Communauté de Communes Opale Sud
Département du Pas-de-Calais

MAITRISE D'ŒUVRE POUR LA PROTECTION DE LA RIVE NORD DE L'AUTHIE

AVANT-PROJET

RAPPORT PROVISOIRE

ARTELIA Eau & Environnement
Branche MARITIME
6 rue de Lorraine
38130 - Echirolles
Tel. : +33 (0) 4 76 33 40 00
Fax : +33 (0) 4 76 33 43 33

DATE : FEVRIER 2016 **REF : 8713428 R1 - V1**

N°8713428 - Maîtrise d'œuvre pour la protection de la rive nord de l'Authie - Avant-Projet					
01	Rapport provisoire	CLI, FHS, PGN	ELC	ELC	08.02.2016
Version	Description	Rédaction	Vérifié	Approuvé	Date

SOMMAIRE

OBJET DE L'ETUDE 1
1. INTRODUCTION 3
2. DESCRIPTION DU PROJET 4
2.1. LOCALISATION DU PROJET ET CONTEXTE GEOGRAPHIQUE 4
2.2. DESCRIPTION GENERALE DU PROJET 5
3. SYNTHESE DES DONNEES EXISTANTES 6
3.1. TOPO-BATHYMETRIE 6
3.1.1. A L'ECHELLE DE LA BAIE 6
3.1.2. DANS LA ZONE D'EXTRACTION (POINTE DE ROUTHIAUVILLE) 7
3.1.3. DANS LA ZONE DE RECHARGEMENT (BOIS DE SAPINS) 8
3.2. CADRE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE GENERAL 10
3.3. NATURE SEDIMENTAIRE 12
3.4. CONDITIONS METEO-OCEANIQUES 13
3.4.1. LES NIVEAUX D'EAU 13
3.4.1.1. Niveaux de marée astronomique 13
3.4.1.2. Surcotes dues aux évènements météorologiques 15
3.4.1.3. Niveaux extrêmes de pleine-mer 15
3.4.1.4. Effets du changement climatique 17
3.4.2. LES VENTS 17
3.4.3. LES COURANTS 18
3.4.4. LES HOULES 21
3.4.4.1. Les houles du large 21
3.4.4.2. Les houles à la côte 24
3.5. L'HYDROLOGIE 26
3.6. LES CONCENTRATIONS EN MATIERES EN SUSPENSION (MES) 27
3.7. DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE 28
3.7.1. EVOLUTIONS A L'ECHELLE DE LA BAIE 29
3.7.2. EVOLUTIONS DANS LA ZONE D'EXTRACTION (POINTE DE ROUTHIAUVILLE) 30
3.7.3. EVOLUTIONS DANS LA ZONE DE RECHARGEMENT (BOIS DE SAPINS) 31
3.7.4. SYNTHESE DE LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE ACTUELLE 34
3.8. CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL 35
4. AVP PRELIMINAIRE AVANT MODELISATION, PROPOSITION DE SCENARIOS DE RECHARGEMENT MASSIF 37
4.1. ANALYSE DE LA METHODE DE TRAVAUX 37
4.1.1. RAPPEL DE LA BASE DU PROJET - ETUDE APS D'IDRA ENVIRONNEMENT 37
4.1.2. LES CRITERES FIXES POUR L'AVANT-PROJET 38

4.1.2.1. Les objectifs de protection 38
4.1.2.2. Le coût prévisionnel des travaux 38
4.1.2.3. Le volume de rechargement et les caractéristiques du sable 38
4.1.2.4. La durée des travaux de rechargement 38
4.1.3. LES CONTRAINTES TECHNIQUES 39
4.1.3.1. La configuration du site 39
4.1.3.2. La bathymétrie 40
4.1.3.3. L'hydrologie de l'Authie 40
4.1.3.4. La houle 40
4.1.4. DRAGAGE PAR VOIE MARITIME 40
4.1.4.1. Description de la méthode de travaux 40
4.1.4.2. Faisabilité du dragage par voie maritime 43
4.1.5. DRAGAGE PAR VOIE TERRESTRE 43
4.1.5.1. Solution excavation mécanique et transport par la route 43
4.1.5.2. Solution excavation mécanique et traversée de l'Authie par voie terrestre 44
4.1.6. SYNTHESE ET COMPARAISON MULTICRITERES DES SOLUTIONS ETUDIEES POUR LA REALISATION D'UN RECHARGEMENT MASSIF 45
4.1.6.1. Synthèse des solutions étudiées 45
4.1.6.2. Conclusion de l'analyse multicritères des solutions étudiées 48
4.2. DIMENSIONNEMENT THEORIQUE DU RECHARGEMENT 48
4.2.1. METHODOLOGIE APPLIQUEE POUR LE DIMENSIONNEMENT DU RECHARGEMENT 48
4.2.2. SCENARIO DE RECHARGEMENT PROPOSE POUR LA MODELISATION 50
5. MODELISATIONS HYDRODYNAMIQUES 52
5.1. SYSTEME DE MODELISATION 52
5.2. METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE 52
5.2.1. APPROCHE METHODOLOGIQUE ET OBJECTIFS 52
5.2.2. LE MODELE HYDRODYNAMIQUE (COURANTOLOGIE) 53
5.2.3. LE MODELE DE PROPAGATION DES HOULES 53
5.2.4. CALCUL DES CONTRAINTES HYDRAULIQUES ET EXPERTISE SEDIMENTOLOGIQUE 55
5.2.5. ETAPES DE MODELISATION ET RENDUS 56
5.3. CONSTRUCTION ET CALAGE DU MODELE HYDRODYNAMIQUE 57
5.3.1. LE MODELE HYDRODYNAMIQUE EXISTANT 57
5.3.2. ADAPTATION DU MODELE AU CONTEXTE DE L'ETUDE 58
5.3.2.1. Emprise et topo-bathymétrie 58
5.3.2.2. Maillage du modèle 59
5.3.2.3. Forçage du modèle hydrodynamique 60
5.3.3. CALAGE HYDRODYNAMIQUE DU MODELE 60
5.4. MODELISATION DE L'ETAT DE REFERENCE 62
5.4.1. PRINCIPE DE MODELISATION 62
5.4.2. RESULTATS DES MODELISATIONS 62
5.4.3. CONCLUSION SUR L'ETAT DE REFERENCE 63
5.5. MODELISATION DU SCENARIO 1 63

5.5.1. PRINCIPE DE MODELISATION 63
5.5.2. RESULTATS DES MODELISATIONS 64
5.5.3. CONCLUSION SUR LE SCENARIO 1 66
5.6. MODELISATION DU SCENARIO 2 67
5.6.1. PRINCIPE DE MODELISATION 67
5.6.2. RESULTATS DES MODELISATIONS 67
5.6.3. ANALYSE PAR EXPERTISE DE LA MOBILITE DES SEDIMENTS 70
5.6.4. CONCLUSION SUR LE SCENARIO 2 71
5.7. COMPARAISON DES SCENARIOS MODELISES 72
6. ETUDE COMPLEMENTAIRE : RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES ET FAISABILITE PAR VOIE TERRESTRE 76
6.1. OBJET DE L'ETUDE COMPLEMENTAIRE 76
6.2. CAHIER DES CHARGES DES RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES 76
6.3. SYNTHESE DES RESULTATS DE LA CAMPAGNE GEOTECHNIQUE 77
6.3.1. DEROULEMENT DE LA CAMPAGNE 77
6.3.2. DIFFICULTES RENCONTREES PAR FONDASOL 78
6.3.3. SYNTHESE DES RESULTATS DE SONDAGES 79
6.3.4. SYNTHESE DES ESSAIS EN LABORATOIRE 79
6.3.5. COMPTE-RENDU ET ANALYSE DES ESSAIS DE ROULAGE 79
6.4. CONCLUSIONS SUR LA FAISABILITE TECHNIQUE DU RECHARGEMENT MASSIF PAR VOIE TERRESTRE EN TRAVERSANT L'AUTHIE 81
6.4.1. LES PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS DES RECONNAISSANCES REALISEES 81
6.4.2. CONCLUSION SUR LA FAISABILITE TECHNIQUE DE LA TRAVERSEE DE L'AUTHIE PAR DES ENGINS DE TRAVAUX 81
6.5. LE RECHARGEMENT MASSIF PAR VOIE TERRESTRE 82
6.5.1. LA SOLUTION ETUDIEE AU STADE AVANT-PROJET 82
6.5.2. LA DUREE DES TRAVAUX 83
7. LES OUVRAGES DE MAINTIEN DU SABLE 84
7.1. OBJECTIFS DES OUVRAGES 84
7.2. SOLUTIONS TECHNIQUES EXISTANTES 84
7.2.1. ENROCHEMENTS 84
7.2.2. PALPLANCHES 85
7.2.3. PIEUX BOIS 85
7.2.4. SYSTEME S-ABLE 86
7.2.5. BOUDIN GEO-COMPOSITE 87
7.2.6. COMPARAISON MULTICRITERES DES SOLUTIONS TECHNIQUES POUR LES DEFLECTEURS 88
7.3. SOLUTIONS ENVISAGEABLES AU STADE AVANT-PROJET 90
7.3.1. SOLUTION PIEUX BOIS 90
7.3.2. SOLUTION S-ABLE 91

8. LES RECHARGEMENTS D'ENTRETIEN 92
8.1. VOLUMES ET FREQUENCE D'ENTRETIEN 92
8.2. SOURCES D'EMPRUNT ENVISAGEABLES 92
8.3. METHODES DE TRAVAUX ENVISAGEABLES POUR LES RECHARGEMENTS ANNUELS 96
8.3.1. VOIE TERRESTRE 96
8.3.1.1. Depuis la pointe de Routhiauville 96
8.3.1.2. Depuis la plage de Berck 96
8.3.1.3. Solution utilisant les deux sources envisageables par moyens terrestres 96
8.3.2. VOIE MARITIME 97
8.3.2.1. Depuis la pointe de Routhiauville 97
8.3.2.2. Depuis le chenal amont de l'Authie 97
9. ESTIMATIONS DES QUANTITES ET DES COUTS 98
9.1. GENERALITES 98
9.2. RECHARGEMENT MASSIF ET OUVRAGES DE MAINTIEN 98
9.2.1. SOLUTION TERRESTRE PAR TRAVERSEE DE L'AUTHIE 98
9.2.2. SOLUTION TERRESTRE PAR LA ROUTE 98
9.2.3. OUVRAGES DEFLECTEURS 99
9.3. RECHARGEMENTS ANNUELS D'ENTRETIEN 99
9.3.1. SOLUTIONS TERRESTRES 99
9.3.1.1. Depuis la pointe de Routhiauville par la route 99
9.3.1.2. Depuis la plage de Berck par la route 100
9.3.2. SOLUTIONS MARITIMES 100
9.3.2.1. Dragage de la pointe de Routhiauville par moyens nautiques 100
9.3.2.2. Dragage du chenal amont de l'Authie par moyens nautiques 101
10. EVOLUTION DU CONTEXTE DE GESTION DU LITTORAL DANS LE CADRE DU PAPI BSA 102
10.1. OBJECTIFS DU PAPI BSA 102
10.2. DIAGNOSTIC DU SECTEUR NORD DE LA BAIE D'AUTHIE VIS-A-VIS DU RISQUE SUBMERSION 102
10.3. STRATEGIE LOCALE PROPOSEE PAR LE PAPI BSA 103
10.3.1. OBJECTIFS DE LA STRATEGIE PROPOSEE 103
10.3.2. STRATEGIE VIS-A-VIS DES AMENAGEMENTS STRUCTURELS 104
10.3.3. COUTS ASSOCIES 105
11. CONCLUSION SUR LA FAISABILITE DU RECHARGEMENT MASSIF DU BOIS DE SAPINS 106
REFERENCES 108

ANNEXE 1 : **ETAT DES LIEUX - VISITE ARTELIA DU SITE DU 02 JUIN 2014**

ANNEXE 2 : **LEVE TOPOGRAPHIQUE (MISSION TC1)**

ANNEXE 3 : **EVOLUTIONS SEDIMENTAIRES PASSEES DANS LA ZONE DE RECHARGEMENT (BOIS DE SAPINS)**

ANNEXE 4 : **DIMENSIONNEMENT DU RECHARGEMENT**

ANNEXE 5 : **CONSTRUCTION ET CALAGE DU MODELE HYDRODYNAMIQUE**

ANNEXE 6 : **RESULTATS DE MODELISATION DE L'ETAT REFERENCE 2014**

ANNEXE 7 : **RESULTATS DE MODELISATION DU SCENARIO 1**

ANNEXE 8 : **RESULTATS DE MODELISATION DU SCENARIO 2**

ANNEXE 9 : **RAPPORT DE RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES COMPLEMENTAIRES FONDASOL - DECEMBRE 2015**

ANNEXE 10 : **CAHIER DE PLANS - AVANT-PROJET**

TABLEAUX

Tableau 1 – Niveaux caractéristiques de la marée à Berck (SHOM, 2012) 14
Tableau 2 – Surcotes extrêmes estimées à Boulogne-sur-Mer (P.A. Pirazzoli, 2008) 15
Tableau 3 – Niveaux extrêmes de PM au droit de la baie d'Authie (SHOM/CETMEF, 2008) 17
Tableau 4 – Projections d'élévation du niveau de la mer (ONERC, 2010) 17
Tableau 5 – Cas de houle modélisés pour les besoins de l'analyse hydrosédimentaire 54
Tableau 6 – Comparaison multicritères des solutions techniques pour les déflecteurs 89
Tableau 7 – Comparaison multicritères des sites potentiels d'emprunt de sable (SOGREAH, 2011) 95
Tableau 8 – Synthèse et comparaison des solutions techniques étudiées pour le rechargement massif depuis la zone d'emprunt de la pointe de Routhiauville 106

FIGURES

Figure 1. Vue générale de la zone d'étude 1
Figure 2. Localisation de la zone de projet 4
Figure 3. Topographie de la baie d'Authie (LIDAR 2011) 6
Figure 4. Topographie de la partie terminale de la pointe de Routhiauville (levé 2013) 7
Figure 5. Vue d'ensemble du levé réalisé par Bleard-Lecocq en juin 2014 8
Figure 6. Topographie de la zone de rechargement considérée pour l'AVP (levé 2014) 9
Figure 7. Vues du Bois de Sapins à différentes dates entre juin 2014 et décembre 2015 10
Figure 8. Carte géologique et structurale de la zone côtière du Nord-Pas-de-Calais 11
Figure 9. Extrait de la carte géologique au 1/50 000 du BRGM en baie d'Authie 11
Figure 10. Campagnes de 1994 et 1998 - D50 du sédiment et teneurs en vase 12
Figure 11. Campagne de mars 2013 - D50 du sédiment 13

Figure 12. Campagne de 1997 - Mesures de niveau d'eau en baie d'Authie 14
Figure 13. Campagne de février-mars 2013 - Mesures de niveau d'eau en baie d'Authie 15
Figure 14. Carte de niveau extrême de pleine-mer, période de retour 100 ans 16
Figure 15. Fréquences des vents au Touquet par classes de direction et de vitesse 18
Figure 16. Campagne de 1999 - Mesures des courants en baie d'Authie 19
Figure 17. Campagne de février-mars 2013 - Mesures des courants en baie d'Authie 20
Figure 18. Etat référence 2014 - Champs de vitesses moyennes verticales 21
Figure 19. Les données de houles disponibles au large de la baie d'Authie 21
Figure 20. Climat annuel moyen des houles au point COAST 3013 (ANEMOC) 23
Figure 21. Houles extrêmes au point COAST 2671 (ANEMOC) 23
Figure 22. Climat annuel moyen des houles à l'entrée de la baie d'Authie 24
Figure 23. Campagne de février-mars 2013 - Mesures des houles en baie d'Authie 25
Figure 24. Etat référence 2014 - Propagation des houles à l'intérieur de la baie d'Authie 26
Figure 25. Campagne de 1997 - Mesures des concentrations en MES en baie d'Authie 27
Figure 26. Campagne de février-mars 2013 - Mesures de la turbidité en baie d'Authie 28
Figure 27. Photographies aériennes 1947 et 2009 de la baie d'Authie 28
Figure 28. Evolution des fonds de la baie d'Authie entre 1997 et 2008 29
Figure 29. Evolution de la pointe de Routhiauville entre 1935 et 2011 30
Figure 30. Enveloppes de divagation du chenal de l'Authie entre 1935 et 2014 31
Figure 31. Evolution du cordon dunaire du Bois de Sapins sur la période 2008-2013 32
Figure 32. Evolution du pied de dune du Bois de Sapins sur la période 1997-2014 33
Figure 33. Schéma de la dynamique sédimentaire actuelle en baie d'Authie 35
Figure 34. Sites Natura 2000 en baie d'Authie 36
Figure 35. Espèces d'intérêt communautaire recensées en baie d'Authie 36
Figure 36. Projet de rechargement de la plage du Bois de Sapins défini dans l'APS (IDRA) 37
Figure 37. Distance entre la zone d'emprunt et la zone de rechargement 39
Figure 38. Durée de dragage en fonction du tirant d'eau et du coefficient de marée 42
Figure 39. Exemple d'une drague stationnaire 42
Figure 42. Dimensionnement du rechargement - Vue en plan des données considérées 49
Figure 43. Exemples de configurations de rechargements envisagés 49
Figure 44. Exemples de profils de rechargements envisagés 50
Figure 45. Méthodologie mise en œuvre dans le cadre de cette étude 52
Figure 46. Exemple de champs de vitesses des courants 53
Figure 47. Exemple d'épure de propagation de la houle dans la zone d'étude 54
Figure 48. Exemple de carte et d'évolution temporelle des contraintes hydrauliques 55
Figure 49. Exemple de carte de différentiel de contraintes hydrauliques - « Scénario testé - Etat de référence » des contraintes max 56
Figure 50. Emprise du modèle hydrodynamique produit dans le cadre du PAPI BSA 57
Figure 51. Emprise du modèle pour l'étude AVP et sources des données bathymétriques (« état 2013 » ayant servi au calage du modèle) 58
Figure 52. Maillage du modèle 59
Figure 53. Calage du modèle - Marée aux points de mesures 2013 (A et C) 61
Figure 54. Calage du modèle - Courants aux points de mesures 2013 (A et C) 61
Figure 55. Etat de référence 2014 - Bathymétrie, maillage et points sondes 62
Figure 56. Etat de référence 2014 - Exemple de résultats de contraintes hydrauliques 63

Figure 57. Principe du Scénario 1 de « rechargement seul » 64
Figure 58. Différentiel de contraintes Scénario 1 - Etat référence 66
Figure 59. Principe du Scénario 2 de « rechargement + déflecteurs » 67
Figure 60. Différentiel de contraintes Scénario 2 - Etat référence 69
Figure 61. Analyse par expertise de la mobilité des sédiments 71
Figure 62. Modélisation hydrodynamique - Comparaison des résultats de courants 73
Figure 63. Modélisation hydrodynamique - Comparaison des résultats de houles....74
Figure 64. Modélisation hydrodynamique - Comparaison des résultats de contraintes hydrauliques 75
Figure 65. Reconnaissances géotechniques prévues au cahier des charges 77
Figure 66. Reconnaissances géotechniques réalisées (étiquettes « P » pour sondage au pénétromètre léger et « T » pour sondage à la tarière à main) 78
Figure 67. Photo de l'essai de roulage – partie terrestre 80
Figure 68. Photo de l'essai de roulage – bras de l'Authie 80
Figure 69. Cordon en enrochements de l'anse des Sternes 84
Figure 70. Palplanches affaissées à l'extrémité de la digue submersible des Sternes 85
Figure 71. Exemple de rideau double de pieux bois sur le littoral de Berck 85
Figure 72. Pieux bois mis en place au Bois de Sapins en mars 2015 86
Figure 73. Dispositif expérimental S-Able - Anse du Bois de Sapins....86
Figure 74. Principe et exemples de boudin géo-composite 87
Figure 75. Protection big-bags en arrière de la zone basse du Bois de Sapins 88
Figure 76. Protection par épis en pieux bois – plage de Wissant (62)....91
Figure 77. Sites potentiels d'emprunt de sable (SOGREAH, 2011)....94
Figure 78. Cartographie du risque inondation en baie d'Authie - Scénario fil de l'eau, situation actuelle (2015) - Tempête d'occurrence décennale (dossier PAPI, 2015)....103
Figure 79. Stratégie du PAPI BSA pour le secteur du Bois de Sapins (dossier PAPI, 2015) 104

OBJET DE L'ETUDE

Titulaire de la compétence « Défense contre la mer » depuis le 1er janvier 2009, la Communauté de Communes Opale Sud (CCOS) a engagé des études afin de mieux comprendre le phénomène d'érosion de la rive nord de la baie d'Authie, pour une meilleure protection des territoires arrière-littoraux contre le risque de submersion marine. Ces réflexions ont abouti en 2009 à une étude de la SOGREAH (devenue ARTELIA), intitulée « Diagnostic, étude d'opportunité et de faisabilité en vue de l'aménagement de la rive nord de la baie d'Authie » [01], qui a permis de proposer plusieurs solutions d'aménagement à court, moyen et long terme.

Depuis décembre 2010, l'érosion s'est fortement accélérée au lieu-dit du « Bois de Sapins », en partie due au déplacement du lit de l'Authie vers la dune, au nord.

Face à ce constat, la CCOS a lancé à la fin de l'année 2012 un marché de mission d'assistance à maîtrise d'ouvrage en vue de la protection de la rive nord de la baie par éloignement du cours de l'Authie. Dans ce cadre, un Avant-Projet Sommaire (APS) a été établi par le bureau d'études IDRA Environnement [02] ; il prévoit un rechargement massif en sable de la plage le long de la rive nord de l'Authie, à l'aide de matériaux en provenance de la même unité hydrosédimentaire, à savoir la pointe de Routhiauville qui est une forme géomorphologique en accrétion se situant en face du secteur en érosion, sur la rive gauche de l'Authie (voir la figure ci-après).

Figure 1. Vue générale de la zone d'étude

Il est escompté que cette solution permette à la fois de renforcer la protection des terres situées en arrière de la dune par un exhaussement du niveau de la plage et du cordon, mais également forcer l'Authie à s'éloigner de la rive nord de la baie en draguant les matériaux sur sa rive gauche et sur la pointe de Routhiauville.

Pour réaliser ces travaux de protection de la rive nord de l'Authie, la CCOS a confié à ARTELIA une mission de Maîtrise d'Œuvre divisée en une tranche ferme et 8 tranches conditionnelles (TC) :

- Tranche ferme : Avant-Projet (AVP) - Etudes techniques et modélisations numériques,
- TC1 : Une campagne de levé topographique supplémentaire,
- TC2 : Une modélisation supplémentaire,
- TC3 : Etablissement des dossiers administratifs et assistance au Maître d'Ouvrage pour la présentation de ces dossiers, puis lors de leur instruction, jusqu'à l'obtention de l'arrêté préfectoral d'autorisation des travaux,
- TC4 : Projet (PRO) - Mise au point du plan masse définitif,
- TC5 : Concertation publique,

- TC6 : ACT - Assistance pour la passation des contrats de travaux,
- TC7 : comprenant les missions suivantes :
  - VISA - Conformité et visa d'exécution du projet,
  - DET - Direction de l'exécution des travaux,
  - AOR - Assistance aux opérations de réception et garantie de parfait achèvement,
- TC8 : OPC - Ordonnancement, pilotage et coordination de chantier.

Conformément au CCTP de cette Maîtrise d'œuvre, le rechargement massif du Bois de Sapins doit permettre une protection des terres arrière-littorales à court terme (objectif 5-10 ans), en attendant la mise en œuvre des mesures de gestion pérenne définies dans le cadre du PAPI[1] de l'estuaire de la Bresle à l'estuaire de l'Authie (le dossier du PAPI BSA a été présenté en Commission Mixte Inondation en novembre 2015 [03]).

Le montant des travaux pour ce rechargement massif a été estimé à 2,5 M€ HT dans l'étude d'APS (selon l'hypothèse d'un dragage par voie maritime).

Le présent document constitue le rapport d'Avant-Projet et correspond à la Tranche Ferme de la mission de Maîtrise d'œuvre. Il intègre et s'appuie également sur les résultats :

- des Tranches Conditionnelles lancées à ce jour par la CCOS, à savoir :
  - la TC1, « Campagne de levé topographique », dont le rendu est utilisé pour l'AVP,
  - la TC3, « Etablissement des dossiers administratifs », qui a permis d'établir un état des lieux exhaustif du site (voir le rapport d'état initial de l'étude d'impact, janvier 2015 [04]),
- de l'étude complémentaire « Reconnaissances géotechniques et analyse de la faisabilité du projet par voie terrestre », non prévue dans le cadre du marché initial, qui a été réalisée fin 2015 et a fait l'objet d'une présentation à la CCOS le 08 janvier 2016 (voir le rapport d'étude complémentaire géotechnique, décembre 2015 [05]).

Les conclusions de cette étude d'Avant-Projet diffèrent de l'objectif initial du projet, en raison des contraintes techniques, financières et environnementales mises en évidence.

Ce rapport expose également l'évolution du contexte de gestion du littoral en fonction des résultats de l'étude du PAPI BSA, réalisée et finalisée entre le démarrage de la présente mission de Maîtrise d'œuvre et l'édition de ce rapport AVP.

[1] Les Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) ont été lancés en 2002. Ils ont pour objet de promouvoir une gestion intégrée des risques d'inondation en vue de réduire leurs conséquences dommageables sur la santé humaine, les biens, les activités économiques et l'environnement. Outil de contractualisation entre l'Etat et les collectivités, le dispositif PAPI permet la mise en œuvre d'une politique globale, pensée à l'échelle du bassin de risque.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre du projet de rechargement massif de l'anse du Bois de Sapins, tel qu'exposé dans le paragraphe précédent, l'étude d'Avant-Projet (Tranche Ferme) prévoyait initialement la réalisation des tâches suivantes :

- Etape 1 : AVP préliminaire du rechargement avant modélisation, sur la base des données existantes et du levé topographique réalisé dans le cadre de la mission TC1,
- Etape 2 : Modélisations numériques hydrodynamiques du rechargement (étude de différents scénarios de prélèvement et de rechargement),
- Etape 3 : AVP final du scénario retenu à l'issue de l'étape 2.

Lors de l'étape 1, la faisabilité du projet tel que défini dans l'étude précédente d'APS [02], à savoir un dragage et un rechargement par voie maritime (solution de base du présent marché de Maîtrise d'œuvre) a été analysée et approfondie. Cette analyse a montré que la solution d'APS n'était pas faisable dans le respect des coûts et délais prévus au marché, en raison des conditions océano-météorologiques et morphologiques de la baie d'Authie (fenêtres de marée réduites et tirants d'eau insuffisants pour la réalisation d'un dragage par voie maritime).

En accord avec le Maître d'Ouvrage, ARTELIA a donc réalisé une nouvelle étude de faisabilité et des reconnaissances géotechniques complémentaires afin de rechercher les solutions techniques envisageables pour la réalisation du projet de rechargement massif dans le respect des contraintes de délais et de coûts admissibles.

Le présent rapport expose cette démarche de manière chronologique ; il est structuré comme suit :

- Description du projet,
- Synthèse des données existantes,
- AVP préliminaire avant modélisation: analyse de la méthode de travaux et dimensionnement du rechargement (étape 1),
- Modélisations hydrodynamiques des scénarios de rechargement massif (étape 2),
- Etude de faisabilité complémentaire : reconnaissances géotechniques et faisabilité du projet par voie terrestre avec traversée de l'Authie,
- Les ouvrages de maintien du sable (structures légères),
- Les rechargements d'entretien,
- Estimations des quantités et des coûts (étape 3),
- Evolution du contexte de gestion du littoral dans le cadre du PAPI BSA,
- Conclusion sur la faisabilité du rechargement massif du Bois de Sapins.

2. DESCRIPTION DU PROJET

2.1. LOCALISATION DU PROJET ET CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

La zone de projet se situe dans l'estuaire de l'Authie, vaste baie ouverte sur la Manche constituant la limite entre les départements du Pas-de-Calais au nord et de la Somme au sud, et entre les régions Nord-Pas-de-Calais et Picardie respectivement, qui ont fusionné début 2016.

Cette baie se trouve par ailleurs au centre de l'ensemble dit des « 3 estuaires picards », constitué également de la Baie de Somme et de la Baie de la Canche (Figure 2).

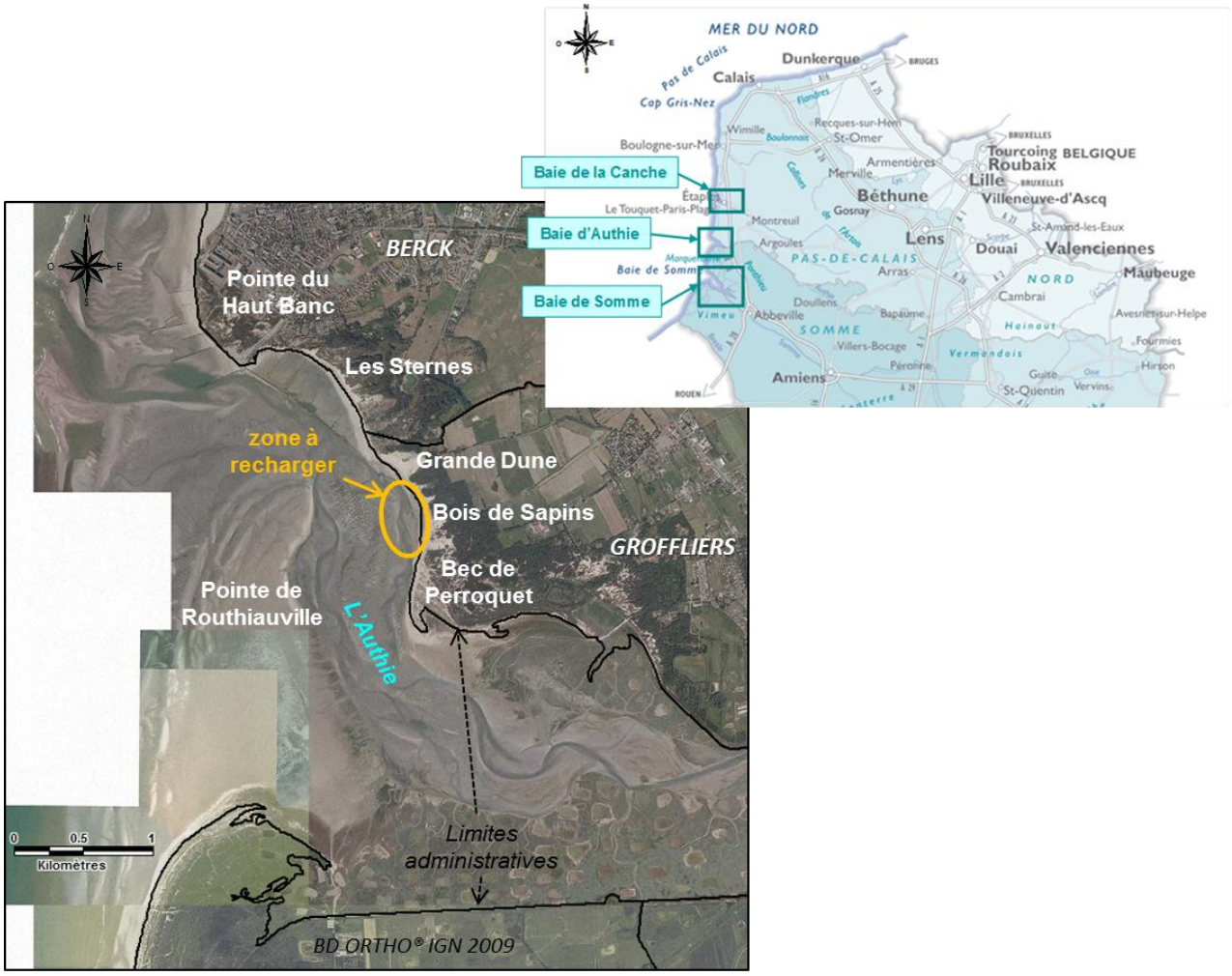


Figure 2. Localisation de la zone de projet

Plus précisément, la zone à recharger est localisée au lieu-dit du Bois de Sapins en rive nord de la baie, sur la commune de Groffliers et au sud de la commune de Berck, toutes les deux appartenant à la Communauté de Communes Opale Sud (département du Pas-de-Calais).

