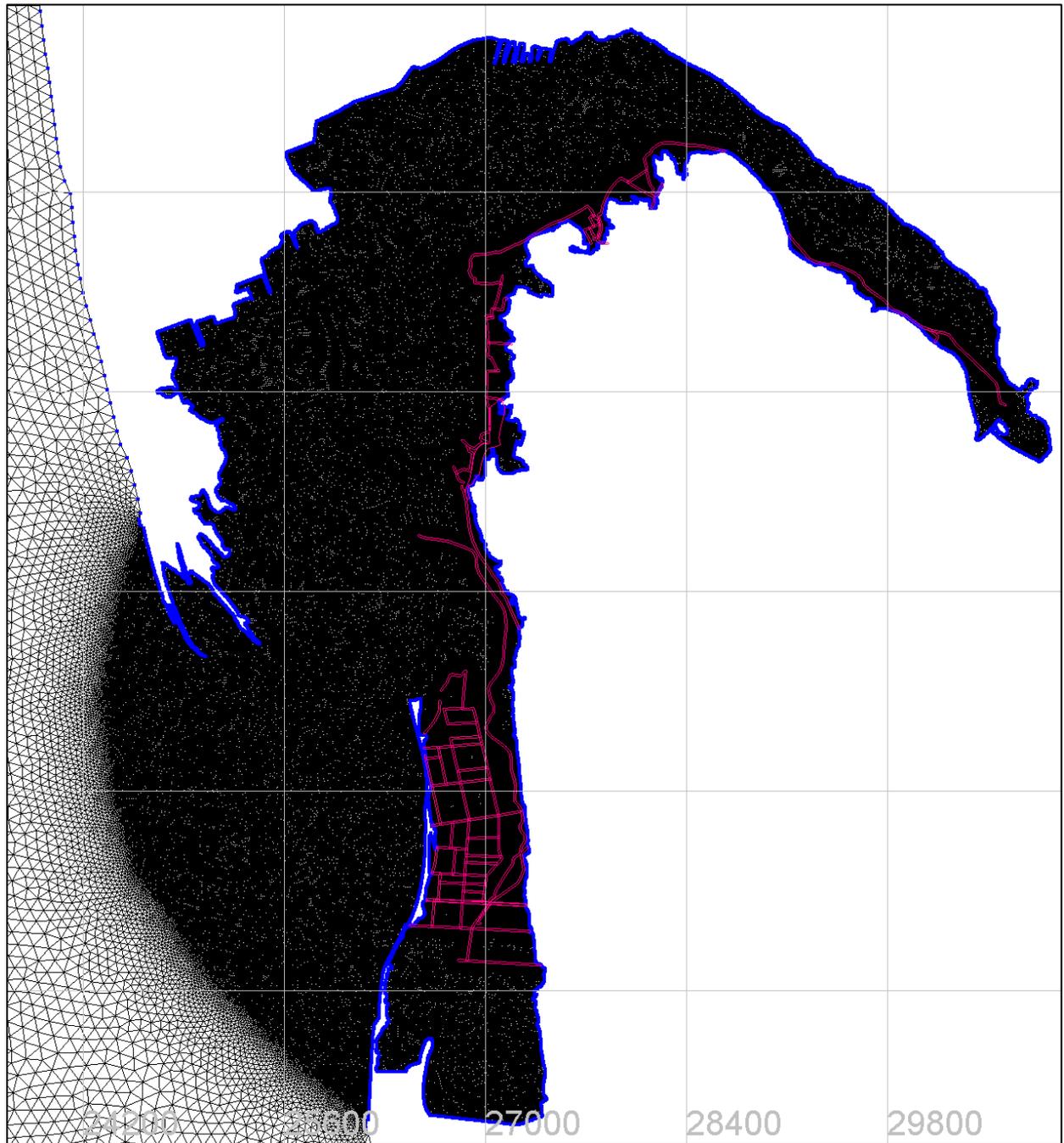


Figure 7-3 : Grille de calcul à haute résolution définie pour simuler les phénomènes de submersion. La résolution est de 10 m dans toute l'embouchure et 1 m localement au niveau de certaines levées de terre et identifiées en rouge sur cette figure. Le trait de côte est représenté en bleu, il n'y a pas de continuité du cordon dunaire.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

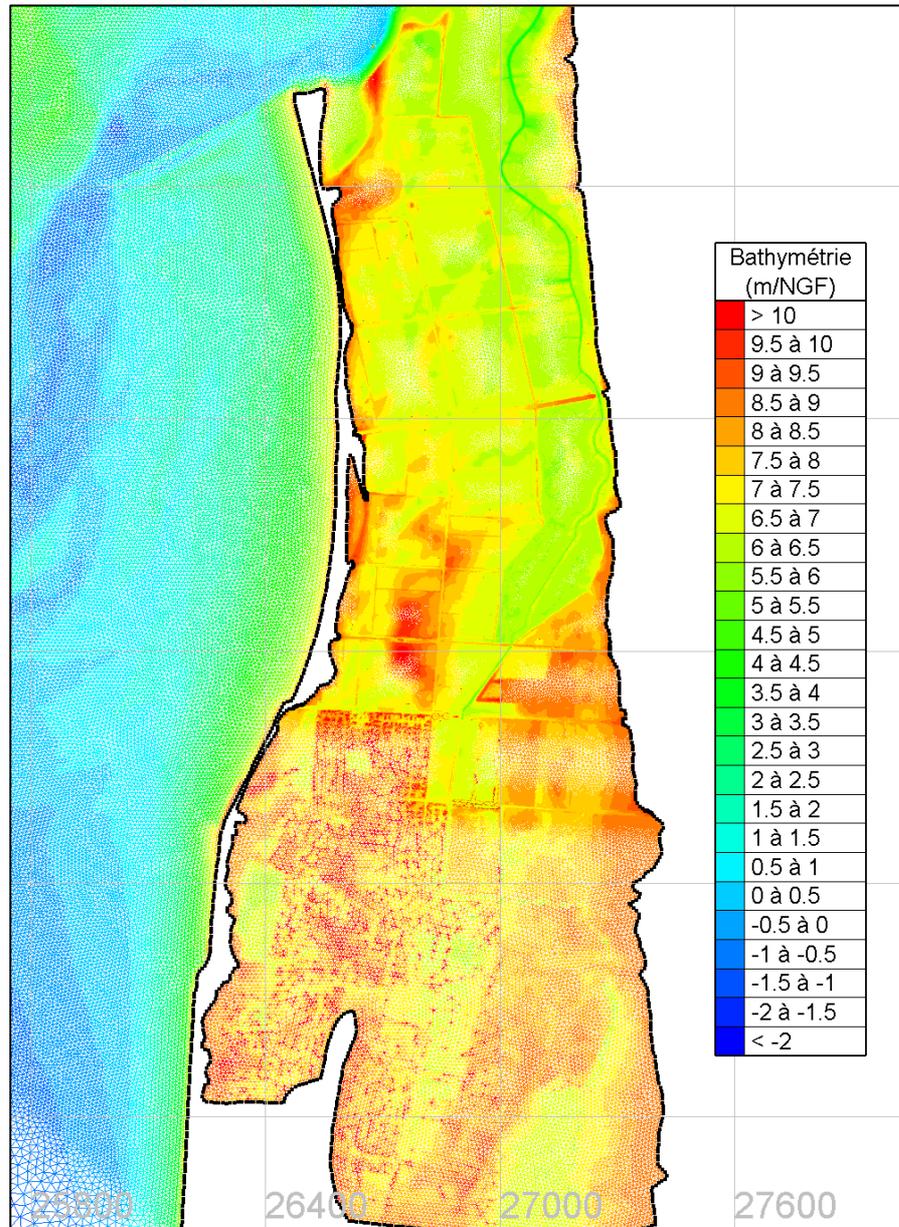


Figure 7-4 : Grille de calcul à haute résolution définie pour simuler les phénomènes de submersion marine. Zoom sur la zone « Hauteville/Montmartin ». La résolution est de 10 m dans toute l'embouchure et 1 m localement au niveau de certaines levées de terre. MNT de 2016.

**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

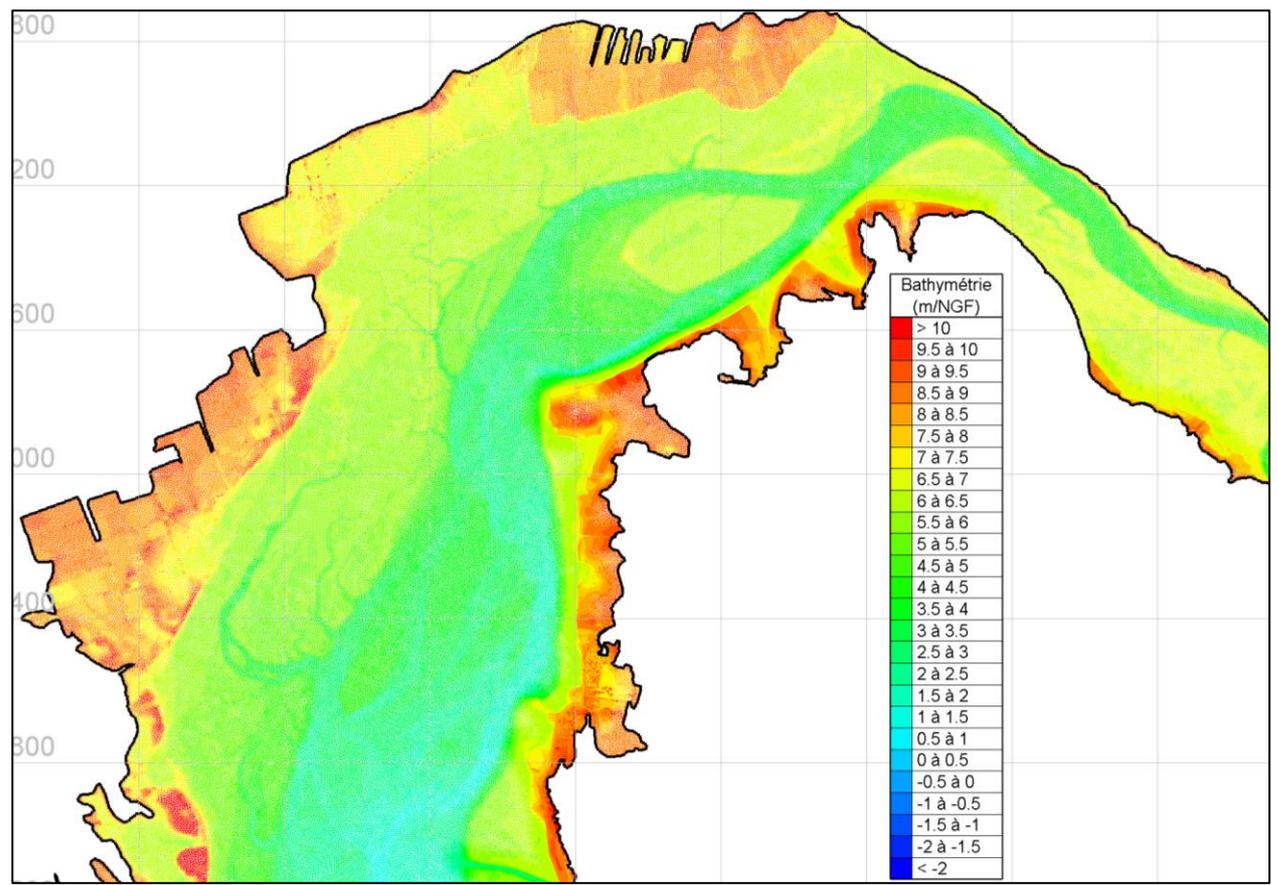


Figure 7-5 : Grille de calcul à haute résolution définie pour simuler les phénomènes de submersion marine. Zoom sur la zone « Regnéville ». La résolution est de 10 m dans toute l'embouchure et 1 m localement au niveau de certaines levées de terre. MNT de 2016.

**7.1.2.2 Conditions simulées**

Les conditions hydrodynamiques et météorologiques conduisant à des niveaux de pleine mer extrêmes, de période de retour centennale, ont été définies conformément aux hypothèses du PPRL [ 2 ] et sont résumées dans le Tableau 7-1.

	<b>Niveau centennal : Marée astronomique + Surcote atmosphérique (Atlas des niveaux extrêmes SHOM- CETMEF)</b>	<b>Action des vagues (set-up)</b>	<b>Incertitudes</b>	<b>Surélévation du niveau moyen (GIEC)</b>	<b>Niveau total considéré</b>
<b>Cote (m)</b>	7.85 m/NGF	0.20 m	0.25 m	0.20 m (2020) 0.60 m (2100)	8.50 m/NGF (2020) 8.90 m/NGF (2100)

Tableau 7-1 : Contribution des différents processus aux marées extrêmes simulées.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

7.1.2.3 Description des ouvrages rétro-littoraux étudiés

Deux modifications de la topographie ont été apportées au MNT actuel (LIDAR 2016) de manière à évaluer leur efficacité sur les risques de submersion des zones basses :

- Aménagement n°1 : confortement et surélévation de talus pour former une digue insubmersible au nord d'Hauteville (premier débouché du Passevin). Le différentiel bathymétrique avec l'état actuel est présenté sur la Figure 7-6 ;
- Aménagement n°2 : aménagement n°1 combiné à une dépoldérisation vers le nord le long du Passevin. Le différentiel bathymétrique avec l'état actuel est présenté sur la Figure 7-7

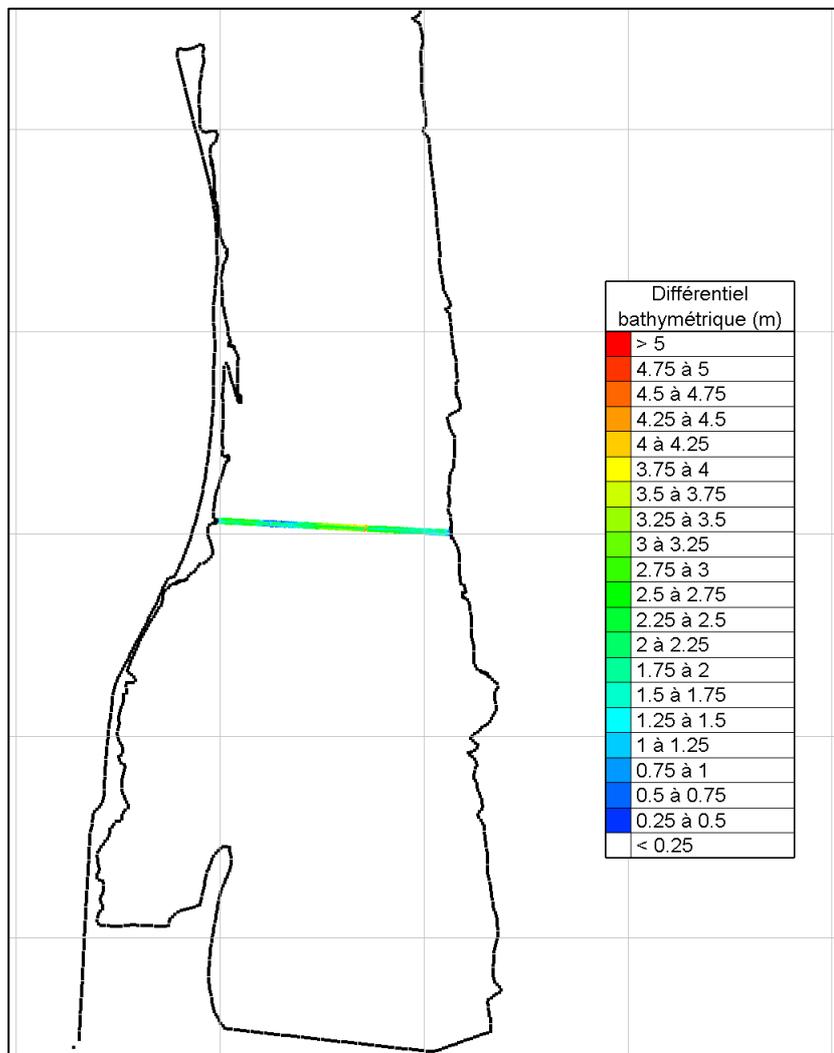


Figure 7-6 : Différentiel bathymétrique (m) entre l'aménagement n°1 et le MNT actuel (2016).

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

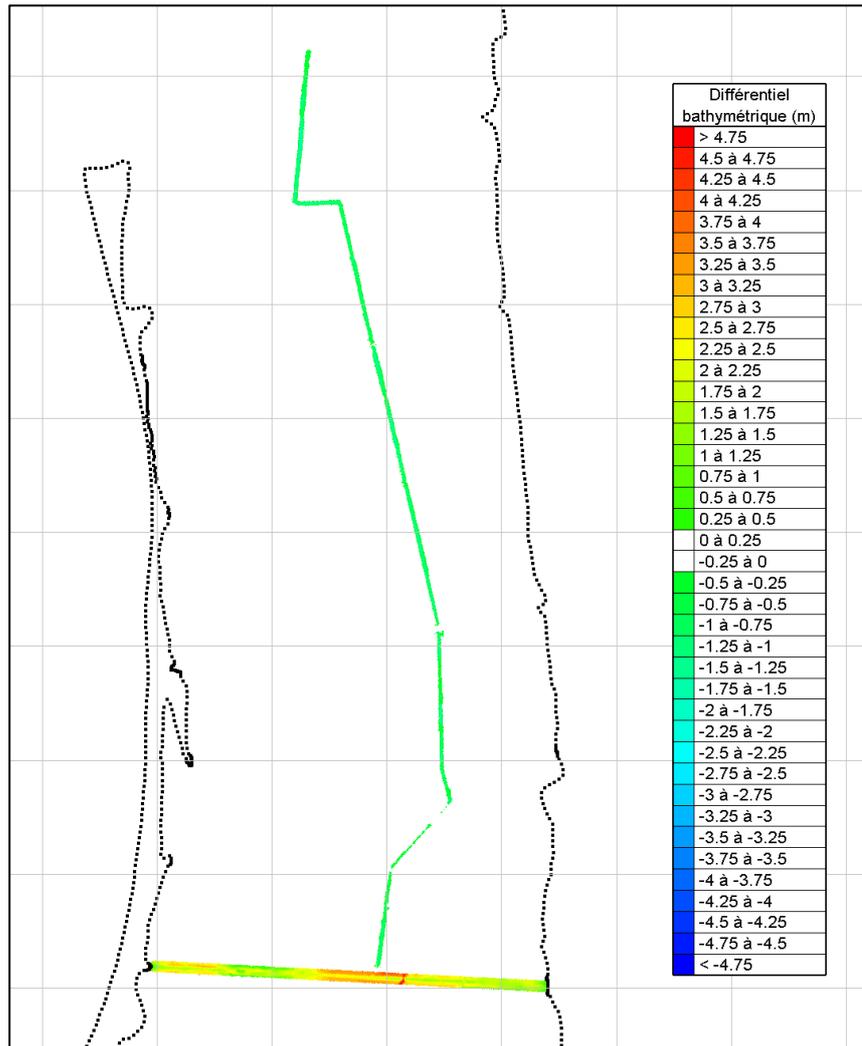


Figure 7-7 : Différentiel bathymétrique (m) entre l'aménagement n°2 et le MNT actuel (2016).

### 7.1.3 RESULTATS

#### 7.1.3.1 Etat actuel

La Figure 7-8 présente les zones submergées et les niveaux maximaux atteints lors des simulations correspondant à la configuration actuelle (sans aménagement), pour des marées extrêmes, de période de retour centennale, aux horizons 2020 et 2100. On peut noter l'amplification de la marée dans l'estuaire, et la submersion qui atteint les zones urbanisées de Montmartin et Hauteville.

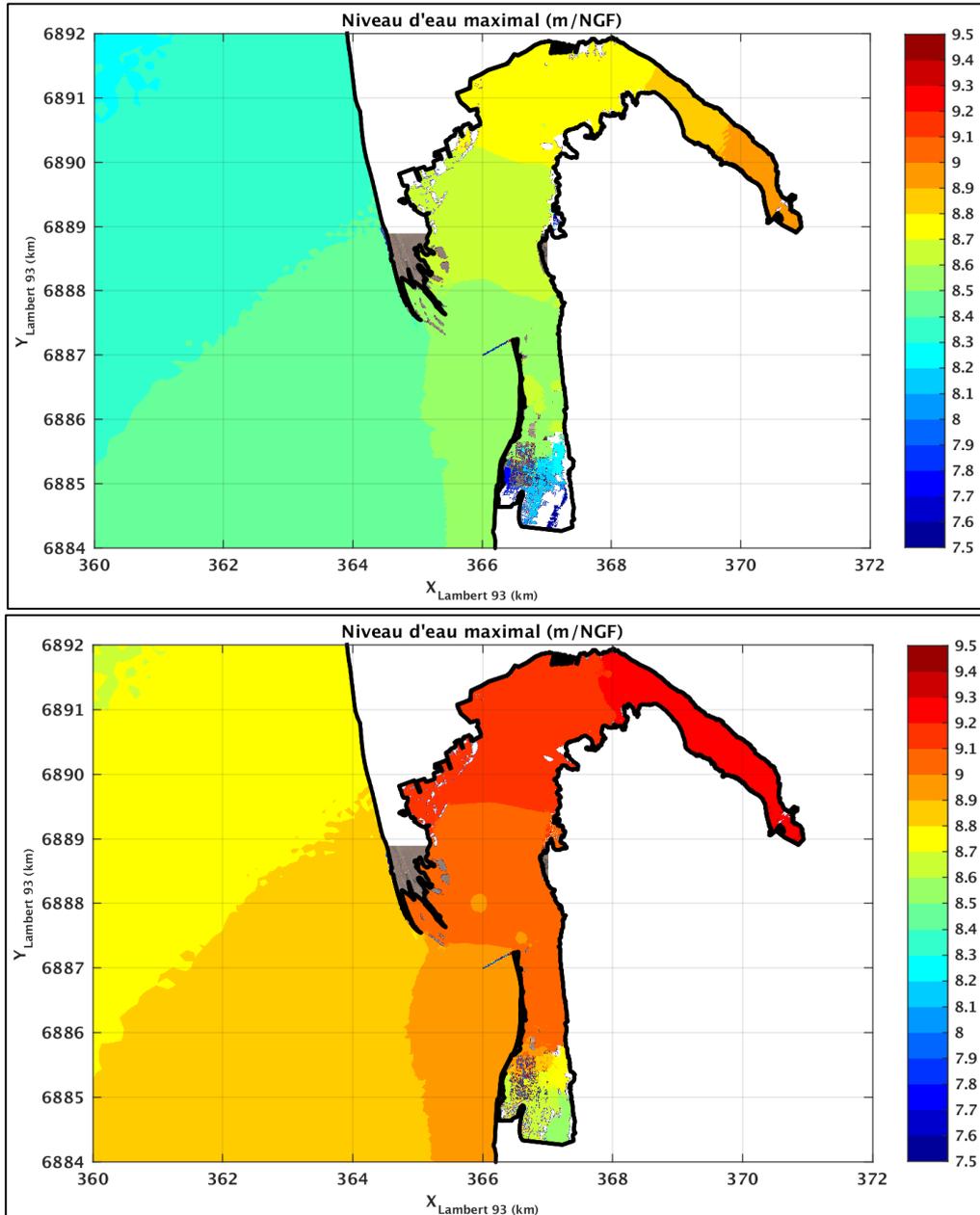


Figure 7-8 : Carte des niveaux d'eau maximaux (m/NGF) simulés en configuration actuelle pour des événements de période de retour centennale– En haut : horizon 2020 ; en bas : horizon 2100.

#### 7.1.3.2 Etat aménagé

##### 7.1.3.2.1 Aménagement n°1 : digue insubmersible au nord d'Hauteville

La Figure 7-9 présente les niveaux d'eau maximaux atteints pour l'aménagement n°1 (confortement et surélévation de talus = digue insubmersible) et pour une condition de période de retour centennale aux horizons 2020 et 2100. Il n'y a pas de modifications significatives à l'échelle de l'embouchure. C'est-à-dire que la surélévation des talus, pour contenir la submersion vers les zones urbanisées de Montmartin et Hauteville, n'aura pas d'effet sur les niveaux d'eau atteints sur d'autres secteurs.

On peut noter, localement, une légère augmentation d'une dizaine de centimètres du niveau d'eau atteint à pleine mer au voisinage de l'ouvrage (Figure 7-12 pour l'horizon 2020 et Figure 7-15 pour l'horizon 2100) ; sans conséquence sur son dimensionnement. Deux maxima locaux se produisent : un premier légèrement avant la pleine mer actuelle avec quelques minutes de déphasage ; et un second après la pleine mer qui serait induit par une réflexion de l'onde après le remplissage du domaine.

Dès que l'on s'éloigne de la digue insubmersible (Figure 7-13 et Figure 7-14 à l'horizon 2020 et Figure 7-16 et Figure 7-17 à l'horizon 2100), l'influence des ouvrages est quasiment nulle à pleine mer.

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

---

#### 7.1.3.2.2 Aménagement n°2 : digue insubmersible au nord d'Hauteville + dépodérisation vers le nord le long du Passevin

La Figure 7-10 présente les niveaux d'eau maximaux atteints en configuration aménagée n°2 (digue insubmersible au nord d'Hauteville combinée à une dépodérisation vers le nord le long du Passevin) pour une condition de période de retour centennale aux horizons 2020 et 2100. Les cartes de résultats sont très proches de celles présentées pour l'aménagement précédent. Les effets escomptés d'une dépodérisation de la flèche de Montmartin sont à peine sensibles. Les niveaux de pleine mer à proximité de la porte à flot du Passevin ne sont par exemple abaissés que de 10 à 20 centimètres.

La dépodérisation n'a pas d'influence sur les niveaux d'eau à pleine mer.

Les 2 maxima locaux induits par la réflexion de l'onde sont toujours présents et légèrement plus marqués, le second atteignant cette fois-ci un niveau légèrement plus haut que le premier.

Dès que l'on s'éloigne de la digue insubmersible (Figure 7-13 et Figure 7-14 à l'horizon 2020 et Figure 7-16 et Figure 7-17 à l'horizon 2100), l'influence des ouvrages est quasiment nulle à pleine mer.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

7.1.3.2.3 Cartes de niveaux d'eau maximaux et de submersion

Les Figure 7-9 et Figure 7-10 présentent les cartes des niveaux d'eau maximaux simulés en configuration actuelle et pour les deux configurations d'ouvrages rétro-littoraux étudiées, pour des événements de période de retour centennale, aux horizons 2020 et 2100.

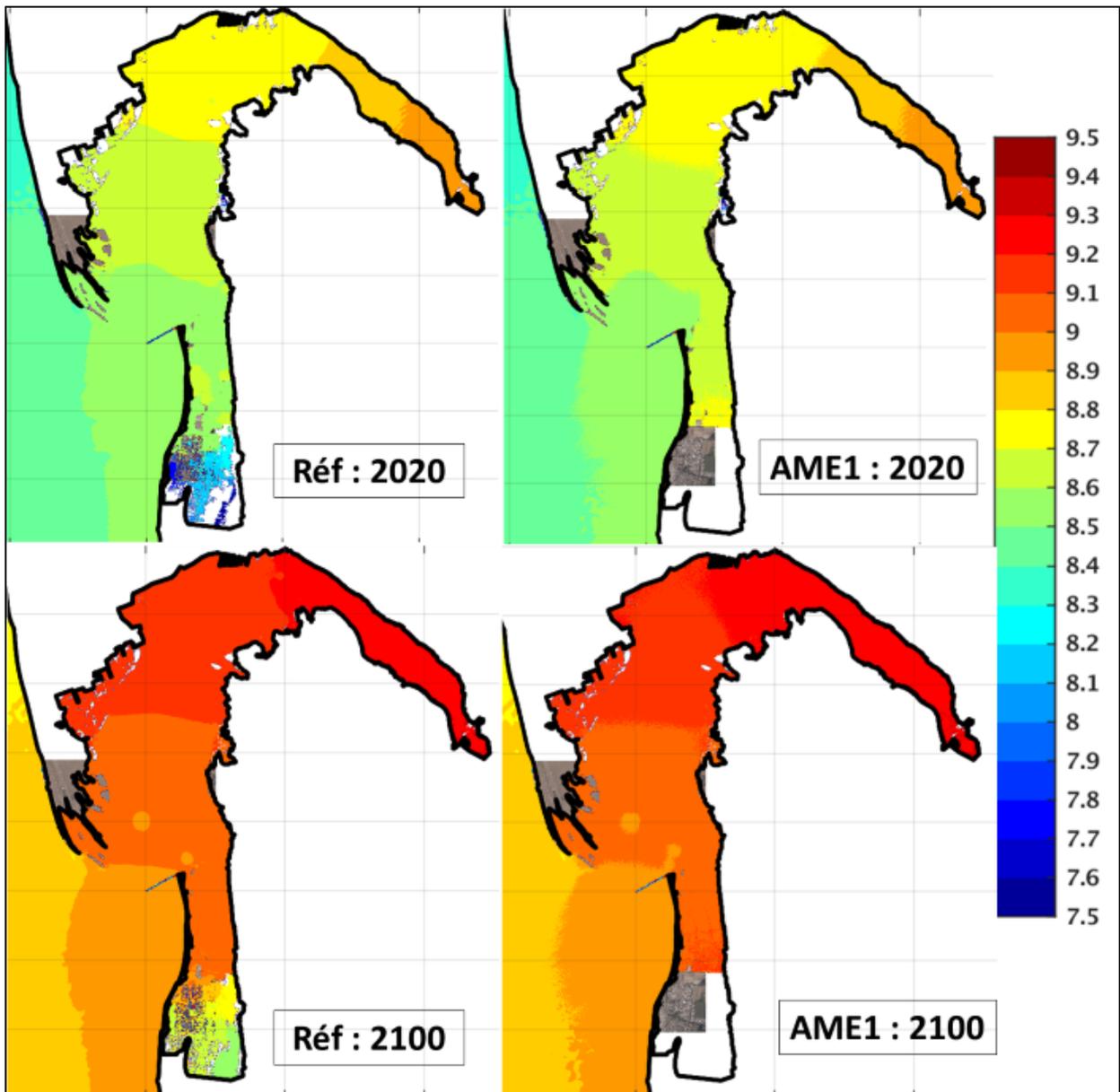


Figure 7-9 : Cartes des niveaux d'eau maximaux (m/NGF) simulés en configuration actuelle (à gauche) et pour l'aménagement n°1 (à droite), pour des événements de période de retour centennale- En haut : horizon 2020 ; en bas : horizon 2100.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

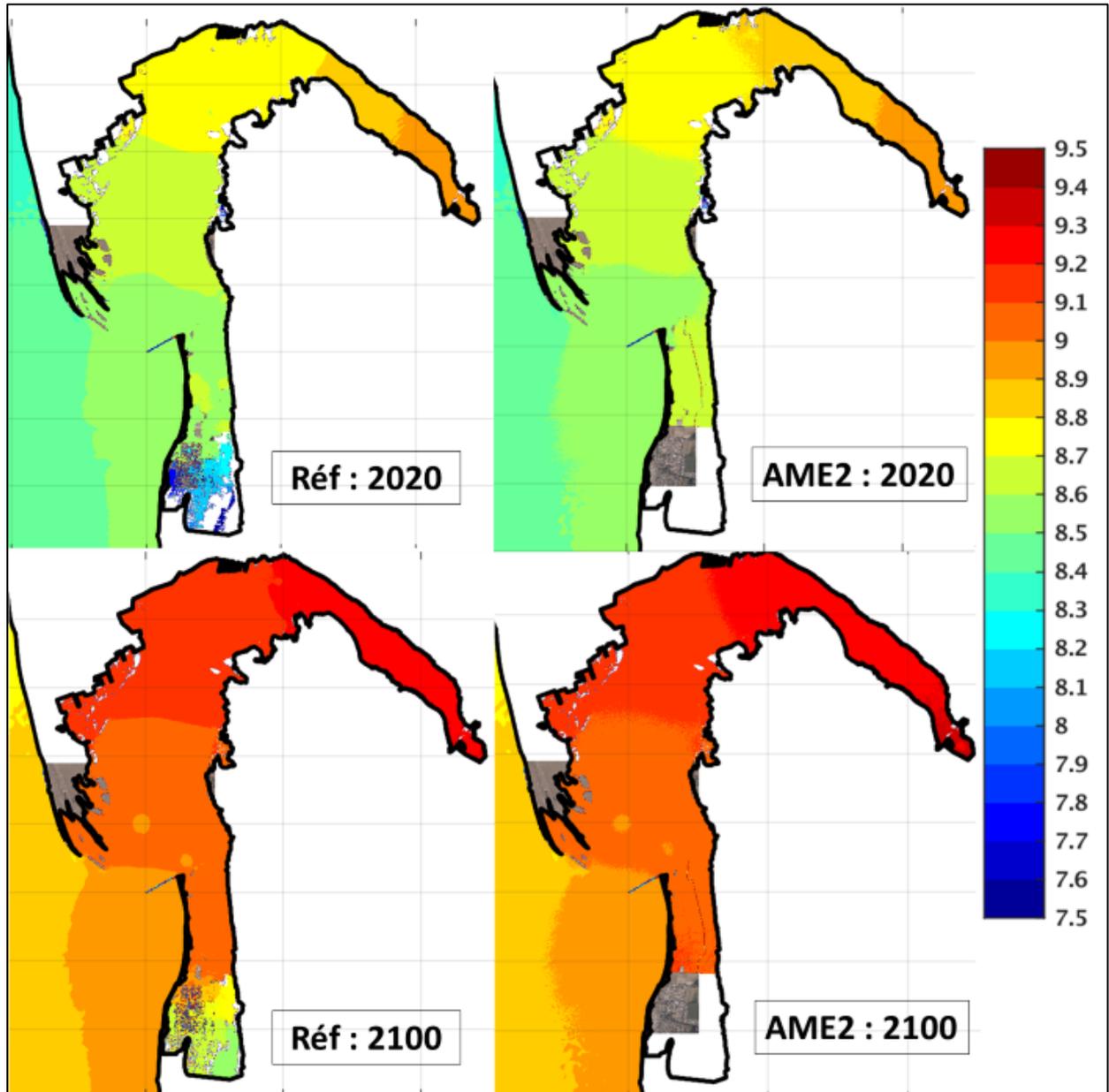


Figure 7-10 : Cartes des niveaux d'eau maximaux (m/NGF) simulés en configuration actuelle (à gauche) et pour l'aménagement n°2 (à droite), pour des événements de période de retour centennale-  
En haut : horizon 2020 ; en bas : horizon 2100.

**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

7.1.3.2.4 Courbes des niveaux d'eau pendant les événements extrêmes simulés

Trois points ont été sélectionnés pour compléter l'analyse des phénomènes de submersion marine pour les ouvrages rétro-littoraux. Ils sont localisés sur la Figure 7-11 :

- Le point n°1 est situé un peu nord de la digue insubmersible (confortement/surélévation des talus au nord d'Hauteville). L'analyse des courbes de marée en ce point permet d'apprécier les effets de la digue elle-même, mais aussi de la dépoldérisation de la flèche de Montmartin, sur le dimensionnement de la digue ;
- Les analyses aux points n°2 et n°3, situés plus au Nord, permettent d'évaluer précisément les effets des aménagements envisagés sur les risques de submersion des secteurs voisins (vers Regnéville).

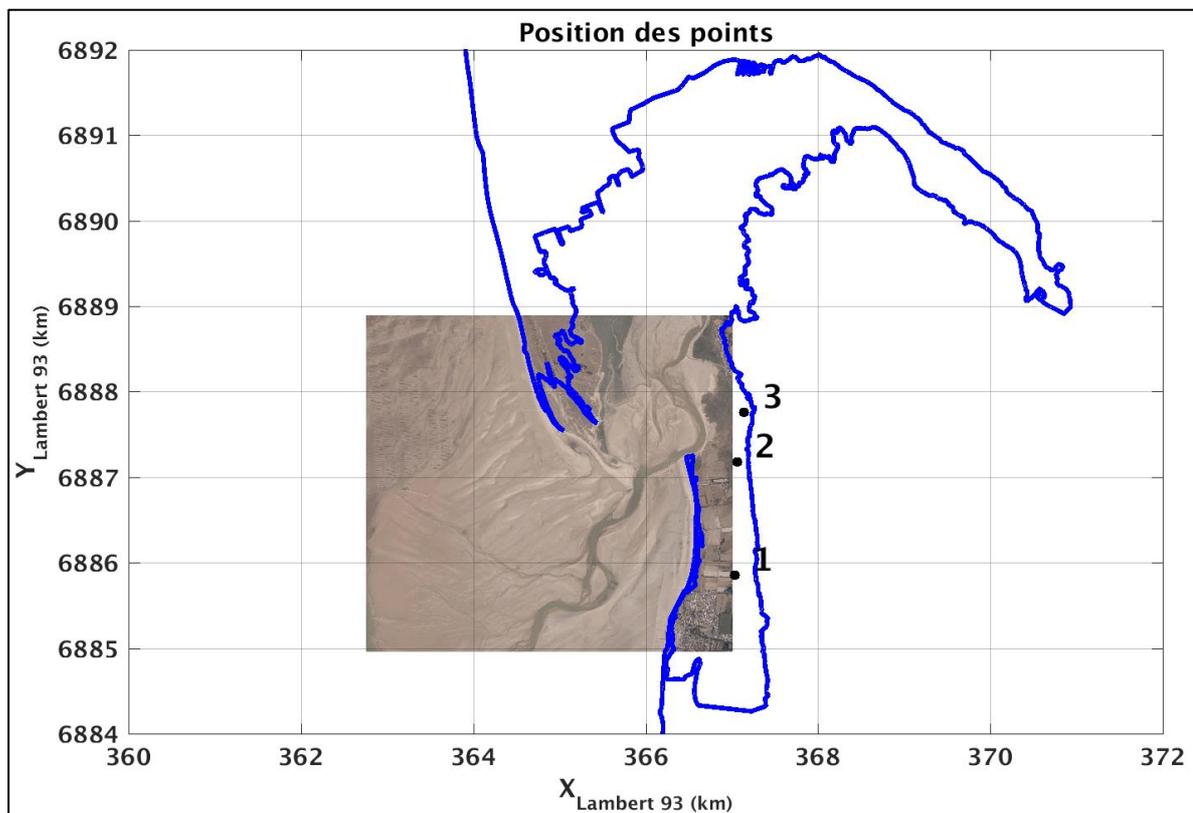


Figure 7-11 : Localisation des points pour l'analyse des évolutions temporelles des niveaux d'eau pour les ouvrages rétro-littoraux.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

➤ **Horizon 2020**

Les Figure 7-12, Figure 7-13 et Figure 7-14 présentent les évolutions temporelles du niveau d'eau respectivement pour les points n°1, 2 et 3 et pour les trois configurations d'ouvrages rétro-littoraux étudiées lors d'un événement centennal (marée + surcote météo + vagues + incertitudes) à l'horizon 2020.

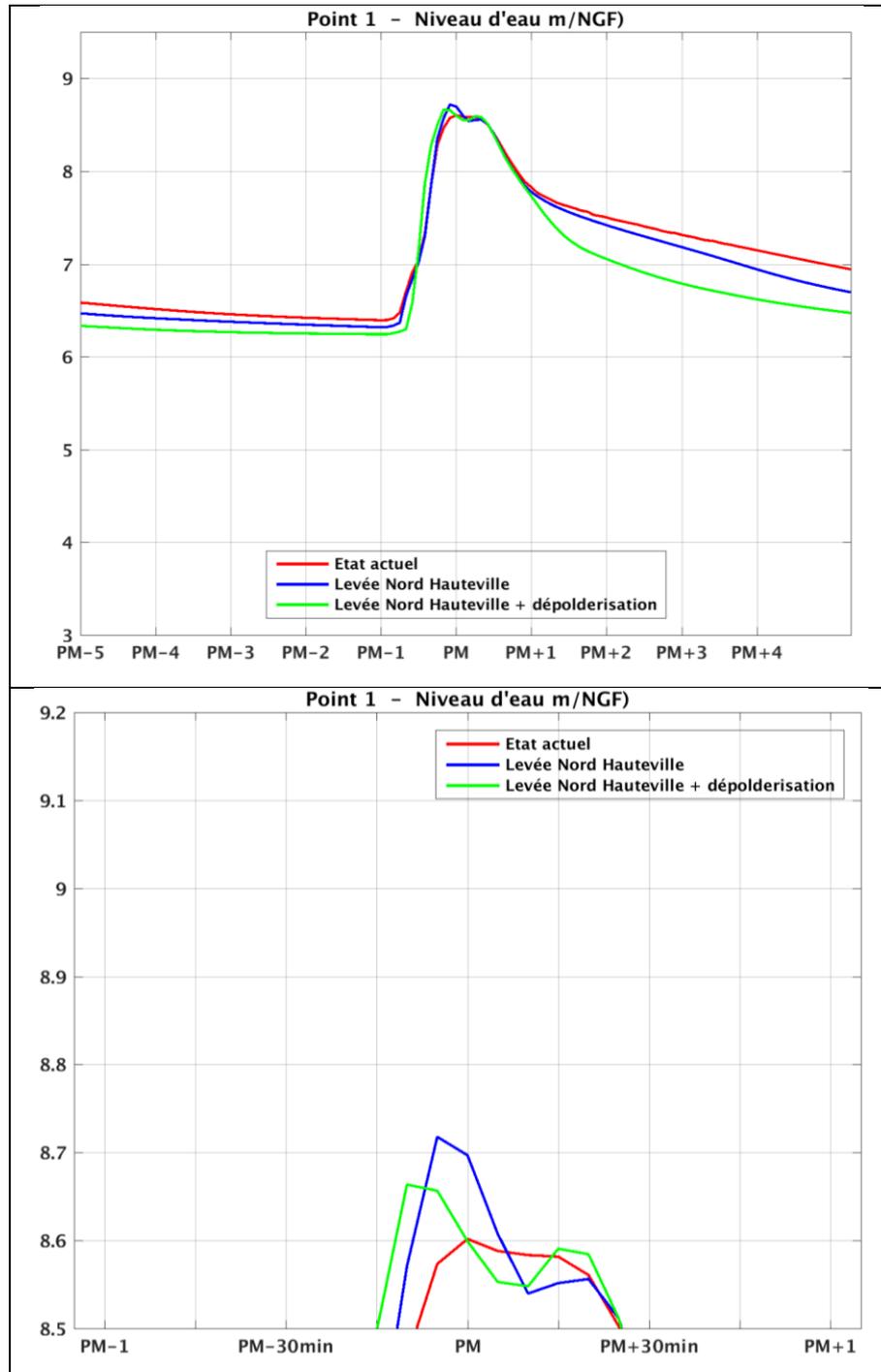


Figure 7-12 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2020 au point n°1 sur toute la marée (en haut) et zoom au moment de la pleine mer (en bas). L'état actuel est représenté en rouge, l'aménagement n°1 en bleu et l'aménagement n°3 en vert.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

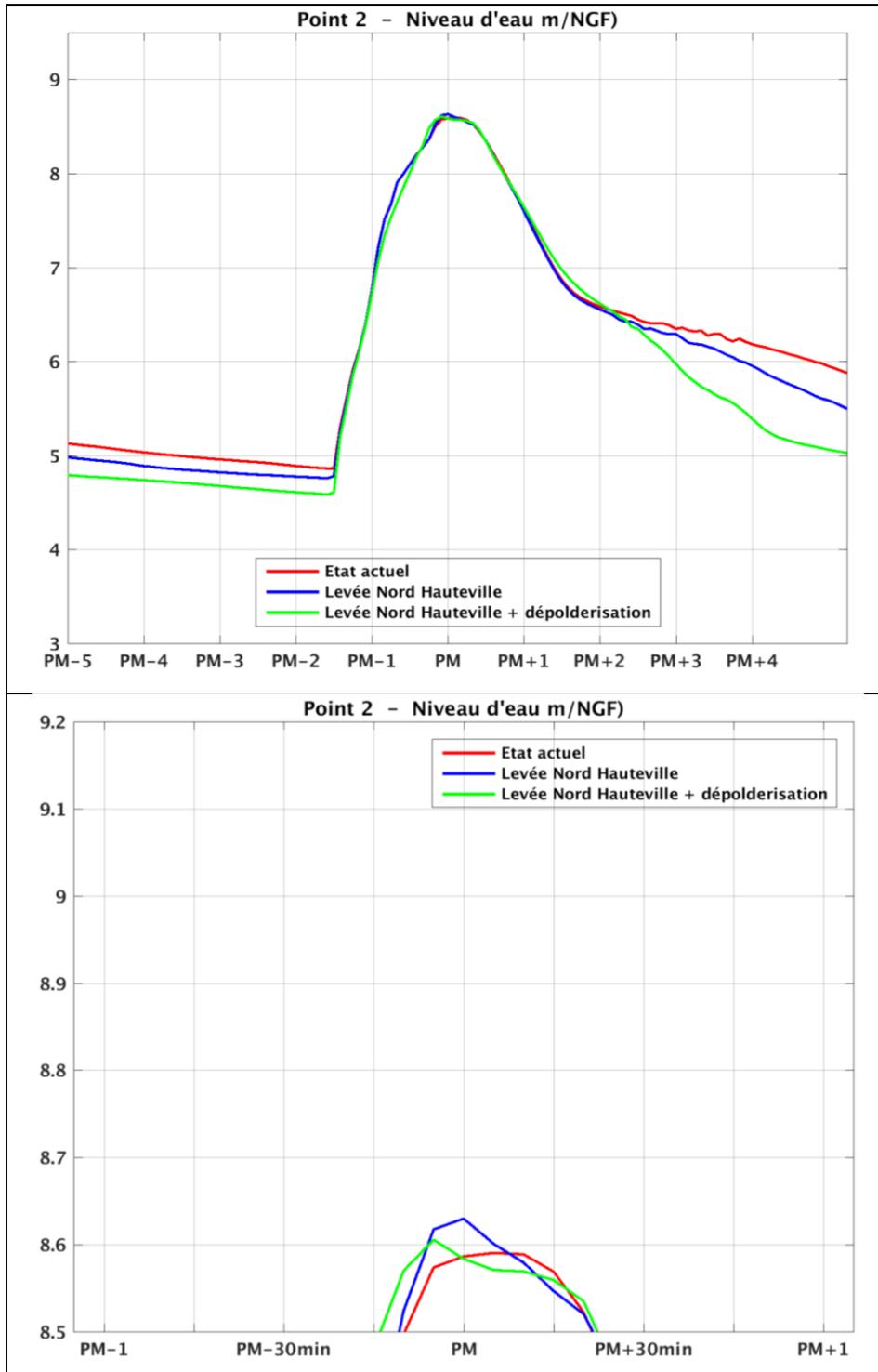


Figure 7-13 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2020 au point n°2 sur toute la marée (en haut) et zoom au moment de la pleine mer (en bas). L'état actuel est représenté en rouge, l'aménagement n°1 en bleu et l'aménagement n°3 en vert.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