La zone de prélèvement de sable est prévue au niveau de la pointe de Routhiauville, qui fait partie du Domaine Public Maritime (le banc est submergé pour les grands coefficients de marée). Elle concernera le flanc interne (Est) du banc afin de garder autant que possible la zone de chantier à l'abri des houles et de limiter les impacts environnementaux.

2.2. DESCRIPTION GENERALE DU PROJET

Les contours du projet de protection de la rive nord de l'Authie ont été définis dans le cadre des études d'Avant-Projet Sommaire (APS) réalisées en 2013 par IDRA Environnement [02], pour le compte de la Communauté de Communes Opale Sud.

Le principe de protection retenu à l'issue de cet APS consiste en un rechargement massif en sable au niveau du Bois de Sapins afin de reconstituer la plage et de contraindre l'Authie à emprunter un chenal plus au sud.

La forte érosion du cordon dunaire actuellement observée dans ce secteur constitue une menace pour les communes de Berck et de Groffliers. En effet, les territoires arrière-littoraux étant situés en partie sous le niveau des plus hautes mers, le risque de submersion marine doit être pris en considération.

L'APS envisageait de prélever les sédiments sur la rive sud du chenal principal de l'Authie, ainsi que sur l'extrémité nord de la pointe de Routhiauville. Les volumes de rechargement nécessaires avaient été estimés en première approche, entre 350 000 et 550 000 m^3, et le montant des travaux à 2,5 M€ HT (selon l'hypothèse d'un dragage par voie maritime).

Dans le cadre de la présente étude d'Avant-Projet, les caractéristiques et le dimensionnement du rechargement doivent être ajustés en tenant compte des évolutions sédimentaires récentes, d'une analyse de la faisabilité des opérations, et de l'enveloppe budgétaire prévue pour la réalisation des travaux au stade Avant-Projet.

La mise en place d'ouvrages légers permettant de maintenir autant que possible le sable rechargé est également envisagée dans cette étude, suite aux résultats des modélisations numériques.

3. SYNTHESE DES DONNEES EXISTANTES

Ce chapitre présente les conditions naturelles du site qui serviront de socle pour l'étude d'Avant-Projet et de données d'entrée pour les modélisations numériques. Il s'appuie sur les diagnostics et états des lieux de la baie d'Authie réalisés dans les études antérieures, complétés par les données collectées dans le cadre de cette mission (levé topographique et reconnaissances géotechniques).

3.1. TOPO-BATHYMETRIE

Les levés topo-bathymétriques utilisés pour l'étude d'Avant-Projet sont décrits ci-après.

3.1.1. A l'échelle de la baie

Le levé topographique le plus récent couvrant la baie d'Authie est le LIDAR de mars 2011, réalisé dans le cadre du projet CLAREC par le CNRS et l'Université de Caen (Figure 3).

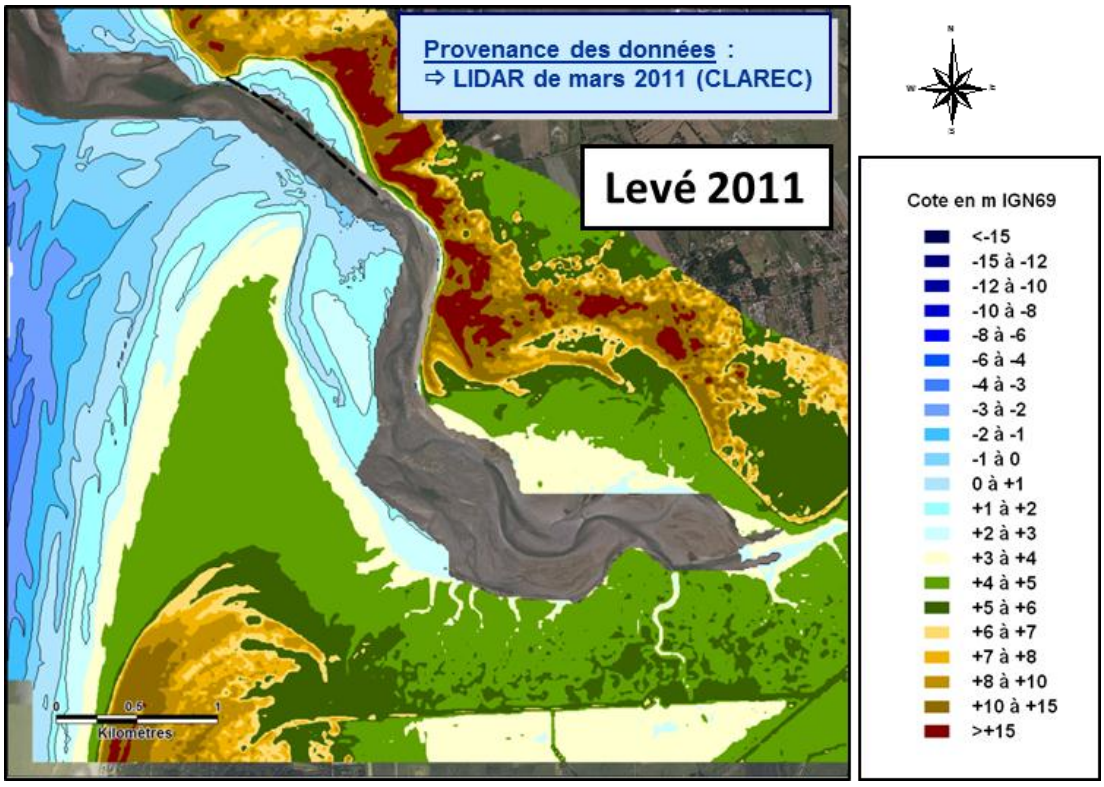


Figure 3. Topographie de la baie d'Authie (LIDAR 2011)

Il montre que les fonds de la baie sont très peu profonds et assèchent aux plus basses mers sur l'ensemble de l'estuaire (sauf dans le chenal de l'Authie). Ils sont compris entre 0 et +2 m IGN69 derrière la pointe de Routhiauville et ils s'élèvent en allant vers le fond de baie, avec des altitudes de +2 à +3 m IGN69 au niveau de la Madelon. Ils sont protégés par le banc de Routhiauville qui culmine entre +4 et +5 m IGN69 et qui n'est donc submergé qu'à pleine mer de vive-eau.

Les zones de slikkes en fond de baie sont situées entre +3 et +4 m IGN69, ce qui explique qu'elles soient recouvertes à pleine mer pour des coefficients de marée relativement faibles, tandis que les mollières sont installées sur la partie supérieure de l'estran, entre +4 et +5 m IGN69 et ne sont par conséquent inondées qu'à pleine mer de vive-eau.

Sur la rive nord, en aval des zones de mollières, se trouve le champ de dunes embryonnaires du Bec de Perroquet. Il est large d'environ 500 m ; ses crêtes sont en majeure partie comprises entre +10 et +15 m IGN69 (notamment à l'extrémité de la flèche) et peuvent atteindre localement, dans la partie centrale du Bec de Perroquet, +20 m IGN69.

En se dirigeant vers l'Ouest, on trouve un cordon dunaire unique qui s'étend sur environ 2 km entre le Bec de Perroquet et la pointe du Haut-Banc. Ce cordon joue le rôle de barrière littorale pour les zones en arrière qui sont situées sous le niveau des plus hautes mers, à une altitude comprise entre +4 et +5 m IGN69. Ce cordon culmine en moyenne entre +15 et +20 m IGN69, excepté au niveau de la Grande Dune où on observe une falaise dunaire située à +30 m IGN69, et au niveau du Bois de Sapins où, au contraire, la dune est plus basse (voir §3.1.3).

Ce cordon dunaire présente une largeur comprise généralement entre 200 et 450 m, et entre 150 à 200 m au niveau de la Grande Dune. On peut toutefois remarquer la zone du Bois de Sapins où le cordon dunaire est plus étroit et constitué de points bas.

L'anse des Sternes se présente sous la forme d'un renfoncement à l'Est du point dur que constitue la digue promenade du Professeur Debeyre. La largeur maximale de l'anse est de l'ordre de 350 m et sa superficie d'environ 20 ha. Le haut de plage est situé à environ +6 m IGN69. Les fonds dans l'anse sont compris entre 0 et +2 m IGN69.

3.1.2. Dans la zone d'extraction (pointe de Routhiauville)

Le levé topographique le plus récent couvrant la zone d'extraction (pointe de Routhiauville) est le levé de mars 2013, réalisé par GEOXYZ [06] dans le cadre de l'Avant-Projet Sommaire (Figure 4).

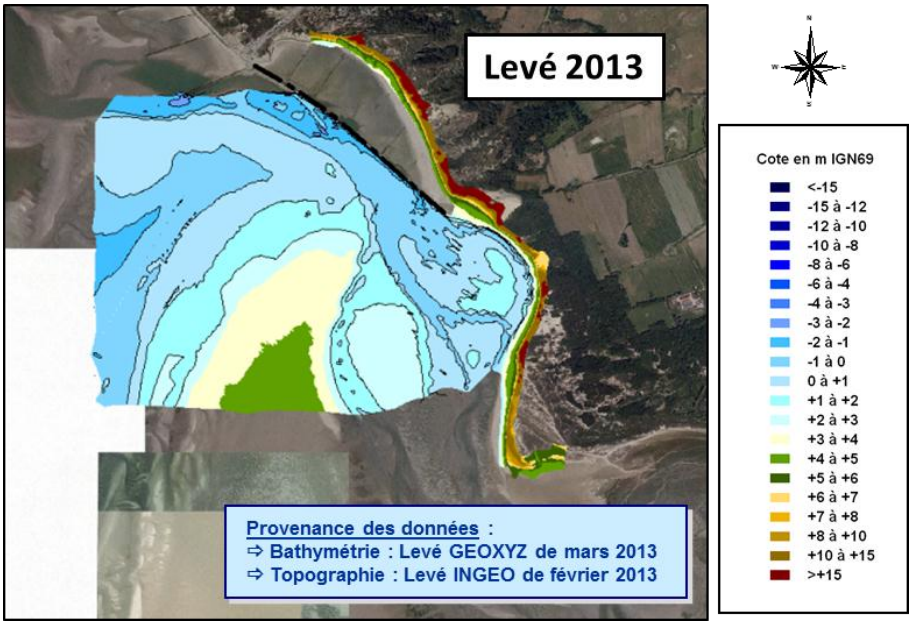


Figure 4. Topographie de la partie terminale de la pointe de Routhiauville (levé 2013)

Ce levé met bien en évidence la pointe de Routhiauville dont les altitudes maximales se situent aux alentours de +4,3 m IGN69 sur sa partie terminale. Dans la partie intérieure de la baie (à l'Est de la pointe), la topographie est complexe. Néanmoins, on observe nettement le chenal principal de l'Authie, d'une profondeur de 1 à 2 m et dont le fond se situe aux alentours de -0,2 à -0,5 m IGN69.

Il est possible également d'observer deux autres chenaux distincts formés par l'Authie, dont l'un faiblement creusé (+1,5 m IGN69) qui longe la face interne de la pointe de Routhiauville, et l'autre qui longe la plage en érosion du Bois de Sapins. Ce dernier chenal est assez étroit ; sa profondeur est d'environ 1 à 2 m, avec une altitude en fond de chenal située autour de 0 m IGN69.

Entre le chenal principal et le chenal Est, on observe une forme sédimentaire qui culmine à +1,7 m IGN69. Entre le chenal principal et le chenal Ouest, une forme sédimentaire similaire est présente, d'une superficie plus importante et avec des altitudes légèrement plus élevées, comprises entre +2 et +2,9 m IGN69.

3.1.3. Dans la zone de rechargement (Bois de Sapins)

Dans le cadre de la tranche conditionnelle n°1 du présent marché de Maîtrise d'œuvre, il est prévu la réalisation d'un levé topographique de l'estran sableux et du cordon dunaire dans le secteur du Bois de Sapins (zone de rechargement).

Ce levé a été réalisé par la SCP BLEARD LECOCQ les 16-17 juin 2014 (coeff. de marée = 95-99) et le 1er juillet (complément sur le cordon dunaire).

On notera les points particuliers suivants :

- Les levés ont été réalisés à pieds.
- Le levé de l'estran s'étend jusqu'à la rive nord du chenal principal de l'Authie ; la localisation du chenal de flot est reportée sur ce levé.
- Les levés du cordon dunaire ont été rendus difficiles par la forte densité de végétation et l'aspect chaotique du relief, ce qui a limité l'emprise du levé côté forêt.

Les repères utilisés sont les suivants :

- Système planimétrique : Lambert 93,
- Système altimétrique : m IGN69.

La figure suivante illustre le levé réalisé ; les principaux points notables y sont indiqués. Ce levé constitue la base des plans réalisés pour le projet (voir en annexe le plan topographique dans le cahier de plans de l'Avant-Projet).

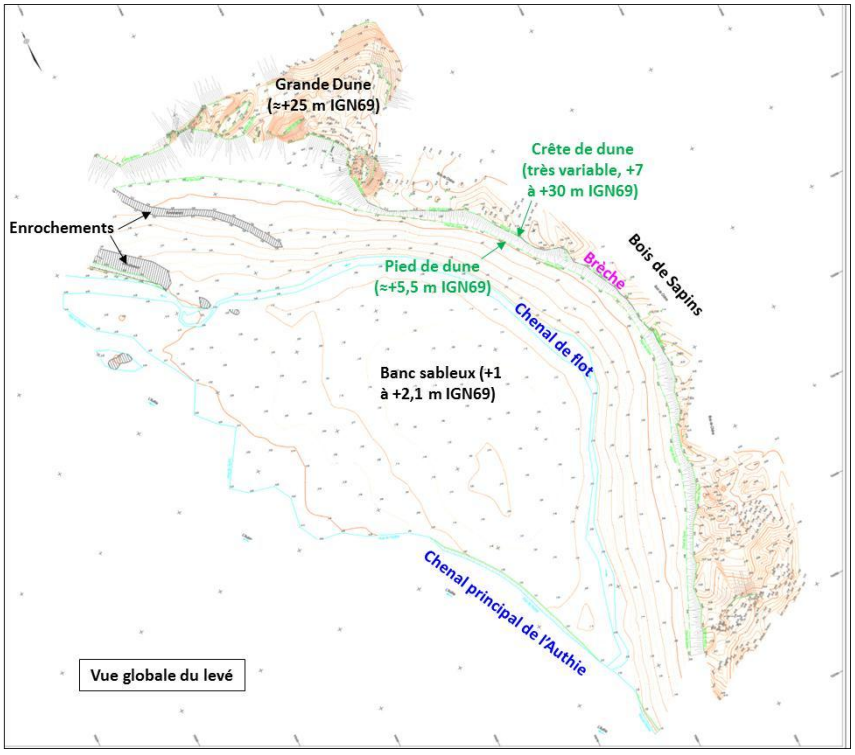


Figure 5. Vue d'ensemble du levé réalisé par Bleard-Lecocq en juin 2014

Ce levé confirme, pour la partie estran, l'existence du chenal Est qui s'appuie contre le cordon dunaire, et du « banc » localisé entre ce chenal et le chenal principal de l'Authie ; l'altitude de ce banc est comprise entre +1 et +2,1 m IGN69.

Le pied de dune se situe en moyenne autour de +5,5 m IGN69.

La crête de dune est très variable, comprise entre +7 m IGN69 au centre de la concavité et +30 m IGN69 vers la Grande Dune. Plus particulièrement, au centre de la concavité où le recul de la dune est le plus marqué, on observe une brèche avec des terrains situés entre +7 et +8 m IGN69 sur un linéaire d'environ 50 m. Cette zone constitue le point le plus critique et doit faire l'objet d'une attention particulière dans le cadre de ce projet (dans les scénarios de rechargement étudiés par la suite, le comblement de cette brèche est prévu).

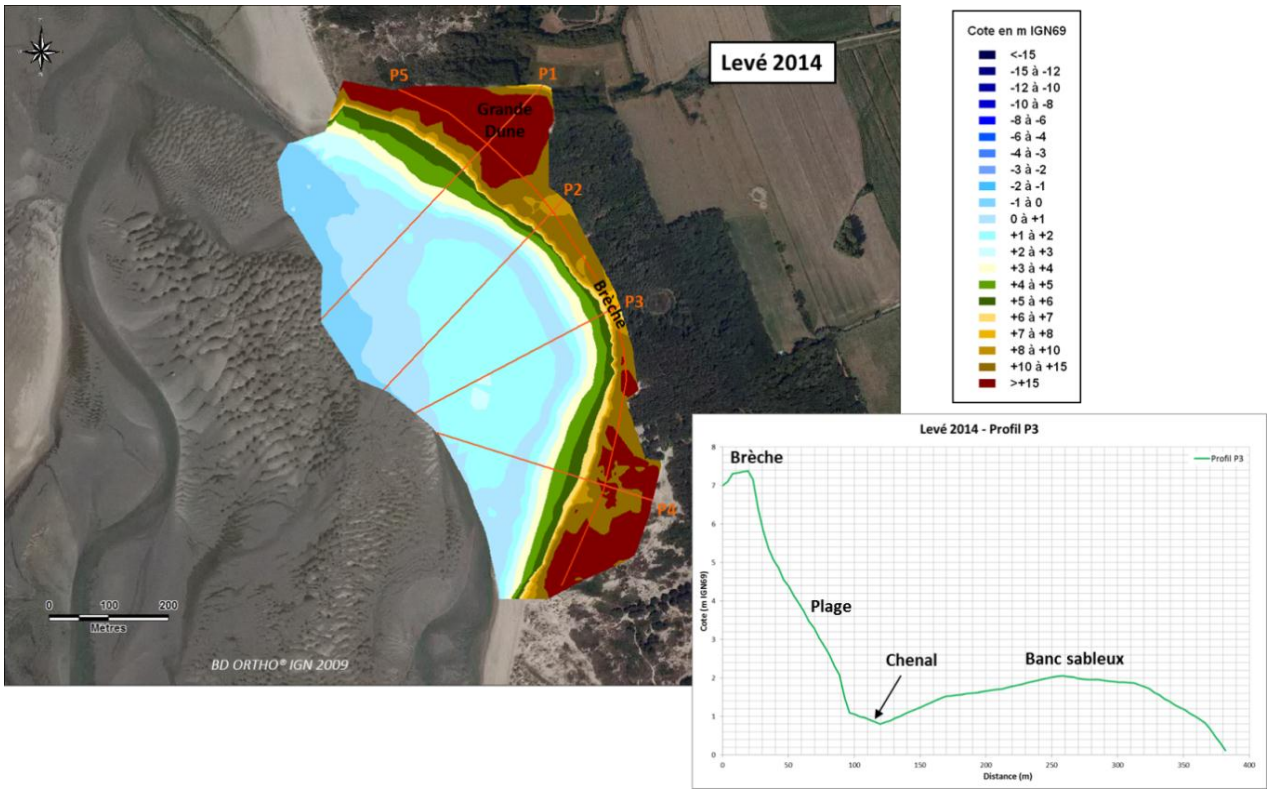


Figure 6. Topographie de la zone de rechargement considérée pour l'AVP (levé 2014)

Remarques importantes :

Les fonds de la baie sont très mobiles et la topographie du site évolue rapidement, comme en témoignent les photos ci-après prises à différentes dates entre juin 2014 et décembre 2015.

De plus, plusieurs opérations de rechargements d'entretien ont été réalisées par la CCOS depuis ce dernier levé de 2014 (3 rechargements de 3 000 m^3 en 2015 avec des sables en provenance de la plage de Berck), ainsi que la pose de dispositifs expérimentaux de maintien des sables dans la zone de rechargement (filet S-Able, pieux bois, big-bags) qui ont également contribué à modifier la morphologie du site.

Compte tenu de ces évolutions morphologiques rapides et continues, il conviendra d'actualiser la topographie du site et les caractéristiques du projet avant le lancement des phases travaux.

Figure 7. Vues du Bois de Sapins à différentes dates entre juin 2014 et décembre 2015

Sources des photos : ARTELIA, ADCMBA SOS Baie d'Authie

3.2. CADRE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE GENERAL

La baie d'Authie est située dans le cadre géologique du bassin parisien, au droit de formations rocheuses de craies datées du Crétacé supérieur qui constituent le principal substratum régional à l'exception du Boulonnais jurassique au Nord (Figure 8).

La structure tectonique régionale est reliée à celle du bassin de la Manche et est caractérisée par la succession du synclinal tertiaire du Weald-Hampshire au Sud-Ouest et de l'anticlinal Weald-Artois au Nord.

Un réseau de failles orientées Nord-Ouest - Sud-Est est associé à cette structure et conditionne vraisemblablement le tracé des fleuves côtiers, Somme, Authie et Canche, et ainsi les échancrures du littoral à leur débouché estuarien.

A une échelle plus locale, la carte géologique au 1/50 000 du BRGM montre dans la zone de projet un sol de nature « Dunes littorales récentes » pour le cordon dunaire du Bois de Sapins, et de type « Dépôts marins sur la ligne de rivage, cordons littoraux et pouliers » au niveau de l'estran et de la pointe de Routhiauville (Figure 9).

Dans le cadre de la présente Maîtrise d'œuvre, une étude géotechnique complémentaire, de type G1 PGC (Principes Généraux de Construction), a été réalisée fin 2015 dans le but de déterminer la faisabilité du rechargement massif du Bois de Sapins par voie terrestre avec traversée de l'Authie. Ces reconnaissances ont consisté en plusieurs sondages positionnés dans la zone de projet afin de connaître la nature des sols et des essais de roulage afin d'apprécier la portance des sols ; les résultats et conclusions de cette étude sont présentés au chapitre 6.

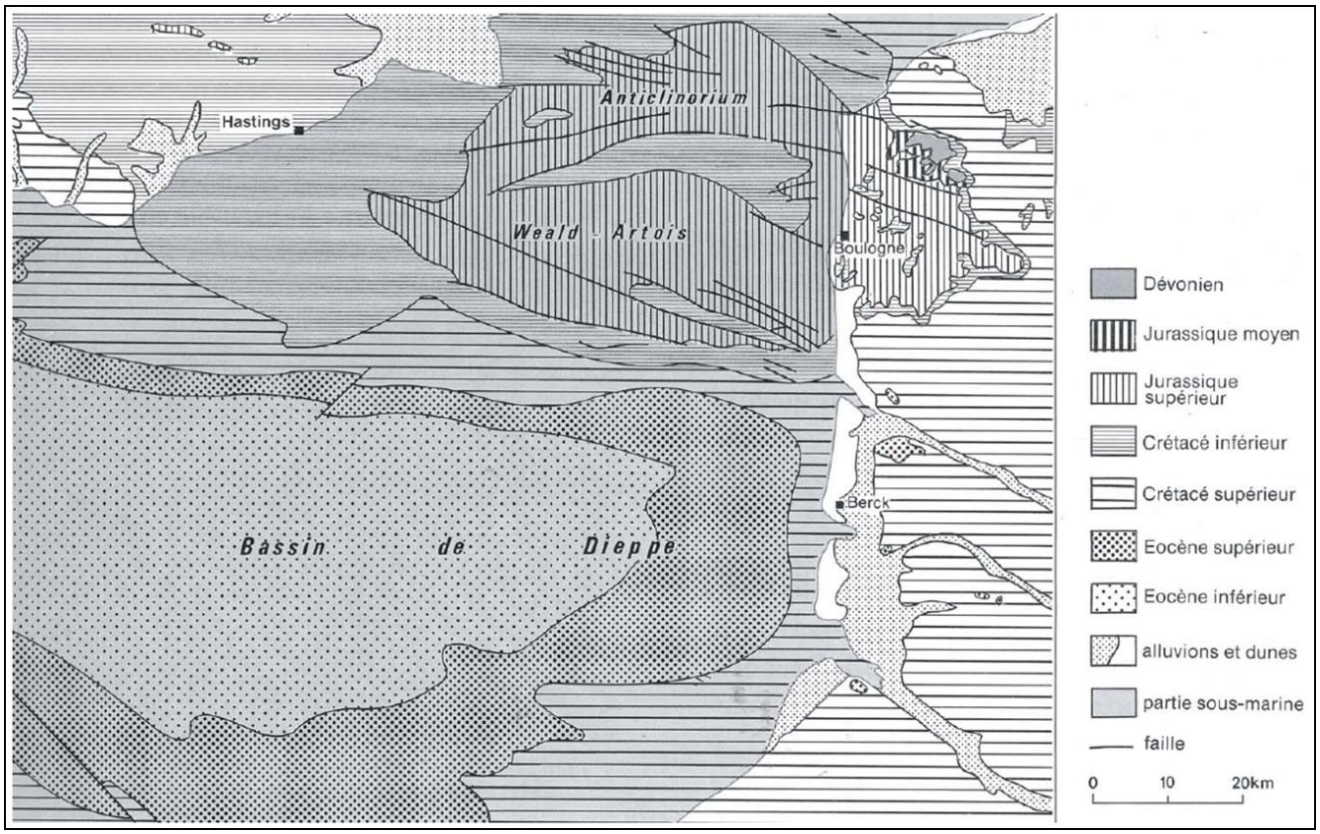


Figure 8. Carte géologique et structurale de la zone côtière du Nord-Pas-de-Calais

Source : Augris et al., 1990 [07]

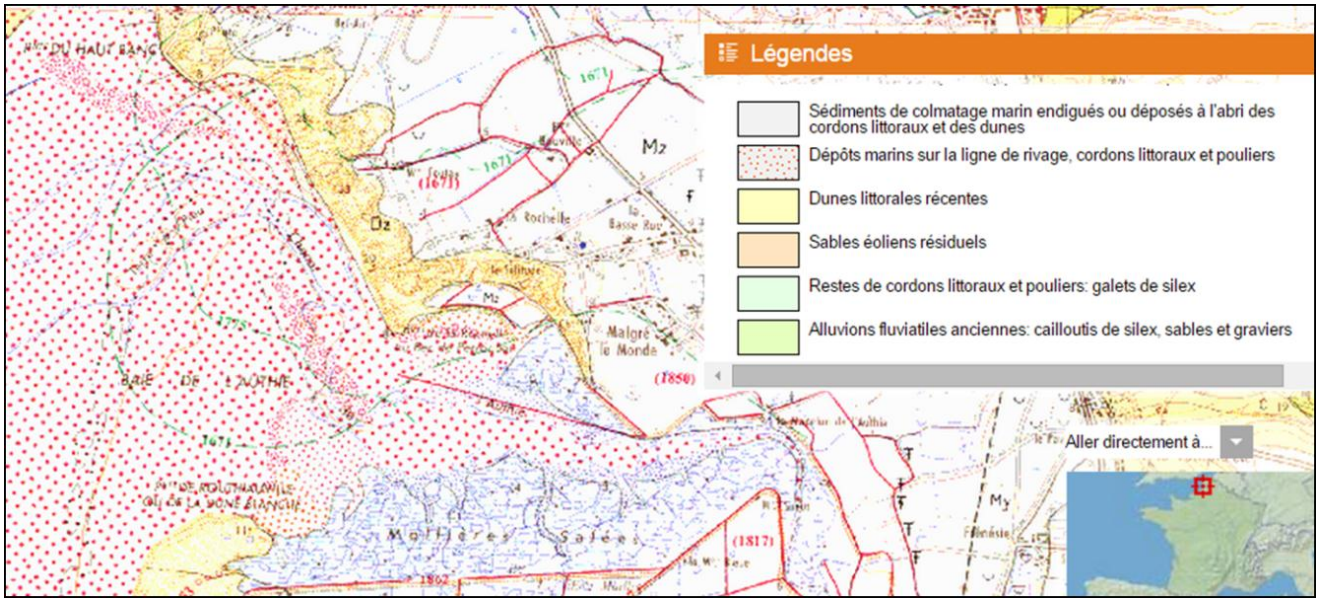


Figure 9. Extrait de la carte géologique au 1/50 000 du BRGM en baie d'Authie

Source : www.infoterre.fr

3.3. NATURE SEDIMENTAIRE

La bibliographie ([08] et [09]) indique que les sédiments couvrant les petits fonds au large de l'estuaire de l'Authie sont des sables fins à moyens de diamètre médian D_{50} compris entre 0,2 et 0,5 mm, avec le long de la côte, de part et d'autre de l'embouchure, une granulométrie moyenne de 0,2 mm.

Par ailleurs, les résultats des campagnes de prélèvements réalisées en 1994 et en 1998 par le GEMEL et C. Dobroniak [10] montrent que dans la partie Nord-Ouest de la baie, les sédiments sont très bien classés avec un diamètre médian compris entre 0,15 et 0,3 mm (Figure 10).

Le sédiment est toutefois plus grossier près du chenal de l'Authie où l'on trouve parfois une fraction significative de graviers.

Dans la partie aval élargie de la baie, le diamètre médian du sédiment est de l'ordre de 0,2 à 0,3 mm, avec des sédiments globalement plus grossiers sur le banc de la pointe de Routhiauville et au niveau du Bec de Perroquet.

Dans la partie amont de la baie, le diamètre médian reste de l'ordre de 0,2 à 0,25 mm à proximité du chenal, mais il peut descendre en-dessous de 0,1 mm dès que l'on s'approche ou l'on atteint les zones de slikkes et de mollières.

La fraction vaseuse (sédiments cohésifs de diamètre inférieur à 0,063 mm) reste peu représentée dans la baie. Le pourcentage de vase est en effet très faible dans toute la partie aval de la baie (inférieur à 5%). Il reste faible dans la partie amont tant que l'on reste hors des zones de slikkes et de mollières. Au niveau de ces dernières, la fraction vaseuse peut par contre dépasser aisément 30%. Les teneurs maximales en vase sont observées dans les zones de méandrement du chenal de l'Authie et dans les chenaux secondaires qui entaillent les mollières, c'est-à-dire dans les zones les plus abritées qui se trouvent en fond de baie.