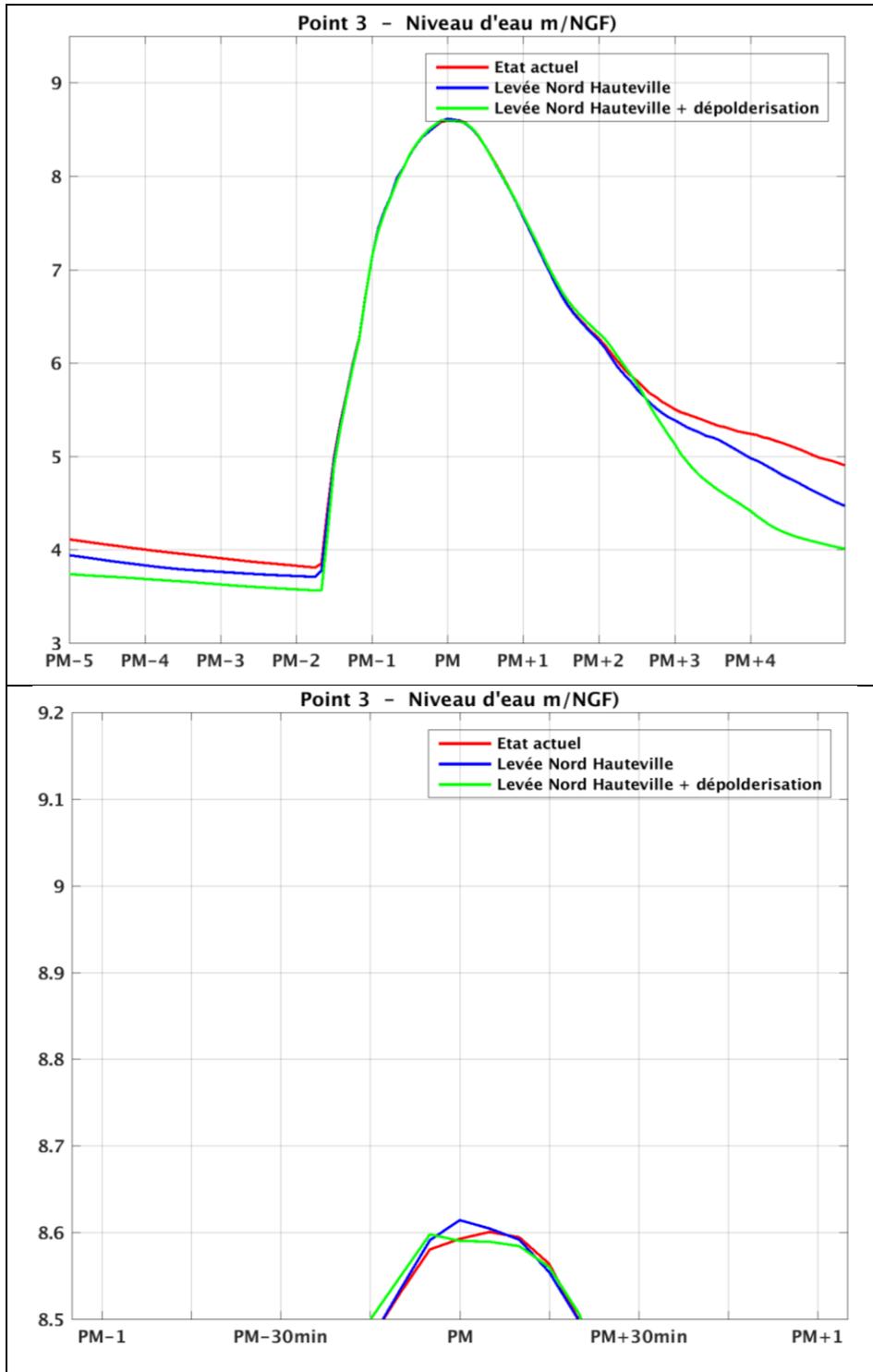


Figure 7-14 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2020 au point n°3 sur toute la marée (en haut) et zoom au moment de la pleine mer (en bas). L'état actuel est représenté en rouge, l'aménagement n°1 en bleu et l'aménagement n°3 en vert.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

➤ **Horizon 2100**

Les Figure 7-15, Figure 7-16 et Figure 7-17 présentent les évolutions temporelles du niveau d'eau respectivement pour les points n°1, 2 et 3 et pour les trois configurations d'ouvrages rétro-littoraux étudiées lors d'un événement centennal (marée + surcote météo + vagues + incertitudes) à l'horizon 2100.

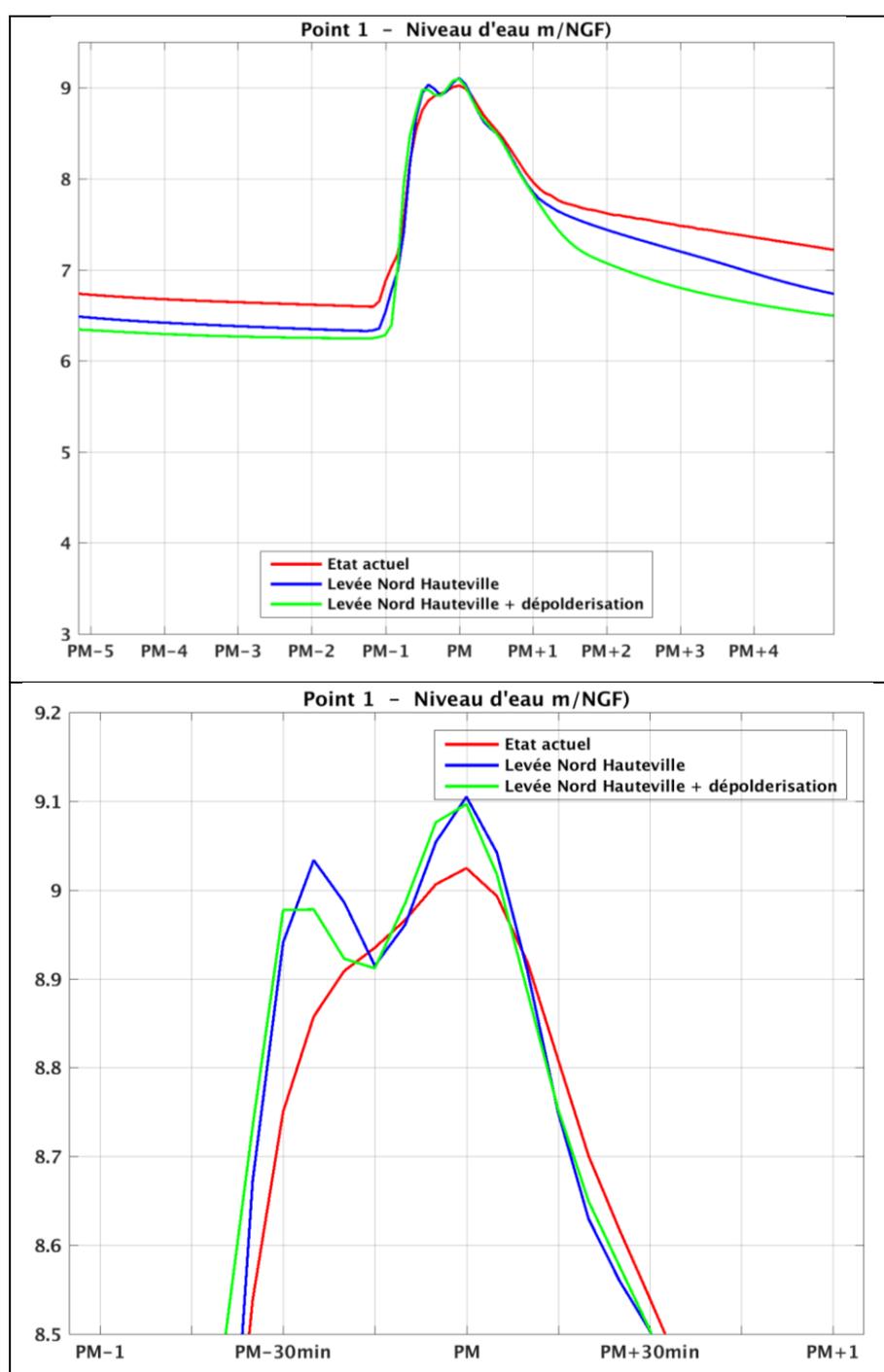


Figure 7-15 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2100 au point n°1 sur toute la marée (en haut) et zoom au moment de la pleine mer (en bas). L'état actuel est représenté en rouge, l'aménagement n°1 en bleu et l'aménagement n°3 en vert.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

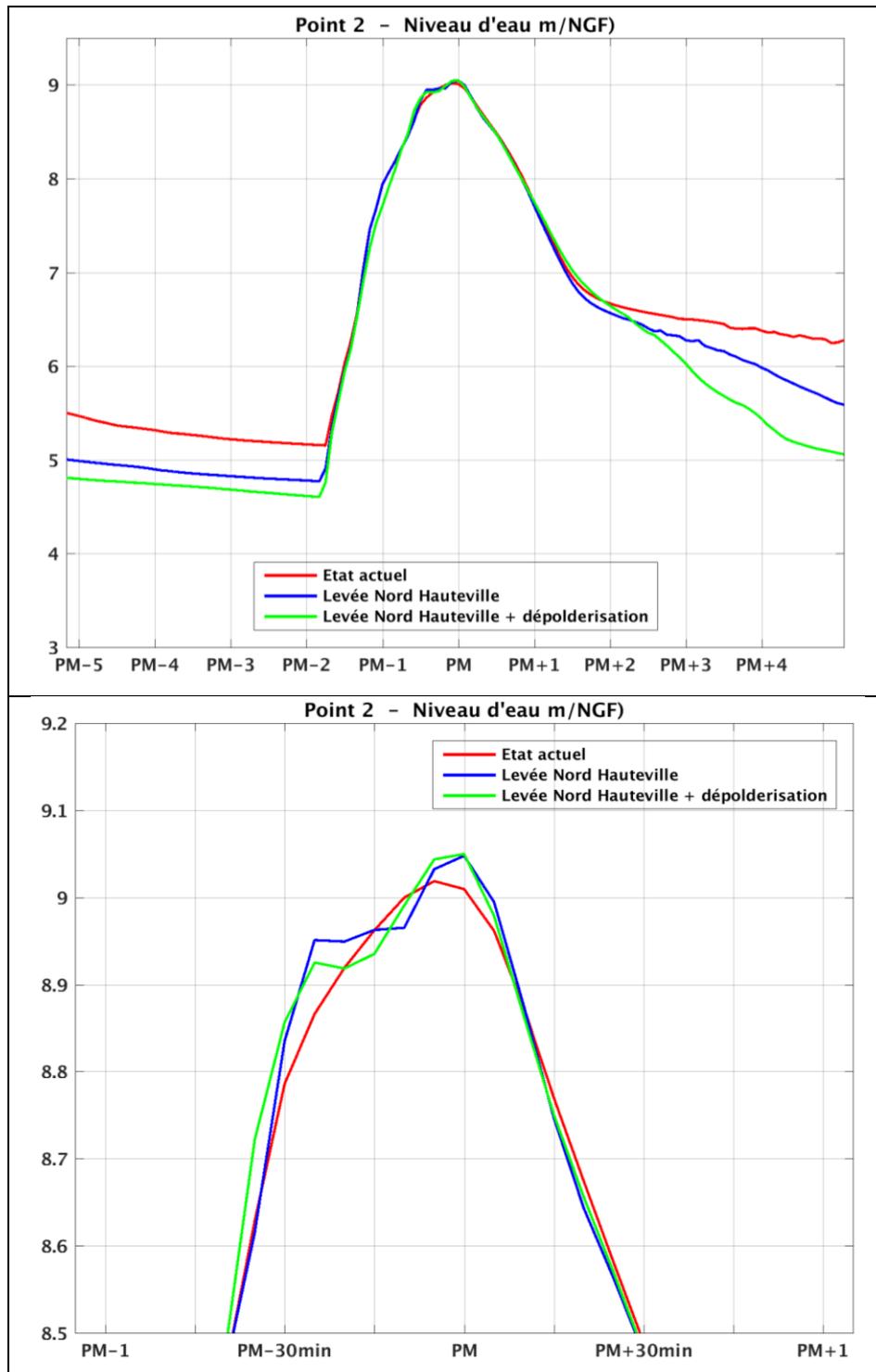


Figure 7-16 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2100 au point n°2 sur toute la marée (en haut) et zoom au moment de la pleine mer (en bas). L'état actuel est représenté en rouge, l'aménagement n°1 en bleu et l'aménagement n°3 en vert.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

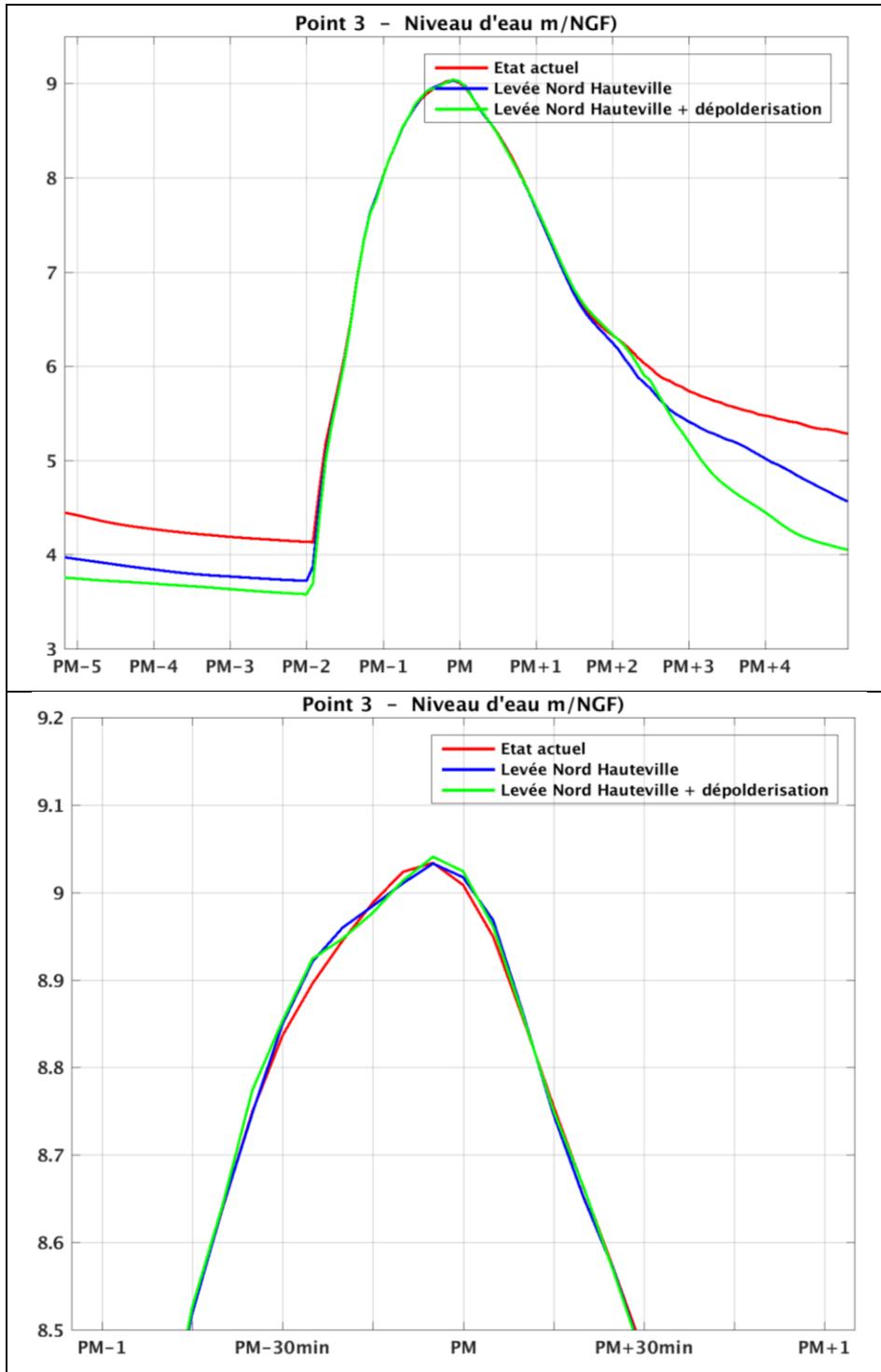


Figure 7-17 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2100 au point n°3 sur toute la marée (en haut) et zoom au moment de la pleine mer (en bas). L'état actuel est représenté en rouge, l'aménagement n°1 en bleu et l'aménagement n°3 en vert.

## 7.2 OUVRAGES A L'EMBOUCHURE

### 7.2.1 AMENAGEMENTS TESTES

L'influence des ouvrages à l'embouchure sur le niveau d'eau a été investigué pour les quatre aménagements étudiés dans la section 6.2 et comparé à la situation de référence. On rappelle la numérotation utilisée :

- Réf : situation actuelle constituant la référence pour les comparaisons, et correspondant à la bathymétrie LIDAR de 2016 ;
- AME1 : creusement d'un chenal au centre et dépôt dans le méandre à l'Est ;
- AME2 : suppression de la digue basse ;
- AME3 : prolongement de la digue basse vers l'Est depuis son enracinement ;
- AME4 : hypothèse de brèche à l'enracinement de la digue basse.

Leurs caractéristiques sont décrites au paragraphe 6.1.2.

### 7.2.2 RESULTATS

Les cartes de niveaux d'eau maximaux présentées au paragraphe suivant 7.2.2.1 montrent qu'aucune des quatre configurations d'aménagements étudiées à l'embouchure ne modifie les niveaux extrêmes atteints dans l'embouchure.

Pour les aménagements n°2 (suppression de la digue basse) et n°3 (prolongement de son enracinement), et n°4 (brèche à l'enracinement), les niveaux d'eau pour les états aménagés sont identiques à l'état actuel. Quelques très légers écarts sur les courbes de marée sont visibles dans le cas de l'aménagements n°1 (creusement chenal + dépôt) pour lequel les niveaux atteints dans l'embouchure interne et en fond d'estuaire (vers le pont de la Roque) sont plus faibles (quelques centimètres) que dans la situation actuelle. Cela peut s'expliquer par une augmentation locale de frottements, devant l'enracinement de la digue basse, où les dépôts de sable dans le chenal principale contraignent sensiblement les écoulements. Ces écarts sont toutefois très faibles (quelques centimètres) et n'ont pas d'effet sur le risque de submersion marine.

Les évolutions temporelles présentées au paragraphe 7.2.2.2 confirment cette analyse.

### 7.2.2.1 Cartes de niveaux d'eau maximaux et de submersion

Les figures suivantes présentent les cartes des niveaux d'eau maximaux simulés en configuration actuelle et pour les quatre hypothèses d'aménagement étudiées à l'embouchure, pour des événements de période de retour centennale, aux horizons 2020 et 2100 :

- Figure 7-18 : creusement d'un chenal central et dépôt dans le méandre à l'Est ;
- Figure 7-19 : suppression de la digue basse ;
- Figure 7-20 : prolongement vers l'Est de l'enracinement de la digue basse ;
- Figure 7-21 : hypothèse de brèche à l'enracinement de la digue basse.

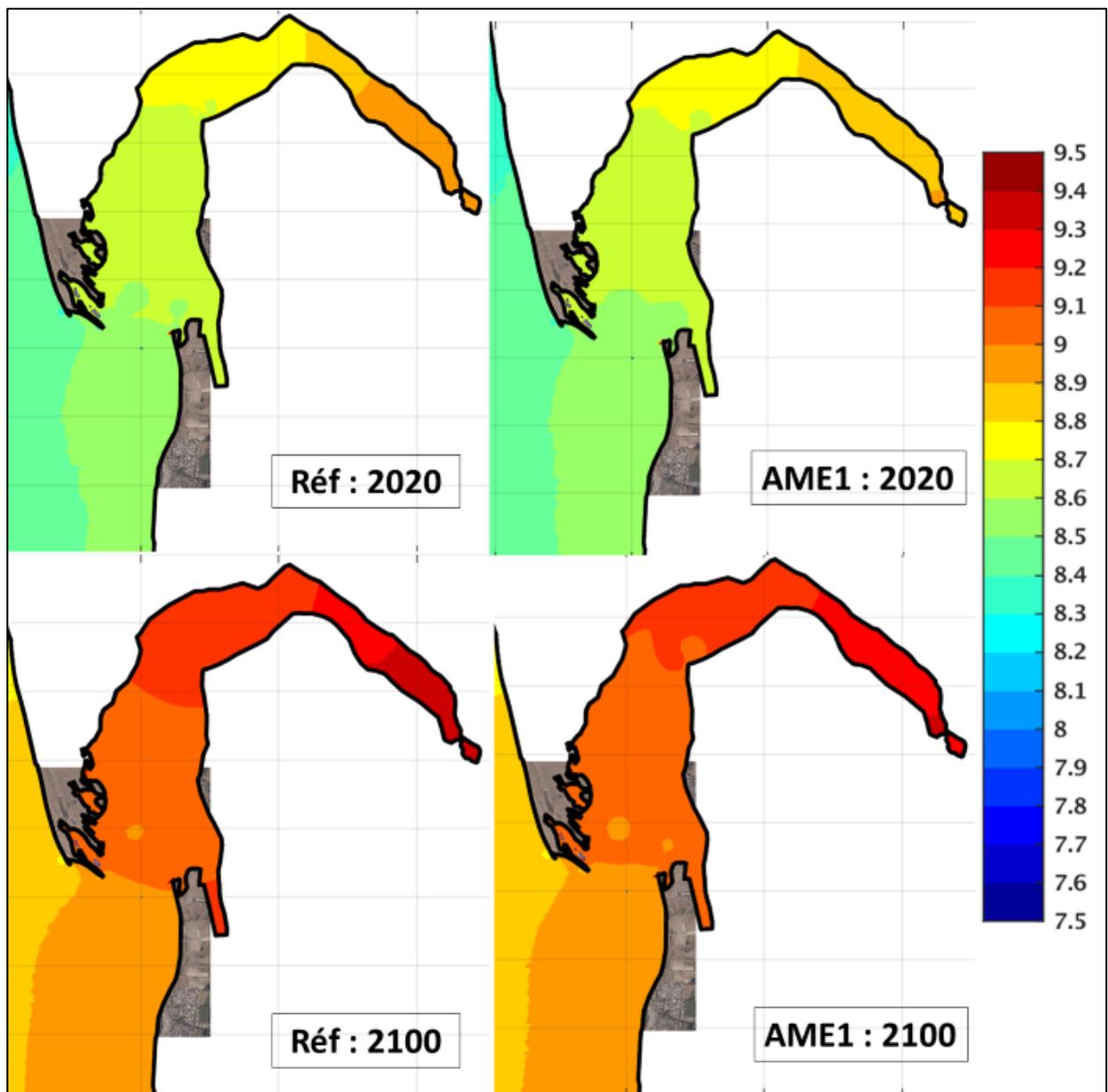


Figure 7-18 : Cartes des niveaux d'eau maximaux (m/NGF) simulés en configuration actuelle (à gauche) et pour l'aménagement n°1 (creusement d'un chenal + dépôt, à droite), pour des événements de période de retour centennale- En haut : horizon 2020 ; en bas : horizon 2100.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

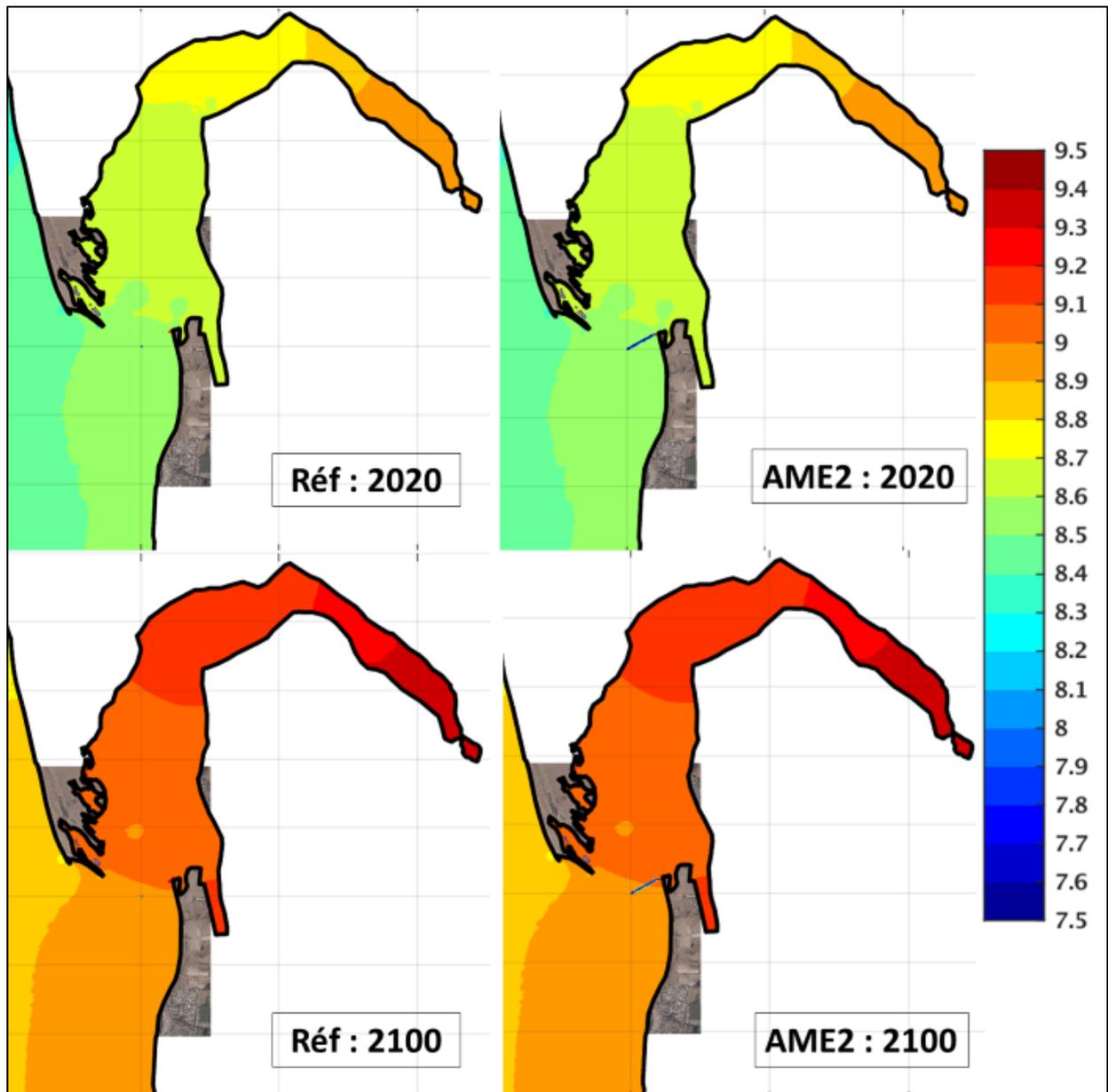


Figure 7-19 : Cartes des niveaux d'eau maximaux (m/NGF) simulés en configuration actuelle (à gauche) et pour l'aménagement n°2 (suppression de la digue basse, à droite), pour des événements de période de retour centennale– En haut : horizon 2020 ; en bas : horizon 2100.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

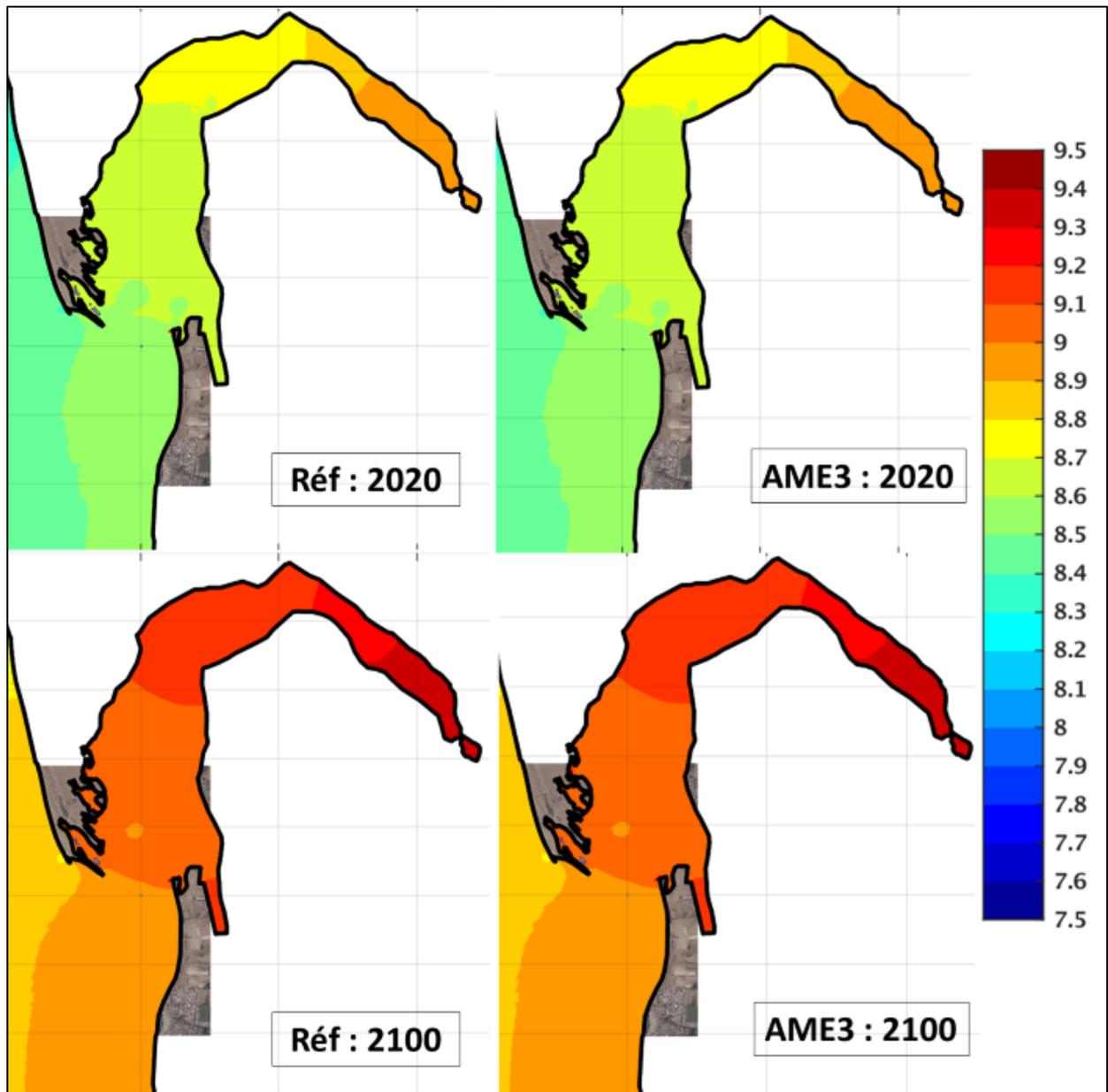


Figure 7-20 : Cartes des niveaux d'eau maximaux (m/NGF) simulés en configuration actuelle (à gauche) et pour l'aménagement n°3 (prolongement de l'enracinement de la digue basse, à droite), pour des événements de période de retour centennale– En haut : horizon 2020 ; en bas : horizon 2100.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

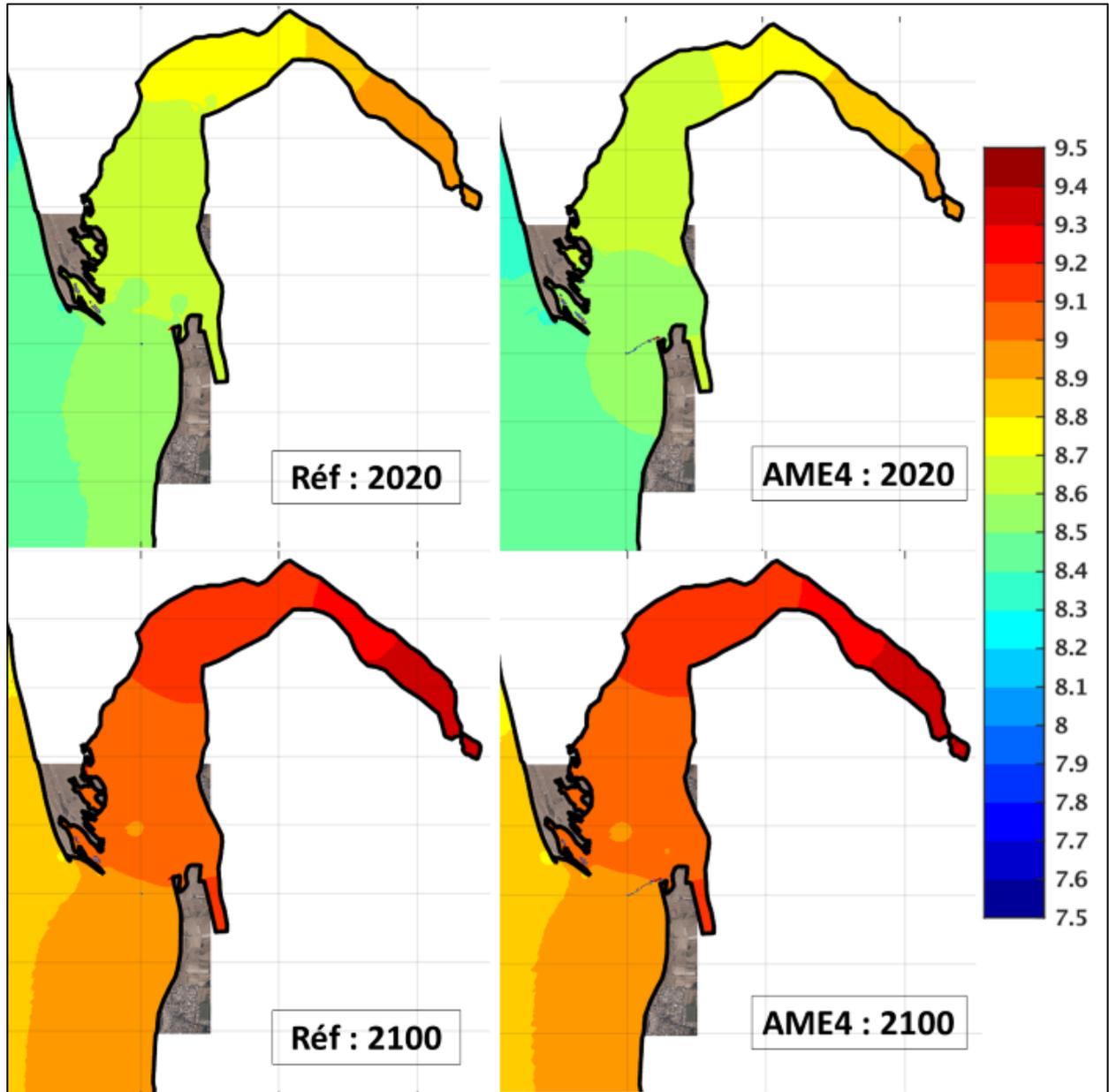


Figure 7-21 : Cartes des niveaux d'eau maximaux (m/NGF) simulés en configuration actuelle (à gauche) et pour l'hypothèse n°4 (brèche à l'enracinement, à droite), pour des événements de période de retour centennale– En haut : horizon 2020 ; en bas : horizon 2100.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

7.2.2.2 Courbes des niveaux d'eau pendant les événements extrêmes simulés

Trois points ont été sélectionnés pour compléter l'analyse des phénomènes de submersion marine pour les aménagements à l'embouchure. Ils sont localisés sur la Figure 7-22 :

- Le point n°1 est situé un peu nord de la digue basse ;
- Le point n°2 est localisé au niveau du méandre à l'Est ;
- Le point n°3 a été placé un plus au Nord-Ouest.

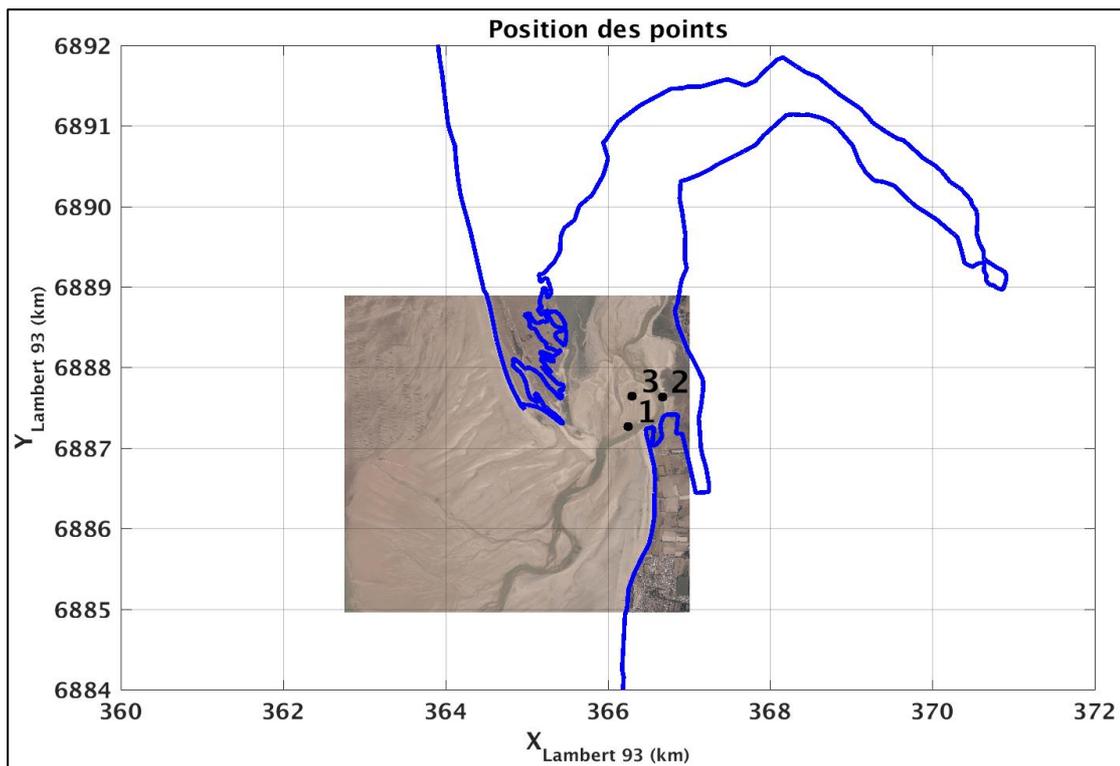


Figure 7-22 : Localisation des points pour l'analyse des évolutions temporelles des niveaux d'eau pour les aménagements à l'embouchure.

**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

➤ **Horizon 2020**

Les Figure 7-23, Figure 7-24 et Figure 7-25 présentent les évolutions temporelles du niveau d'eau respectivement pour les points n°1, 2 et 3 et pour les cinq configurations étudiées à l'embouchure lors d'un événement centennal (marée + surcote météo + vagues + incertitudes) à l'horizon 2020.

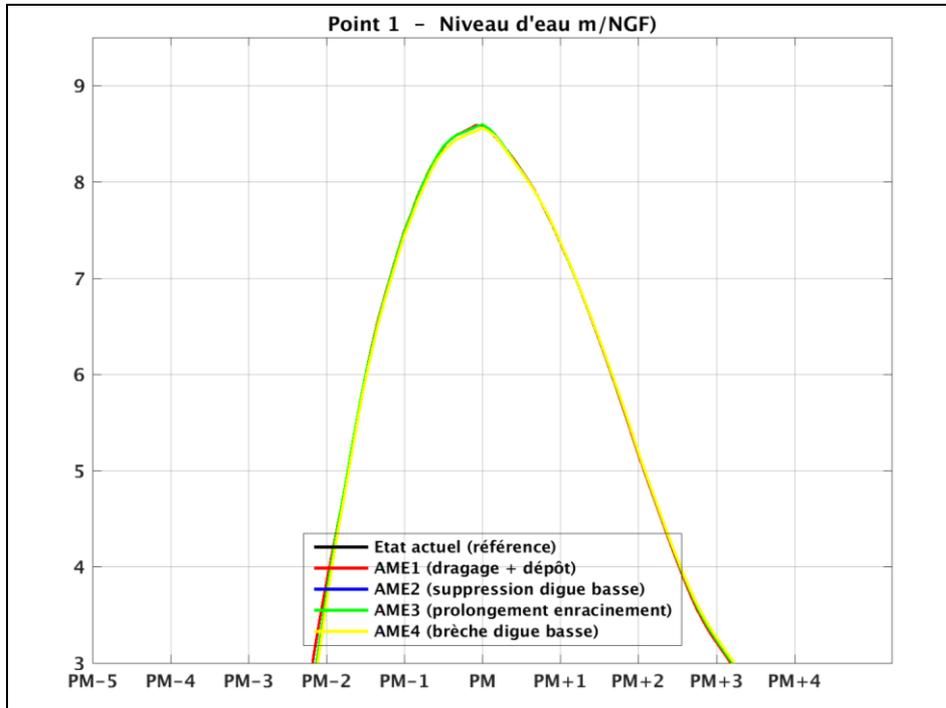


Figure 7-23 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2020 au point n°1.

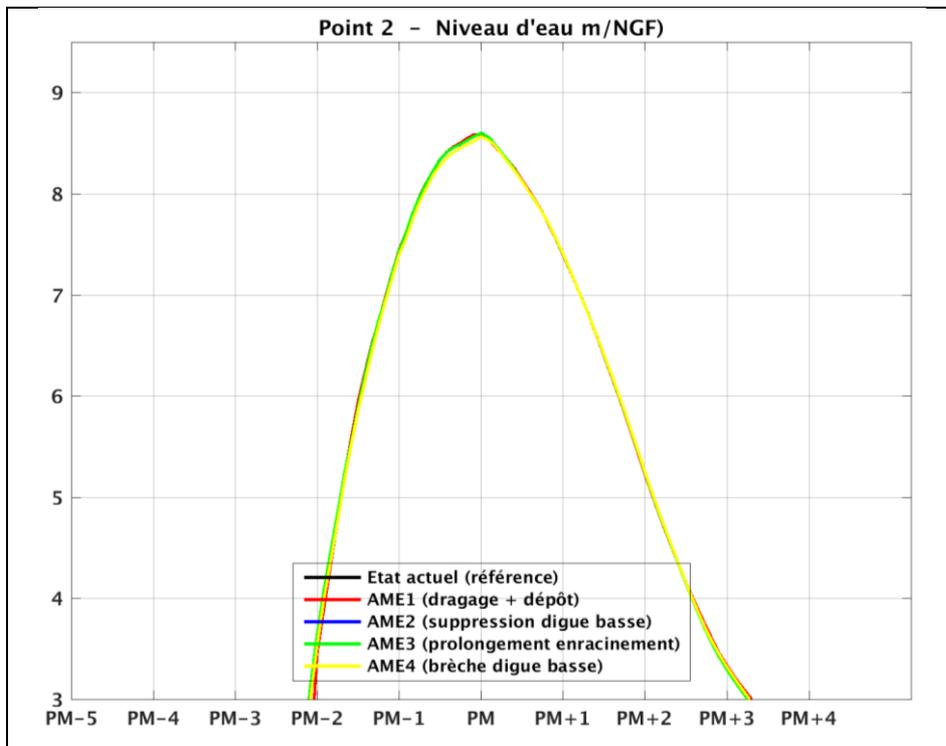


Figure 7-24 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2020 au point n°2.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

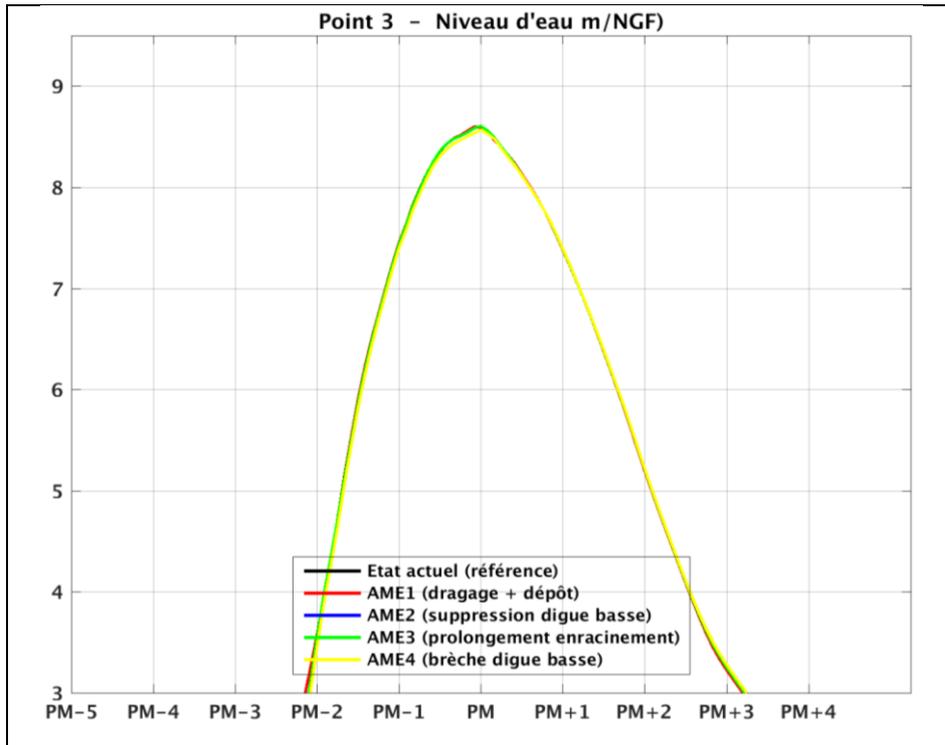


Figure 7-25 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2020 au point n°3.