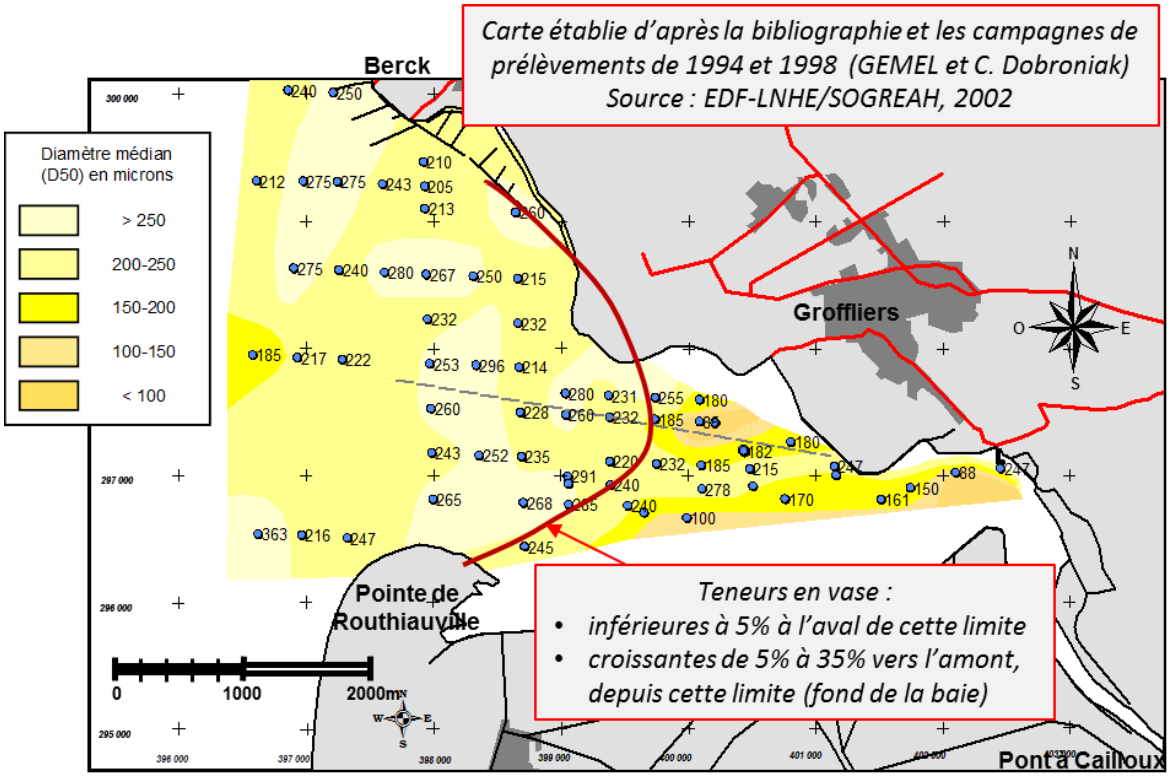


Figure 10. Campagnes de 1994 et 1998 - D50 du sédiment et teneurs en vase

Ces éléments ont été confirmés dans la zone de projet par les 30 prélèvements d'échantillons de sables en surface effectués le 04 mars 2013 par la société Gallia Sana [11] (Figure 11) :

- Secteur de la pointe de Routhiauville : Les sédiments sont caractérisés par la présence de sables fins à moyens d'un diamètre médian compris entre 0,20 mm < D_{50} < 0,33 mm. On observe une différence entre les sédiments situés sur l'extrémité Nord de la pointe qui sont plus fins que ceux de la partie Sud de la pointe.
- Secteur du Bois de Sapins : Le sable local présente les mêmes caractéristiques que celles de la pointe de Routhiauville avec des sables fins à moyens d'un diamètre médian compris entre 0,20 mm < D_{50} < 0,32 mm. Il est possible de différencier les sédiments situés au Nord qui sont un peu plus grossiers que ceux de la plage du Bois de Sapins.

Figure 11. Campagne de mars 2013 - D50 du sédiment

Enfin, les essais en laboratoire menés sur les échantillons de sédiments prélevés dans la zone de projet fin 2015, dans le cadre des reconnaissances géotechniques complémentaires (voir §6.3.4), indiquent que :

- Les teneurs en fines sont faibles.
- Le diamètre médian D_{50} varie de 0,20 à 0,25 mm, ce qui est cohérent avec les campagnes sédimentologiques précédentes.

Ces résultats mettent en évidence la compatibilité des sables entre la zone d'extraction (pointe de Routhiauville) et la zone de rechargement (Bois de Sapins).

3.4. CONDITIONS METEO-OCEANIQUES

3.4.1. Les niveaux d'eau

3.4.1.1. Niveaux de marée astronomique

La marée sur le littoral de la Côte d'Opale est de type semi-diurne, avec deux pleines mers et deux basses mers journalières, d'une période de 12h25 en moyenne.

L'onde de marée se propage d'Ouest en Est, depuis l'Atlantique vers la Mer du Nord. Le régime de marée est macrotidal, c'est-à-dire caractérisé par de forts marnages (supérieurs à 4 m en vive-eau), du fait de l'amplification de l'onde de marée sur la bathymétrie peu profonde de la Manche et de l'étroitesse du bassin couvert par cette dernière.

Les niveaux caractéristiques de la marée à Berck sont fournis dans le tableau suivant (données SHOM 2012, [12]). Le zéro hydrographique (niveau des plus basses mers) est à la cote -4,95 m IGN69 à Berck. Le niveau moyen est à +0,42 m IGN69.

Tableau 1 – Niveaux caractéristiques de la marée à Berck (SHOM, 2012)

Marée	Basse mer (BM)	Pleine mer (PM)	Marnage
Plus basse/haute mer astronomique	-4,66 m IGN69	+5,59 m IGN69	10,25 m
Vive-Eau Moyenne (C=95)	-3,75 m IGN69	+4,75 m IGN69	8,50 m
Morte-Eau Moyenne (C=45)	-2,10 m IGN69	+2,95 m IGN69	5,05 m

Des mesures de niveau d'eau ont été réalisées de septembre à novembre 1997, sur deux cycles de 15 jours, en trois stations [13] : Berck, la Madelon et le Pont à Cailloux (Figure 12).

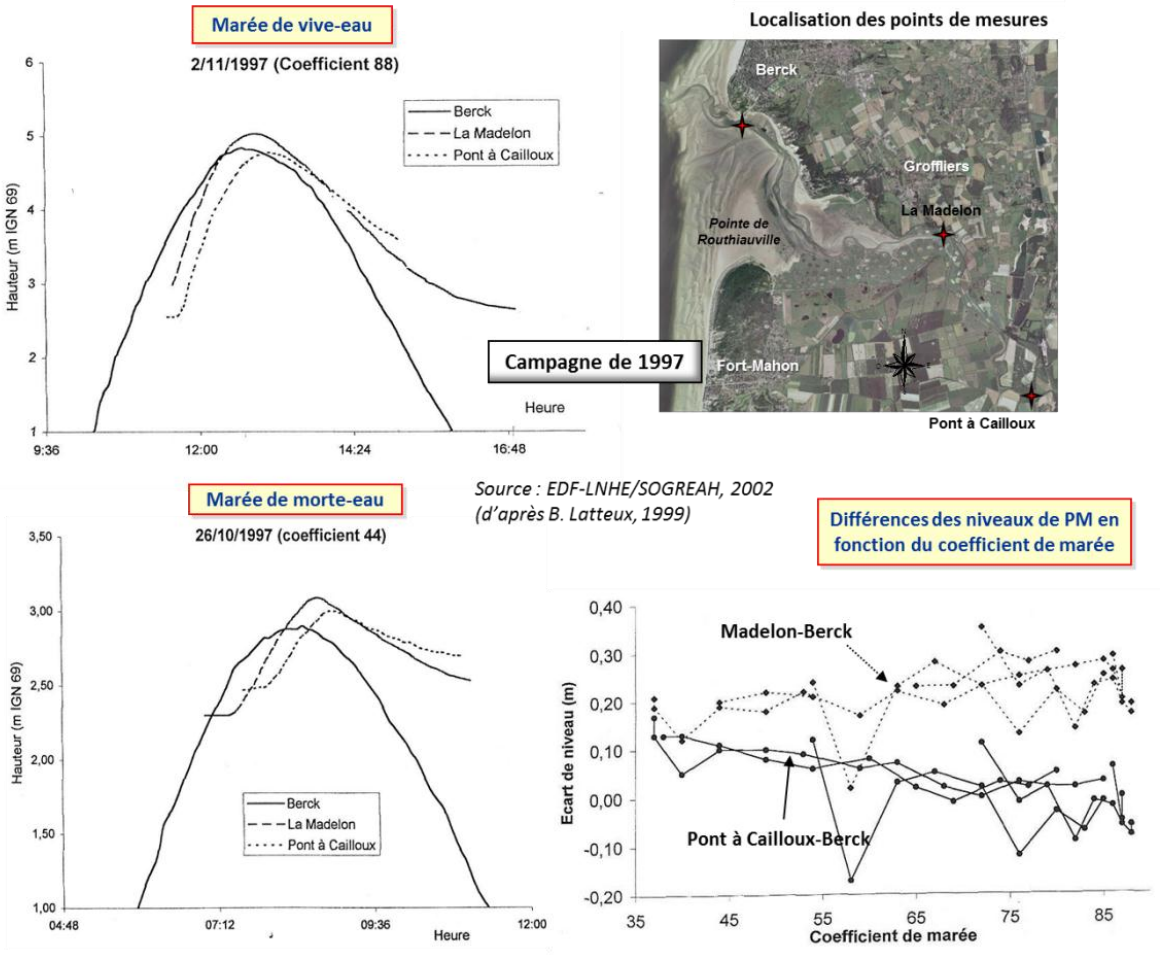


Figure 12. Campagne de 1997 - Mesures de niveau d'eau en baie d'Authie

La différence des niveaux de pleine mer à la Madelon et au Pont à Cailloux par rapport à la pleine mer à Berck atteint respectivement en moyenne 22 cm et 2 cm ; l'écart croît avec le coefficient de marée à la Madelon, cependant qu'il décroît, par frottement, au Pont à Cailloux. Par ailleurs, le retard des pleines mers à la Madelon et au Pont à Cailloux par rapport à la pleine mer à Berck atteint respectivement en moyenne 8 minutes et 23 minutes, avec des écarts plus importants en morte-eau qu'en vive-eau. Ces résultats montrent que, quel que soit le coefficient de marée, les courbes de marée sont fortement dissymétriques avec un montant plus court que le perdant.

Des mesures de niveau d'eau ont également été réalisées par iXSurvey [14] en deux points de la baie lors de la campagne de février-mars 2013, menée dans le cadre de l'Avant-Projet Sommaire (Figure 13). Les hauteurs d'eau mesurées au point C sont nettement supérieures à celles mesurées au point A (le point C étant plus profond que le point A).

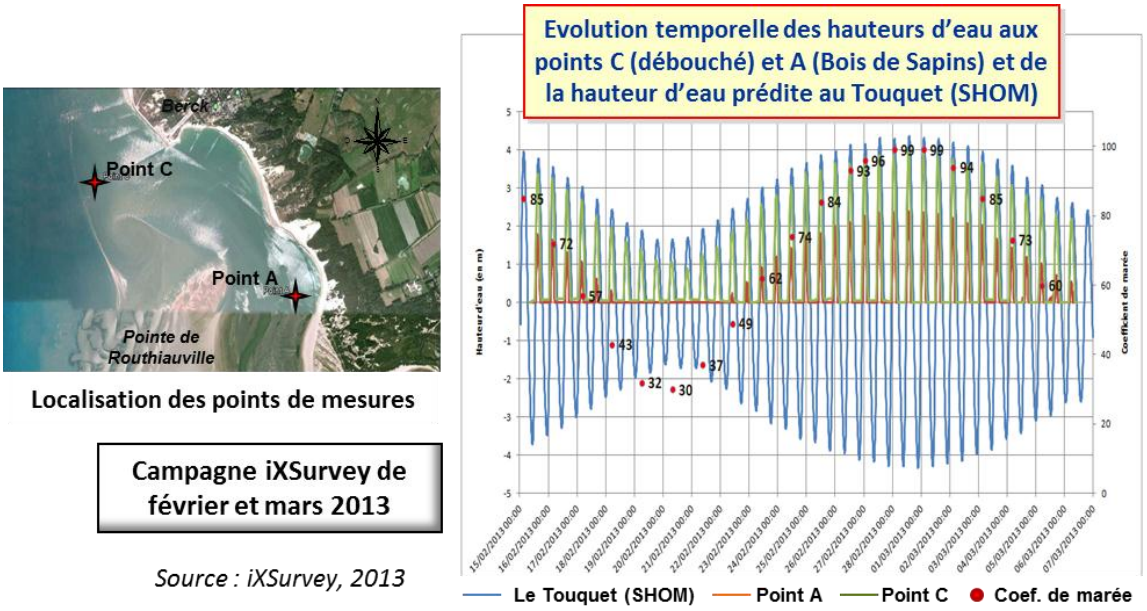


Figure 13. Campagne de février-mars 2013 - Mesures de niveau d'eau en baie d'Authie

Du fait de la faible pente du cours de l'Authie, l'onde de marée peut remonter loin en amont de l'embouchure, jusqu'à environ 15 km en amont du Pont à Cailloux pour des coefficients de marée supérieurs à 95, à pleine mer, et en étiage [15].

3.4.1.2. Surcotes dues aux évènements météorologiques

A ces niveaux de marée peuvent se superposer des surcotes dues aux variations de la pression atmosphérique et à l'effet du vent. Les données de surcotes sont fournies ici à titre indicatif : les niveaux extrêmes considérés pour le projet sont issus d'une analyse combinée de la marée et des surcotes, comme détaillé dans le paragraphe suivant.

Les travaux menés par P.A. Pirazzoli, dans le cadre du projet DISCOBOLE, indiquent les surcotes extrêmes suivantes à Boulogne-sur-Mer [16] :

Tableau 2 – Surcotes extrêmes estimées à Boulogne-sur-Mer (P.A. Pirazzoli, 2008)

Périodes de retour	Surcotes à Boulogne-sur-Mer
10 ans	1,80 m
50 ans	2,10 m
100 ans	2,20 m

3.4.1.3. Niveaux extrêmes de pleine-mer

L'estimation des niveaux extrêmes le long des côtes françaises a fait l'objet de plusieurs études. L'étude considérée ici et qui fait référence en France est l'étude du SHOM/CETMEF [17]. Elle date initialement de 2004 (Simon, 2004), et a fait l'objet de mises à jour en 2008, puis en 2012.

En dehors des ports principaux, les résultats doivent être lus sur des cartes indiquant les iso-niveaux (niveaux extrêmes de pleine-mer référencés en IGN69) pour une période de retour donnée. Les éditions les plus récentes de ce document incluent les cartes des périodes de retour 10, 20, 50 et 100 ans.

Les cartes traitant le site à l'étude sont les cartes « Manche Est » couvrant la façade s'étendant de la frontière franco-belge à Fécamp (exemple à la Figure 14 pour la période de retour 100 ans).

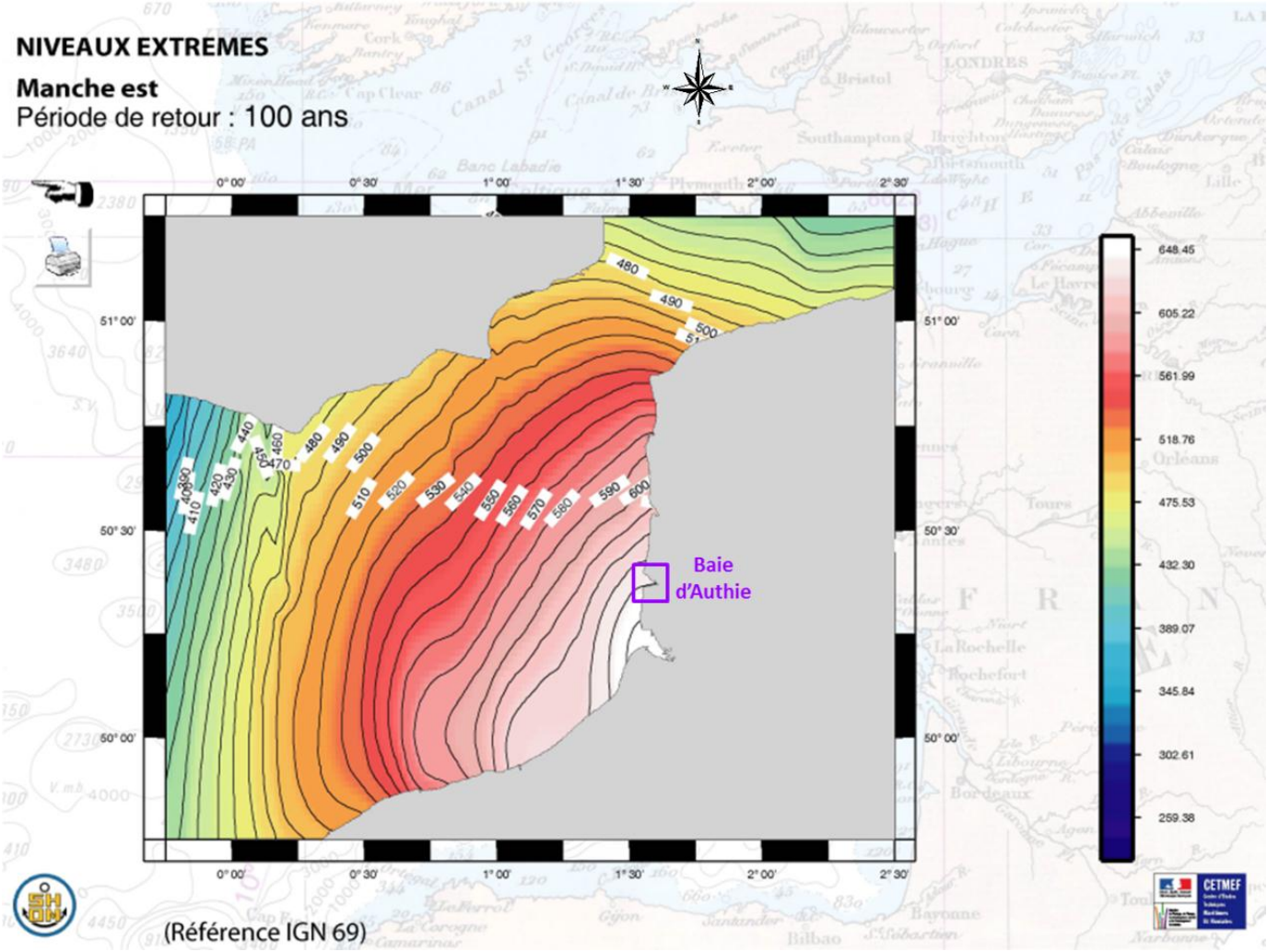


Figure 14. Carte de niveau extrême de pleine-mer, période de retour 100 ans

Source : SHOM/CETMEF, 2008

Ces cartes correspondent à l'édition 2008 pour suivre les conseils d'utilisation émis par le SHOM/ CETMEF début 2013 dans sa « Note méthodologique relative au produit *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France* Edition 2012 » [18], qui indique de « retenir les valeurs des estimations de niveaux marins du produit 2012 aux ports principaux et en dehors de ces ports, par sécurité, retenir la valeur maximum entre le niveau marin proposé dans le produit de 2008 et celui du produit 2012 ». Sur le littoral d'étude, les valeurs maximales sont celles de l'édition 2008.

La lecture des cartes 2008 du SHOM/CETMEF au droit de la baie d'Authie (ces résultats ne sont pas valables en zone estuarienne) fournit les niveaux extrêmes de pleine-mer suivants :

Tableau 3 – Niveaux extrêmes de PM au droit de la baie d'Authie (SHOM/CETMEF, 2008)

Périodes de retour	Niveaux extrêmes de pleine-mer
10 ans	+6,10 m IGN69
20 ans	+6,20 m IGN69
50 ans	+6,30 m IGN69
100 ans	+6,40 m IGN69

NB : Les niveaux extrêmes fournis ci-dessus n'intègrent pas les contributions liées au déferlement de la houle (set-up : surélévation du niveau d'eau en zone côtière), et au changement climatique (élévation du niveau moyen de la mer à moyen/long terme).

A l'intérieur de la baie, les cartes d'aléas établies par modélisation numérique dans le cadre du PAPI BSA indiquent des hauteurs d'eau maximales pour l'état de référence 2015, au droit du Bois de Sapins, de +6,5 m IGN69 et +6,8 m IGN69 respectivement pour les évènements maritimes de période de retour 10 ans et 100 ans [03]. Notons que ces résultats tiennent compte de l'ensemble des processus hydrodynamiques dans la baie, dont l'action du vent et de la houle.

3.4.1.4. Effets du changement climatique

Afin de fournir un cadre de référence pour les études sur les impacts du changement climatique et les mesures d'adaptations possibles, l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) a proposé des valeurs de référence pour l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle nationale (France métropolitaine) aux horizons 2030, 2050 et 2100.

En se basant sur les rapports du GIEC et les débats scientifiques actuels, l'ONERC a proposé les hypothèses suivantes [19] :

Tableau 4 – Projections d'élévation du niveau de la mer (ONERC, 2010)

Hypothèse	2030	2050	2100
Optimiste	+0,1m	+0,17m	+0,40m
Pessimiste	+0,14m	+0,25m	+0,60m
Extrême	+0,22m	+0,41m	+1m

Projections d'élévation de la mer par rapport à aux valeurs de la fin du XXème siècle (*source : ONERC, 2010*)

Conformément au CCTP, l'hypothèse pessimiste de l'ONERC a été considérée pour le projet.

3.4.2. Les vents

Les données de Météo-France relevées sur la période 1980-1994 à la station météorologique du Touquet, située à environ 15 km au Nord de Berck, montrent que les vents dominants proviennent du secteur Sud-Ouest à Ouest ; ils représentent 24% des observations, toutes classes de vitesses confondues (Figure 15).

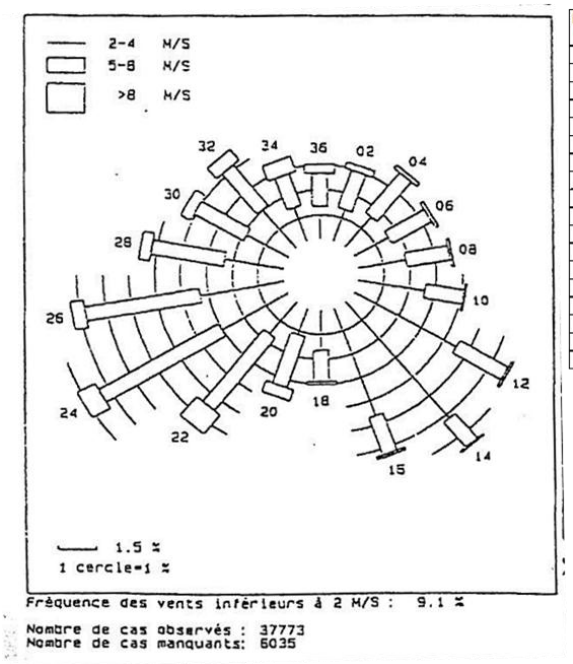
Les vents soufflant sur le littoral d'étude ont pour la plupart des vitesses comprises entre 2 et 8 m/s (84,6% des observations). Les vents ayant une vitesse supérieure à 8 m/s représentent 6,3% des observations, alors que 9,1% sont des vents calmes (<2 m/s).

Les vents les plus forts (>8 m/s) proviennent bien en majorité du secteur marin avec 5,1% des observations pour le secteur 200 à 360°N, ce qui correspond à 81% de l'ensemble des vents de cette classe de vitesses. Il en est de même pour les vents de vitesses comprises entre 5 et 8 m/s, avec 25,3% des observations pour le secteur marin, soit environ 63% de l'ensemble des vents de cette classe de vitesses. Pour ces deux classes, le secteur Sud-Ouest à Ouest est prédominant.

En revanche, pour les vents plus faibles de vitesses comprises entre 2 et 4 m/s, les vents de terre sont majoritaires avec 25,8% des observations pour le secteur terrestre (20 à 180°N), contre 18,5% pour le secteur marin (200 à 360°N), avec une prédominance cette fois-ci pour le secteur Sud-Est.

Du fait d'un fort marnage et donc d'une grande étendue de plage découverte à marée basse, les vents les plus forts sont responsables de transports éoliens importants dirigés en majorité vers le Nord-Est.

Les vents les plus violents sont principalement observés en période hivernale, entre octobre et mars.



Direction moyenne (°N)	N° classe	2 à 4 m/s	5 à 8 m/s	> 8 m/s	Total
20	2	1.3	1.6	0.3	**3.2**
40	4	1.6	2.1	0.2	**3.9**
60	6	1.5	1.8	0.1	**3.4**
80	8	1.9	1.7	0.1	**3.7**
100	10	2.6	1.5	0.1	**4.2**
120	12	4.5	2.1	0.1	**6.7**
140	14	6.2	1.3	0.1	**7.6**
160	16	4.6	1.6	0.1	**6.3**
180	18	1.6	1.3	0.1	**3**
200	20	1.2	2.2	0.5	**3.9**
220	22	1.7	3.8	1	**6.5**
240	24	3.1	5.2	0.8	**9.1**
260	26	3.3	4.5	0.5	**8.3**
280	28	2.4	2.7	0.4	**5.5**
300	30	1.9	2.2	0.4	**4.5**
320	32	2.1	2.1	0.5	**4.7**
340	34	1.5	1.3	0.6	**3.4**
360	36	1.3	1.3	0.4	**3**
		44.3	**40.3**	**6.3**	**90.9**

Sur la base de valeurs tri horaires de vitesses de 00 à 21h

Fréquences cumulées annuelles (%) des vents par direction et vitesse au Touquet

Données sur la période 1980-1994

Source : Météo-France

Figure 15. Fréquences des vents au Touquet par classes de direction et de vitesse

3.4.3. Les courants

Les résultats de la campagne de mesures de courants réalisée par C. Dobroniak en 1999 au droit et dans la baie d'Authie [08], amènent les commentaires suivants (Figure 16) :

- La rose des courants au point A montre la dominance des courants de flot portant vers le Nord-Nord-Est, avec des pics de vitesse dépassant 0,4 m/s en vive-eau. Les courants de jusant sont orientés Sud-Ouest et ne dépassent pas 0,2 m/s. Ce signal est typique de ceux des plages de la région, caractérisées par une forte composante de courant Sud-Nord en dehors des zones d'embouchure (même comportement général des courants au point C).
- Au niveau de l'embouchure de l'Authie (point B), le jusant est plus puissant (<1,15 m/s) que le flot (<0,85 m/s). Il s'agit vraisemblablement d'un effet de chasse du jusant canalisé dans l'Authie. Au point B, le flot atteint son maximum vers PM-2h et est alors orienté à l'Est pour pénétrer dans l'estuaire ; le jusant atteint son maximum dès PM+2h, il est alors dirigé plein Ouest. La renverse des courants vers l'Ouest s'amorce dès PM+0h15.

- On assiste au niveau de l'embouchure de l'Authie à un éclatement des directions des courants de marée (point B), qui entraîne une désorganisation des transits soutenus quasi-unidirectionnels vers le Nord (point A). Le fort effet de chasse observé au point B joue un rôle important dans le maintien de l'ouverture du chenal de l'Authie contre la tendance à la fermeture induite par la dérive littorale Sud-Nord.
- A l'intérieur de la baie, la courantologie s'avère beaucoup plus complexe. Dans l'anse des Sternes, le flot passe par la brèche située dans la partie centrale de la digue submersible et commence peu à peu à remplir l'anse de chaque côté de la brèche. Lorsque la digue submersible est franchie, l'anse continue de se remplir avec des courants de flot orientés vers l'Est, d'une vitesse maximale de 0,2 m/s. La vidange s'effectue ensuite par-dessus la digue grâce à des courants de jusant dirigés vers l'Ouest, d'une vitesse maximale de 0,35 m/s. Enfin, dès que la digue n'est plus franchissable, la vidange continue par la brèche.
- Au niveau du Bois de Sapins (point D), les courants sont fortement canalisés par le chenal puis, plus au Sud, par le banc de Routhiauville et la flèche du Bec de Perroquet. L'arrivée du flot est brutale ; il est dirigé vers le SSE et sa vitesse maximale est de l'ordre de 1 m/s en vive-eau moyenne, atteinte vers PM-1h30. Le courant de jusant est dirigé vers le Nord et son intensité est plus faible, avec un maximum de 0,5 m/s atteint vers PM+1h30.
- Entre les mollières (point E), les pics de vitesse sont très élevés : le flot, portant vers le Nord-Est, atteint une vitesse maximale de 1,75 m/s en vive-eau ; le jusant, dirigé vers le Sud-Ouest, atteint une vitesse maximale de 1 m/s.
- En allant vers le fond de baie (point F), le flot n'est plus dominant : il porte vers l'Est avec une vitesse maximale de 0,4 m/s, tandis que le jusant est dirigé vers l'Ouest avec un pic de vitesse de l'ordre de 0,8 m/s. On observe en fond de baie une nette asymétrie en faveur du jusant, du fait de l'effet de chasse du volume tidal renforcé par le chenal étroit du fleuve.

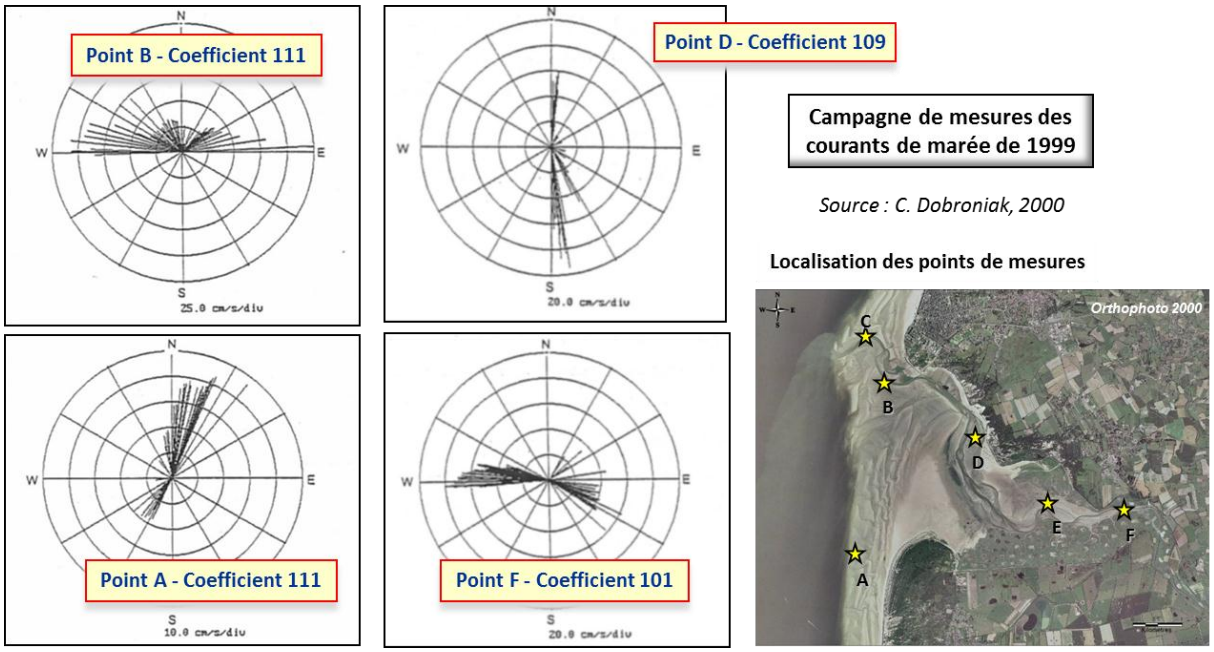


Figure 16. Campagne de 1999 - Mesures des courants en baie d'Authie

Cette dynamique des courants de marée est confirmée par les mesures effectuées par iXSurvey en deux points de la baie lors de la campagne de février-mars 2013 [14]. Les conclusions de cette campagne sont les suivantes (Figure 17) :

- Au point A (Bois de Sapins), le flot porte au Sud et le jusant au Nord. Les directions des courants sont homogènes sur la verticale et à chaque moment de la marée. Les courants les plus forts sont mesurés près du fond.