**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

➤ **Horizon 2100**

Les Figure 7-26, Figure 7-27 et Figure 7-28 présentent les évolutions temporelles du niveau d'eau respectivement pour les points n°1, 2 et 3 et pour les cinq configurations étudiées à l'embouchure lors d'un événement centennal (marée + surcote météo + vagues + incertitudes) à l'horizon 2100.

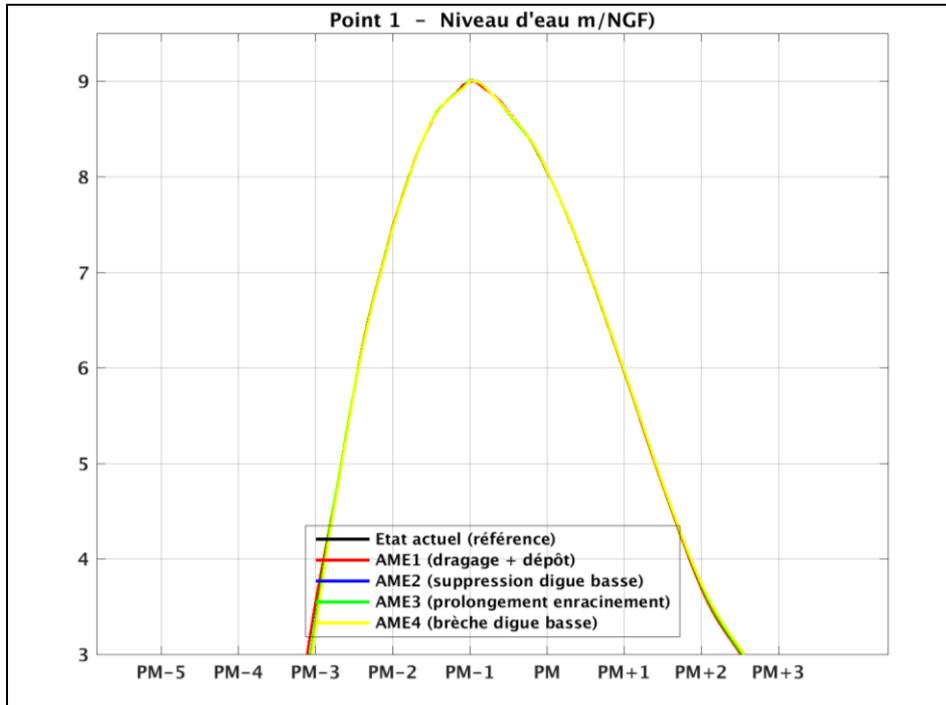


Figure 7-26 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2100 au point n°1.

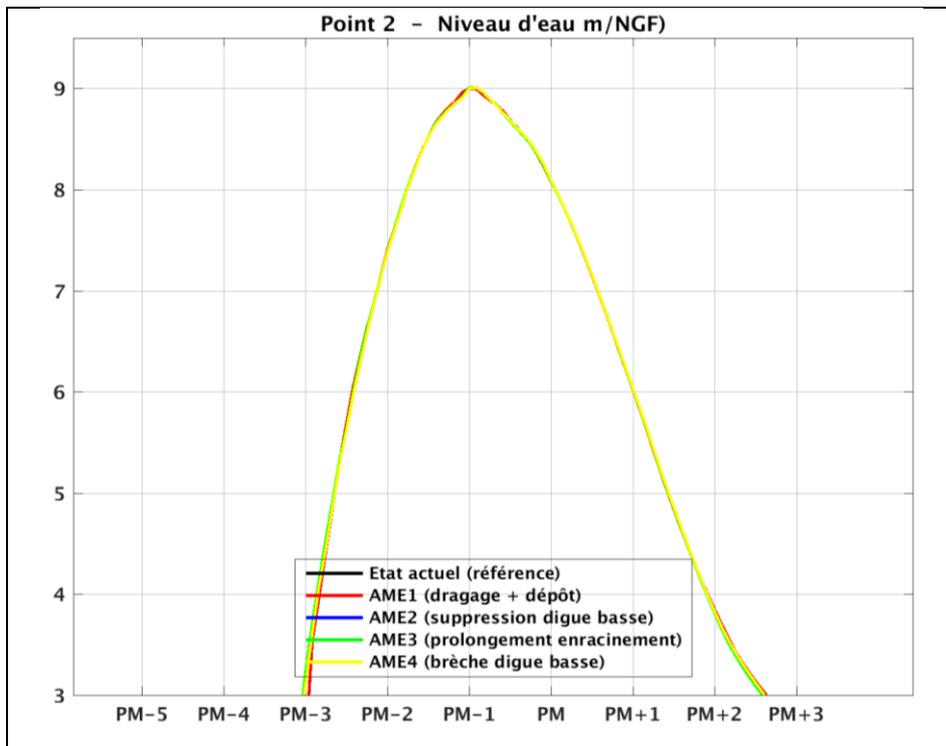


Figure 7-27 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2100 au point n°2.

Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

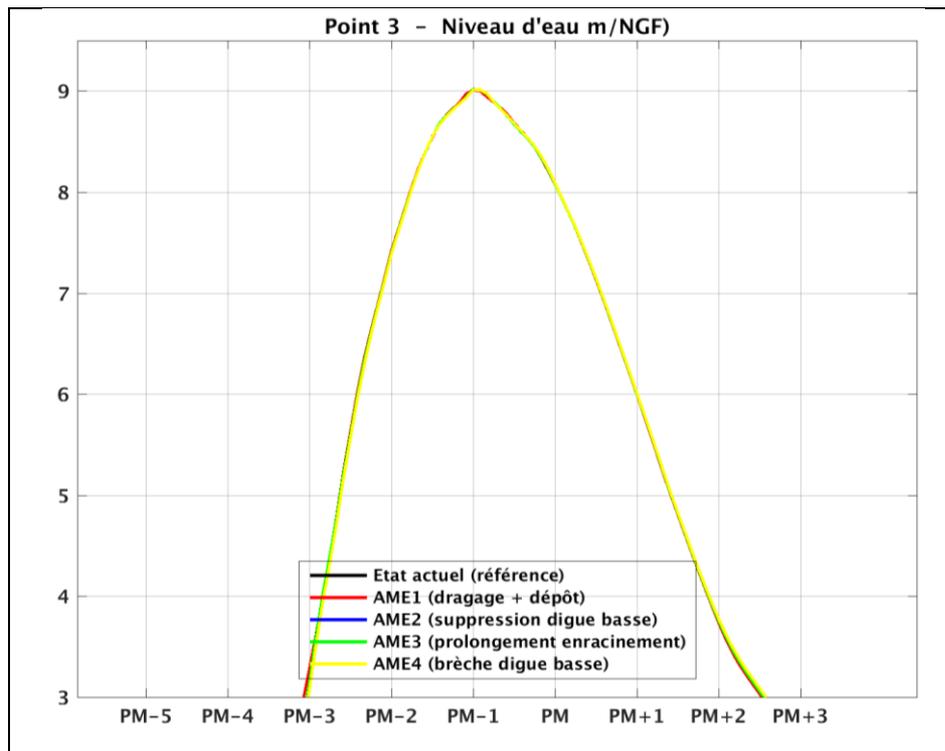


Figure 7-28 : Evolutions temporelles des niveaux d'eau pour une condition centennale à l'horizon 2100 au point n°3.

### 7.2.3 SYNTHÈSE DES SIMULATIONS DE SUBMERSION

Il a été vérifié dans un premier temps que les différents aménagements envisagés à l'embouchure n'ont aucun effet sur le risque submersion, ni dans un sens ni dans l'autre.

Deux aménagements majeurs d'ouvrages rétro-littoraux ont ensuite été testés successivement :

- La surélévation d'un ouvrage, orienté Est-Ouest, depuis la zone dunaire à l'Ouest jusqu'à 300 m à l'Est de la porte à flot du Passevin. Il s'agit d'un **ouvrage insubmersible, pour contenir un risque de submersion vers les zones urbanisées de Montmartin et Hauteville. Cet ouvrage est recommandé**, car n'ayant pas d'effet significatif autre que celui pour lequel il a été conçu. **Il est considéré comme prioritaire**, compte tenu d'un risque submersion marine qui peut se produire chaque année. **Des analyses complémentaires des niveaux extrêmes** (en raison d'une possible sous-estimation des niveaux extrêmes SHOM/CETMEF) **sont recommandées pour son dimensionnement** (en premier lieu sa cote d'arrase).
- **La dépoldérisation des bas-champs de la flèche de Montmartin, pour créer une zone d'expansion de l'onde de submersion** et limiter les niveaux atteints devant les zones sensibles (y compris les digues qui visent à contenir la submersion). Les effets escomptés sont trop peu marqués pour justifier un tel aménagement.

## 8. BIBLIOGRAPHIE

- [ 1 ] Boudiere E., Maisondieu C., Arduin F., Accensi M., Pineau-Guillou L. and Lepesqueur J., 2013. A suitable metocean hindcast database for the design of Marine energy converters. International Journal of Marine Energy, 3-4, e40-e52. Publisher's official version : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijome.2013.11.010>, Open Access version : <http://archimer.ifremer.fr/doc/00164/27524/>.
- [ 2 ] DHI, SEPIA Conseils. « Plan de Prévention des Risques Littoraux des communes de Montmartin-sur-Mer, Hauteville-sur-Mer et Annoville. Note de présentation ». version 4, juillet 2015.
- [ 3 ] English et al. 2000. A comparison of the impact of TOVS and ATOVS satellite sounding data on the accuracy of numerical weather forecasts. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 126, 2911-2931.
- [ 4 ] IFREMER. Etude morphologique de la zone intertidale "Les Havres du Cotentin". Décembre 1986, Contrat CNEXO 82/6873, Laboratoire de Géomorphologie, Ecole Pratique des Hautes Etudes, U.A. CNRS n°910 "Etude des Rivages", 15 Boulevard de la Mer, 35800 Dinard.
- [ 5 ] Robin N., "Morphodynamique des systèmes de flèches sableuses : Etude entre les embouchures tidales de l'Archipel de St Pierre et Miquelon et de la côte ouest du Cotentin (Manche)". Thèse de doctorat. Université de Caen. Septembre 2007.
- [ 6 ] SHOM. "Références altimétriques maritimes. Ports de France métropolitaine et d'outre mer". 2017. ISBN 978-2-11-139469-8
- [ 7 ] SHOM. Carte marine 6966 : "Des Héaux-de-Bréhat au Cap Lévi".
- [ 8 ] SHOM. Carte marine 7133 : "Ports de la côte ouest du Cotentin", zoom "Havre de Regnéville".
- [ 9 ] SHOM. Carte marine 7156 : "De la Pointe du Grouin à la Pointe d'Agon – Baie du Mont-Saint-Michel – Iles Chausey".
- [ 10 ] SHOM. Carte marine 7157 : "De la Pointe d'Agon au Cap de Carteret – Passage de la Déroute".
- [ 11 ] The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. 2010, American Meteorological Society.
- [ 12 ] The NCEP Climate Forecast System Version 2. 2012, submitted to the Journal of Climate.
- [ 13 ] Lundi, 2011. Regnéville-sur-Mer, un village maritime de la Manche.
- [ 14 ] Poirier C., Poitevin C., Chaumillon E., 2016. Comparison of estuarine sediment record with modelled rates of sediment supply from a western European catchment since 1500. C. R. Geoscience.
- [ 15 ] GRESARC, 2001. Réalisation d'une batterie d'épis en avant de la digue longitudinale d'Hauteville-sur-Mer.
- [ 16 ] FondOuest, 2002. Déplacement du lit de la Sienne. Compte-rendu d'intervention (mission G0).
- [ 17 ] Robin et Levoy, 2007.
- [ 18 ] Poullain, 2013.

# ANNEXE A : SYSTEME DE MODELISATION TELEMAC

---

## TELEMAC-2D

Le code Telemac-2D a été développé par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) d'EDF. Il constitue l'un des modules de la chaîne de calcul et permet de simuler les écoulements à surface libre en résolvant les équations de Barré de Saint-Venant (1871) à deux dimensions horizontales d'espace par une méthode d'éléments finis sur des maillages non structurés constitués d'éléments triangulaires. Le logiciel calcule, en chaque point du maillage, la hauteur d'eau ainsi que les deux composantes de la vitesse intégrées sur la verticale. Plusieurs phénomènes physiques sont pris en compte :

- Les bancs découvrants sur les zones d'estran ;
- Les effets des vagues sur la circulation littorale ;
- La force de Coriolis ;
- Le frottement sur le fond ;
- La turbulence ;
- Les effets atmosphériques ;
- Les effets horizontaux des gradients de température ou de salinité ;
- Le déplacement et la diffusion d'un traceur passif par les courants, éventuellement avec prise en compte de termes sources/puits additionnels ;
- La dérive lagrangienne de particules ;
- Le traitement de singularités (barrages, digues, buses, exutoires...) ;
- La prise en compte de forces de traînée créées par des structures verticales ;
- ...

### Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

---

#### TOMAWAC

Le modèle numérique Tomawac fait partie du système Telemac, ensemble de modules dédiés à l'étude des phénomènes dans les écoulements à surface libre. Ces modules utilisent la technique des éléments finis afin de mieux représenter les processus dans les zones à géométrie complexe. Les modules 2D comme Tomawac permettent une discrétisation du domaine sur une grille de calcul non structurée, constituée d'éléments triangulaires. Au sein de la chaîne Telemac, le module de simulation Tomawac est dédié à la propagation spectrale des états de mer. Tomawac est un modèle de « troisième génération », c'est-à-dire qu'il résout la répartition spectrale ou directionnelle des vagues au lieu de la paramétrer.

Tomawac permet de prendre en compte les phénomènes physiques suivants :

- Interaction houle-fond. Le profil bathymétrique est donné en entrée. Tomawac modélise la transformation des ondes de surface sous les effets combinés de la réfraction, du shoaling et des processus de dissipation d'énergie tels que le frottement sur le fond et le déferlement bathymétrique. Les interactions non-linéaires entre vagues peuvent être prises en compte dans le mode « troisième génération ».
- Interaction houle-atmosphère. Des relations très étroites existent entre la couche limite de l'atmosphère et le champ des vagues. L'interaction entre la surface de l'eau et l'atmosphère est responsable du transfert d'énergie du vent vers les vagues, mais participe également aux processus dissipatifs tels que le moutonnement et aux transferts non-linéaires d'énergie entre les composantes. L'interaction houle-atmosphère est modélisée dans grâce à trois termes sources prenant respectivement en compte les effets de l'apport dû au vent, du moutonnement et des interactions non-linéaires entre les vagues.
- Interaction houle-marée. La variation temporelle des courants et de la profondeur d'eau affecte sensiblement l'évolution des vagues en domaine littoral. Ces processus peuvent être pris en compte dans le mode « troisième génération ».

## SISYPHE

SISYPHE résout les équations de transport des sédiments cohésifs (vases, limons, fines...) et non cohésifs (sables, graviers) sous l'effet combiné de la houle et des courants.

Lorsque le flux de sédiments transportés ne dépend que des caractéristiques locales de l'écoulement, le transport à l'équilibre par charriage sur le fond et par suspension dans la colonne d'eau sont pris en compte simultanément. Lorsque ces conditions de transport à l'équilibre ne sont plus remplies (variations brusques de la bathymétrie et/ou de l'écoulement, sédiments cohésifs...), la résolution additionnelle des processus d'advection/diffusion permet de représenter le retard de concentration lié aux faibles vitesses de chute des sédiments.

A l'interface eau/sédiment, un bilan des flux sédimentaires permet d'évaluer les évolutions des fonds (équation d'Exner). Les zones non érodables (roches, ouvrages...) peuvent être incluses dans la simulation.

Les principaux processus physiques modélisés sont :

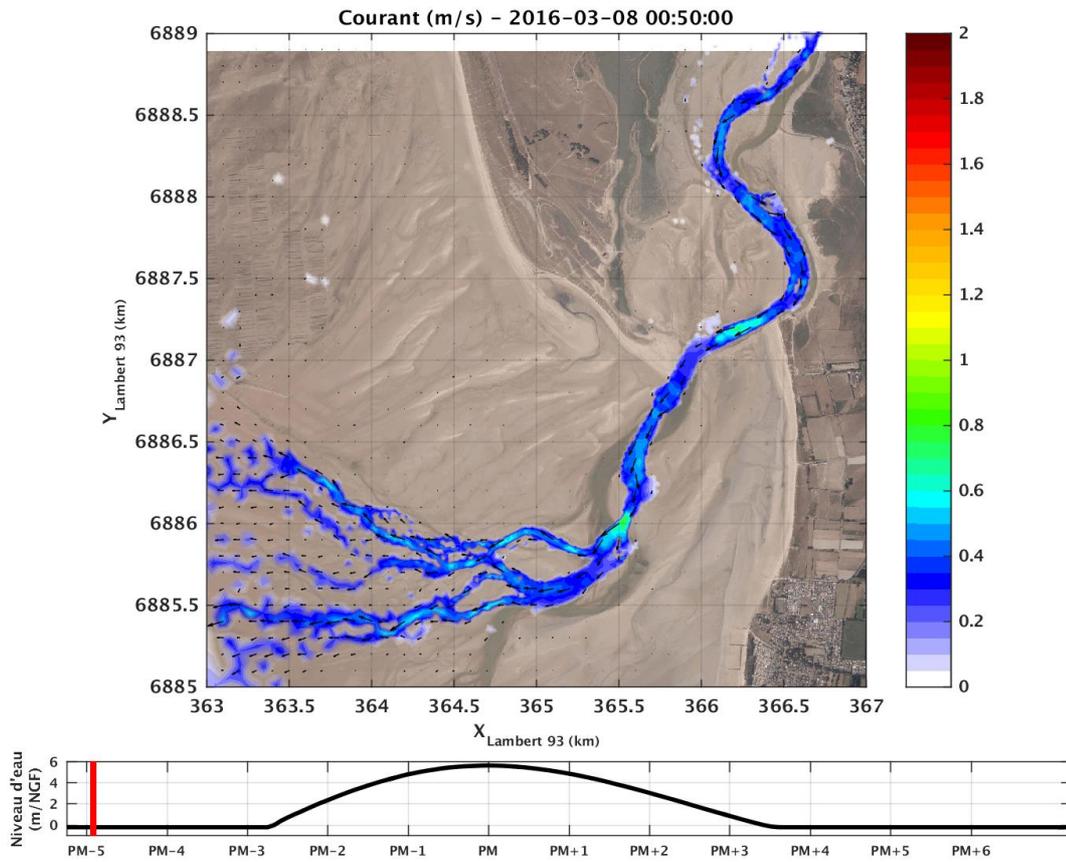
- Transport total par charriage et suspension (plusieurs formules),
- Advection/Diffusion des sédiments fins,
- Evolution des fonds,
- Erosion/Dépôt,
- Effet de pente,
- Rugosité de fond (grain, forme),
- Bancs découvrants.

SISYPHE utilise les calculs hydrodynamiques réalisés au préalable par TELEMAC-2D ou 3D pour les courants et par TOMAWAC pour la houle. Un mode de couplage interne est disponible lorsque les évolutions des fonds influent de manière significative sur l'écoulement : les différents modules s'échangent alors directement les informations nécessaires et réactualisent l'écoulement au cours du temps. Les interactions houle/courants peuvent être prises en compte par l'intermédiaire des tensions de radiation (ou forces motrices).

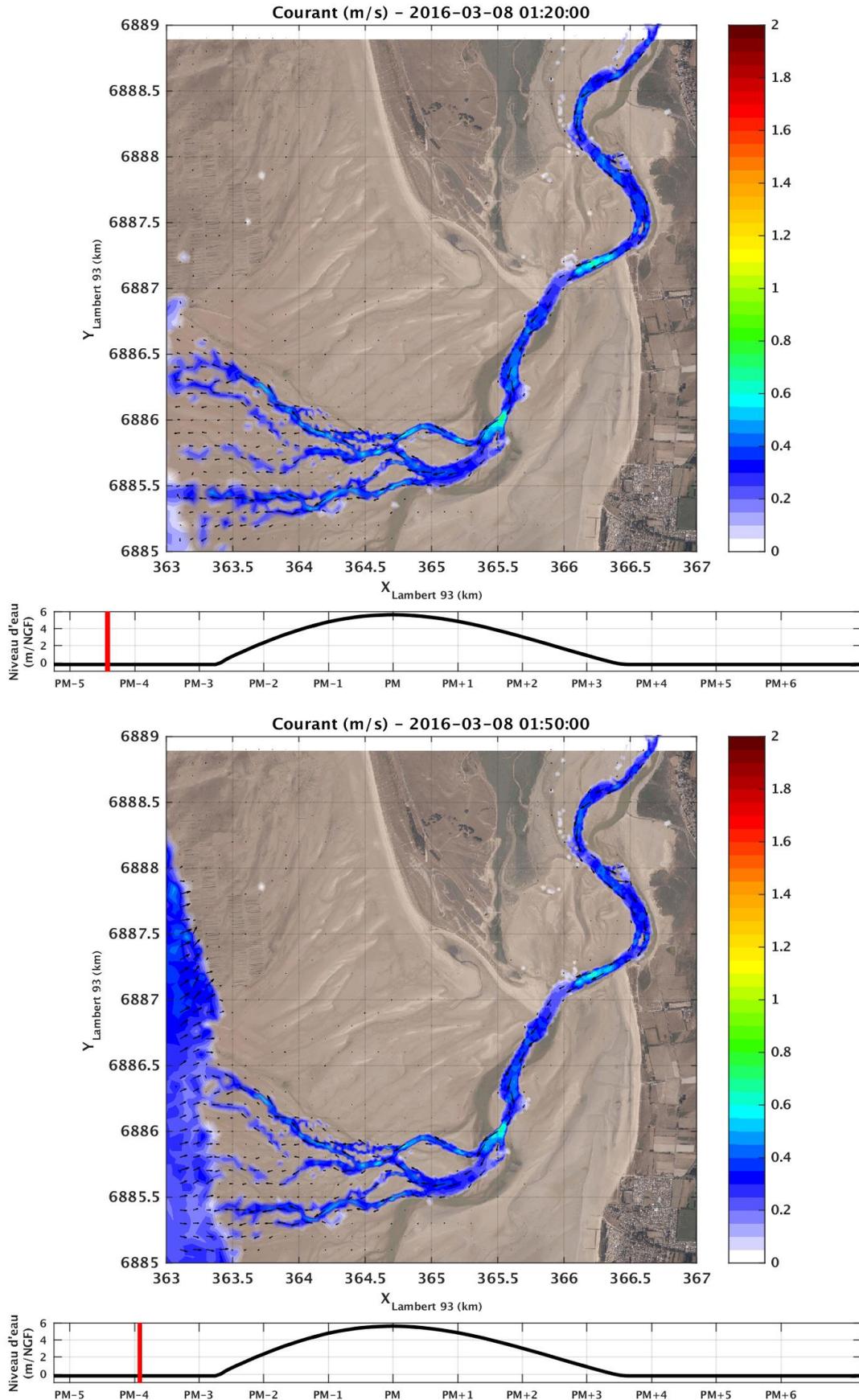
SISYPHE dispose de plusieurs techniques de filtrage de la marée, dont l'utilisation d'un facteur morphologique) qui permettent de réaliser des simulations morphodynamiques à long terme, qui réduisent les efforts de calculs nécessaires.