- Au point C (embouchure de l'Authie), le flot porte au Nord-Est et le jusant à l'Ouest. En ce qui concerne les vitesses des courants, on observe le même phénomène qu'au point A.
- Les vitesses les plus fortes ont été mesurées au point A. De plus, les pics de vitesses pour le point A ont lieu à marée montante, alors que les pics de vitesses au point C ont lieu à marée descendante.
- Au niveau du point A, les directions sont très marquées lors des différentes marées. En revanche, au point C, les directions sont plus éparses avec une rotation par le Nord au cours de la renverse de pleine mer.

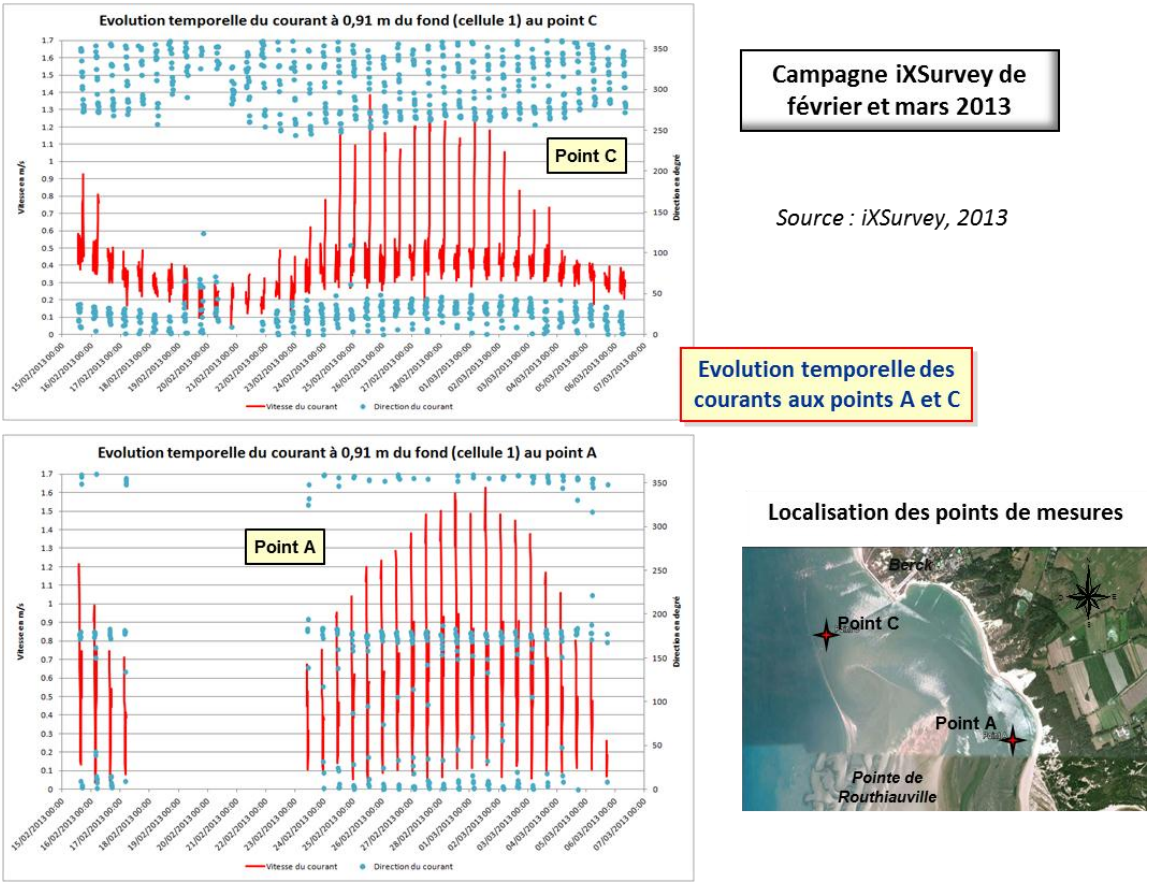


Figure 17. Campagne de février-mars 2013 - Mesures des courants en baie d'Authie

Cette dynamique des courants a été reproduite par une modélisation numérique hydrodynamique (TELEMAC-3D) dans le cadre de la présente étude d'Avant-Projet (voir chapitre 5). L'analyse des résultats pour l'état référence 2014 amène les conclusions suivantes (Figure 18) :

- Les courants sont fortement canalisés entre l'extrémité nord de la pointe de Routhiauville et la digue submersible des Sternes (max de 1,7 m/s au flot et de 1,5 m/s au jusant), ainsi qu'au droit du Bec de Perroquet (max de 2 m/s au flot et au jusant) du fait de la présence d'un banc central qui divise le chenal principal de l'Authie en deux bras.
- Au niveau de la zone de rechargement projetée (Bois de Sapins), la morphologie actuelle très « creusée » de l'anse liée au fort recul de la dune, ainsi que la présence d'un banc sur l'estran au droit du site, semblent aujourd'hui conduire dans la concavité à une entrée préférentielle du jusant qui est légèrement plus marqué contre le rivage (0,3 à 0,7 m/s) ; plus bas sur l'estran, le flot reste prépondérant (0,5 à 1,1 m/s).
- Au niveau de la zone de dragage projetée (flanc interne de la pointe de Routhiauville), les courants sont plus forts au jusant et peuvent atteindre jusqu'à 1,7 m/s.

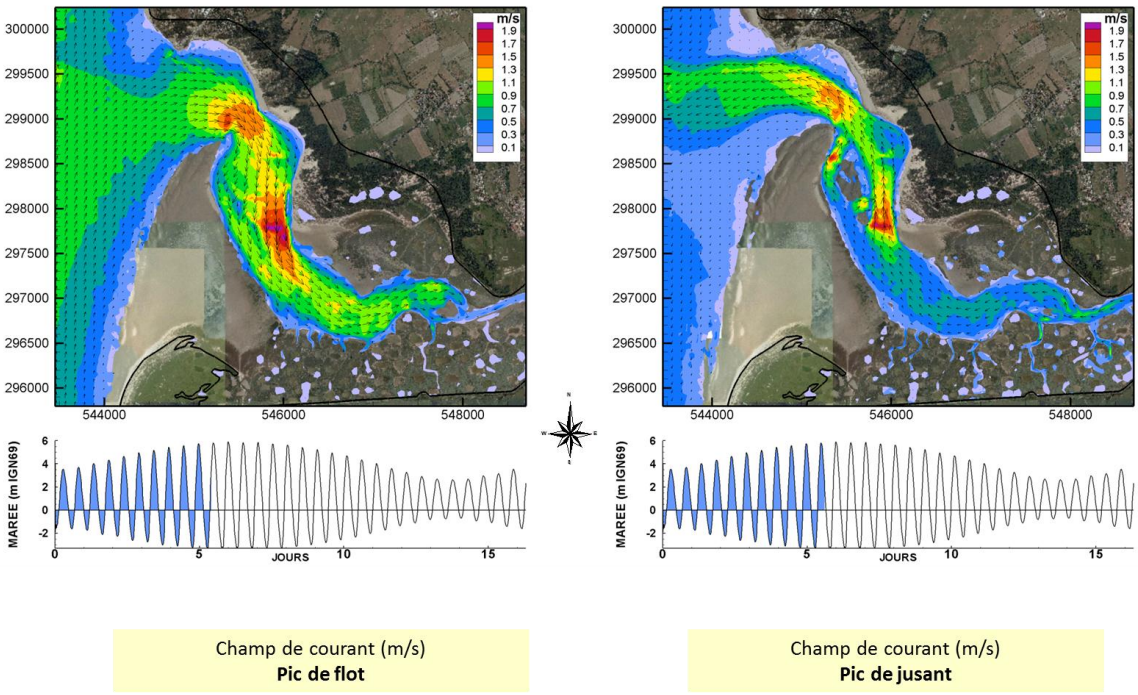


Figure 18. Etat référence 2014 - Champs de vitesses moyennes verticales

3.4.4. Les houles

3.4.4.1. Les houles du large

Les données de houles disponibles au large de la baie d'Authie sont issues de la base de données ANEMOC (Atlas Numérique d'Etats de Mer Océaniques et Côtiers) aux points suivants (Figure 19):

- Point COAST 3013 : climat annuel moyen des houles,
- Point COAST 2671 : estimation des valeurs extrêmes de hauteur de houle H_{m0}.

Cette base de données d'états de mer a été construite à partir de simulations numériques par EDF -LNHE/CETMEF, sur une période de 23 ans et 8 mois, du 01/01/1979 au 31/08/2002.

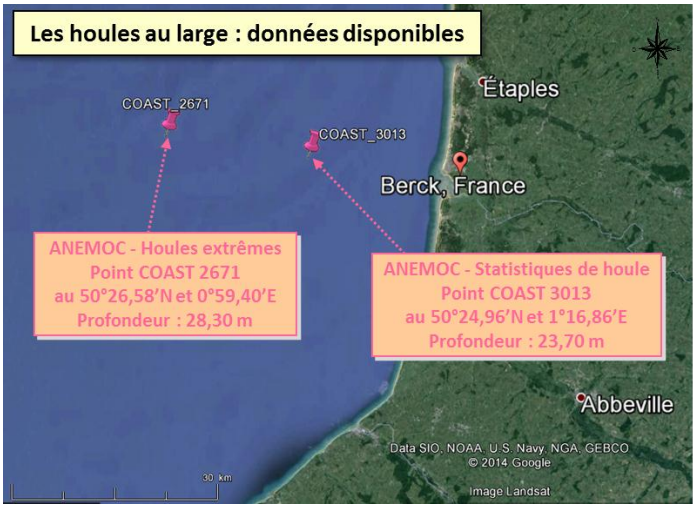


Figure 19. Les données de houles disponibles au large de la baie d'Authie

Point COAST 3013 - Climat annuel moyen des houles :

La Figure 20 donne successivement les corrélogrammes H_{mo}/Dir_{moy} et H_{mo}/T_{pic} et les histogrammes (en direction, hauteur et période) issus de la base de données ANEMOC au point COAST 3013, localisé à environ 20 km au large de la baie d'Authie.

Ces données montrent que :

- 94% des houles du large sont inférieures à 2 m et seulement 2,7% dépassent 3 m.
- Le secteur OSO à Nord est majoritairement représenté, avec un pic d'occurrences pour le secteur OSO-ONO (environ 64% entre 255°N et 285°N), et plus particulièrement pour la direction Ouest (un peu plus de 46%).
- Les houles les plus fortes proviennent du secteur Ouest et peuvent atteindre plus de 6 m.
- Les périodes de pic sont majoritairement comprises entre 5 et 10 s (87%), avec une prédominance de la classe 6-8 s (57%). Pour les houles les plus fortes, les périodes sont plutôt comprises entre 8 et 10 s et peuvent même atteindre 12 s.

Corrélogramme Hm0 / DirMoy - ANEMOC_COAST_3013 - annuel

Hm0 (m)	DirMoy (degrés)																								
0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	360	Total
0.5	62.38	13.46	0.07	0.00	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.05	0.05	0.04	0.14	1.01	146.81	62.18	32.00	24.11	19.87	22.37	27.73	412.41
1	38.47	11.39	1.38	0.49	0.41	0.34	0.06	0.06	0.05	0.03	0.07	0.08	0.13	0.29	0.58	1.97	13.02	180.87	25.12	9.93	6.95	7.15	7.97	12.79	319.62
1.5	7.35	4.34	0.50	0.07	0.03	0.04					0.02	0.02	0.19	0.66	1.51	4.38	25.25	73.52	8.72	2.34	2.33	1.82	2.26	3.04	138.41
2	1.73	0.59											0.01	0.20	1.08	4.44	19.53	30.74	4.93	1.29	0.65	0.54	0.46	0.70	66.90
2.5	0.29	0.01												0.09	0.46	2.27	9.00	15.35	2.70	0.44	0.11	0.09	0.21	0.24	31.27
3	0.06													0.05	0.12	1.07	4.75	8.70	0.99	0.05	0.03	0.01	0.00	0.02	15.87
3.5														0.01	0.06	0.29	1.80	4.43	0.43	0.01					7.04
4														0.00	0.02	0.14	0.70	1.76	0.20						2.83
4.5																0.02	0.14	0.79	0.14						1.10
5																	0.06	0.34	0.00						0.41
5.5																	0.01	0.13							0.14
6																		0.12							0.12
6.5																		0.03							0.03
Total	110.28	29.80	1.95	0.57	0.46	0.39	0.08	0.07	0.06	0.03	0.11	0.13	0.39	1.36	3.88	14.74	75.26	463.61	105.42	46.06	34.19	29.49	33.28	44.51	

Les valeurs du tableau sont exprimées en "pour mille (‰)" - Les valeurs 0.00 ‰ correspondent à des fréquences comprises entre 0 ‰ et 0.01 ‰ - Les case vides correspondent à des fréquences nulles.

Code des couleurs		
>= 10 ‰	>= 30 ‰	>= 50 ‰

Corrélogramme Hm0 / Tpic - ANEMOC_COAST_3013 - annuel

Hm0 (m)	Tpic (Secondes)																			
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Total
0.5			0.97	11.32	32.62	70.39	69.23	53.51	59.67	50.77	31.02	16.87	9.01	4.34	2.05	1.66	0.56	0.69	0.04	0.03	414.76
1			0.22	11.73	55.60	68.70	63.02	36.95	27.28	22.92	15.54	9.15	5.01	2.32	1.26	0.45	0.27	0.17	0.11	0.05	320.76
1.5				0.10	8.88	45.36	44.63	28.12	8.77	1.70	0.62	0.23	0.08	0.03	0.08	0.03	0.01	0.02	0.01	0.04	138.72
2					0.14	7.56	29.77	22.01	6.76	0.58	0.06	0.03	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01				66.96
2.5						0.36	6.81	15.72	7.58	0.75	0.03										31.27
3							0.52	5.61	8.68	1.02	0.04										15.87
3.5							0.03	0.60	3.93	2.34	0.15										7.04
4							0.00	0.05	0.75	1.66	0.36	0.00									2.83
4.5									0.09	0.53	0.46	0.02									1.10
5										0.10	0.25	0.06									0.41
5.5											0.06	0.08									0.14
6											0.01	0.08	0.03								0.12
6.5												0.02	0.00								0.03
Total			1.19	23.16	97.25	192.37	214.02	162.56	123.50	82.35	48.60	26.56	14.15	6.71	3.41	2.15	0.85	0.88	0.17	0.12	

Les valeurs du tableau sont exprimées en "pour mille (‰)" - Les valeurs 0.00 ‰ correspondent à des fréquences comprises entre 0 ‰ et 0.01 ‰ - Les case vides correspondent à des fréquences nulles.

Code des couleurs		
>= 10 ‰	>= 30 ‰	>= 50 ‰

Les intervalles sont à lire : "Borne inférieure incluse - borne supérieure exclue" (ex : 0.5 -> [0 - 0.5[ )

ANEMOC - Statistiques de houle
Point COAST 3013

Source : CETMEF, site internet

Edition du 28.03.07 - © CETMEF / EDF R&D-LNHE

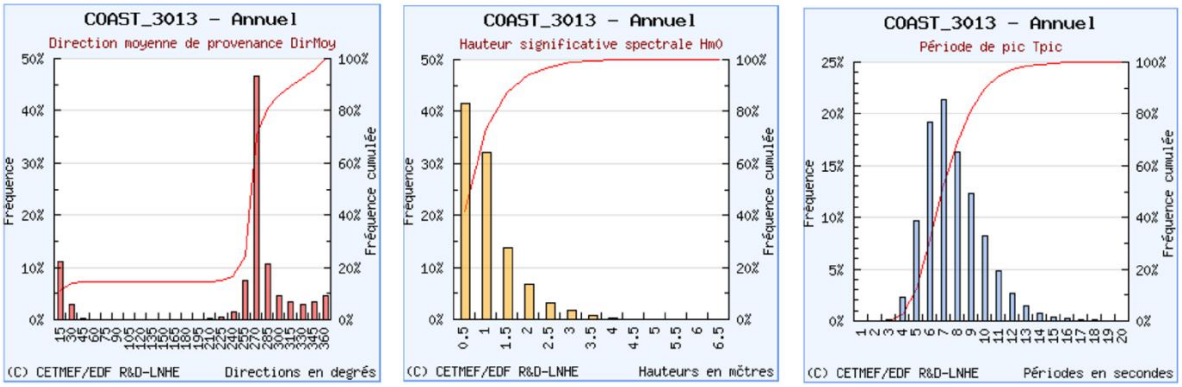


Figure 20. Climat annuel moyen des houles au point COAST 3013 (ANEMOC)

Par ailleurs, le régime des houles au large de la baie d'Authie connaît des variations saisonnières :

- D'avril à octobre (période estivale), le régime des houles est relativement calme avec des hauteurs qui restent inférieures à 1,5 m pour 95% des cas, et des périodes comprises pour la plupart entre 6 et 7 s.
- D'octobre à mars (période hivernale), l'agitation est plus importante, les houles supérieures à 1,5 m représentent un peu plus de 20% des cas et les périodes sont plutôt comprises entre 7 et 8 s.

Point COAST 2671 - Houles extrêmes :

L'estimation des houles extrêmes réalisée par EDF -LNHE/CETMEF au point COAST 2671 donne des hauteurs de 4,6 m, 6 m et 7 m pour respectivement les périodes de retour 1 an, 10 ans et 100 ans (Figure 21). Ces houles extrêmes proviennent principalement du secteur Ouest (270°N).

Niveaux de retour			
Périodes de retour	Borne inférieure de l'intervalle de confiance à 70% de Hm0 (en m)	Estimation ponctuelle de Hm0 (en m)	Borne supérieure de l'intervalle de confiance à 70% de Hm0 (en m)
1 an	4,45	4,59	4,72
10 ans	5,70	5,97	6,25
30 ans	6,07	6,50	6,93
50 ans	6,21	6,72	7,23
100 ans	6,36	6,99	7,62

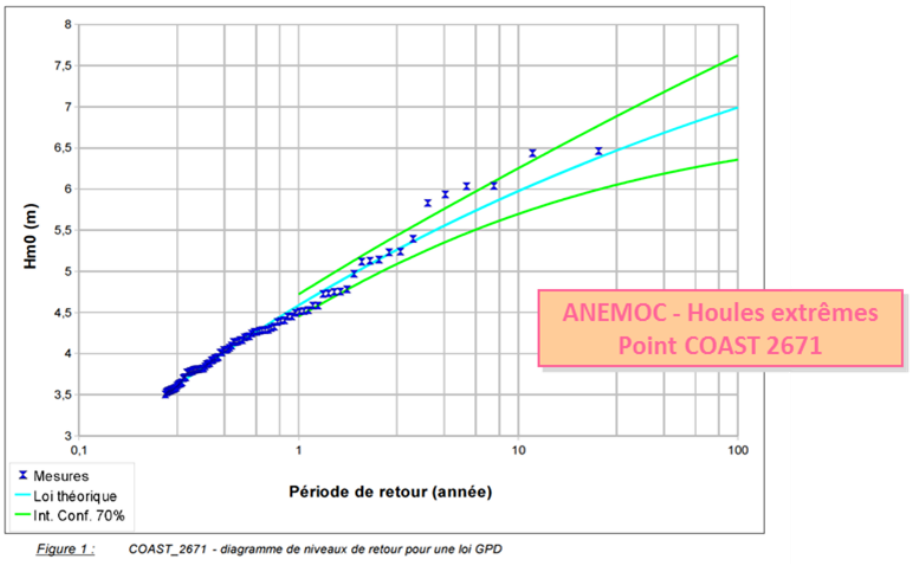


Figure 1 : COAST_2671 - diagramme de niveaux de retour pour une loi GPD

Figure 21. Houles extrêmes au point COAST 2671 (ANEMOC)

3.4.4.2. Les houles à la côte

Dans le cadre du PAPI Bresle-Somme-Authie [03], le climat des houles du large a été transféré par modélisation numérique en un point à l'entrée de la baie d'Authie (S6-P1 situé par -10 m IGN69). L'examen des résultats de cette modélisation amène les remarques suivantes (Figure 22) :

- Les houles se présentent pour la plupart au 270°N (secteur Ouest) à l'entrée de la baie,
- Pendant environ 77% du temps, la hauteur de l'agitation est inférieure à 1 m, et 0,8% des agitations sont supérieures à 3 m.

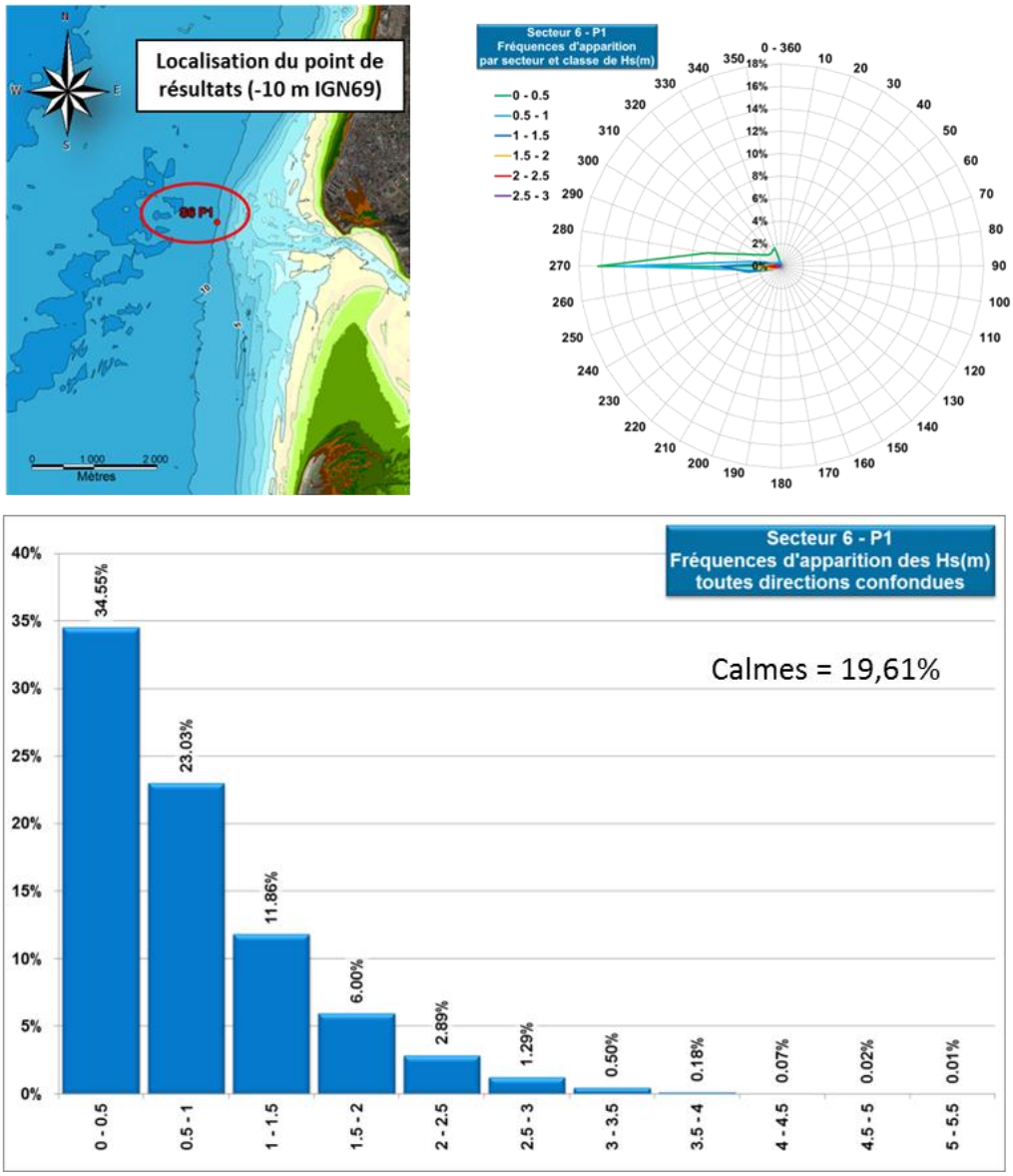


Figure 22. Climat annuel moyen des houles à l'entrée de la baie d'Authie

A l'intérieur de la baie, les mesures de houles effectuées par iXSurvey [14] aux points A et C lors de la campagne de février-mars 2013, montrent que (Figure 23) :

- Au point A (Bois de Sapins) : La houle est amortie avant d'arriver au point A du fait de la faible profondeur. La houle maximale mesurée est de l'ordre de 0,5 m. La direction de la houle est assez homogène ; d'une manière générale, elle provient des secteurs Ouest à Nord-Ouest (directions majoritairement comprises entre 260°N et 340°N).

- Au point C (embouchure de l'Authie) : La tendance de l'évolution de la hauteur de houle est la même qu'au point A, mais les hauteurs de vagues sont plus importantes au point C du fait de sa position plus exposée. Le maximum de hauteur significative est de l'ordre de 1 m. La houle provient majoritairement des secteurs Ouest à Nord-Ouest.

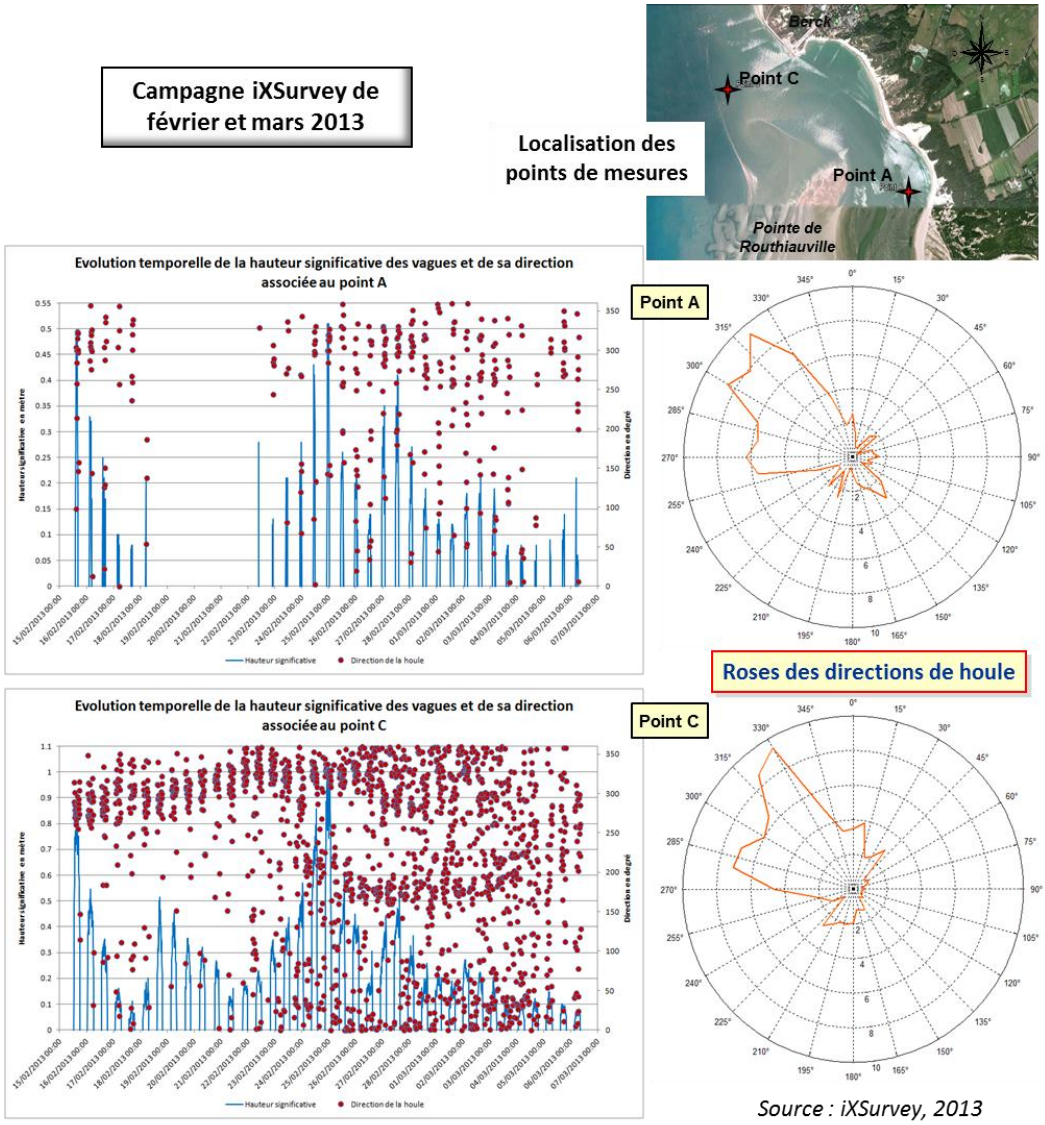


Figure 23. Campagne de février-mars 2013 - Mesures des houles en baie d'Authie

Cette dynamique de l'agitation dans la baie a été reproduite par une modélisation numérique dans le cadre de la présente étude d'Avant-Projet (voir chapitre 5). L'analyse des résultats pour l'état référence 2014 amène les conclusions suivantes (Figure 24, le cercle rouge correspond au Bois de Sapins) :

- Pour des houles modérées (Hs=0,6 m à 0,7 m au large), soit environ 58% du temps, l'agitation dans la baie reste faible avec des hauteurs globalement inférieures à 0,4 m (pouvant localement atteindre 0,6 m pour des forts coefficients de marée). Les houles du NO pénètrent peu dans la baie avec des hauteurs généralement inférieures à 0,2 m.
- Pour des houles plus fortes (Hs=1,8 m à 3,7 m au large), soit environ 22% du temps, l'agitation est évidemment plus importante, mais les différences entre ces fortes houles restent faibles dans la baie du fait de l'écrêtement de celles-ci par le banc de Routhiauville (hauteurs max de 0,8 à 1,2 m dans la zone de rechargement).

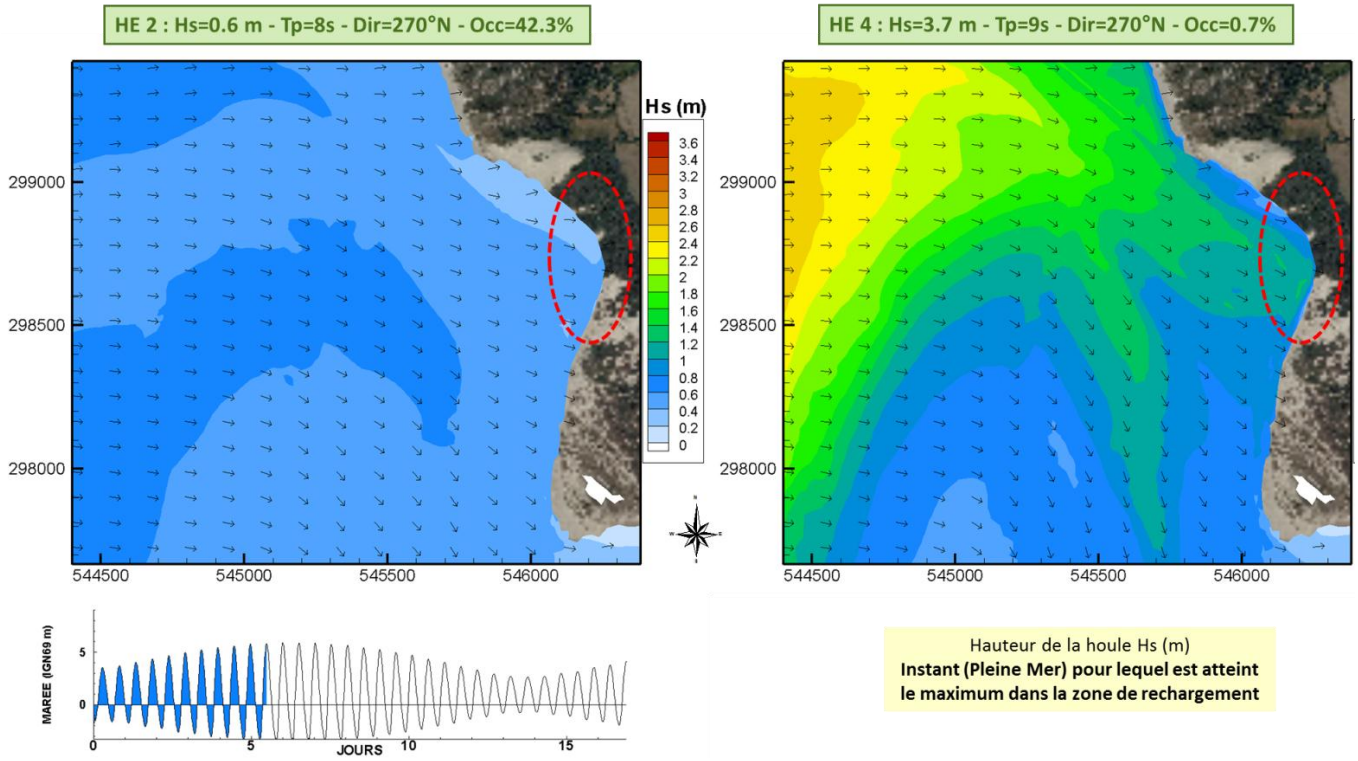


Figure 24. Etat référence 2014 - Propagation des houles à l'intérieur de la baie d'Authie

La houle pénètre dans la partie Nord-Ouest de l'estuaire pour les niveaux de marée élevés où sa propagation est déviée vers le Sud-Est. Elle peut donc favoriser la remise en suspension du sable au moins à l'embouchure de la baie et favoriser un transport solide vers le Sud-Est. Ce mouvement pourrait être un facteur explicatif de la progradation de la flèche du Bec de Perroquet. Les courants de houle peuvent ainsi constituer une part non négligeable des courants observés dans la baie pour des hauteurs de houle supérieures à 1 m [13].

3.5. L'HYDROLOGIE

La source principale d'apports d'eau douce dans la baie est l'Authie. On peut également noter le débouché de deux autres cours d'eau dans la baie : le Fliers au niveau du port de la Madelon et le canal du Marquenterre au niveau des mollières sud. Leurs débits ont cependant une influence négligeable sur le régime général de l'estuaire.

L'Authie prend sa source à Coigneux (Somme) à 100 m d'altitude, et se jette dans la Manche en formant un estuaire à partir du Pont à Cailloux, après avoir parcouru environ 100 km.

L'Authie est une rivière peu large (environ une quinzaine de mètres dans son cours inférieur) qui apporte à la mer un débit moyen de l'ordre de 10 m^3/s. Les écoulements de l'Authie sont soumis à l'influence de la marée. La pente de la rivière étant très faible (pente moyenne de 1‰), il s'ensuit que le cours de l'Authie est lent et sinueux et que lors de fortes marées la mer remonte loin dans les terres (jusqu'à 15 km en amont du Pont à Cailloux lors de forts coefficients de marée).

Le régime hydrologique de l'Authie se caractérise par une très forte régularité des débits moyens mensuels. Les données issues de la station hydrométrique de Dompierre-sur-Authie (partie amont fluviale) entre 1963 et 2004 révèlent cette régularité, avec des débits moyens compris entre 6 et 9 m^3/s. L'examen de ces débits met en évidence une période de hautes eaux, qui s'étale de janvier à juin avec un maximum en mars-avril (débit moyen de 8,9 m^3/s), et une période de basses eaux qui s'étend de juillet à décembre avec un minimum en septembre-octobre (débit moyen de 6,3 m^3/s).

Les débits moyens au Pont à Cailloux ont été extrapolés à partir de ceux de Dompierre-sur-Authie par l'Agence de l'eau Artois-Picardie [08]. Ainsi, sur la période 1963-1992, le débit moyen au Pont à Cailloux est de 10,4 m^3/s ; les débits d'étiage et de crue sont de 5,7 et 17,8 m^3/s respectivement.

Ces débits modestes résultent de la taille réduite du bassin versant de l'Authie et leur tendance à la stabilité s'expliquerait par un apport d'eau très important en provenance de la nappe (80% d'après l'Atlas des zones inondables Nord-Pas-de-Calais).

Compte tenu de ces débits modestes et de la localisation du projet en partie aval maritime de la baie, les débits liquides de l'Authie ont une influence négligeable dans la zone de projet, dont la dynamique dépend principalement des agents météo-océaniques décrits au chapitre précédent.

3.6. LES CONCENTRATIONS EN MATIERES EN SUSPENSION (MES)

Les concentrations en matières en suspension (MES) dans l'Authie, en amont de son débouché (station de Quend), étaient en moyenne de l'ordre de 0,033 kg/m^3 entre 1976 et 1998, avec une variation saisonnière marquée (de 0,013 kg/m^3 en août à 0,064 kg/m^3 en décembre). Ces valeurs de MES associées aux débits liquides de la rivière ont conduit à une estimation des apports solides de l'Authie de l'ordre de 15 000 tonnes de matières sèches par an [09].

Dans la baie, ces concentrations ont fait l'objet de mesures en 1997 en quatre stations (Figure 25). La concentration moyenne mesurée était de l'ordre de 0,17 kg/m^3 au fond, et de 0,12 kg/m^3 en moyenne sur la verticale, soit significativement plus forte que la concentration mesurée en amont dans la rivière [13].

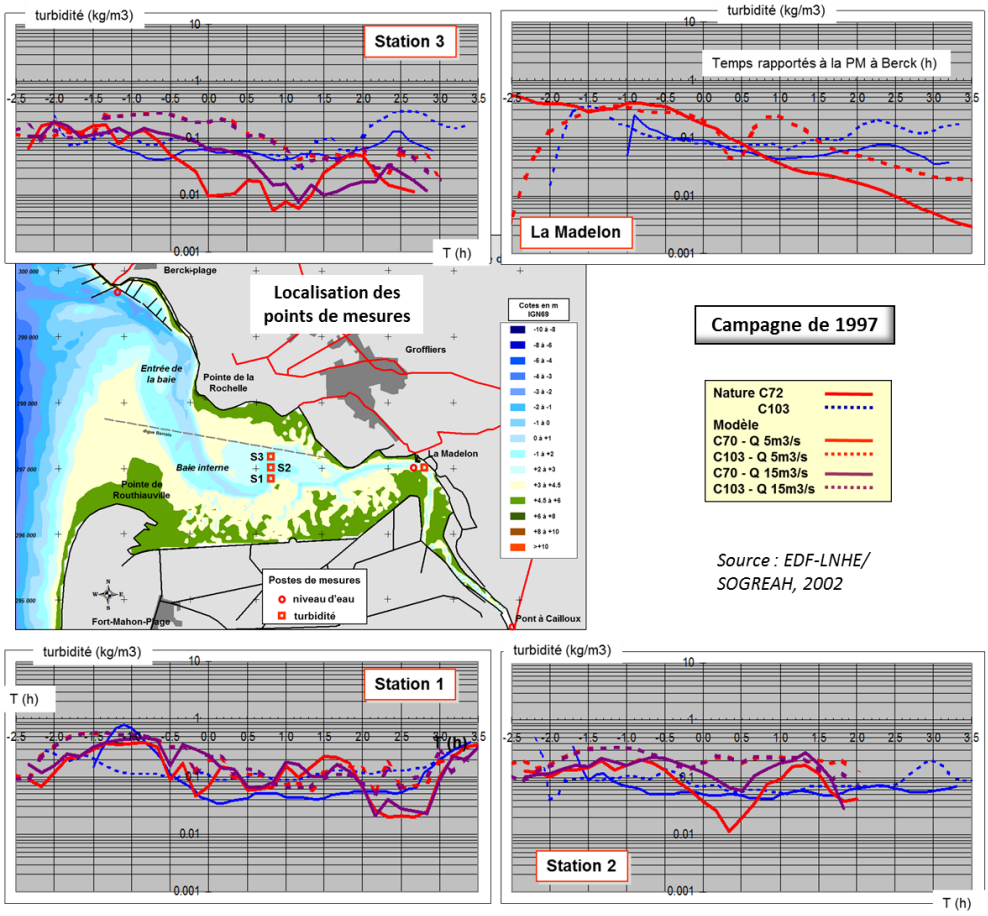


Figure 25. Campagne de 1997 - Mesures des concentrations en MES en baie d'Authie

Par ailleurs, les mesures effectuées par iXSurvey lors de la campagne de février-mars 2013 [14] mettent en évidence une évolution des turbidités relativement similaire aux deux points A et C (Figure 26). La turbidité la plus forte est souvent mesurée à marée montante. Lors des coefficients de marée importants, on observe de forts pics de turbidité aux deux points.

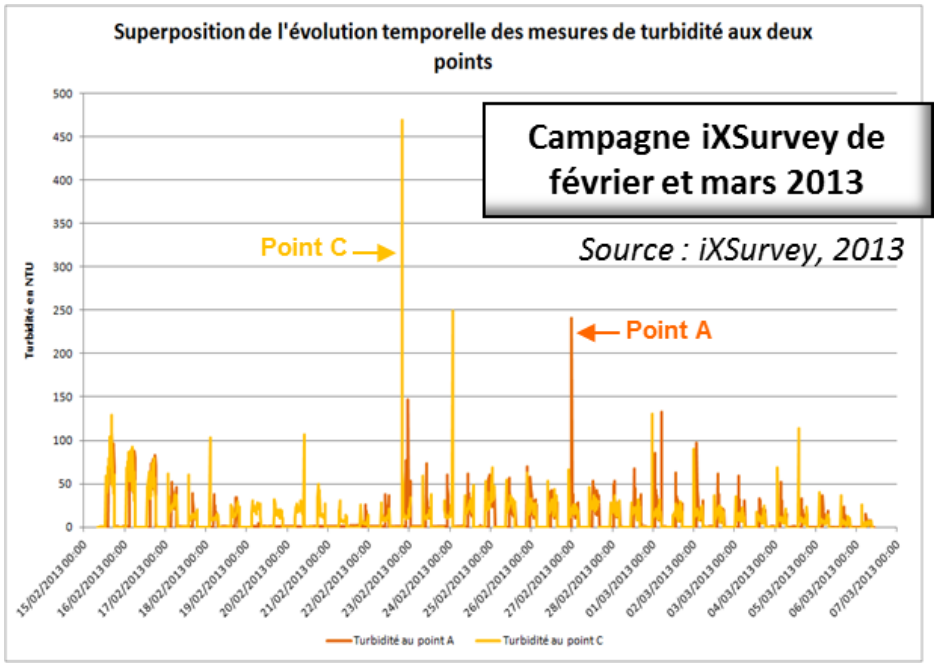


Figure 26. Campagne de février-mars 2013 - Mesures de la turbidité en baie d'Authie

3.7. DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE

Les photographies aériennes de 1947 et 2009 permettent d'avoir un premier aperçu des évolutions passées de la baie d'Authie, et plus particulièrement de l'érosion de la rive nord qui contraste avec la progression de la pointe de Routhiauville (Figure 27).

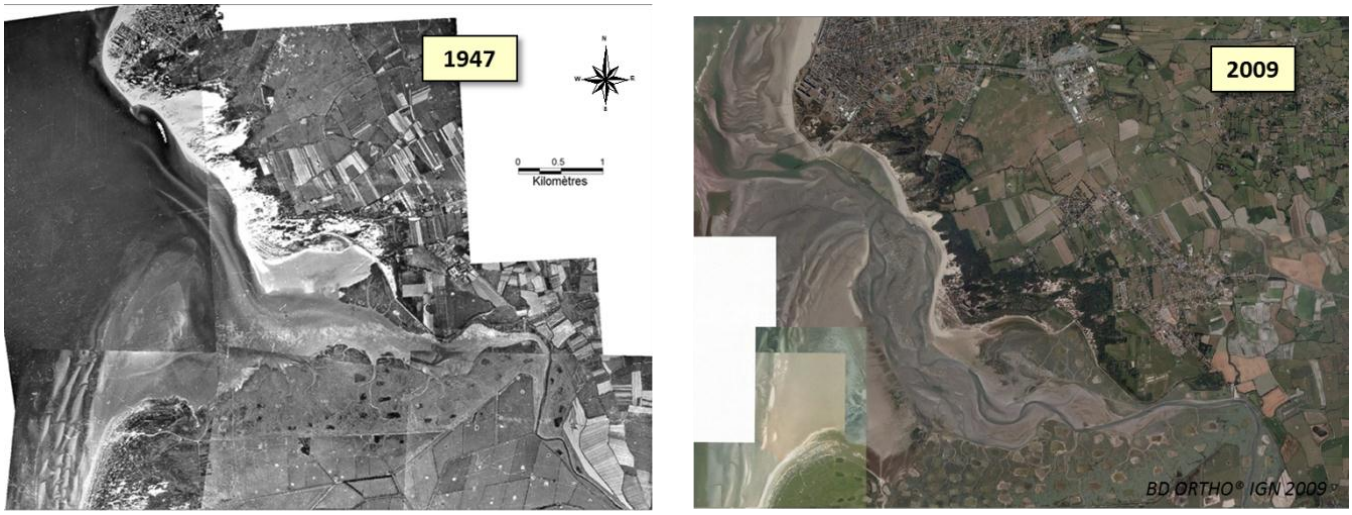


Figure 27. Photographies aériennes 1947 et 2009 de la baie d'Authie

3.7.1. Evolutions à l'échelle de la baie

A l'échelle de la baie d'Authie, le bilan sédimentaire réalisé sur la période 1997-2008 (Figure 28) peut être résumé comme suit [01] :

- Développement du banc de la pointe de Routhiauville, avec des dépôts moyens annuels d'environ +80 000 m^3/an,
- Divagations du cours de l'Authie dans la partie centrale de la baie,
- Colmatage de la baie interne (en amont d'une ligne passant par la pointe de Fort-Mahon au Sud et le Bec de Perroquet au Nord), à raison d'environ +50 000 m^3/an,
- Erosion de l'anse des Sternes, estimée à -20 000 m^3/an,
- Erosion du secteur du Bois de Sapins, de l'ordre de -10 000 à -15 000 m^3/an pour la zone d'estran (à noter que ces volumes d'érosion ne concernent que l'estran, et non le cordon dunaire - voir le détail des évolutions sur ce secteur au §3.7.3),
- Développement du poulier interne (Bec de Perroquet), avec des dépôts moyens annuels de l'ordre de +15 000 à +20 000 m^3/an.

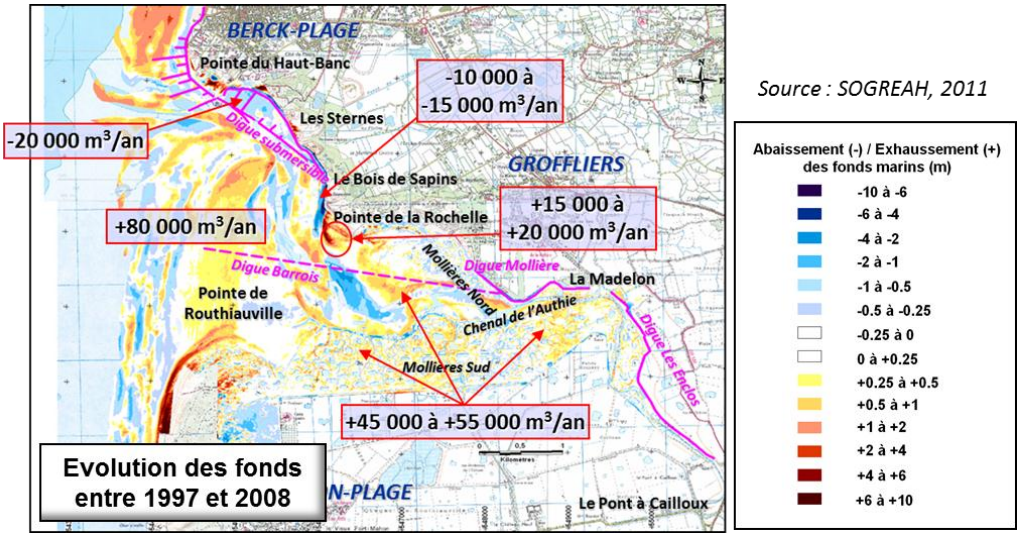


Figure 28. Evolution des fonds de la baie d'Authie entre 1997 et 2008

Les mollières Sud et Nord sont des zones en exhaussement, à raison de +45 000 à +55 000 m^3/an sur la période 1997-2008, soit en moyenne +1,2 cm/an de dépôts pour l'ensemble des mollières.

Par ailleurs, le suivi de la limite du couvert végétal de ces mollières, sur la base des photographies aériennes, met en évidence les tendances évolutives générales suivantes [03] :

- Pour les mollières Sud : alternance de phases d'extension et de régression liées aux divagations du cours de l'Authie et au développement du banc de Routhiauville ; ainsi, sur l'ensemble de la période 1947-2009, on peut distinguer trois zones pour les mollières Sud : les mollières du fond de baie (extension vers le Nord), la partie centrale des mollières (régression vers le Sud), et l'extrémité Ouest des mollières (extension vers le Nord-Ouest).
- Pour les mollières Nord : extension des mollières sur l'ensemble de la période 1947-2009, tout d'abord vers l'Ouest, puis plus récemment vers le Sud.

Concernant les divagations du chenal de l'Authie, l'examen des photographies aériennes montre l'orientation Nord-Sud que tend à prendre le cours de l'Authie au fil du temps, et l'augmentation de l'amplitude des méandres. Cette évolution indique nettement la diminution de la pente du lit de l'Authie au fur et à mesure du comblement de la baie, et la nécessité de la rivière à augmenter la longueur de son parcours pour dissiper l'énergie.

Le cours de l'Authie est venu se coller à la digue submersible (bras principal) entre 1971 et 1982. Le flot, qui pénètre dans la baie en s'appuyant sur la digue submersible, a ensuite eu tendance à creuser un chenal (bras secondaire de flot), parallèle à cette digue submersible, qui vient buter contre le pied du cordon dunaire entre la Grande Dune et le Bois de Sapins et éroder ce secteur à concavité marquée. En jusant, l'Authie emprunte principalement le bras Ouest qui s'appuie sur la face interne du banc de Routhiauville.

3.7.2. Evolutions dans la zone d'extraction (pointe de Routhiauville)

Entre 1935 et 2011, le bilan est clairement à la sédimentation au niveau du banc de Routhiauville, à raison de +60 000 à +80 000 m^3/an selon les périodes, ce qui correspond à un exhaussement moyen de la flèche sableuse compris entre +1,7 et +2,3 cm/an.

Entre 1935 et 1997 (Figure 29), le développement de la flèche s'est traduit par un exhaussement et une extension marquée de son emprise : progression vers le Nord, étoffement du banc sur ses flancs Ouest et Est.

Sur la période récente, la flèche s'est principalement exhaussée, sa progression étant aujourd'hui limitée par le chenal de l'Authie et les ouvrages de protection de Berck (anse des Sternes, pointe du Haut-Banc).

Actuellement, la cote d'arase du banc dans sa partie haute, côté enracinement (profils Plong, PES et PWS), plafonne à environ +4,80 m IGN69 qui correspond au niveau de PMVEM (coeff 95).

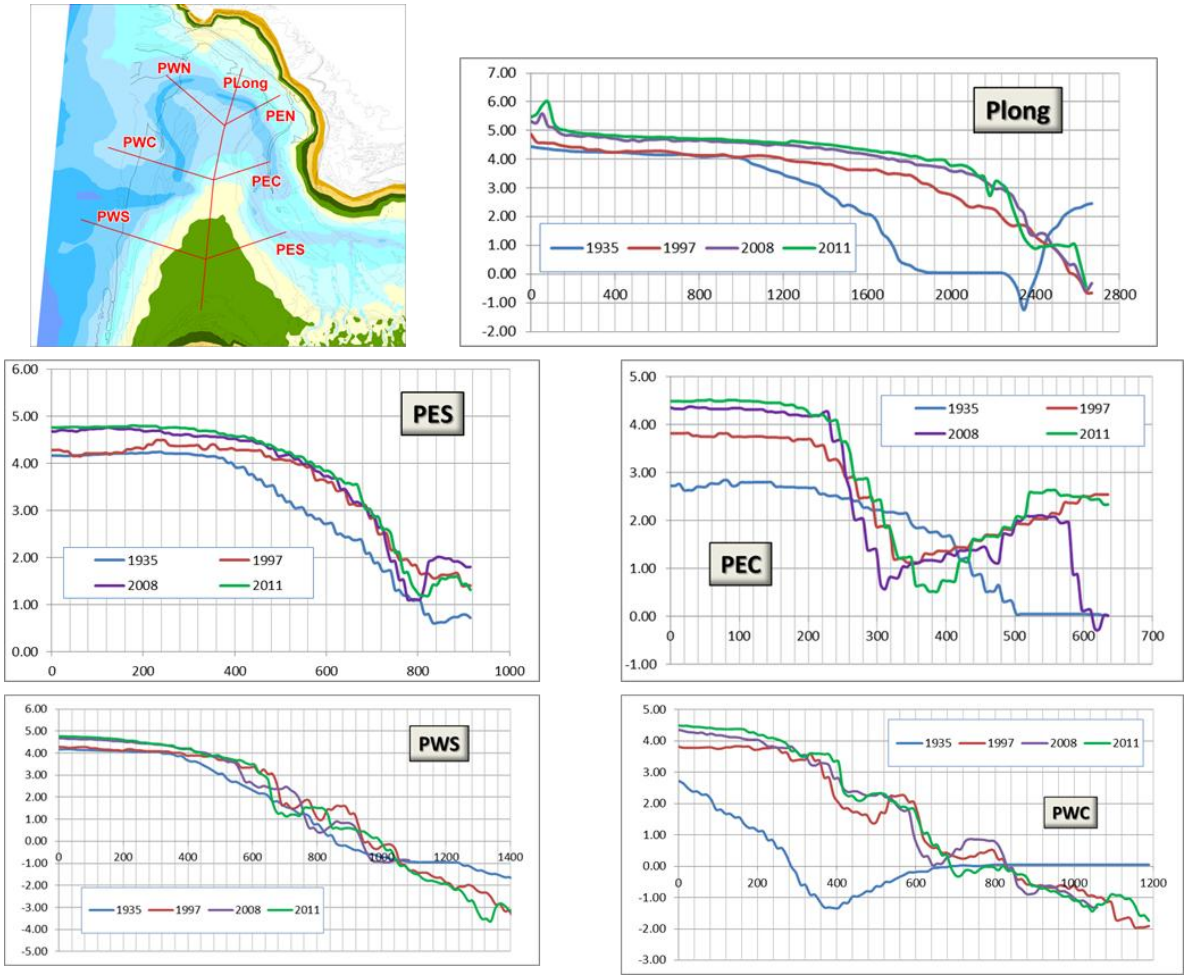


Figure 29. Evolution de la pointe de Routhiauville entre 1935 et 2011

3.7.3. Evolutions dans la zone de rechargement (Bois de Sapins)

Le littoral du Bois de Sapins est en processus érosif marqué depuis les années 1980, suite à la construction des ouvrages de protection de l'anse des Sternes (digue submersible et épis).

En effet, sur la période 1971-1982 (avant travaux), le Bois de Sapins était le siège d'un recul limité d'en moyenne -1 à -2 m/an, le sédiment pris sur le secteur des Sternes au Nord-Ouest alimentant cette zone. L'érosion s'est ensuite déplacée vers le Sud-Est conduisant à une accélération du recul du cordon dunaire du Bois de Sapins jusqu'à aujourd'hui.

Une analyse détaillée des évolutions sédimentaires passées sur le secteur du Bois de Sapins a été réalisée dans le cadre de cette étude d'Avant-Projet. Elle est présentée à l'Annexe 3, avec :

- Annexes 3.1 à 3.3 : Les levés topo-bathymétriques disponibles sur ce secteur (1935, 1997, 2006, 2008, 2011, 2013 et 2014) et les enveloppes de divagation du chenal associées.

  Ces dernières mettent en évidence le déplacement du chenal vers la rive nord au cours de la période 1935-2014 et l'action érosive de celui-ci sur le cordon dunaire du Bois de Sapins (augmentation de la concavité de l'anse, Figure 30).

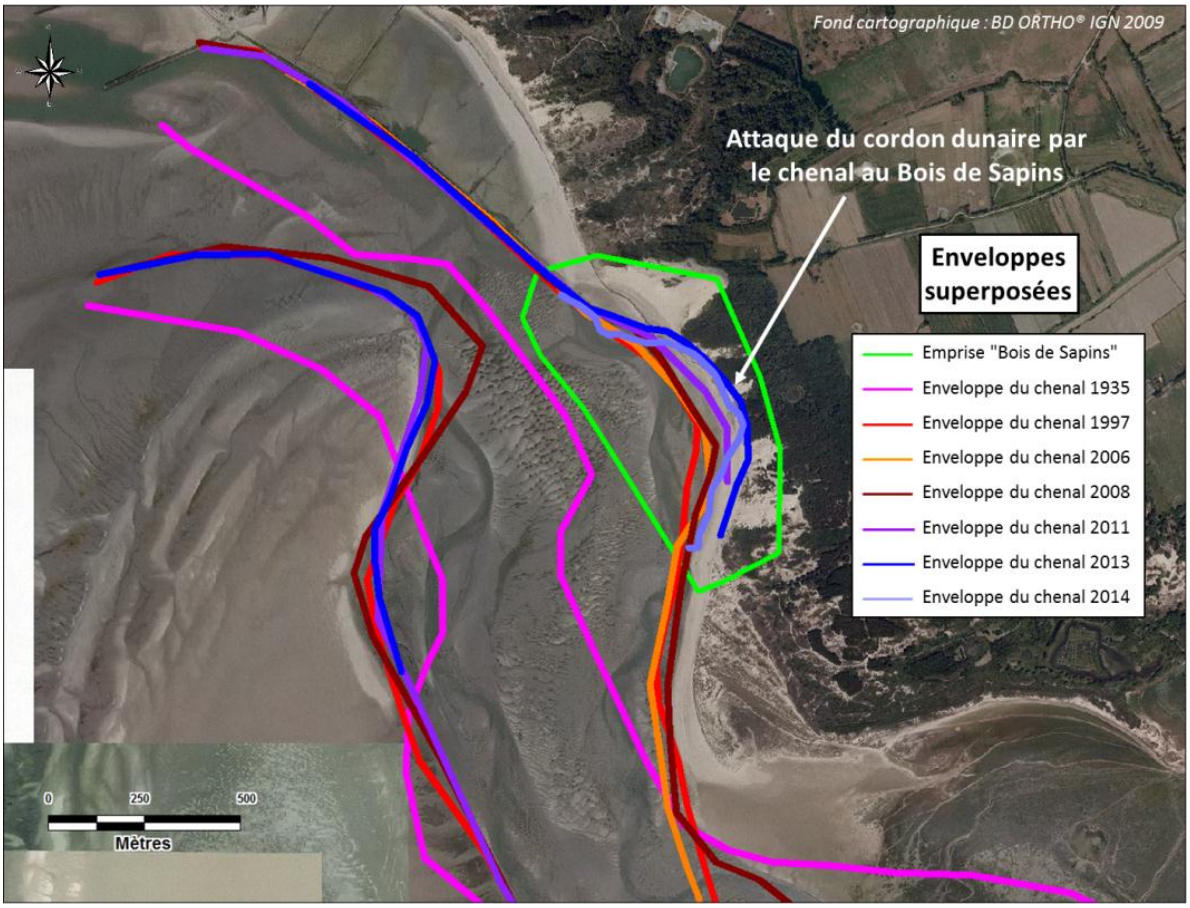


Figure 30. Enveloppes de divagation du chenal de l'Authie entre 1935 et 2014

- Annexes 3.4 à 3.5 : Les évolutions passées de l'estran au droit du Bois de Sapins pour différentes périodes entre 1935 et 2014.

  Les cartes d'évolution font apparaître des bilans à l'érosion sur la zone d'estran, de l'ordre de -8 000 à -13 000 m^3/an. Sur la période récente 1997-2014, ces bilans traduisent un fort abaissement de la plage du Bois de Sapins et, à l'inverse, un exhaussement de l'estran de l'autre côté du chenal Est de l'Authie (qui correspond au « banc » mentionné §3.1.3).

- Annexes 3.6 à 3.11 : Les évolutions récentes du cordon dunaire du Bois de Sapins.

  D'après les levés topographiques du cordon dunaire disponibles (2008, 2012, 2013, 2014), les volumes d'érosion peuvent être estimés entre -70 000 et -110 000 m^3/an en fonction de la morphologie du cordon résiduel (Figure 31).

  Ces volumes conséquents correspondent à des taux moyens de recul de -10 à -15 m/an sur la période récente 2009-2014, pouvant localement dépasser -20 m/an au centre de la concavité qui est la plus touchée par l'érosion (zone de la brèche).

  L'ensemble des données disponibles sur l'évolution du trait de côte au Bois de Sapins met en évidence trois grandes périodes d'évolution depuis 1997, avec les taux moyens de recul suivants (Figure 32) :

  - 1997-2005 : -8 à -10 m/an,
  - 2005-2009 : -3 à -5 m/an,
  - 2009-2014 : -10 à -15 m/an.

  L'érosion s'est donc accélérée sur la période récente, notamment depuis 2011, marquée par une dérive rapide du cours de l'Authie vers le nord et une forte action des courants de marée, pouvant être renforcés par les effets de la houle.

  Ainsi, en mars 2011, 5000 m^3 de sable en provenance de la plage de Berck furent déposés par la CCOS aux deux points les plus fragiles du cordon dunaire du Bois de Sapins.

  A noter que les taux ci-dessus correspondent à des reculs moyens ; des reculs localement plus importants ont pu avoir lieu au cours de tempêtes. Ainsi, d'après la CCOS, lors de la tempête de fin 1999, un recul d'environ 30 m aurait été constaté dans ce secteur.