Les principaux résultats obtenus sont l'évolution des fonds et les composantes vectorielles du transport solide.

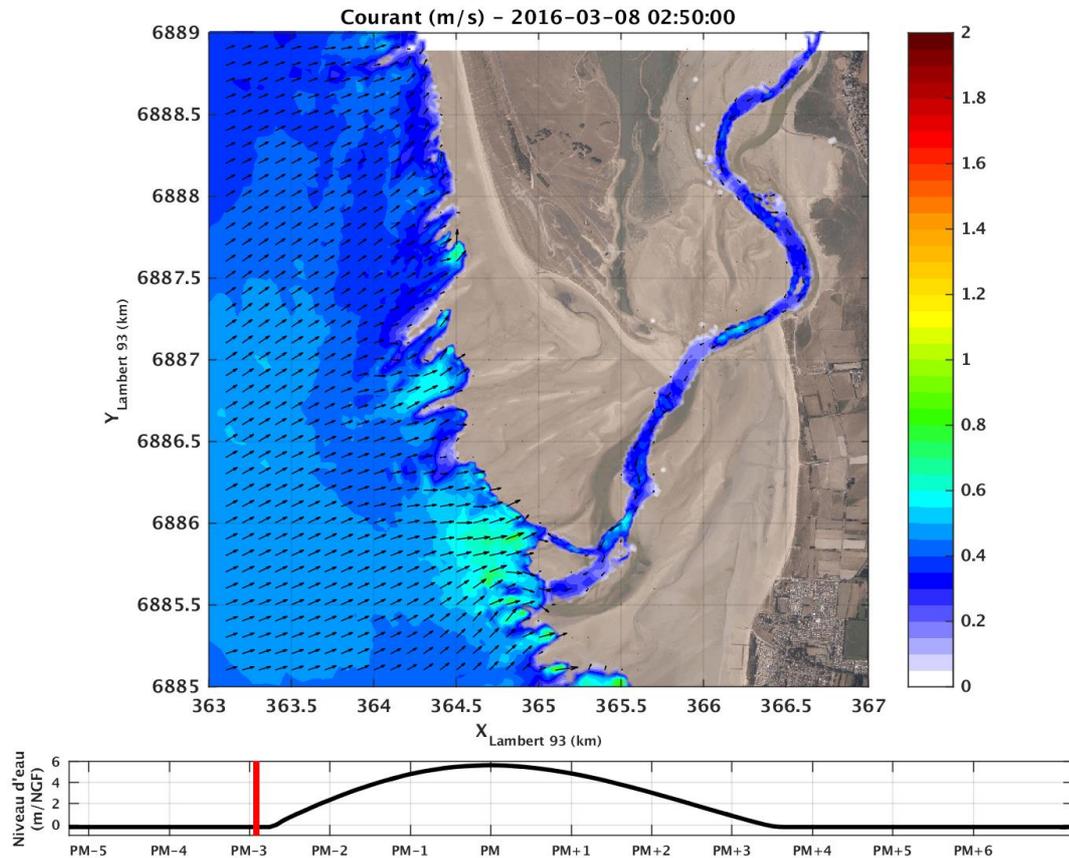
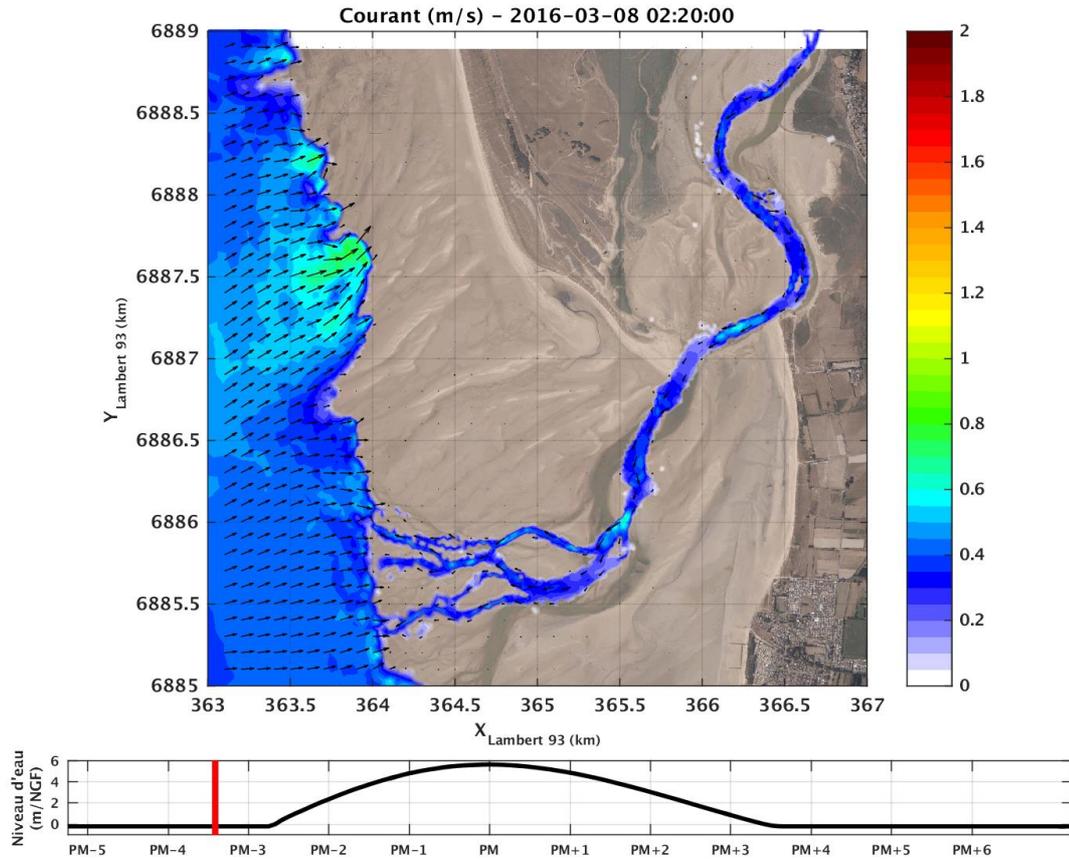
# ANNEXE B : COURANTS DE MAREE



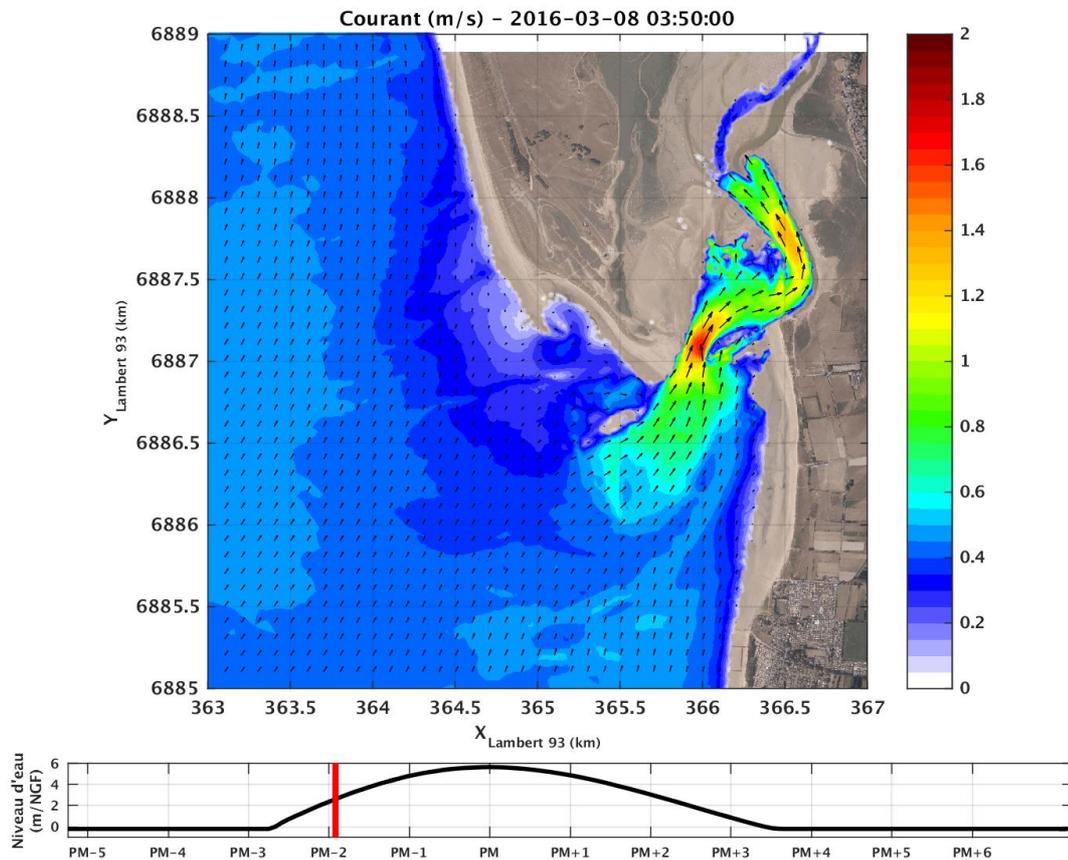
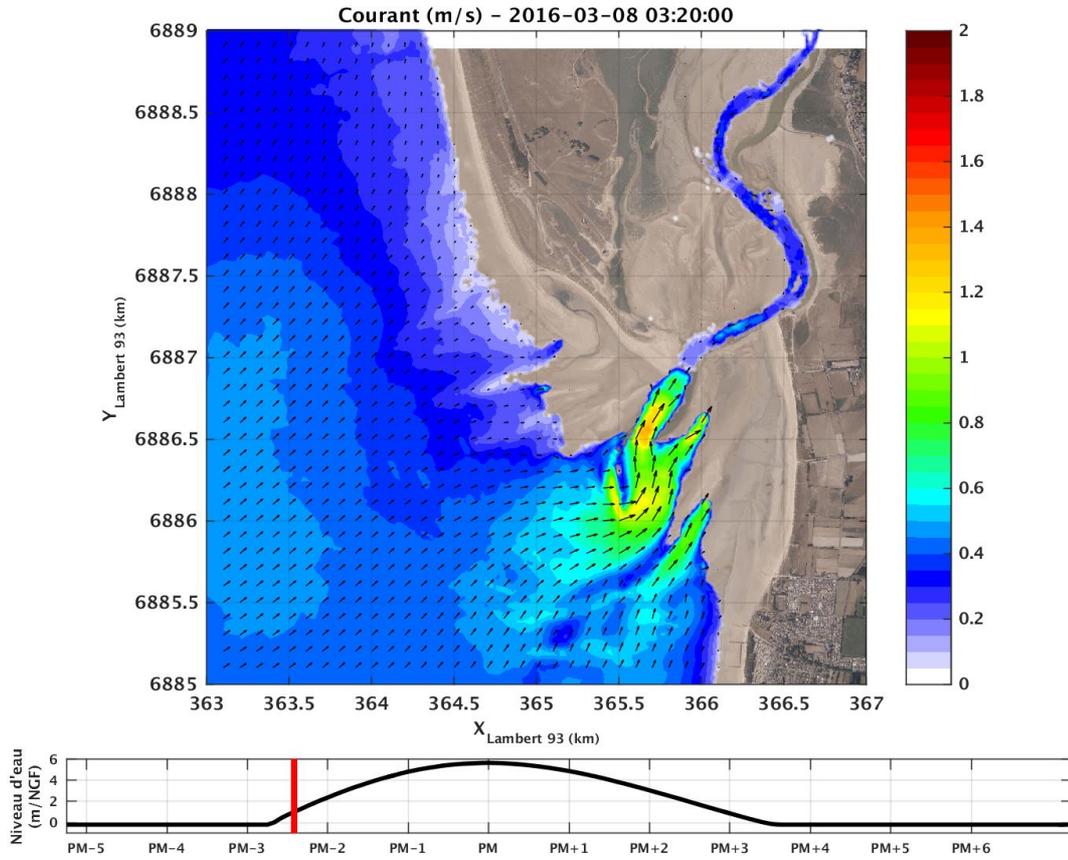
## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville



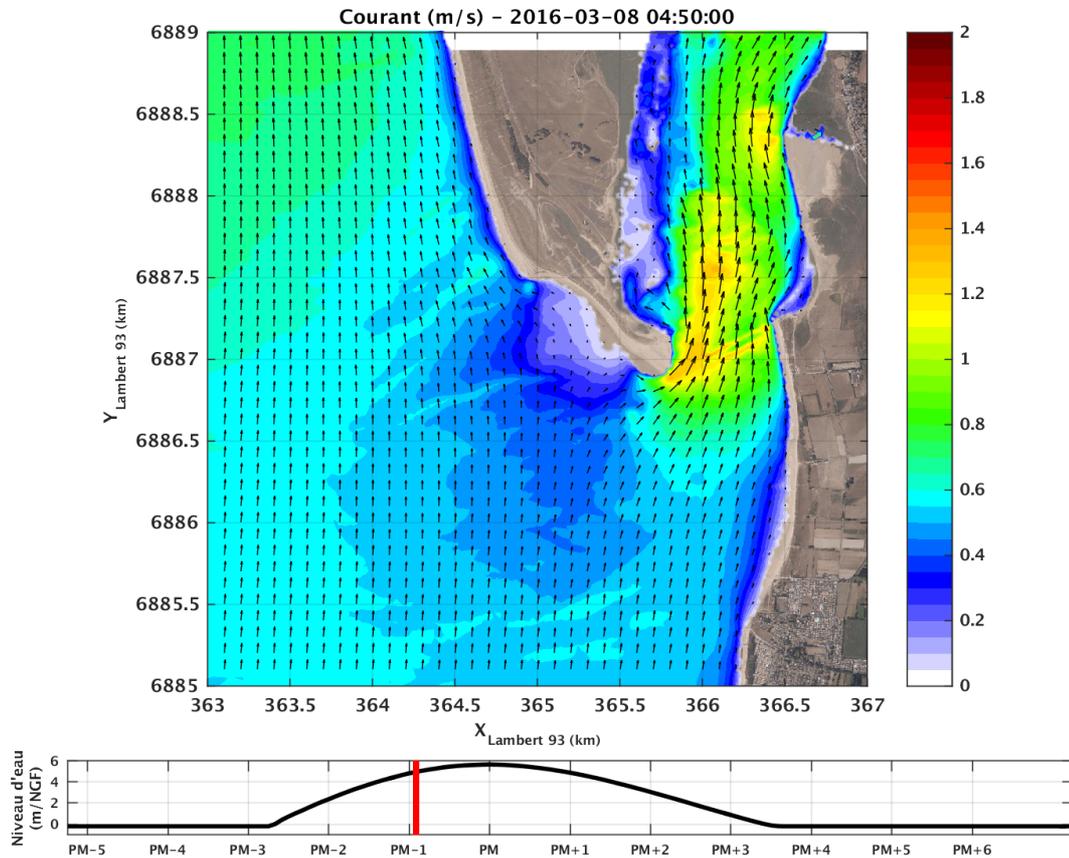
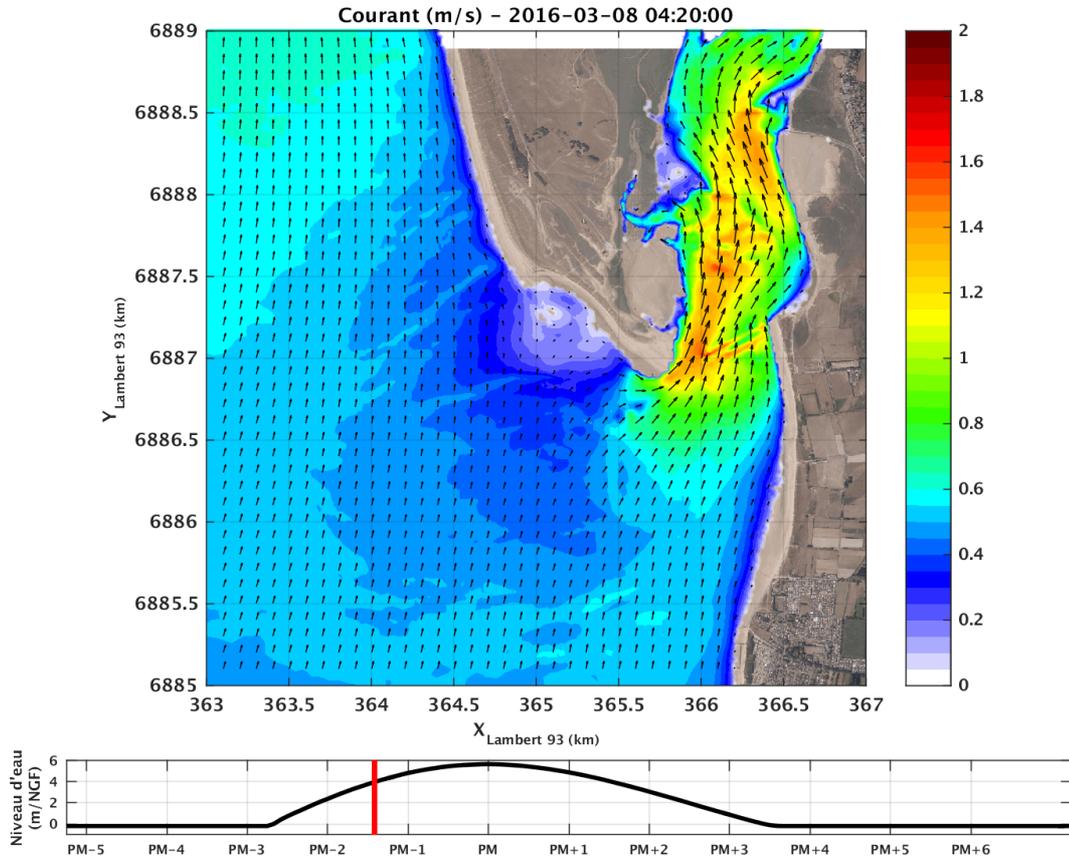
## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville



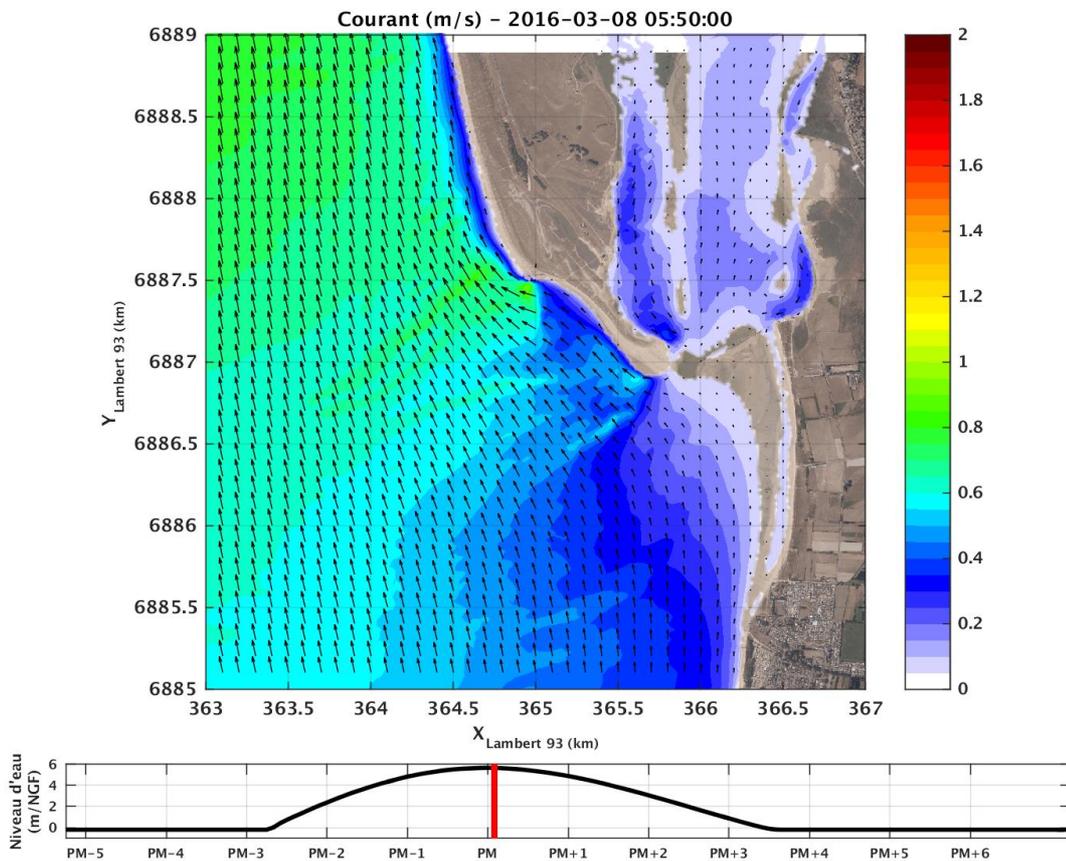
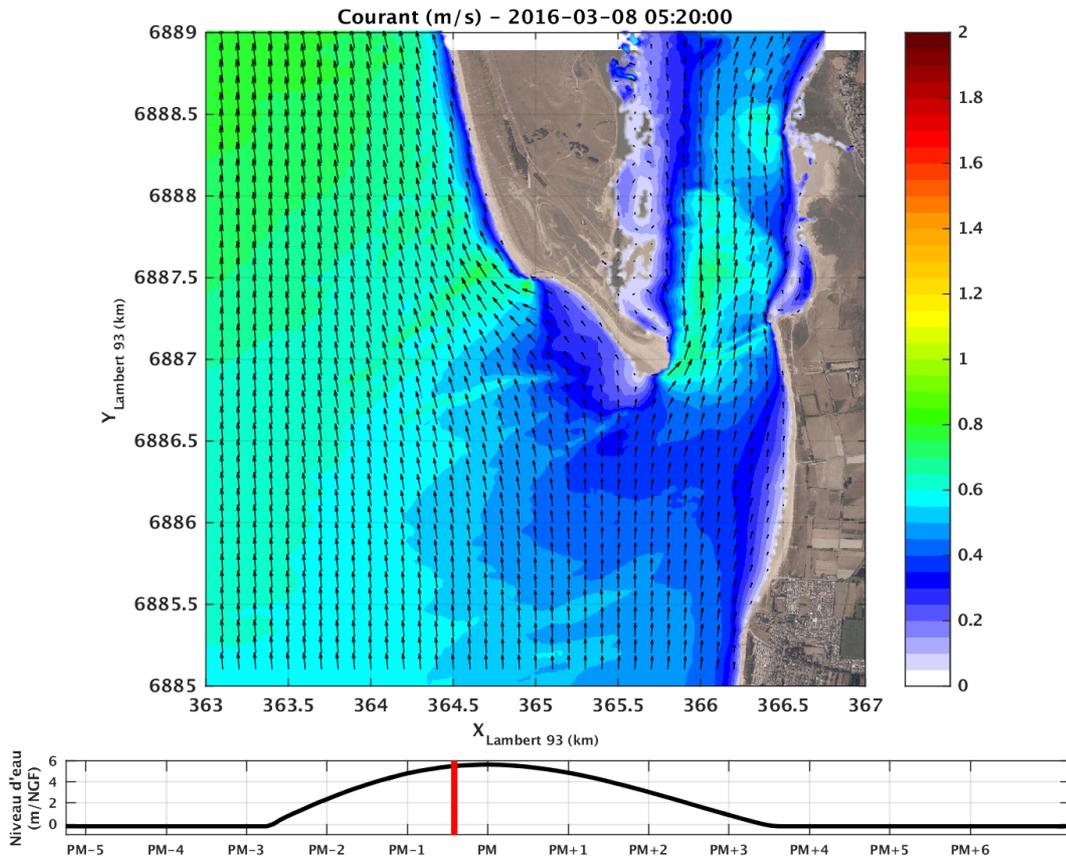
## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville