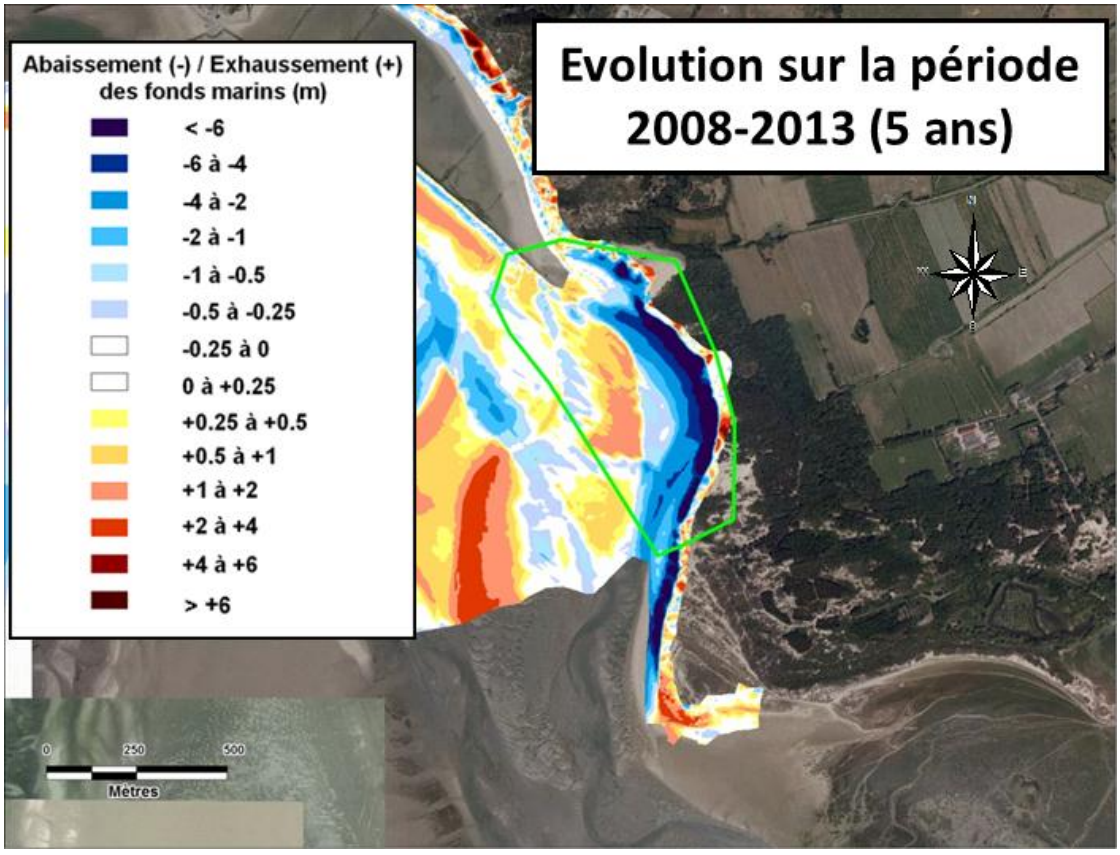


Figure 31. Evolution du cordon dunaire du Bois de Sapins sur la période 2008-2013

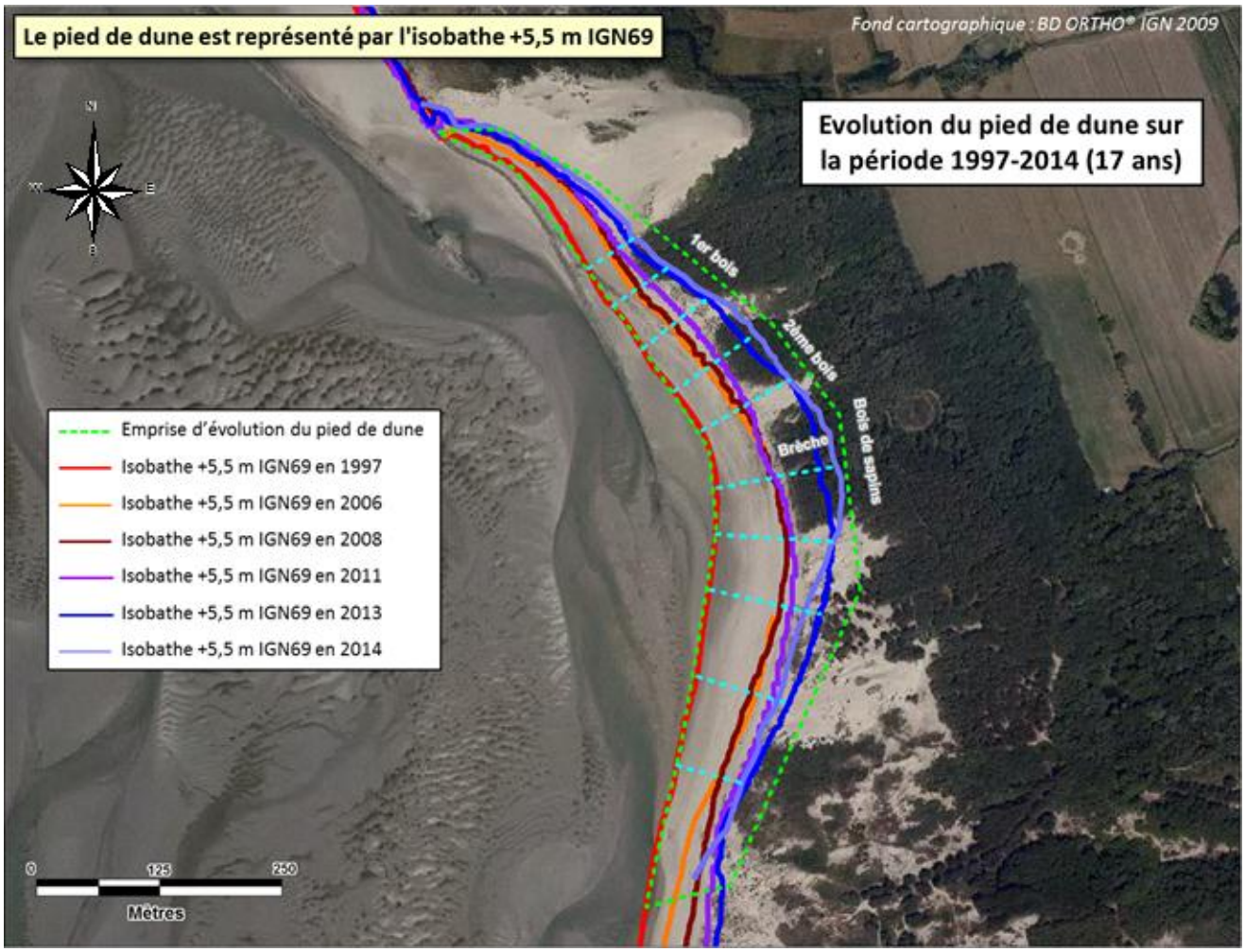


Figure 32. Evolution du pied de dune du Bois de Sapins sur la période 1997-2014

Concernant les secteurs adjacents à la zone de rechargement, leurs évolutions passées peuvent être résumées comme suit (voir l'Annexe 3.11) :

- Anse des Sternes au Nord-Ouest : L'évolution du cordon dunaire montre que, après une période (1971-1982) marquée par un fort recul (jusqu'à -12 m/an) dans la partie Sud-Est de l'anse, a suivi une période de relative stabilité (1982-1997), résultant des travaux de confortement du pied de dune (cordon d'enrochements), puis les processus érosifs ont repris sur la période 1997-2004 avec un recul moyen de -2 à -4 m/an. La tempête de fin 1999 a dû « peser » dans les reculs observés sur cette dernière période. En effet, sur la période récente 2004-2009, l'érosion redevient moins marquée (-1 à -2 m/an).
- Bec de Perroquet au Sud-Est : La façade exposée du poulier située dans le prolongement du Bois de Sapins est également soumise à érosion, avec des reculs moyens de -7 à -12 m/an sur la période 2009-2012.

  En revanche, plus au Sud, la tendance est à la sédimentation : la flèche sableuse a connu une avancée significative depuis les années 1980, en se déplaçant vers l'Ouest dans un premier temps, puis en progressant vers le Sud dans un second temps, à un taux moyen de l'ordre de +20 m/an. Ce poulier interne est alimenté par les sables érodés au Nord et par ceux ramenés par l'Authie à marée descendante.

3.7.4. Synthèse de la dynamique sédimentaire actuelle

Le schéma de la dynamique sédimentaire actuelle en baie d'Authie est présenté à la Figure 33.

Au Sud de la baie d'Authie (littoral de Fort-Mahon), le transit littoral, engendré principalement par la houle dominante de secteur Ouest à OSO, est orienté du Sud vers le Nord et est estimé à environ 60 000 m^3/an de sable.

La pointe de Routhiauville a rapidement progressé vers le Nord, alimentée par cette dérive littorale, et elle tend aujourd'hui à barrer l'embouchure. Sous l'effet de la progression de la pointe, le chenal de l'Authie s'est déplacé vers la rive Nord de la baie où l'érosion s'est installée.

Dans l'estuaire de l'Authie, la dynamique est contrôlée essentiellement par les courants de marée ; la dissymétrie de ces courants, au profit du flot, est favorable à la pénétration des sédiments vers l'intérieur de la baie. La baie est ainsi soumise au phénomène de colmatage.

Les courants de marée chargés de sédiments montant vers le Nord (parallèlement à la direction générale de la côte) sont, à la hauteur de l'estuaire de l'Authie, déviés vers l'Est par le remplissage de celui-ci (courant de flot). Ces courants sont très érosifs compte tenu des faibles profondeurs d'eau dans la baie.

Ils s'appuient contre la digue submersible et viennent buter sur le pied du cordon dunaire du Bois de Sapins favorisant l'érosion de ce secteur, puis s'étalent en pénétrant dans la baie.

Des courants giratoires s'établissent. Le centre du « tourbillon », zone à vitesse faible et donc favorable au dépôt, se situe au niveau de la face interne du banc de Routhiauville. Les matériaux arrachés à la rive Nord pendant le flot viennent donc en partie se déposer sur ce banc.

La pointe de Routhiauville s'engraisse ainsi à la fois grâce aux sédiments provenant de l'érosion littorale au Sud de la baie et apportés par la dérive littorale, et d'une partie des produits de l'érosion de la rive Nord de l'Authie apportés par les courants de marée au flot.

A la renverse flot-jusant commence la vidange de l'estuaire. A l'embouchure, le courant du large infléchit les courants de jusant vers le Nord. Ceux-ci sont repoussés vers la rive Nord, tendant à participer à la progression du banc de Routhiauville.

Lorsque les hauts fonds de la baie découvrent (à basse mer), la vidange s'effectue dans la baie centrale par un bras qui prend appui sur la face interne du banc de Routhiauville.

Plus en aval, le chenal est repoussé vers le Nord par le développement de ce banc. Les sédiments entraînés par les courants de jusant se déposent au Nord de l'estuaire, au voisinage de la laisse de basse mer.

Dans l'anse des Sternes, l'érosion du cordon dunaire est provoquée par les houles à marée haute qui franchissent la digue submersible. Ces houles proviennent majoritairement du secteur Ouest à OSO. De par leur incidence par rapport à la côte, ces houles, renforcées dans leur action par les courants de flot, engendrent dans l'anse un transport littoral résultant dirigé vers le Sud-Est. Ce transport littoral est à l'origine du recul du trait de côte dans la partie Ouest de l'anse des Sternes.

Les sables emportés vers le Sud-Est vont alors grossir le Bec de Perroquet qui manifeste une forte tendance à la progradation. Cette progression est renforcée et modelée par l'action des courants de remplissage qui poussent le chenal de l'Authie vers le rivage au sortir de la digue submersible (secteur du Bois de Sapins) et participent au recul de cette partie de la rive Nord où la tendance érosive est actuellement la plus prononcée (-10 à -15 m/an sur la période récente).

Les vents participent aussi activement à la dynamique sédimentaire et à l'évolution des cordons dunaires. Le transport éolien dominant est orienté d'Ouest en Est. Les sables fins éoliens pouvant être pris au banc de Routhiauville à marée basse, sous certaines conditions de vents, sont ainsi piégés par l'Authie et sont perdus pour la rive Nord.

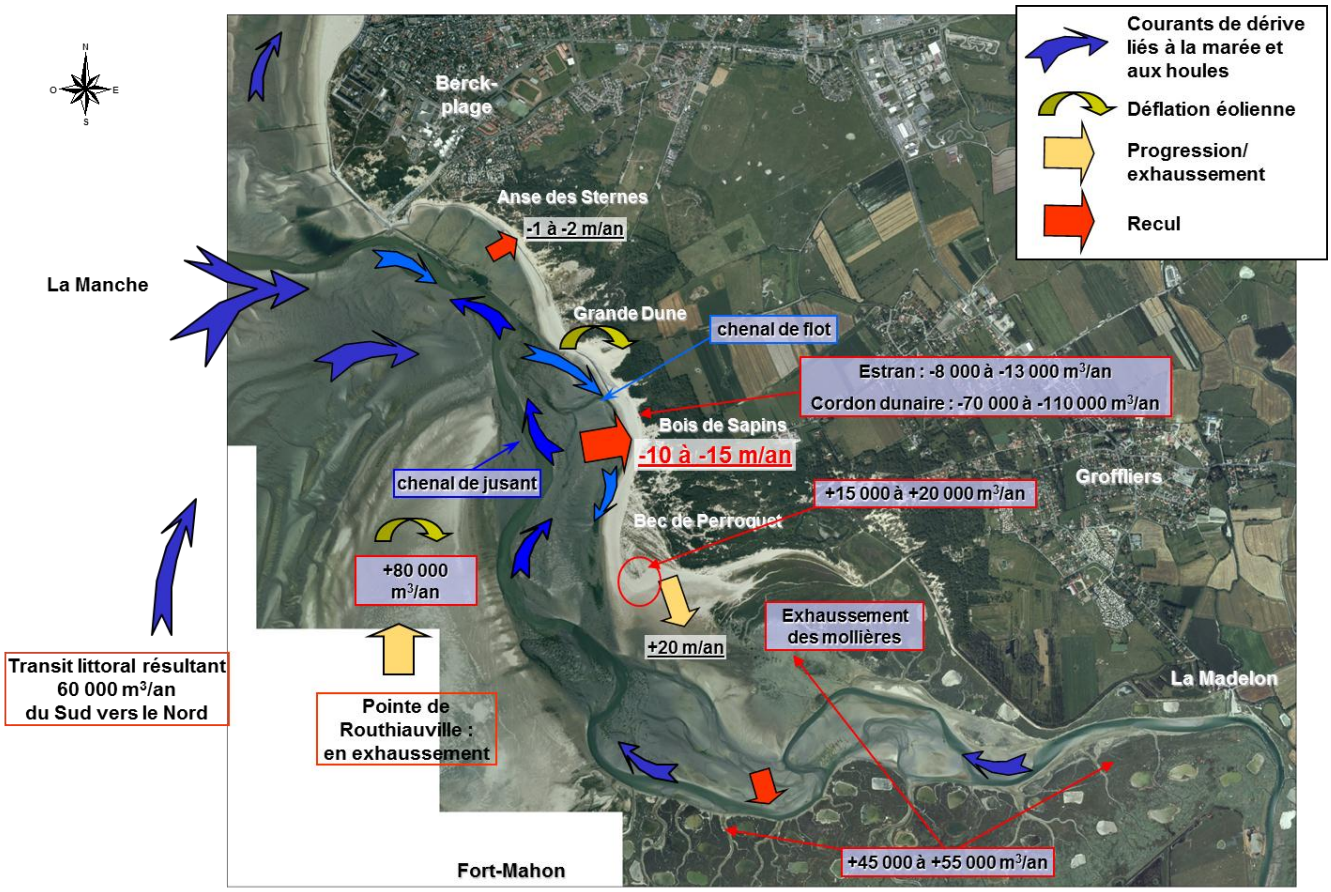


Figure 33. Schéma de la dynamique sédimentaire actuelle en baie d'Authie

3.8. CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL

La zone de projet est incluse ou située à proximité immédiate de plusieurs périmètres de protection réglementaire et d'inventaires des habitats naturels et espèces associées (faune-flore) :

- 4 sites Natura 2000 (3 de la Directive Habitats, 1 de la Directive Oiseaux),
- 3 ZNIEFF (Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique),
- 1 ZICO (Zone Importante pour la Conservation des Oiseaux),
- Terrains appartenant au Conservatoire du Littoral (site du Bois de Sapins dont la gestion est assurée par Eden 62),
- Parc Naturel Marin des estuaires picards et de la mer d'Opale,
- Site Ramsar de la baie de Somme (protection des zones humides), qui s'étend jusqu'au sud de la baie d'Authie,
- Réserve de chasse Authie-Somme (dont une zone de protection pour la reproduction du Gravelot à collier interrompu au sud de la pointe de Routhiauville).

Ces périmètres protégés sont présentés dans le rapport d'état des lieux préparé dans le cadre de la TC3 du projet [04].

Etant donné la richesse de l'environnement naturel en baie d'Authie, il est possible, voire probable, que des restrictions soient imposées sur les travaux à certaines périodes de l'année (périodes de reproduction des espèces, périodes de migrations, présence d'espèces protégées…).

Par ailleurs, en raison du caractère touristique de la côte de part et d'autre de la baie (plages de Berck et de Fort-Mahon), des restrictions seront probablement imposées par les services de l'Etat. On peut dès à présent prévoir que la période estivale nécessitera une interruption des opérations de dragage. Il est également possible que d'autres périodes de congés ou manifestations induisent des restrictions sur les travaux.

Ces contraintes, susceptibles d'impacter fortement le calendrier envisageable des travaux, devront être confirmées à l'issue des phases d'instruction des dossiers d'autorisation.

D'ores et déjà, il est envisagé dans la présente étude, une interruption de travaux durant les mois de juillet et août (période estivale).

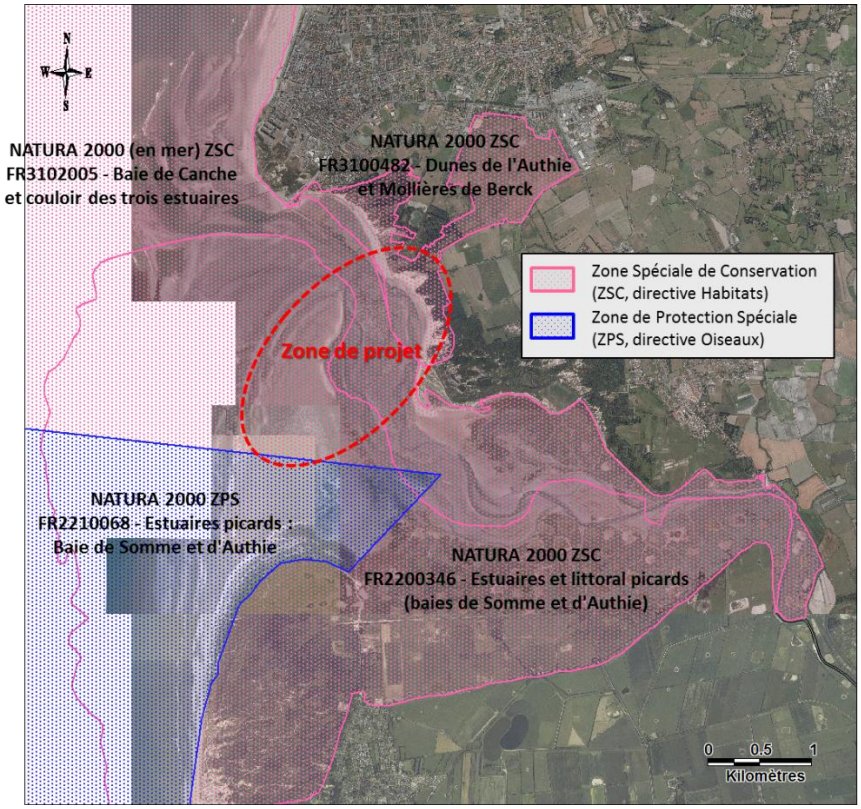


Figure 34. Sites Natura 2000 en baie d'Authie

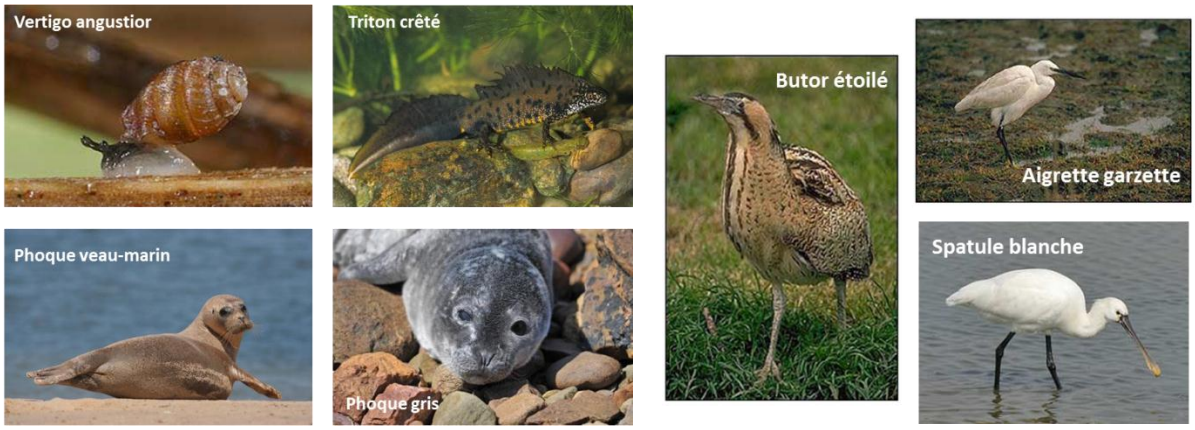


Figure 35. Espèces d'intérêt communautaire recensées en baie d'Authie

4. AVP PRELIMINAIRE AVANT MODELISATION, PROPOSITION DE SCENARIOS DE RECHARGEMENT MASSIF

4.1. ANALYSE DE LA METHODE DE TRAVAUX

A l'issue de la phase d'étude de faisabilité (APS), le rechargement de l'anse du Bois de Sapins a été envisagé par voie maritime (dragage hydraulique). Cette méthode de travaux a été développée dans le cadre de la présente mission Avant-Projet ; ce travail d'analyse est présenté ci-après.

Les contraintes du site et du projet ont toutefois mis en évidence la nécessité de rechercher des solutions alternatives. Une étude de faisabilité complémentaire a donc été menée ; ses conclusions sont présentées au chapitre 6.

4.1.1. Rappel de la base du projet - Etude APS d'IDRA Environnement

Les contours du projet de protection de la rive nord de l'Authie ont été définis dans le cadre des études d'Avant-Projet Sommaire (APS) réalisées en 2013 par IDRA Environnement [02], pour le compte de la Communauté de Communes Opale Sud.

Le principe de protection retenu à l'issue de cet APS consiste en un rechargement massif en sable au niveau du Bois de Sapins afin de reconstituer la plage et de contraindre l'Authie à emprunter un chenal plus au sud.

Les caractéristiques du projet envisagé étaient les suivantes (source : IDRA Environnement, voir la figure ci-dessous) :

- Rechargement de la plage du Bois de Sapins selon un à-plat de 50 m de large et de 800 m de long ; cette bande de 50 m de large devra être reliée au terrain naturel selon une pente qui reste à définir au moyen de modélisations numériques ; l'emprise totale de l'opération concerne une superficie de 100 000 à 120 000 m^2.

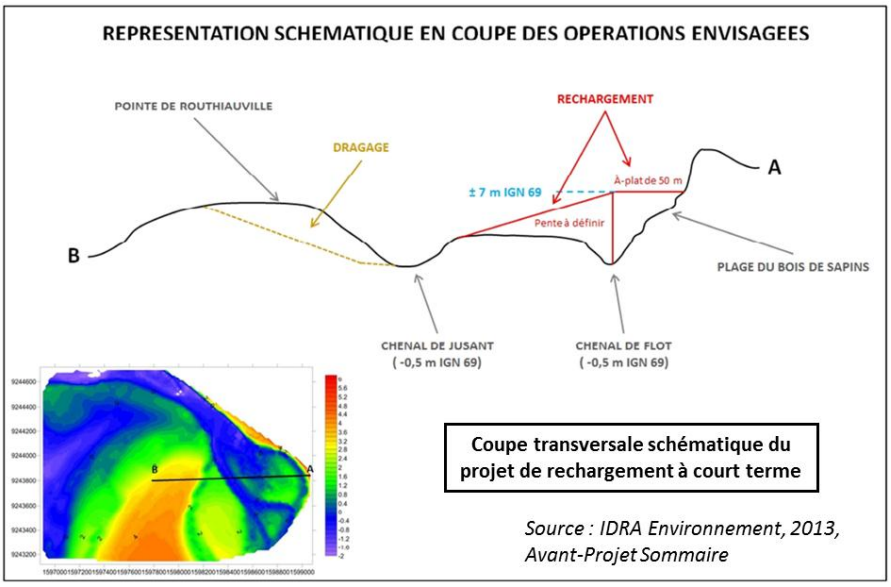


Figure 36. Projet de rechargement de la plage du Bois de Sapins défini dans l'APS (IDRA)

- Les sédiments pourraient être prélevés sur la rive sud du chenal principal de l'Authie, ainsi que sur l'extrémité nord de la pointe de Routhiauville.
- Les volumes de rechargement nécessaires ont été estimés, en première approche, entre 350 000 et 550 000 m^3 (volumes approximatifs d'après IDRA, nécessitant un ajustement par un dimensionnement détaillé et des modélisations numériques).
- Le montant des travaux a été estimé à 2,5 M€ HT (hypothèse d'un dragage hydraulique).

4.1.2. Les critères fixés pour l'Avant-Projet

4.1.2.1. Les objectifs de protection

Conformément au CCTP, le rechargement massif du Bois de Sapins doit permettre une protection des terres arrière-littorales contre le risque de submersion marine à court terme (objectif de 5 à 10 ans), en attendant la mise en œuvre des mesures de gestion pérenne définies dans le cadre du PAPI BSA (voir le chapitre 10).

4.1.2.2. Le coût prévisionnel des travaux

Le coût prévisionnel des travaux, tel que précisé dans les pièces du présent marché de Maîtrise d'œuvre, est de 2,5 M€ HT.

4.1.2.3. Le volume de rechargement et les caractéristiques du sable

Au regard des critères de projet précédents (objectifs de protection, coût prévisionnel des travaux, caractéristiques techniques), le volume de rechargement considéré pour cette étude d'Avant-Projet est de l'ordre de 300 000 m^3 ; ce volume correspond à la fourchette basse des estimations de l'APS du fait des contraintes budgétaires du projet (analyse développée dans la suite du rapport).

Les caractéristiques du sable souhaité sont les suivantes :

- Granulométrie : Les diamètres médians D_{50} des sables en place sur la zone à recharger du Bois de Sapins étant compris entre 0,20 et 0,25 mm, les sables d'apport devront a minima présenter ces caractéristiques pour permettre une bonne stabilité du rechargement dans les conditions hydrodynamiques du site (plus le sable d'apport sera grossier, meilleure sera sa tenue dans le temps).

  Comme vu au §3.3, les prélèvements de sédiments récemment réalisés dans la baie mettent en évidence la compatibilité des sables entre la zone d'extraction (pointe de Routhiauville) et la zone de rechargement (Bois de Sapins).
- Teneurs en fines : Afin de limiter autant que possible les pertes sédimentaires à la mise en place du rechargement, les teneurs en fines (< 63 µm) devront rester faibles, dans la limite des ordres de grandeur observés sur la zone de projet (< 5%).
- Qualité : Sur le plan physico-chimique, les sables d'apport devront respecter les niveaux de référence N1 et N2 destinés à évaluer la qualité des sédiments marins ou estuariens (seuils de la rubrique 4.1.3.0 fixés par arrêté du 09 août 2006, modifié par arrêté du 17 juillet 2014).

  Notons que la Communauté de Communes Opale Sud a fait réaliser par Gallia Sana [20] des analyses physico-chimiques de 3 échantillons de sables prélevés le 03 juillet 2013, au niveau de la plage actuelle du Bois de Sapins, du chenal de l'Authie et de l'extrémité de la pointe de Routhiauville. Aucun indice de pollution n'a été mis en évidence par rapport aux critères de qualité à prendre en compte pour les sédiments lors des opérations de dragage ou de rejet en milieu marin.

4.1.2.4. La durée des travaux de rechargement

La cadence de rechargement doit être adaptée aux transports sédimentaires et aux mouvements induits sur le site du Bois de Sapins (efficacité du rechargement par rapport aux pertes naturelles). Ainsi, le projet initial [02] prévoyait une durée de travaux de l'ordre de 3 à 4 mois minimum.

4.1.3. Les contraintes techniques

L'analyse de la méthode de travaux nécessite au préalable d'étudier les contraintes du site, liées à la configuration des lieux d'emprunt et de rechargement et aux données océano-météorologiques.

4.1.3.1. La configuration du site

La zone de prélèvement envisagée pour les matériaux se situe sur la partie terminale de la flèche sableuse de Routhiauville (Figure 37).

La distance entre la zone de prélèvement et le site de rechargement varie de 700 à 1500m environ à vol d'oiseau, à plus de 25 km par la route (contournement de la baie d'Authie).

Les accès terrestres à ces sites (par le centre nautique de Berck pour le site de rechargement, par le parking de la baie d'Authie côté Fort Mahon pour la zone de prélèvement) empruntent une partie du DPM et constituent également une contrainte en termes de temps et de conditions d'accès aux sites vis-à-vis des fenêtres de marées basses.