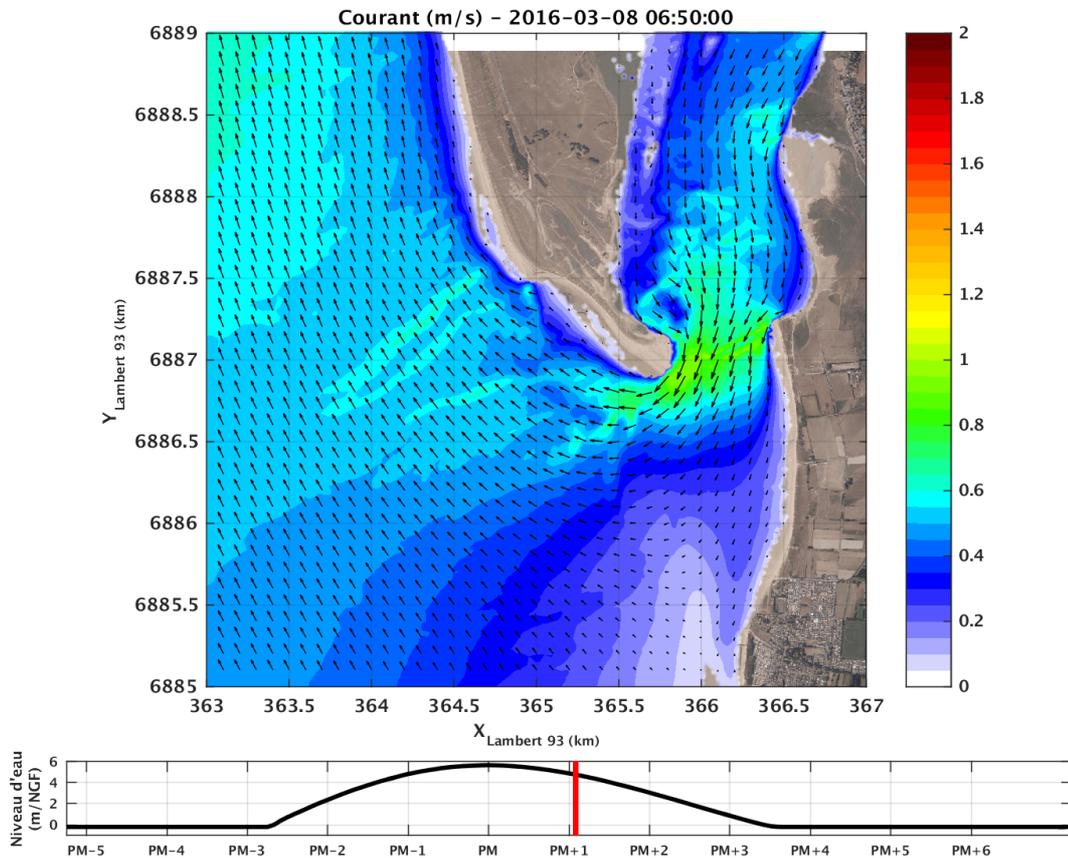
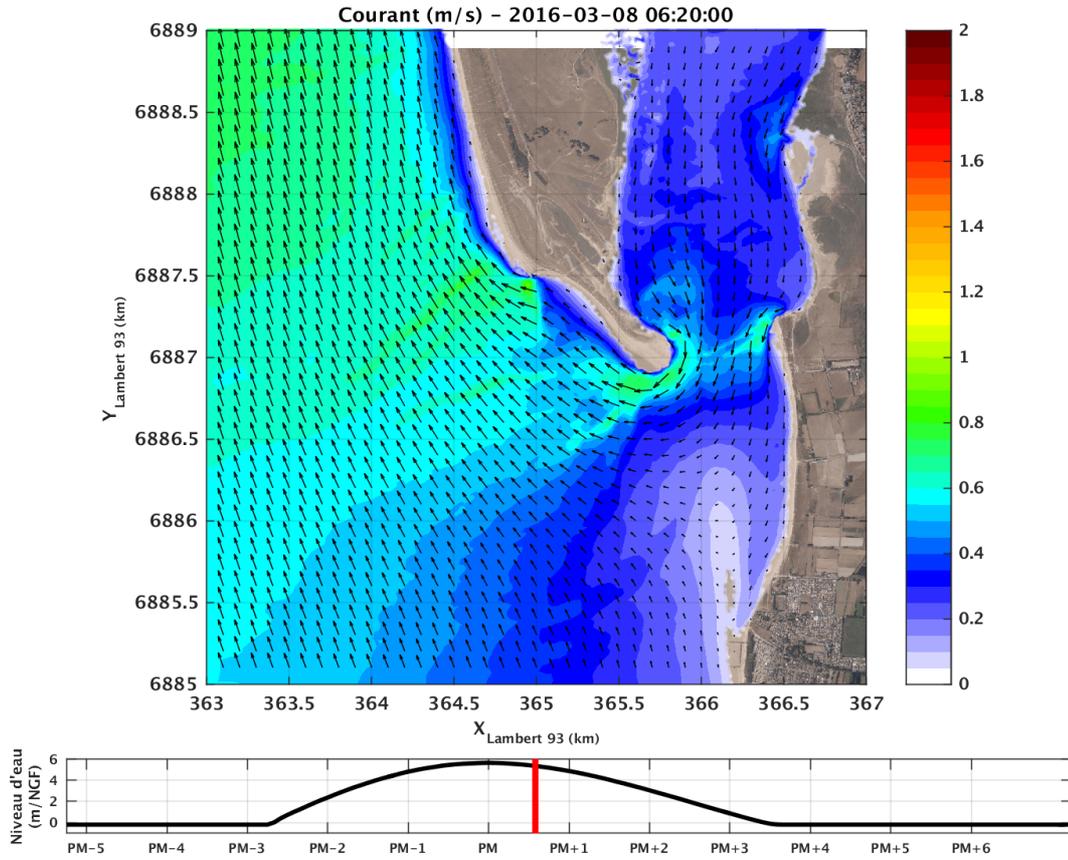
Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville



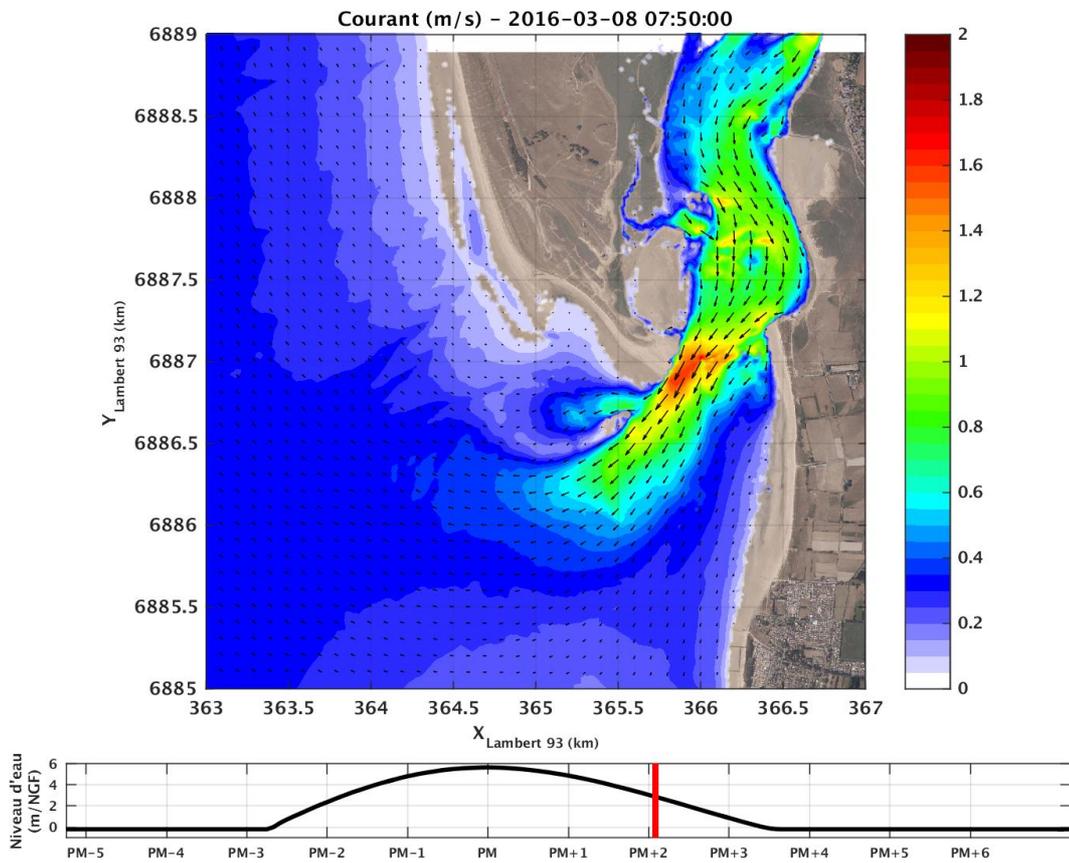
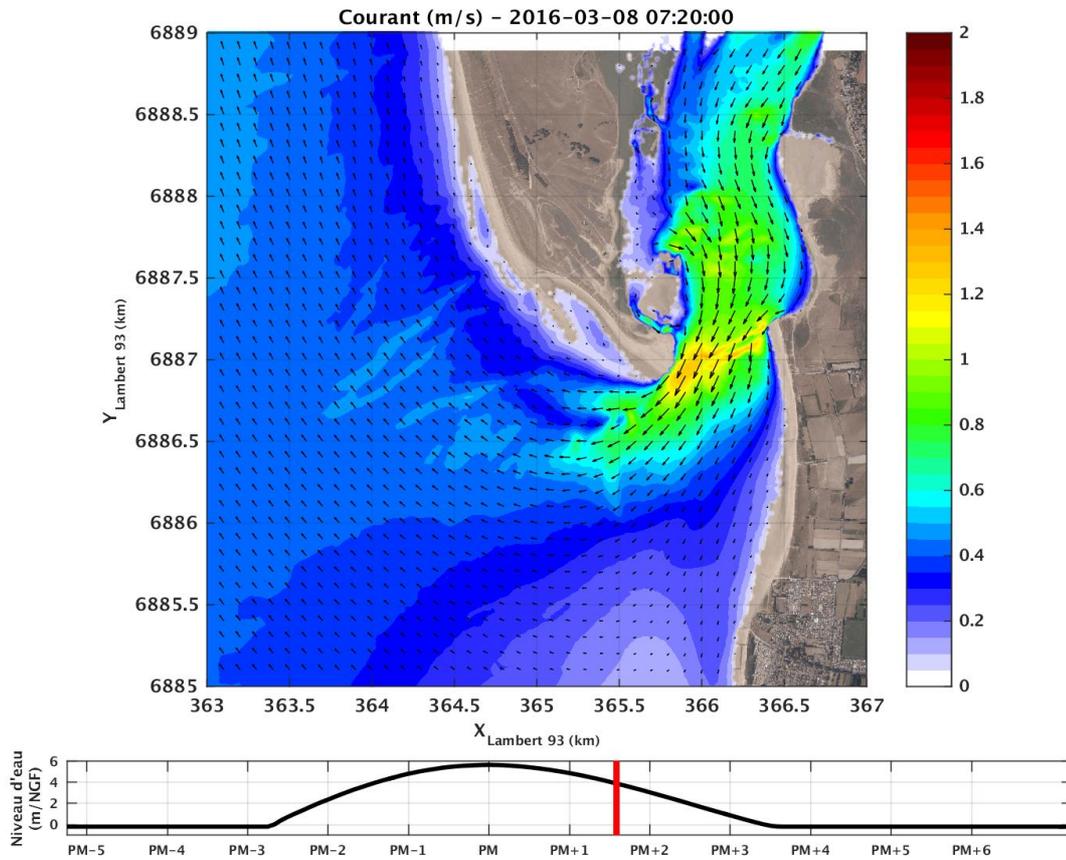
Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville



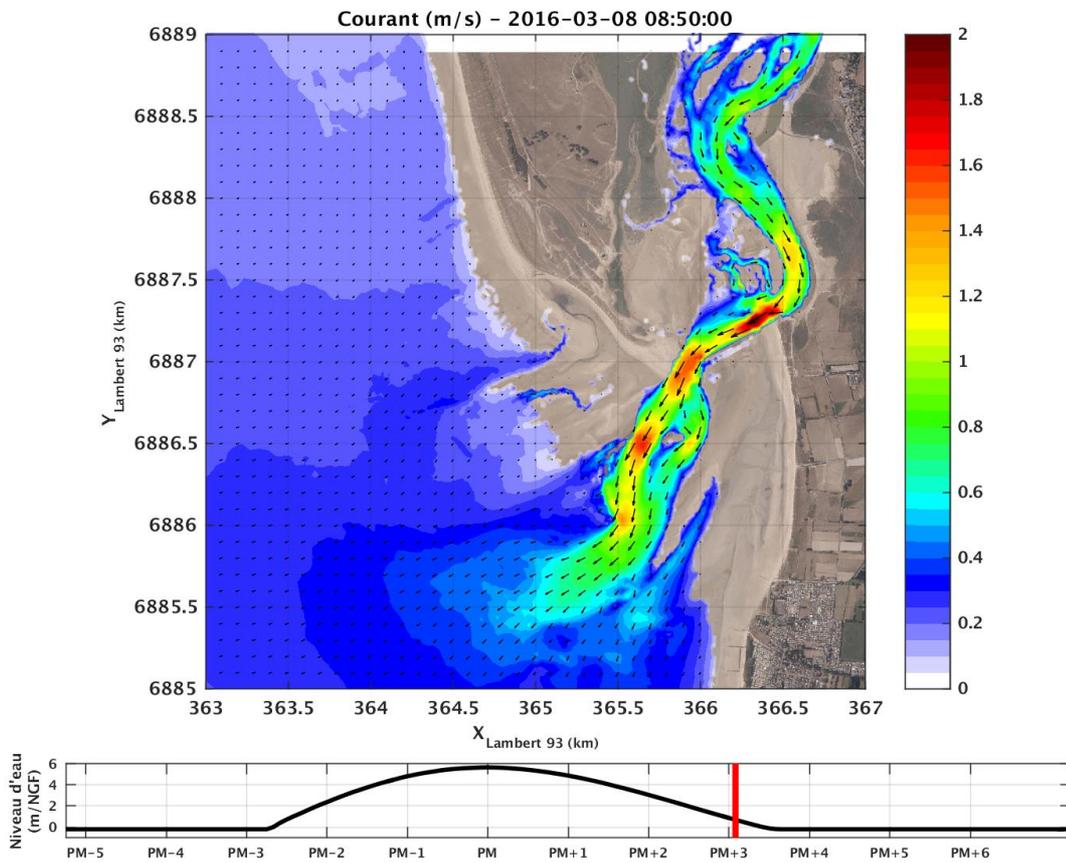
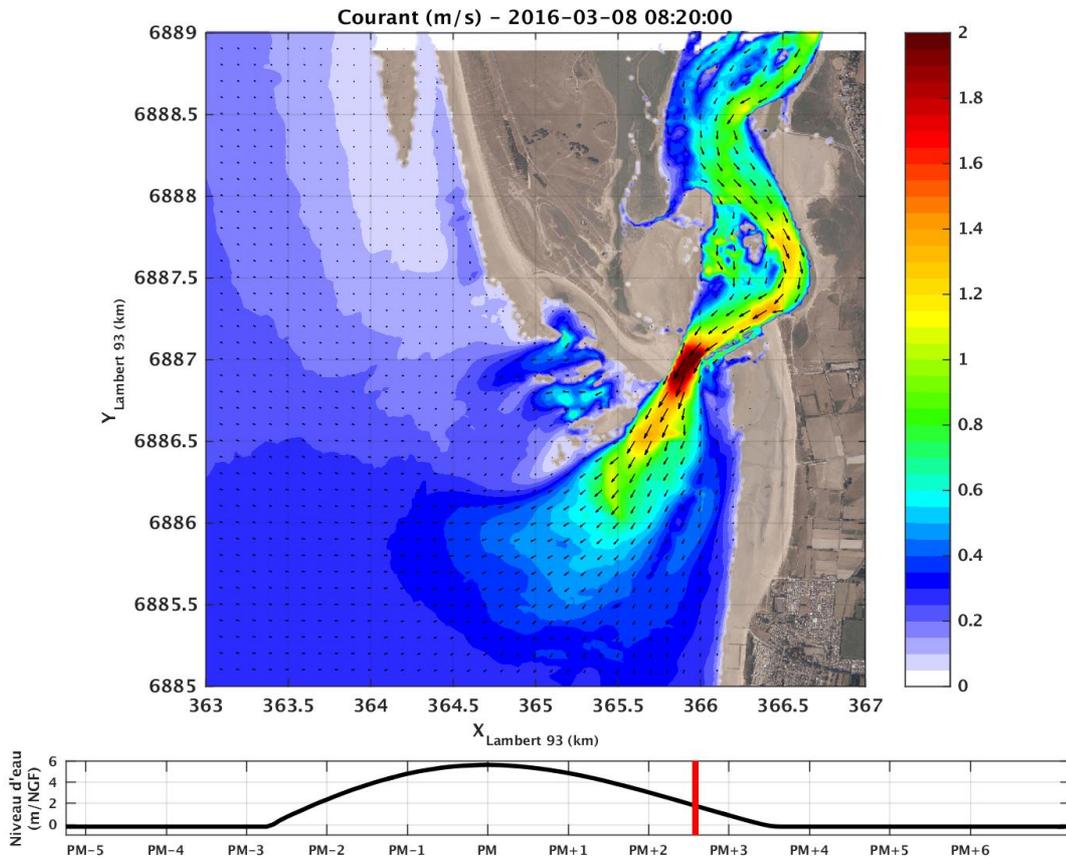
Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville



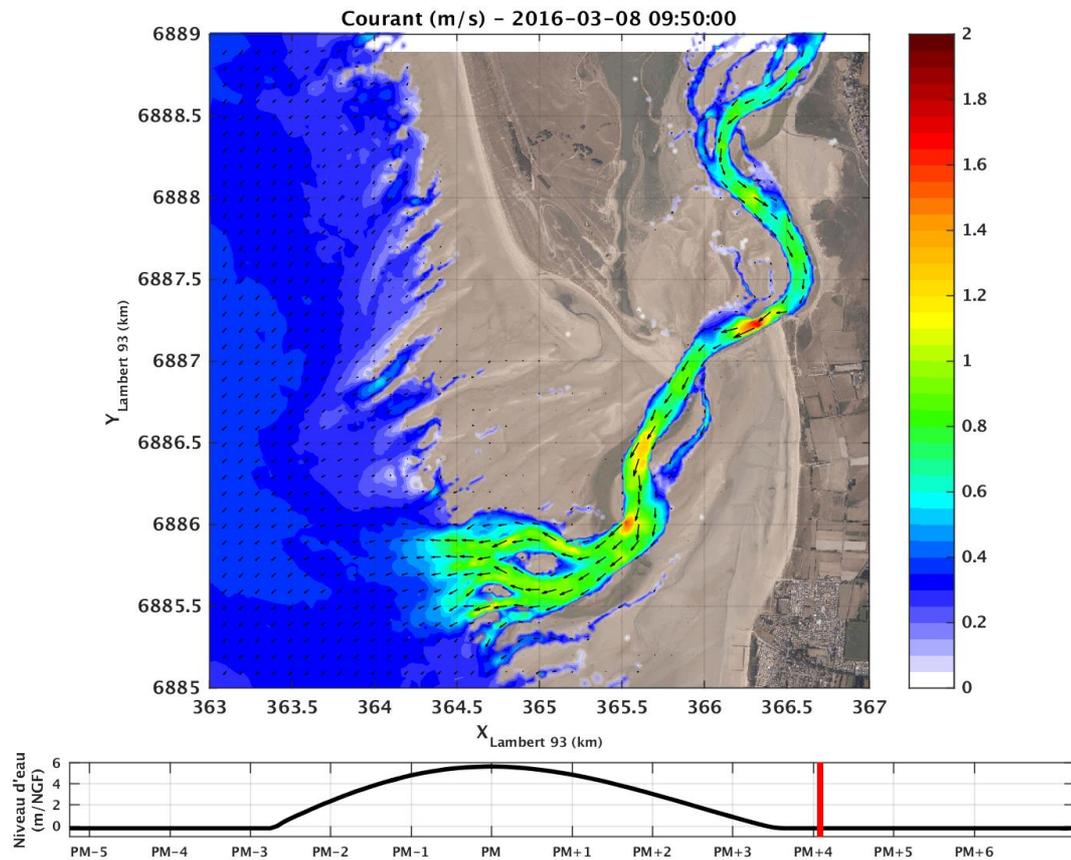
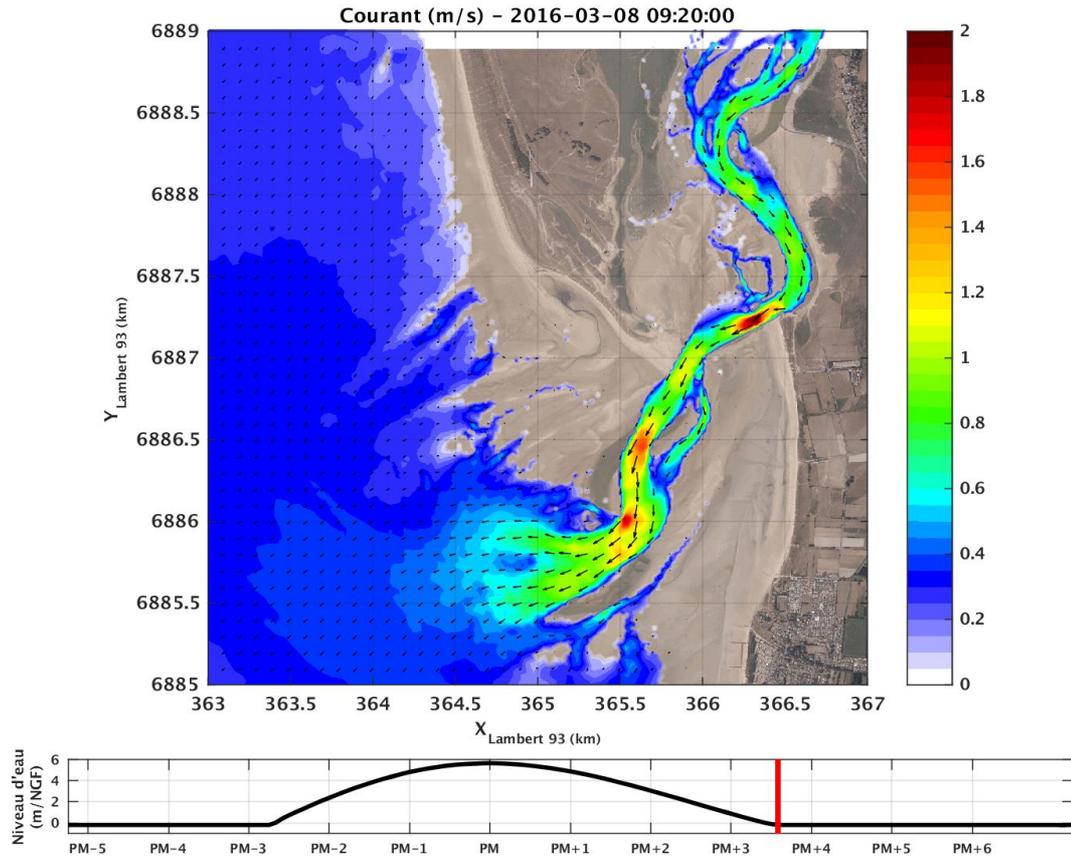
**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**



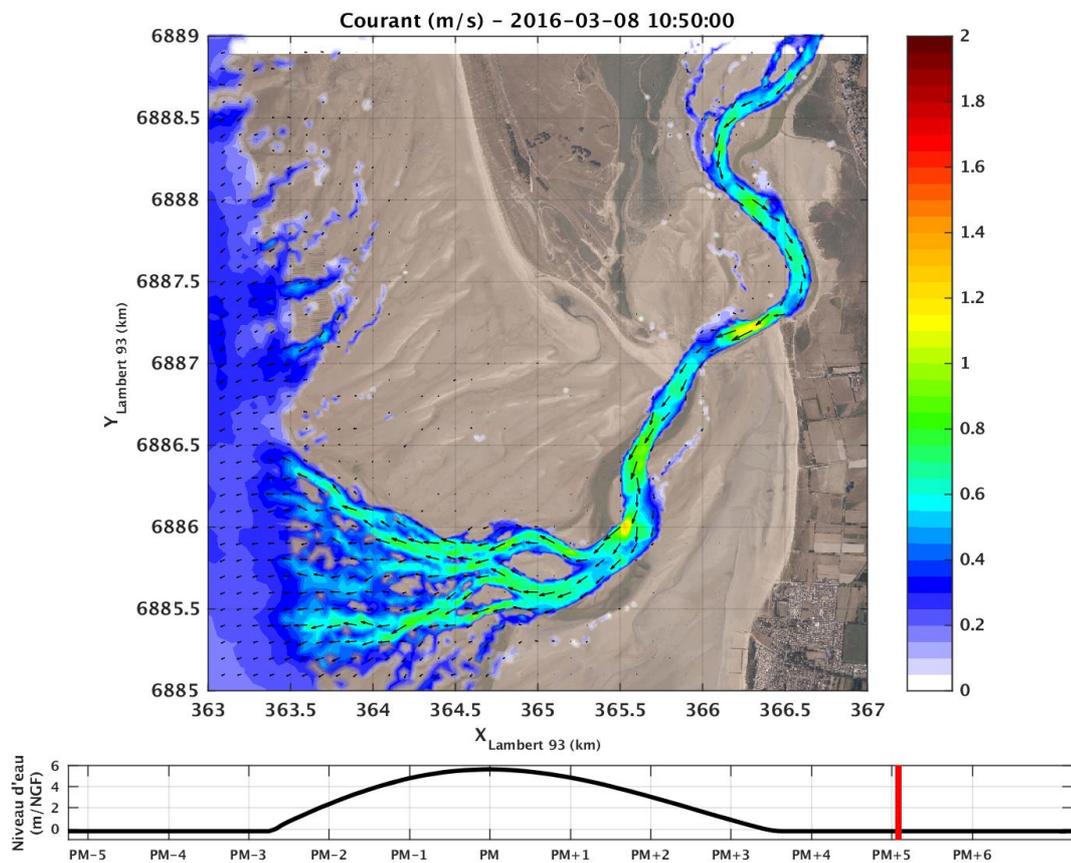
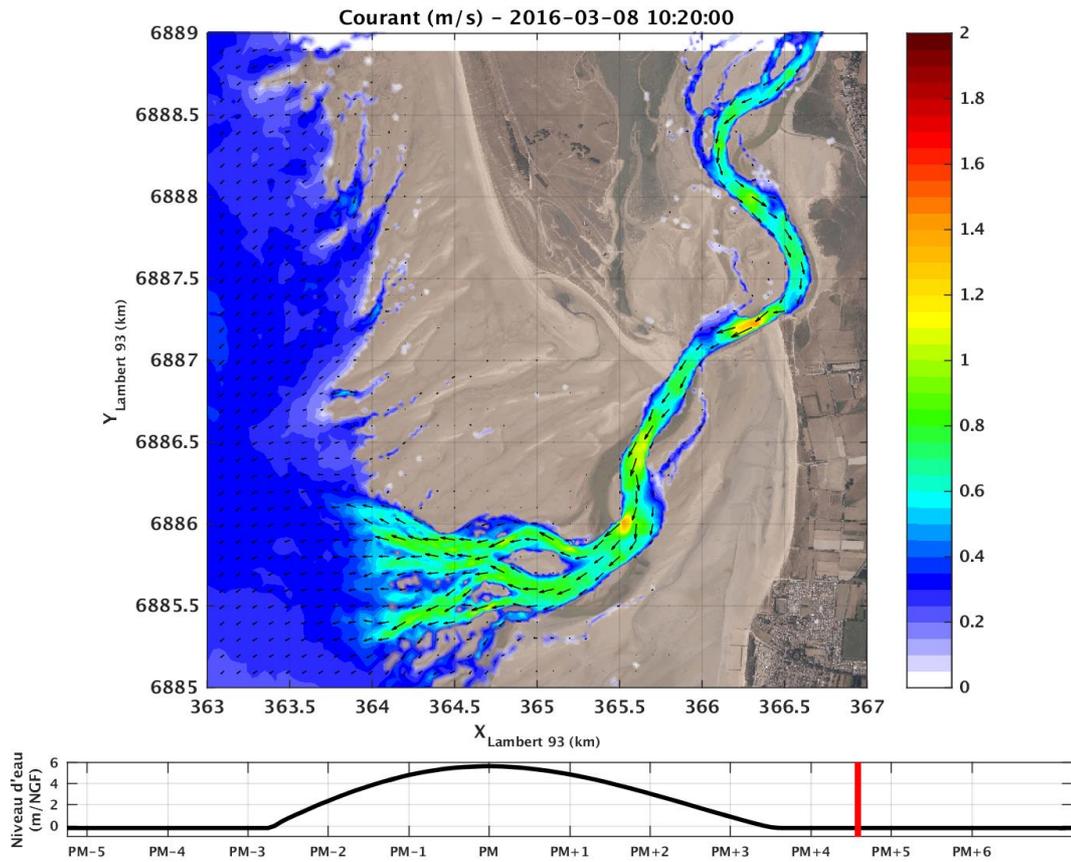
Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale  
sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville



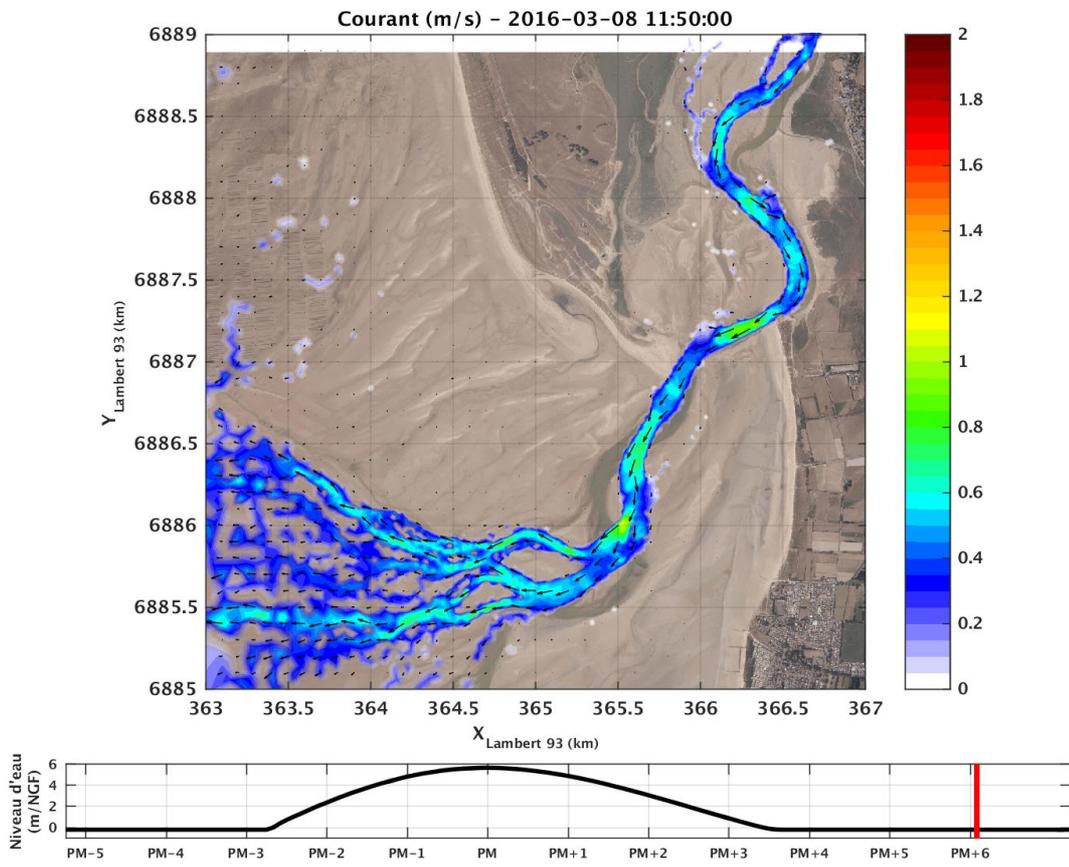
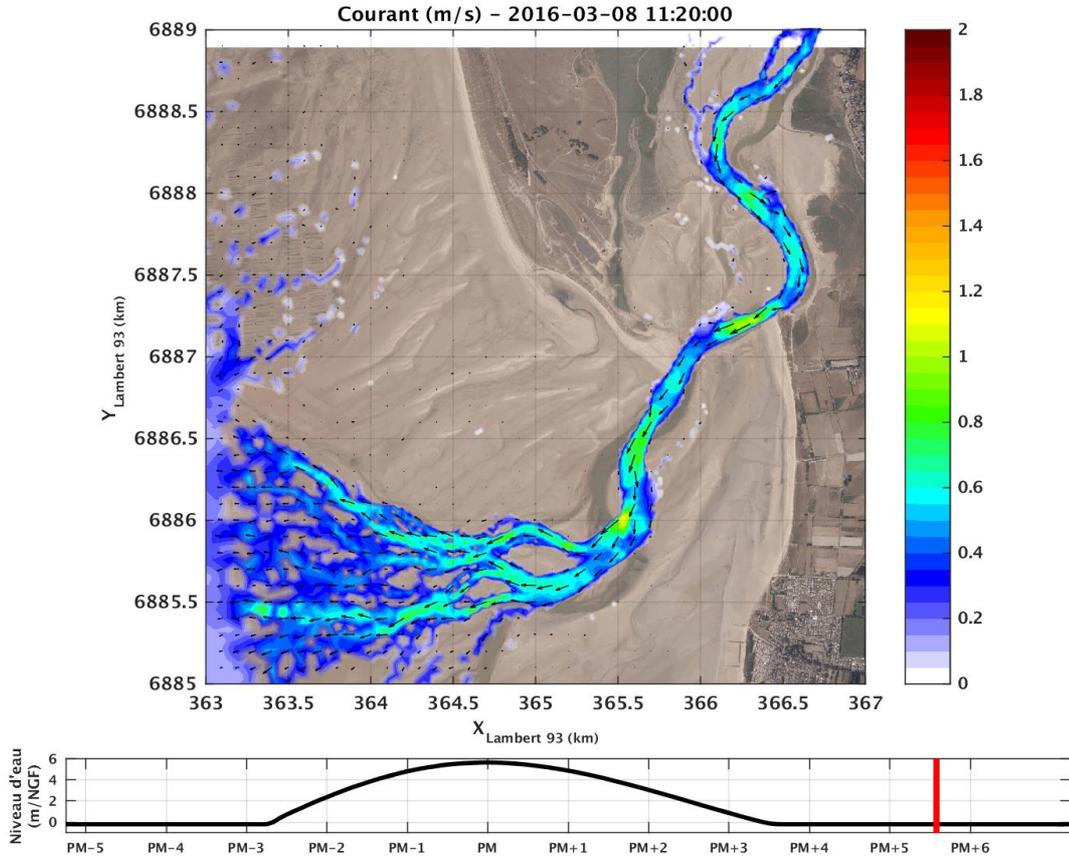
## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville



## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville

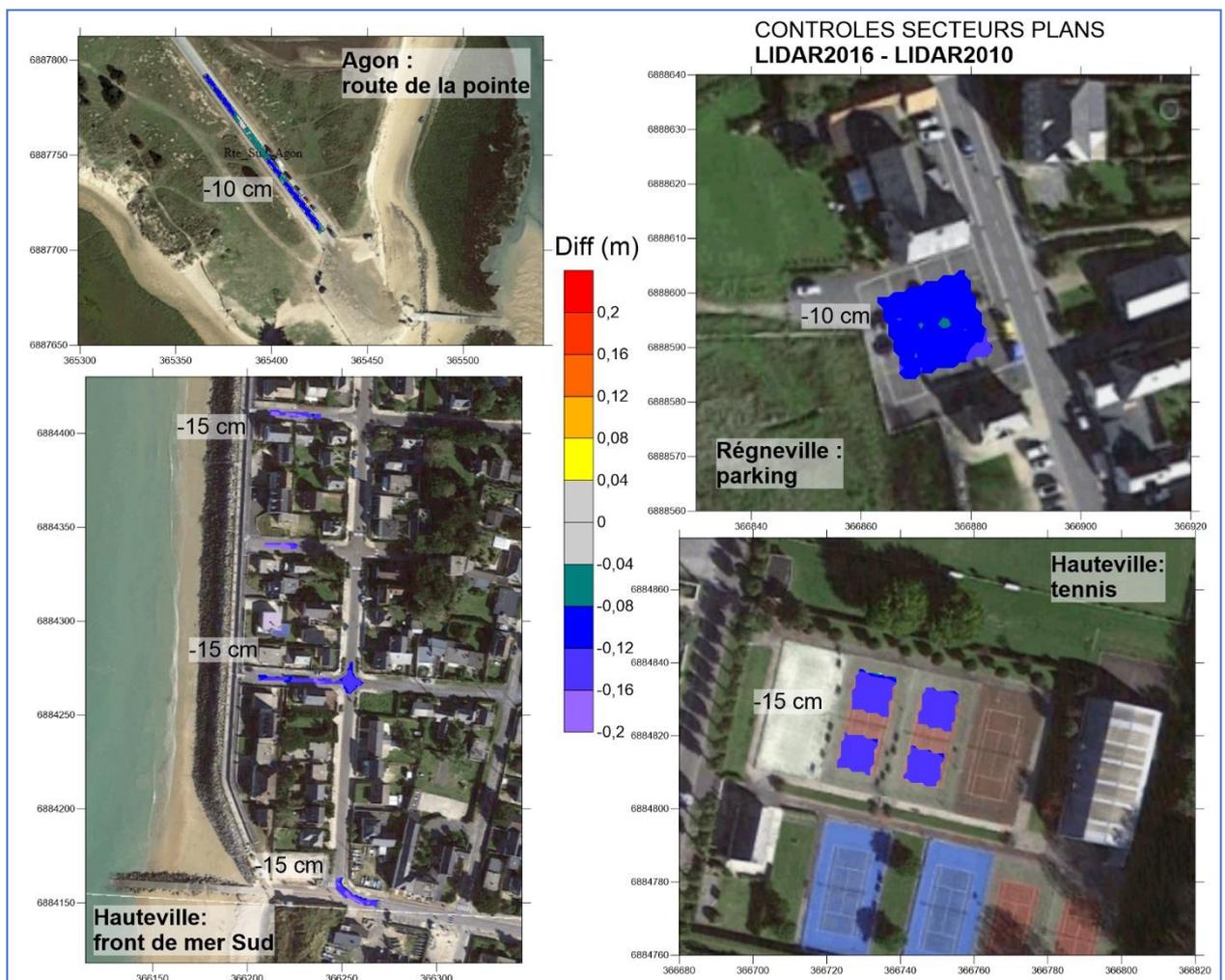


## Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville



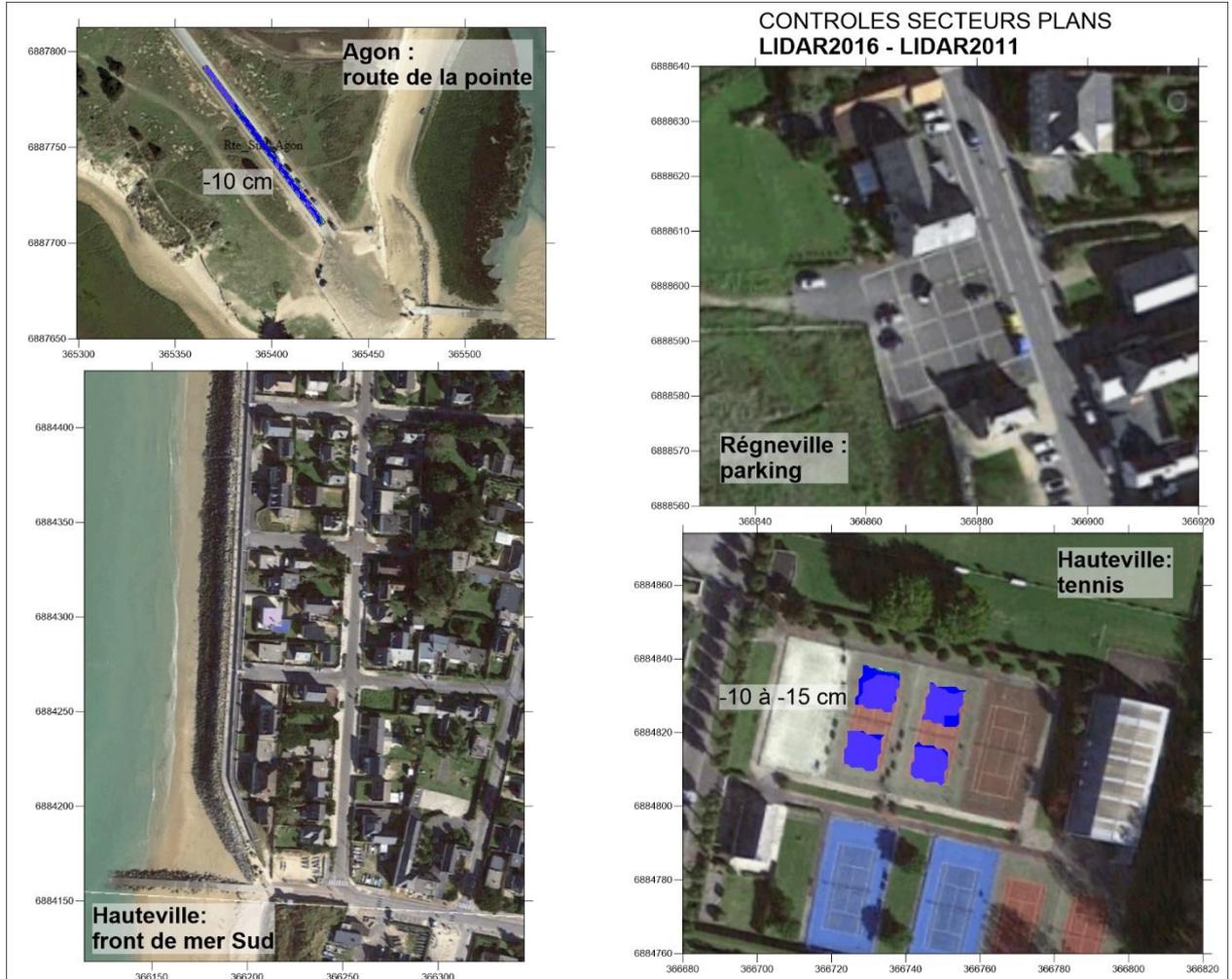
# ANNEXE C : ANALYSE DES CALAGES RELATIFS DES LEVES LIDAR

Le levé **2016** serait décalé de 10 à 15 cm (vers le bas) par rapport au levé **2010**, *ou inversement...*



**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

Le levé **2016** serait décalé de 10 à 15 cm (vers le bas) par rapport au levé **2011**, ou *inversement*...



**Etude hydro-sédimentaire, hydraulique et environnementale sur la sous-cellule hydro-sédimentaire de Coutainville**

Les décalages sont plus variables entre **2016** et **2011**.