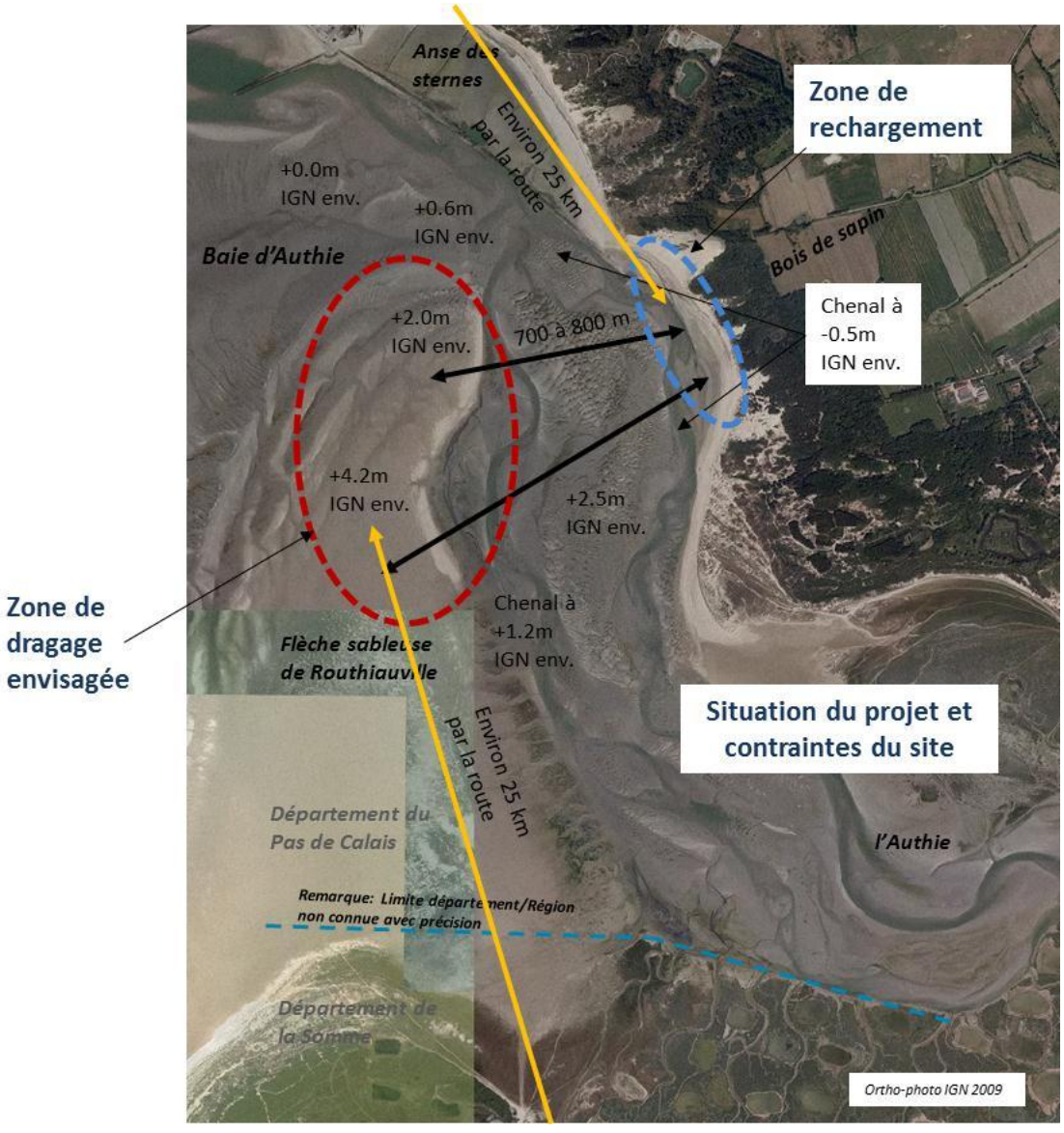


Figure 37. Distance entre la zone d'emprunt et la zone de rechargement

4.1.3.2. La bathymétrie

La bathymétrie de la baie d'Authie est peu profonde et le chenal de l'Authie atteint l'océan par un cours sinueux en pente très douce, qui change souvent de position.

Au droit du Bois de Sapins, le cours de l'Authie se situe à la cote -0,5 m IGN69 environ.

Deux chenaux principaux sont visibles à cet endroit, l'un en pied de dune côté Bois de Sapins, à la cote +0,7 m IGN69 en 2014, l'autre au pied de la pointe sableuse de Routhiauville, à la cote +1,5 m IGN69 en 2013. On note que le premier chenal était plus profond et directement en pied de dune en 2013 ; il s'est décalé vers l'ouest et s'est partiellement comblé entre les deux levés disponibles (mars 2013 et juin 2014).

D'après le dernier levé de juin 2014, le pied de dune du Bois de Sapins se situe à la cote +5,5 m IGN69 environ et la plage descend en pente douce jusqu'au chenal de flot, entre les cotes +5,5 et +1 m IGN69, sur une largeur variable de 50 m côté Nord à 100 m côté Sud de l'anse.

En raison de ces fonds élevés dans la zone de projet, la durée quotidienne de dragage sera limitée par les horaires de marées et des dispositions particulières devront être envisagées pour atteindre des cadences suffisantes pour le dragage des volumes prévus au projet (méthode à l'aide de moyens nautiques pour exploiter la marée haute (plage de travail relativement réduite) ou méthode terrestre pour exploiter la marée basse (plage de travail théoriquement plus longue, mais pouvant dépendre de contraintes physiques de portance des sols et d'accès aux sites)).

4.1.3.3. L'hydrologie de l'Authie

L'Authie est une rivière peu large (environ 15 m au débouché dans la baie) qui apporte à la mer un débit moyen de 10 m^3/s environ.

La pente de la rivière est très faible, son cours est lent et sinueux, et la marée remonte sur 15 km pour les plus forts coefficients.

Les débits les plus forts (hautes eaux) apparaissent entre janvier et juin avec un maximum en mars avril, les débits les plus faibles (basses eaux) apparaissent entre juillet et décembre.

Les débits d'étiage et de crue sont respectivement au Pont à Cailloux de 5,7 et de 17,8 m^3/s. Une étude SOGREAH de 1999 a donné un débit décennal de 22,1 m^3/s à Colline-Beaumont.

4.1.3.4. La houle

La houle à l'intérieur de la baie d'Authie est fortement limitée par la présence de la pointe sableuse de Routhiauville, qui protège la zone de dragage envisagée. Cependant, pour les houles les plus fortes et à marée haute, l'agitation à l'intérieur de la baie peut dépasser 1 m (voir §3.4.4.2).

La zone envisagée pour le dragage sera donc globalement bien protégée des houles du large mais il sera toutefois nécessaire de prévoir un lieu de mise à l'abri du matériel de drague en cas d'avis de tempête, le matériel nautique compatible avec les fonds de la baie ne pouvant supporter une houle formée (à titre indicatif, une drague stationnaire de faible tirant d'eau devra s'abriter pour une houle de Hs dépassant 50 cm environ).

4.1.4. Dragage par voie maritime

4.1.4.1. Description de la méthode de travaux

A. Le matériel de dragage

Le matériel envisageable pour la réalisation du dragage et du rechargement doit répondre aux principales contraintes suivantes :

- Un tirant d'eau adapté au site : un marnage important (8,5 m en vives eaux moyennes), et donc de faibles niveaux d'eau à marée basse, limitent très fortement le tirant d'eau, découvrant une bonne partie de la zone à marée basse ; ceci implique une durée de travail journalière réduite.
- Une tenue à la houle et aux courants suffisante : à marée haute et pour des houles fortes à modérées, l'agitation dans la zone de dragage pourra être notable ; d'autre part, les courants de marée sont très importants (1 à 1,5 m/s environ). Faute d'un matériel nautique adapté, les périodes d'arrêt de travaux dues à ces conditions pourraient être très élevées (stand-by).
- Une cadence d'exploitation compatible avec le projet : **La durée des travaux sera avec une solution maritime très longue, sans doute sur deux, voire trois années, étant donné le type de drague envisageable (drague stationnaire), les durées de dragage limitées par les conditions océano-météorologiques et les volumes importants en jeu.**
- Un impact sur l'environnement qui devra être acceptable étant donné les contraintes du site (précautions importantes, interruptions lors des périodes sensibles).
- Un coût d'amenée et d'exploitation compatible avec le projet (durée importante du dragage, coûts d'entretien, coût de personnel, moyens mis en œuvre pour la sécurité du personnel…).
- Un matériel assurant la sécurité des opérateurs sur le site (travail de nuit fréquent en raison des contraintes de marée, problématique de l'accès à la drague en l'absence de port).

Pour le dragage hydraulique, la mise en place de conduites de refoulement est indispensable étant donné la configuration du site. L'apport par barge ou le refoulement par rainbowing ne sont en effet pas envisageables en raison des faibles tirants d'eau.

B. La conduite de refoulement

La mise en place d'une conduite de refoulement coupant l'estuaire de l'Authie devra :

- Résister aux conditions hydrodynamiques du site (houles, marées et courants),
- Etre adaptée à la forte mobilité des sédiments (conduite lestée sur le fond ou ensouillée),
- Permettre autant que possible l'accès nautique en fond de baie à marée haute (conduite lestée en fond de chenal, signalisation).

Une conduite lestée, posée sur les fonds ou ensouillée, sera sans doute nécessaire. Il est en effet difficile d'envisager une conduite flottante sur l'ensemble du linéaire en raison du marnage, des courants et de la houle, qui rendraient sa maintenance extrêmement délicate, voire impossible (il pourrait être nécessaire de mettre la conduite à l'abri à chaque marée).

C. La mise à l'abri du matériel de dragage en cas de coup de mer

Tout matériel nautique nécessite une mise en sécurité en cas d'avis de coup de vent ou de tempête. Une partie des travaux devant nécessairement être réalisée durant la saison hivernale, le matériel devra pouvoir être mis en sécurité à proximité du site de dragage à chaque fois que nécessaire.

En l'absence de port à proximité immédiate du site, une zone abritée devra être dédiée à cette fin et d'éventuels aménagements provisoires pourront être envisagés en fond de baie (chenal d'accès, souille provisoire).

Devant l'impact d'une telle disposition sur l'environnement de la baie, même temporaire, elle devra, si elle est retenue, être intégrée au projet et au dossier de demandes d'autorisation.

D. Type de drague et durée moyenne de dragage par marée

La figure suivante illustre les durées de travail d'une drague possibles sur le site en fonction de la marée et de la cote des fonds (hors intempéries et imprévus).

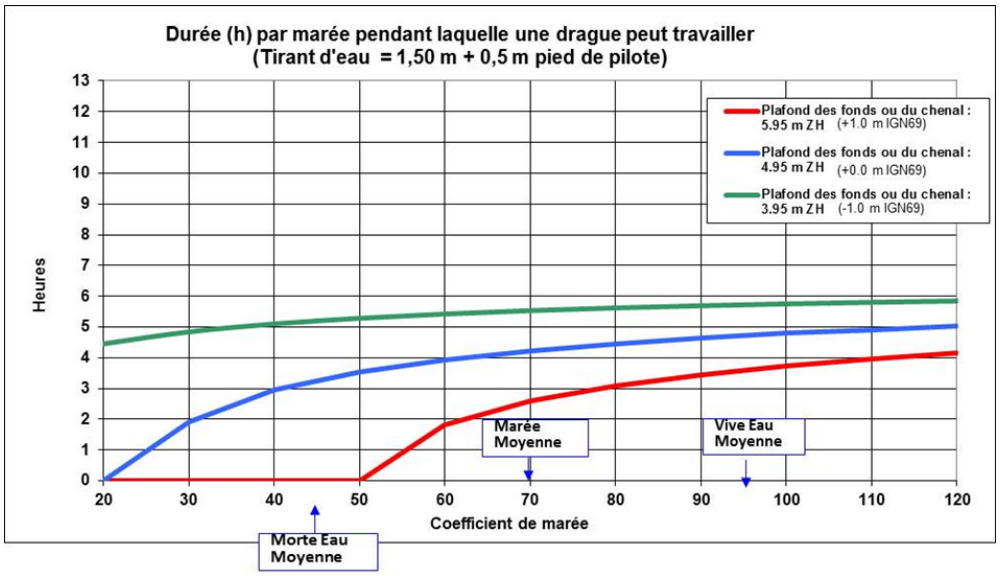


Figure 38. Durée de dragage en fonction du tirant d'eau et du coefficient de marée

On constate que la durée moyenne de travail par marée serait d'environ 5h30 avec un plafond à -1 m IGN, de 4h avec un plafond à 0 m IGN et de seulement 2h pour un plafond à +1 m IGN, avec interruption des travaux lors des faibles coefficients de marée.

Ces éléments excluent l'utilisation d'une drague aspiratrice en marche.

Les fonds de la baie sont situés entre -0,5 et +2,5 m IGN, la pointe de Routhiauville à draguer se situe entre +2,0 et +4,2 m IGN.

Une drague stationnaire de taille suffisante pour résister à un minimum de houle serait dans ce contexte la seule solution envisageable ; elle serait par contre contrainte d'entretenir un bassin ou un chenal de travail (cote à définir).

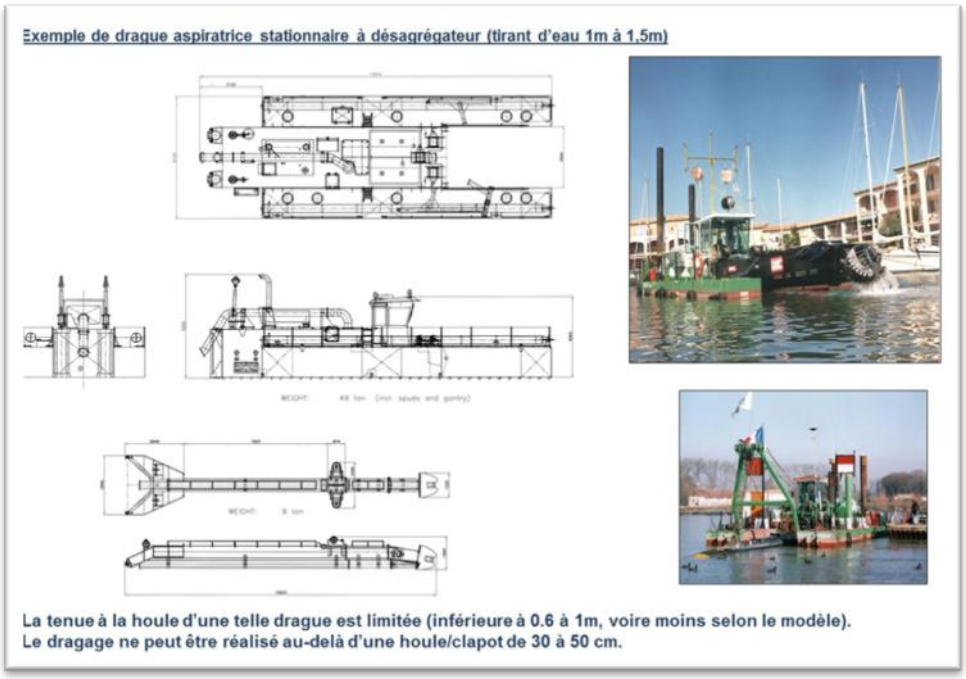


Figure 39. Exemple d'une drague stationnaire

4.1.4.2. Faisabilité du dragage par voie maritime

Afin de mieux cerner la faisabilité du dragage et rechargement massif du Bois de Sapins par voie maritime et les coûts associés, nous avons consulté quatre entreprises de dragage reconnues en France et à l'export.

Il ressort de ces consultations les principaux enseignements suivants :

- L'intervention avec une drague de forte capacité est exclue (tirant d'eau insuffisant).
- Malgré nos demandes répétées, aucune entreprise n'a été en mesure d'estimer un coût de dragage.
- Deux entreprises ont clairement exclu l'option dragage maritime et envisageraient une option par voie terrestre.
- Une seule entreprise nous a répondu par écrit en concluant sur la méthode maritime et les contraintes du projet : « Nous jugeons irréalisable ce projet tant sur le plan technique que économique. L'exposition du site permet à peine de travailler et les risques sur les personnes et équipements pourraient être majeurs ».
- Une entreprise propose un dragage par ponton sur pieux et pelle hydraulique, avec une conduite flottante. La cadence envisageable serait très faible et les travaux devraient être étalés sur 2 voire 3 ans.

Devant les retours de ces entreprises spécialisées qui confirment notre première analyse exposée dans les paragraphes précédents, il ne semble pas envisageable de baser l'étude d'AVP sur une solution de travaux de rechargement massif à l'aide d'une drague maritime comme préconisée dans l'étude APS [02], trop aléatoire au regard des contraintes du projet et dont on ne peut définir avec une précision suffisante le coût d'exécution et la durée des travaux.

Il s'avère donc indispensable de rechercher une solution alternative à celle initialement prévue au cahier des charges de l'étude.

L'utilisation d'une drague spécifiquement conçue pour le site (drague stationnaire ou ponton sur pieux et pompes) pourrait être envisagée pour les rechargements annuels d'entretien (faibles volumes), cependant, les contraintes évoquées ci-dessus resteraient les mêmes.

4.1.5. Dragage par voie terrestre

Le dragage par voie terrestre peut s'envisager selon deux méthodes :

- L'excavation sur la pointe de Routhiauville puis le transfert du sable par la route,
- L'excavation sur la pointe et le transfert en traversant l'Authie.

4.1.5.1. Solution excavation mécanique et transport par la route

Cette solution terrestre consiste à accéder à la zone d'emprunt de la pointe de Routhiauville par le Sud (département de la Somme), depuis Fort-Mahon.

Elle implique plusieurs reprises du sable.

Des pelles hydrauliques et/ou chargeurs chargeraient des dumpers qui transporteraient le sable sur 3 km environ (flèche sableuse de Routhiauville) jusqu'à la côte.

Le sable serait alors transféré sur semi-remorque, puis transporté par la route (environ 20 km) dont des voiries secondaires étroites et traversées de villages et de ville (Berck).

Le sable serait déposé à l'extrémité de l'anse des Sternes (pointe du Haut Banc, base nautique) et repris sur dumpers, transporté sur le site de rechargement (2 km) et régalé à l'aide de bulldozers.

Figure 40. Exemple de transport par dumpers et reprise sur semi-remorques (Grau d'Agde et Cayeux sur Mer)

4.1.5.2. Solution excavation mécanique et traversée de l'Authie par voie terrestre

Cette solution est identique à la précédente pour la zone d'emprunt, mais les dumpers une fois chargés traversent l'Authie à l'aide d'une piste de chantier provisoire aménagée en travers de la baie et apportent directement le sable sur la zone de rechargement.

Le principe de cette solution terrestre est illustré à la Figure 41.

Cette solution semble intéressante car la distance à parcourir est très réduite (700 à 1500 m) ; elle présente par ailleurs l'avantage d'être moins dépendante des conditions océano-météorologiques qu'un dragage par voie maritime.

Elle présente par contre plusieurs contraintes et difficultés qui peuvent s'avérer bloquantes :

- Conditions techniques :
  - La nature et la portance des sols pourraient s'avérer problématiques pour la circulation des engins de chantier, voire rendre l'opération impossible.
  - La stabilité et le maintien sur toute la durée des travaux de la piste provisoire pourraient s'avérer difficiles (affouillements importants par effet de seuils, tassements différentiels et stabilité de la structure aux courants).
- Contraintes financières :
  - Le coût de la piste d'accès et de son entretien pendant les opérations dépend en grande partie des conditions géotechniques.
- Conditions environnementales :

  Pour obtenir les autorisations de travaux nécessaires, les points particuliers suivants devront a minima être résolus :
  - Circulation d'engins de travaux (dumpers, tracto bennes, chargeurs et bulldozer) sur le DPM de la baie (nuisances sonores et visuelles, risques de pollution à maîtriser, impacts sur la faune, sur les activités nautiques…),
  - Nécessité de créer une piste traversant l'Authie avec un dispositif permettant de limiter l'impact sur l'écoulement de la rivière (modélisation hydraulique nécessaire).

Pour lever les incertitudes liées à cette solution excavation mécanique et traversée de l'Authie, une campagne géotechnique est indispensable afin de vérifier la nature et la portance des sols dans la zone de projet.

Figure 41. Principe de la création d'une piste provisoire en travers de l'Authie

4.1.6. Synthèse et comparaison multicritères des solutions étudiées pour la réalisation d'un rechargement massif

4.1.6.1. Synthèse des solutions étudiées

Les tableaux suivants synthétisent les différentes solutions étudiées pour la faisabilité des travaux de rechargement massif du Bois de Sapins.

Les 5 méthodes de travaux identifiées sont comparées.

	Moyens maritimes			Moyens terrestres	
Méthodes de travaux	**Drague aspiratrice en marche**	**Drague stationnaire**	**Ponton sur pieux, pelle hydraulique**	**Excavation mécanique et transfert par la route**	**Excavation mécanique et traversée de l'Authie**
Principales contraintes **NB : A ces contraintes s'ajoutent les aspects environnementaux / réglementaires qui seront à étudier dans le cadre de la TC3 et pourront également contribuer au choix d'une méthode de travaux.**	- Tirant d'eau - Houle - Vent - Tenue et entretien de la conduite de refoulement	- Tirant d'eau : peu de fonds, limitation de la durée d'intervention - Houle : pas de dragage au-delà de 40 à 50 cm d'agitation - Vent : inférieur à 20-30 nœuds - Tenue et entretien de la conduite de refoulement vis-à-vis des courants, de la mobilité des fonds, de la houle… - Pas de port ou d'abri pour la mise en sécurité de la drague, l'entretien, l'accès du personnel. Nécessité de créer une zone abri dans la baie.	- Houle : pas de dragage au-delà de 80 cm à 1m d'agitation - Tenue et entretien de la conduite de refoulement vis-à-vis des courants, de la mobilité des fonds, de la houle… - Pas de port ou d'abri pour la mise en sécurité du ponton et du navire de service, l'entretien, l'accès du personnel. Nécessité de créer une zone abri dans la baie.	- Marée - Portance des sols - Nécessité de trois postes : • Excavation et transport sur la pointe de Routhiauville • Reprise et transport par la route • Reprise et transport par dumper ou tracto-benne sur la plage depuis Berck (anse des Sternes) - Nombre important de camions sur la route (fortes nuisances) - Engins de travaux dans la baie et sur le DPM	- Marée - Portance des sols - Engins de travaux dans la baie et sur le DPM - Maintien de l'écoulement de l'Authie - Prise en compte des mouvements sédimentaires, entretien permanent de la piste d'accès provisoire
Durée journalière de travail	Pour un tirant d'eau minimum de 4m (tirant d'eau + pied de pilote), une zone de dragage à 0m IGN69 n'est accessible que 2h et pour un coefficient de marée supérieur à 90 **→ Durée incompatible avec les volumes à draguer (faibles fonds), méthode non envisageable**	3 à 4h par marée (haute) Possibilité de dragage sur 2 marées mais contraintes importantes associées **→ Durée journalière difficilement compatible avec les volumes à draguer selon les aléas mécaniques et météorologiques**	4 à 5h par marée (haute) Possibilité de dragage sur 2 marées mais contraintes importantes associées **→ Durée journalière difficilement compatible avec les volumes à draguer selon les aléas mécaniques et météorologiques**	6 à 7h par marée (basse) pour l'excavation mécanique 8h par jour pour le transport routier	6 à 7h par marée (basse)
Cadence moyenne	**Non envisageable techniquement**	Capacité drague 180 m3/h (hors aléa), moins hypothèse 40% indisponibilité (aléa océano-météo et entretien)	Capacité pompe de refoulement: 60 m3/h moins hypothèse 30% indisponibilité (aléa océano-météo et entretien)	2 400 m3/jour (24 camions pour les rotations, 16 dumpers répartis sur sites d'excavation et rechargement)	2 500 m3/jour (9 dumpers pour les rotations)
Durée de travail globale minimum (mois) hors interruptions estivales ou environnementales pour un volume de dragage de 300 000m3 (base 21j/mois)		38 mois avec une drague sur une marée/jour 19 mois avec une drague sur deux marées/jour 9 mois avec deux dragues sur deux marées/jour	68 mois avec un ponton une pompe sur une marée/jour 34 mois avec un ponton et une pompe sur deux marées/jour 17 mois avec un ponton et deux pompes sur deux marées/jour	6 mois	6 mois
Coût unitaire estimé (Hors Taxes)		**10 à 15 €/m3** en conditions normales (aléas du site non intégrés)	**12 à 20 €/m3** en conditions normales (aléas du site non intégrés)	**18 à 22 €/m3**	**8,5 à 10 €/m3**

NB : Les coûts unitaires et délais indiqués dans ce tableau sont des estimations préliminaires qui permettent une première comparaison mais doivent être affinés/ajustés en fonction de l'analyse détaillée des aléas et contraintes du site, notamment pour la solution excavation mécanique et traversée de l'Authie (incertitudes à lever) ; l'estimation des coûts au stade AVP est présentée au §9.

	Moyens maritimes			Moyens terrestres	
Méthodes de travaux	**Drague aspiratrice en marche**	**Drague stationnaire**	**Ponton sur pieux, pelle hydraulique**	**Excavation mécanique et transfert par la route**	**Excavation mécanique et traversée de l'Authie**
Coût unitaire estimé (Hors Taxes)	Non envisageable techniquement	**10 à 15 €/m3** en conditions normales (aléas du site non intégrés)	**12 à 20 €/m3** en conditions normales (aléas du site non intégrés)	**18 à 22 €/m3**	**8,5 à 10 €/m3**
Volume total de sable à draguer pour un budget de 2,5 M€ HT		250 000 à 170 000 m3	125 000 à 200 000 m3	140 000 à 115 000 m3	300 000 à 250 000 m3
Volume en place correspondant (départ moyen annuel estimé à 70 000 m3/an d'après l'évolution récente du cordon dunaire)		**- Sur 9 mois : volume en place de 200 000 à 120 000 m3** (départ d'environ 50 000 m3) - Sur 19 mois : volume en place de 140 000 à 60 000 m3 (départ d'environ 110 000 m3) **→ Durée trop importante, faible volume en place, non envisageable** - Sur 38 mois : pertes > volume en place (départ d'environ 220 000 m3) **→ idem 19 mois, non envisageable**	**- Sur 17 mois : volume en place de 25 000 à 100 000 m3** (départ d'environ 100 000 m3) Etalement des travaux sur 2 ans voir 3 ans → **Durée trop importante, faible volume en place, non envisageable**	- Sur 6 mois : volume en place de 105 000 à 80 000 m3 (départ d'environ 35 000 m3) **→ Coût élevé, faible volume en place, fortes nuisances environnementales liées au trafic poids lourds, non envisageable**	**- Sur 6 mois : volume en place de 265 000 à 215 000 m3** (départ d'environ 35 000 m3)
Incertitudes à lever		**Retour négatif des entreprises de dragage consultées** **Solution difficilement envisageable et n'offrant aucune garantie de faisabilité tant du point de vue technique qu'économique en raison des aléas importants**	**Non envisageable économiquement et au regard des objectifs du projet**	**Non envisageable économiquement et au regard des nuisances engendrées**	- Portance des sols dans la zone d'excavation et dans la zone de traversée de l'Authie - Impacts sur l'environnement et autorisations administratives (TC3)
Avantages		**Non envisageable économiquement et au regard des objectifs du projet**			- Non soumis aux aléas océano-météorologiques (hors tempêtes) - Souplesse des cadences d'apports - Durée sur 6 mois possible - Coût
Inconvénients					**Incertitudes à lever**

NB : Les coûts unitaires et délais indiqués dans ce tableau sont des estimations préliminaires qui permettent une première comparaison mais doivent être affinés/ajustés en fonction de l'analyse détaillée des aléas et contraintes du site, notamment pour la solution excavation mécanique et traversée de l'Authie (incertitudes à lever) ; l'estimation des coûts au stade AVP est présentée au §9.

4.1.6.2. Conclusion de l'analyse multicritères des solutions étudiées

De cette analyse se dégage comme seule solution envisageable au regard des contraintes de délais et de coûts du projet :

- **Excavation mécanique et traversée de l'Authie** (travaux sur 6 mois avec 9 dumpers pour les rotations + piste d'accès provisoire pour la traversée de l'Authie) : volume en place de 265 000 à 215 000 m^3 (pour un volume à draguer de 300 000 à 250 000 m^3).

Cependant, la faisabilité de cette solution reste à confirmer par la vérification des points suivants :

- La portance des sols dans la baie permet-elle la traversée d'engins de travaux lourds et à une cadence élevée ?
- La réalisation et le maintien d'une piste d'accès en travers de la baie pendant la durée des travaux sont-ils compatibles avec le budget du projet ?
- Les autorisations administratives sont-elles envisageables étant donné les travaux projetés et le contexte environnemental ?

Suite à ce constat, présenté au Maître d'Ouvrage et ses partenaires le 29 janvier 2015 en réunion à Berck, il a été réalisé une campagne complémentaire de reconnaissances géotechniques afin de vérifier le premier point et de fournir les éléments techniques pour le second point.

Le chapitre 6 présente la campagne réalisée et l'analyse de ses résultats.

4.2. DIMENSIONNEMENT THEORIQUE DU RECHARGEMENT

4.2.1. Méthodologie appliquée pour le dimensionnement du rechargement

L'intérêt d'un rechargement massif dans la zone érodée du Bois de Sapins est d'élargir de manière substantielle le haut estran afin :

- d'une part, d'éloigner le chenal de flot de l'Authie de la rive nord,
- d'autre part, de créer une plage « sèche », c'est-à-dire non recouverte par les pleines mers (pour rappel PHMA = +5,60 m IGN69), permettant la réalimentation du cordon dunaire par déflation éolienne.

La configuration d'un rechargement massif dépend de plusieurs paramètres (Figure 42) :

- Le linéaire de côte à recharger (L) : Il a été considéré pour l'analyse un maximum de 800 m entre la Grande Dune au Nord-Ouest et le blockhaus au Sud-Est, et un minimum de 200 m centré sur la zone de brèche.
- La hauteur de berme (h) : Les cotes +7 et +8 m IGN69 ont été considérées pour l'analyse compte tenu des résultats de submersion marine du PAPI BSA (les cartes d'aléas établies par modélisation indiquent des hauteurs d'eau maximales pour l'état de référence, au droit du Bois de Sapins, de +6,5 et +6,8 m IGN69 respectivement pour les évènements maritimes de période de retour 10 ans et 100 ans).
- La largeur de berme (b) : Des largeurs de 20 m à 150 m au centre de la concavité (au droit de la brèche) ont été prises en compte pour l'analyse (largeur diminuant progressivement vers les extrémités Nord-Ouest et Sud-Est pour se raccorder au terrain naturel).
- La pente d'équilibre de la plage (fonction de la granulométrie du sédiment d'apport) :

  Le site de rechargement est soumis à des conditions hydrodynamiques particulières (actions combinées des courants de marée et de la houle) ; les caractéristiques des sables d'apport de la pointe de Routhiauville étant relativement similaires à celles des sables en place au Bois de Sapins, la pente de la plage rechargée devrait être équivalente à celle de la plage actuelle, soit environ 6% (voir le profil P6 à la Figure 44). Cette pente est cohérente avec la littérature (voir le graphe en Annexe 4.1).

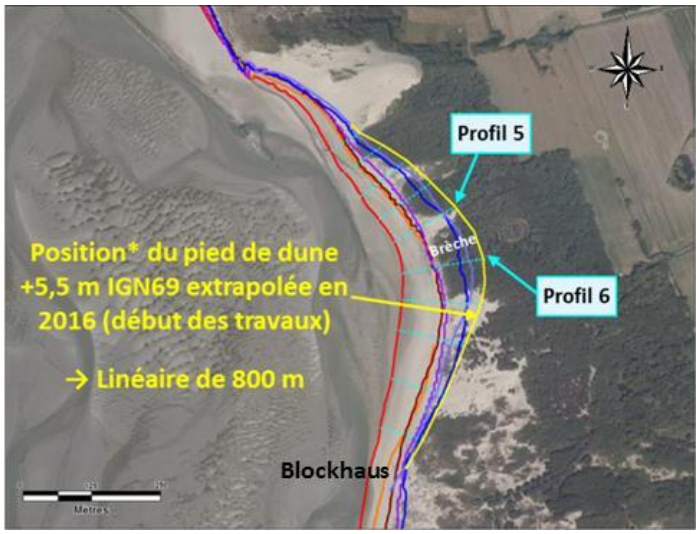


Figure 42. Dimensionnement du rechargement - Vue en plan des données considérées

Les étapes suivantes ont permis d'établir des abaques donnant les volumes en place en fonction des paramètres de rechargement :

1/ Positionnement du pied de dune +5,5 m IGN69 extrapolé en 2016 (début des travaux) - voir la présentation de la réunion du 22/09.

2/ Tracé en plan des différentes configurations de rechargement (linéaire/largeur de berme) à partir de ce trait de côte 2016.

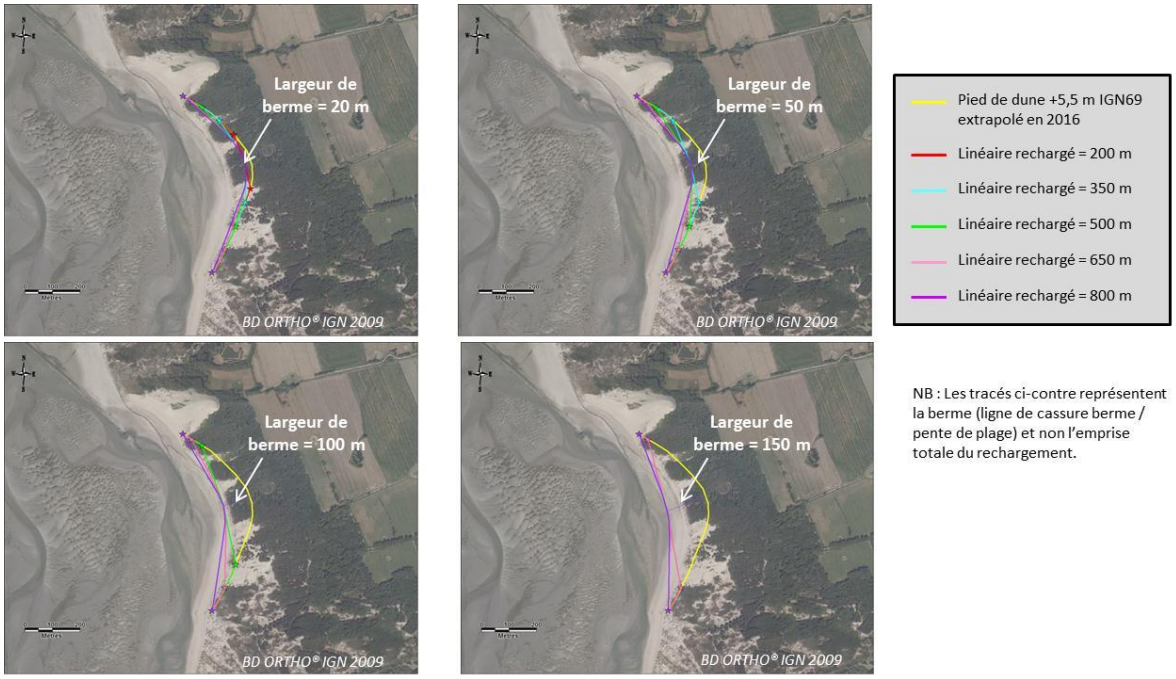


Figure 43. Exemples de configurations de rechargements envisagés

3/ Tracé de 10 profils répartis sur le linéaire maximum de 800 m (profils en bleu clair sur la Figure 42) à partir des levés topographiques 2008 et 2014, tracé du profil extrapolé 2016, et calcul des volumes en place pour chaque profil en fonction des différentes largeurs et hauteurs de berme (voir l'exemple ci-dessous pour le profil central P6 et une hauteur de berme à +7 m IGN69).

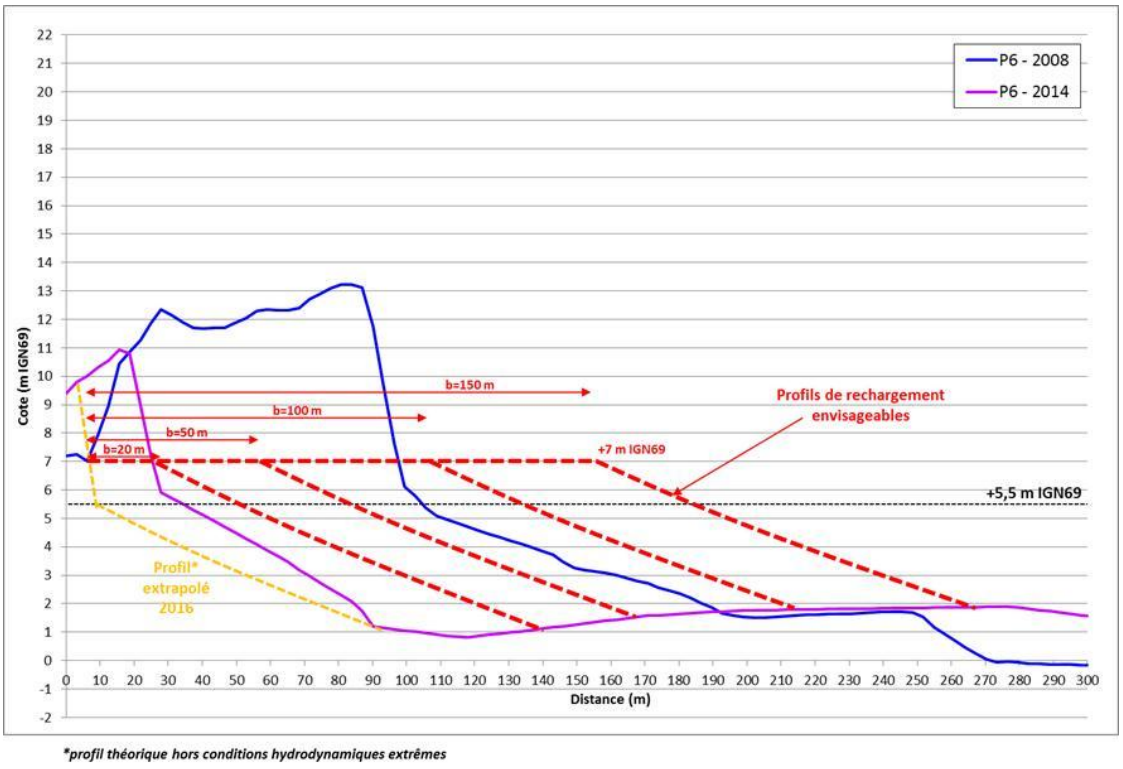


Figure 44. Exemples de profils de rechargements envisagés

4/ Enfin, pour chaque configuration de rechargement (linéaire, largeur et hauteur de berme), estimation du volume total de sable en place à partir des volumes/profil et des linéaires d'application de chaque profil.

Les abaques obtenus pour les hauteurs de berme +7 et +8 m IGN69 sont présentés en Annexe 4.

4.2.2. Scénario de rechargement proposé pour la modélisation

A ce stade de l'étude, nous proposons donc de considérer comme hypothèse de base à tester avec le modèle hydrodynamique, la 1ère solution de « rechargement seul » suivante :

Volume en place au Bois de Sapins de 250 000 m^3

(pour un volume à draguer sur la pointe de Routhiauville de 300 000 m^3)

Ce volume se situe dans la fourchette des volumes en place estimés envisageables au regard du budget de 2,5 M€ HT pour la méthode « excavation mécanique et traversée de l'Authie » dans l'analyse préliminaire du §4.1.

Cette modélisation permettra ainsi d'analyser le comportement et l'impact d'une 1ère configuration « maximale » de rechargement.

D'après les abaques de l'Annexe 4, ce volume en place de 250 000 m^3 pourrait correspondre à différentes configurations de plage rechargée :

- h=+7 m IGN69 / b=50 m / L=800 m
- h=+7 m IGN69 / b=100 m / L=550 m
- h=+8 m IGN69 / b=20 m / L=800 m
- h=+8 m IGN69 / b=50 m / L=550 m

Compte tenu des objectifs du projet (éloignement du chenal de l'Authie, plage suffisamment large pour permettre l'action éolienne), des hauteurs d'eau maximales pour des évènements marins extrêmes (inférieures à +7 m IGN69 devant le Bois de Sapins), et du fait qu'une berme plus large permet un meilleur amortissement des houles, il nous semble préférable de retenir la configuration suivante pour la modélisation :

- **h=+7 m IGN69 / b=100 m / L=550 m**

A noter que cette configuration est celle qui se rapproche le plus de la position du pied de dune 2008 et qu'elle privilégie la mise en place d'un nouveau stock sédimentaire au droit de la zone actuellement la plus menacée.

Il convient également de préciser que ce dimensionnement reste théorique, et qu'une fois les travaux de rechargement réalisés, le système plage-dune se reprofilera naturellement sous les actions hydrodynamiques et éoliennes.

Les étapes et résultats des modélisations hydrodynamiques sont présentés au chapitre suivant.

5. MODELISATIONS HYDRODYNAMIQUES

5.1. SYSTEME DE MODELISATION

Le modèle numérique, construit et exploité dans le cadre de cette étude AVP, a été élaboré à l'aide du système de modélisation aux éléments finis TELEMAC. Ce système regroupe un ensemble de logiciels dédiés aux problématiques de mécanique des fluides environnementaux. Il est en particulier adapté à la simulation et à l'étude détaillée des courants induits par la marée, les houles, les vents, les débits des rivières, etc.

TELEMAC est développé par le LNHE (Laboratoire National d'Hydraulique et d'Environnement - Electricité de France) et est sa propriété, en respect des procédures d'Assurance de la Qualité des Logiciels Scientifiques et Techniques d'EDF-R&D. ARTELIA Eau & Environnement contribue au développement de ce logiciel depuis plus de 15 ans.

L'intérêt principal d'utiliser une technique aux éléments finis sur des maillages non structurés est de représenter très précisément le terrain (bathymétrie, ouvrages côtiers et portuaires, etc.) par un assemblage de facettes triangulaires de taille et de forme variables, nommé « maillage ». Il est ainsi possible d'affiner aisément la précision du modèle là où les variations de bathymétrie sont importantes et/ou dans les zones d'intérêts.

5.2. METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE

5.2.1. Approche méthodologique et objectifs

La méthodologie mise en œuvre dans le cadre de cette étude est schématisée ci-dessous.

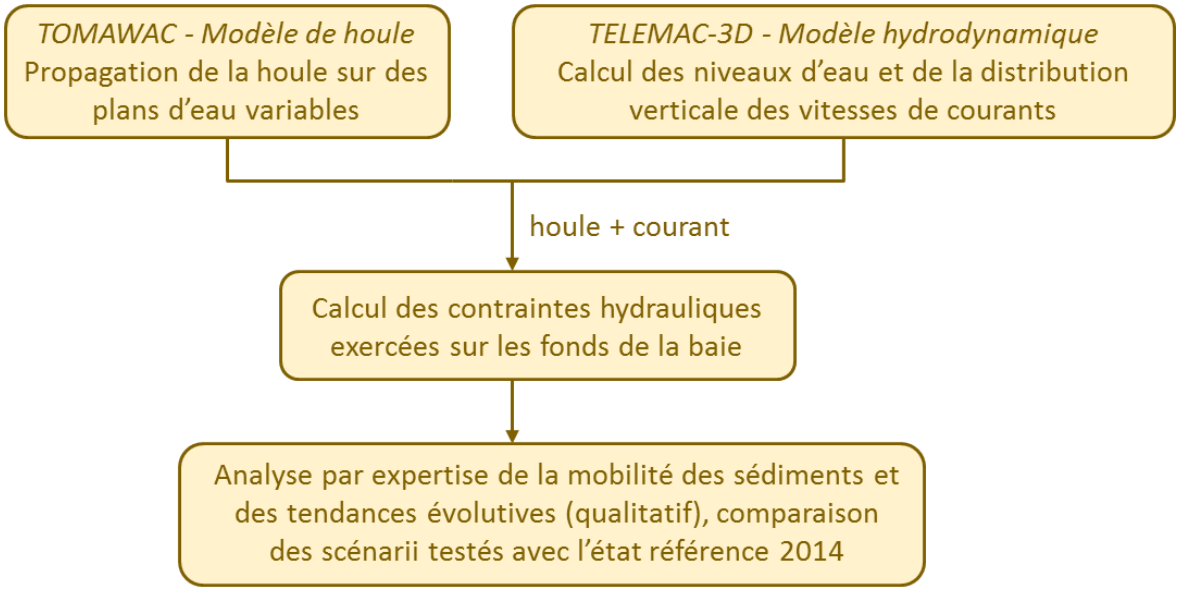


Figure 45. Méthodologie mise en œuvre dans le cadre de cette étude

Cette méthodologie, adaptée au contexte de la baie d'Authie et aux objectifs de la présente étude, est basée sur l'enchaînement suivant : modélisation hydrodynamique 3D → calcul des contraintes hydrauliques exercées sur les fonds de la baie → expertise sédimentologique sur les transports sédimentaires et les évolutions des fonds.

Elle vise à analyser la mobilité des sédiments dans la zone de projet et les tendances évolutives en résultant, afin de répondre aux problématiques hydrosédimentaires suivantes :

- Les volumes de sédiments apportés pendant la période de chantier (limités par la cadence des travaux) seront-ils suffisamment stables ?
- Une fois le chantier terminé, quelle sera la tenue du remblai sableux vis-à-vis de l'objectif de protection de 5 à 10 ans ?

5.2.2. Le modèle hydrodynamique (courantologie)

La modélisation hydrodynamique a été réalisée avec le module TELEMAC-3D (chaîne TELEMAC), qui permet de simuler la dynamique des écoulements tridimensionnels à surface libre. Il résout les équations tridimensionnelles de l'hydraulique (Navier-Stokes) à l'aide d'une méthode aux éléments finis sur une grille de calcul à éléments triangulaires. Il permet d'étudier aussi bien des domaines côtiers que fluviaux et estuariens.

Il calcule, en tous points du maillage, l'évolution temporelle de la hauteur d'eau et de la vitesse du courant sur plusieurs niveaux verticaux.

La construction et le calage de ce modèle sont présentés au §5.3.

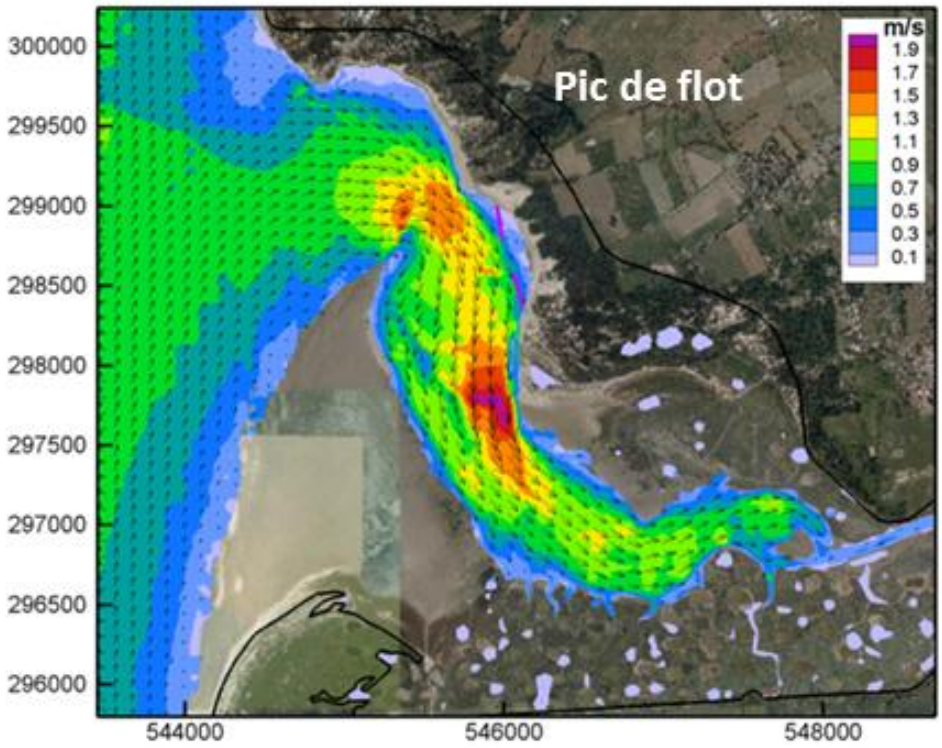


Figure 46. Exemple de champs de vitesses des courants

5.2.3. Le modèle de propagation des houles

Le module TOMAWAC (chaîne TELEMAC) a permis de propager la houle du large jusque dans la baie, et en particulier dans la zone de projet, en tenant compte des phénomènes de réfraction sur la bathymétrie, de réflexion sur les obstacles et de déferlement de la houle.

L'emprise, la bathymétrie et le maillage de ce modèle de houle sont identiques à ceux du modèle hydrodynamique (TELEMAC-3D) - voir §5.3.

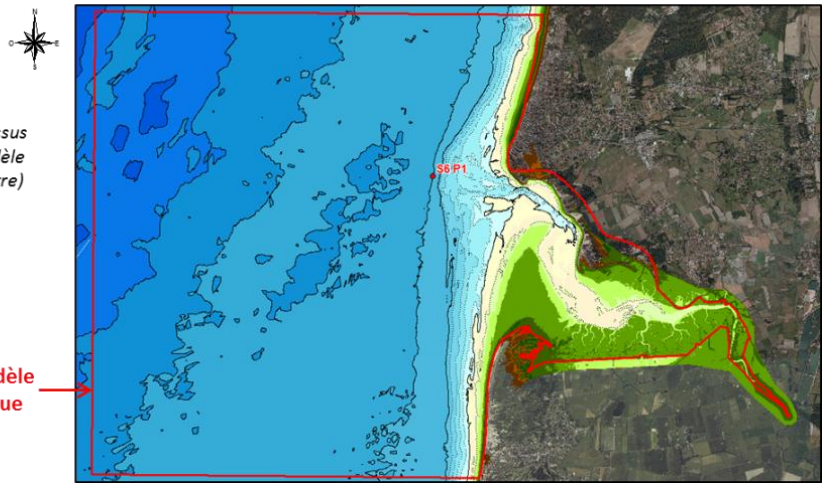
Les cas de houle modélisés pour les besoins de l'analyse hydrosédimentaire sont précisés dans le tableau suivant (houles équivalentes représentatives du climat annuel moyen de houles sur le site):

Tableau 5 – Cas de houle modélisés pour les besoins de l'analyse hydrosédimentaire

	Conditions de houles au point S6-P1 (-10 m IGN69)				A appliquer en entrée du modèle*	
N° cas de houle usuelle	Dir (°N)	Hs (m)	Tp (s)	Occurrence	Dir (°N)	Hs (m)
Calmes	0	0.0	0	19.6%		
HE 1	250	1.66	6	3.1%	250	1.80
HE 2	270	0.53	8	42.3%	270	0.60
HE 3	270	1.70	7	18.0%	270	1.80
HE 4	270	3.57	9	0.7%	270	3.70
HE 5	295	0.63	8	7.1%	295	0.70
HE 6	315	0.54	7	4.1%	320	0.60
HE 7	335	0.56	6	5.1%	340	0.60

HE = houle équivalente

**Valeurs tenant compte des processus de réfraction entre l'entrée du modèle et le point S6-P1 (voir figure ci-contre)*



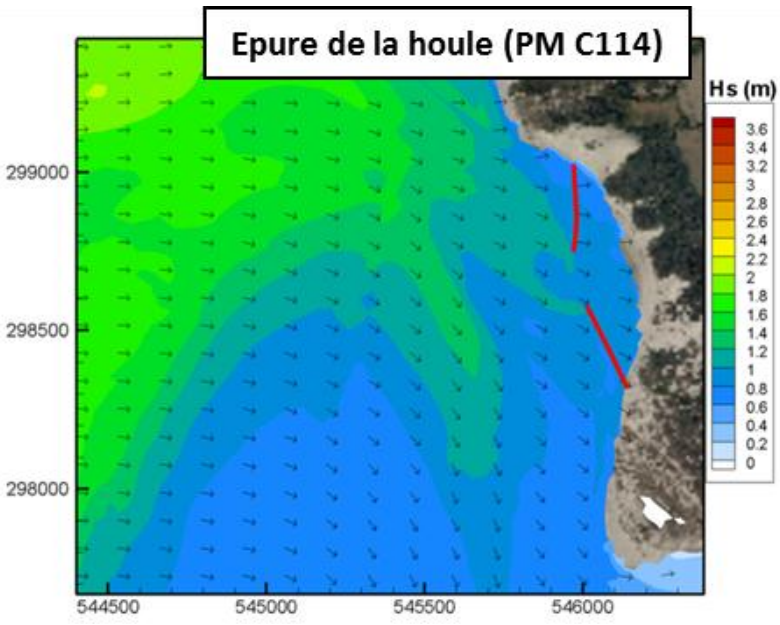


Figure 47. Exemple d'épure de propagation de la houle dans la zone d'étude

5.2.4. Calcul des contraintes hydrauliques et expertise sédimentologique

La méthode mise en œuvre a consisté à calculer la contrainte hydraulique exercée sur le fond sous l'action combinée des courants et de la houle à partir des résultats des modélisations précédentes.

Pour une paramétrisation de frottement au fond de Strickler, la contrainte hydraulique est fonction de la vitesse des particules d'eau au fond, de la hauteur d'eau et du paramètre de frottement, selon la formule suivante :

$$\tau = \frac{\rho g}{str} \times \frac{V^2}{H^{1/3}}$$

Avec :

ρ= 1025 kg/m^3 (densité de l'eau)

g= 9,81 m/s^{-2} (gravité)

str= 70 (coefficient de Strickler du modèle numérique)

V= intensité du courant (m/s)

H= hauteur d'eau (m)

Il existe des contraintes de frottement hydraulique critiques τ_{c-e} au-delà de laquelle il y a érosion, et τ_{c-s} en dessous de laquelle il y a sédimentation.

Les résultats de ces calculs sont présentés sous la forme de cartes de contraintes hydrauliques et de graphiques de l'évolution temporelle des contraintes (points sondes) pour chacun des scénarios étudiés, ainsi que pour l'état de référence (sans projet).

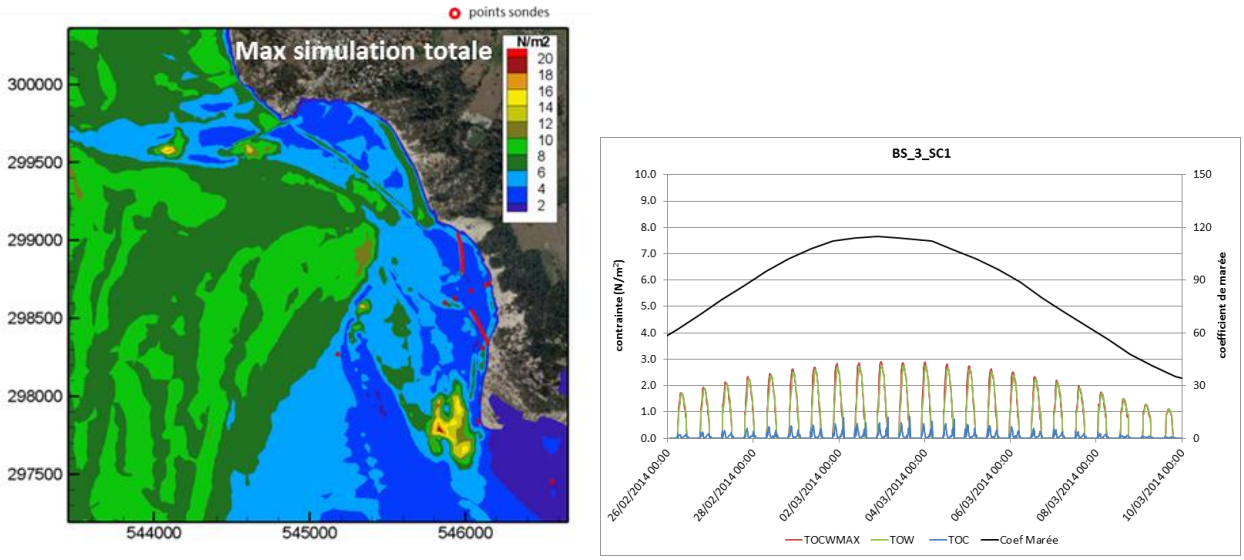


Figure 48. Exemple de carte et d'évolution temporelle des contraintes hydrauliques

Les cartes de contrainte établies pour les scénarios étudiés sont ensuite comparées avec celles de l'état de référence. Ces comparaisons sont réalisées sous la forme de différentiels des grilles de contrainte. Les cartes de différentiel ainsi obtenues permettent de mettre en évidence l'impact des différentes solutions étudiées en termes de contraintes de frottement sur les fonds.

Ces résultats de modélisation sont complétés par une expertise sédimentologique qui consiste, sur la base des cartes de contrainte et de différentiel, et plus généralement de la connaissance du fonctionnement hydrosédimentaire du site, de préciser la mobilité des sédiments selon les zones et les tendances évolutives qui en découlent (zones potentielles d'érosion et de sédimentation). Cette expertise a été menée de manière à apprécier et comparer l'efficacité des solutions étudiées sur le plan hydrosédimentaire, et de fournir les éléments nécessaires à l'analyse multicritères sur ce plan.

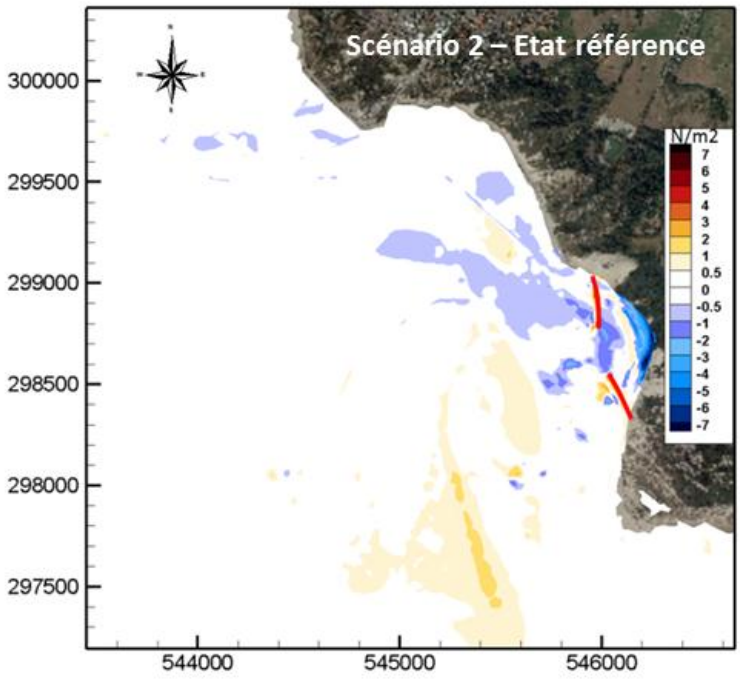


Figure 49. Exemple de carte de différentiel de contraintes hydrauliques - « Scénario testé - Etat de référence » des contraintes max

5.2.5. Etapes de modélisation et rendus

Les grandes étapes de modélisation mises en œuvre dans cette étude AVP sont les suivantes :

- Construction et calage du modèle hydrodynamique,
- Modélisation de l'état de référence (sans projet),
- Modélisation du Scénario 1 de « rechargement seul »,
- Modélisation du Scénario 2 de « rechargement + déflecteurs ».

Les principes et conclusions de chacune de ces étapes sont présentés ci-après.

Pour chaque scénario étudié, les éléments fournis sont les suivants (voir Annexes 6 à 8) :

- Les conditions de houles en entrée du modèle hydrodynamique,
- La bathymétrie et le maillage du modèle,
- La position et la profondeur des points sondes (pour l'analyse temporelle),
- Les champs de vitesses moyennes verticales aux pics de flot et de jusant,
- Pour chacune des conditions de houles modélisées :
  - Les cartographies des contraintes hydrauliques (maximum de flots, maximum de jusants, maximum de la simulation totale) résultant de l'action combinée houle-courant,
  - Une épure de la houle à Pleine Mer C114 (instant où son action est maximale dans la zone de rechargement),
  - En chaque point sonde, les graphes de l'évolution temporelle de la houle (Hs, direction) et des contraintes hydrauliques (TOC : contrainte du courant seul, TOW : contrainte de la houle seule, TOCWMAX : contrainte max houle + courant),
- L'analyse des résultats et conclusions.

5.3. CONSTRUCTION ET CALAGE DU MODELE HYDRODYNAMIQUE

Cette étape de construction et de calage du modèle hydrodynamique est détaillée en Annexe 5.

5.3.1. Le modèle hydrodynamique existant

Le présent modèle hydrodynamique a été bâti à partir d'un modèle de grande emprise produit par ARTELIA dans le cadre du PAPI Bresle-Somme-Authie [03].

Ce dernier est délimité de manière élargie, de façon à ce que les conditions de niveaux d'eau et de vitesses soient suffisamment bien connues. La partie maritime modélisée s'étend depuis 15 km au nord de l'Authie, jusqu'à 15 km au sud de la Bresle le long du littoral, et jusqu'à 25 km des côtes au droit de la baie de Somme (voir la figure ci-après).

La topo-bathymétrie du modèle de grande emprise est essentiellement définie à partir de dalles SHOM dans le domaine maritime et de données LIDAR dans le domaine terrestre. La liaison entre ces données est assurée par des levés bathymétriques ponctuels.

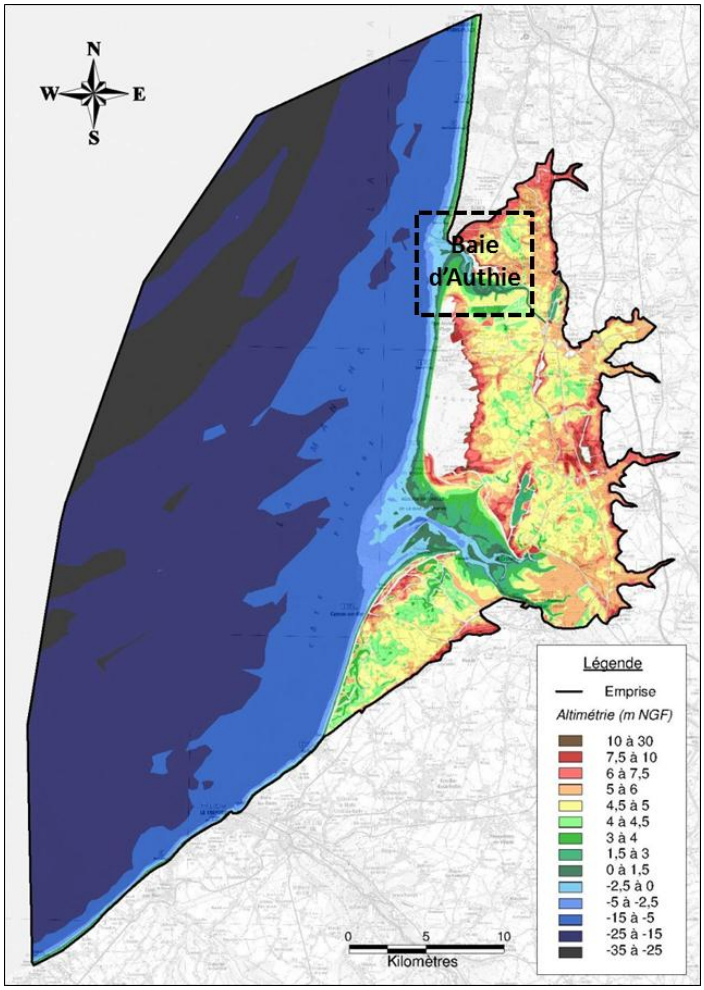


Figure 50. Emprise du modèle hydrodynamique produit dans le cadre du PAPI BSA

Le modèle existant répondant aux besoins d'une étude de grande emprise est constitué de mailles triangulaires d'une taille évoluant de 500 m à proximité de la baie d'Authie jusqu'à 100 m dans sa partie amont. Ce maillage, ainsi que la bathymétrie locale, ont été repris et adaptés dans les zones d'intérêts de la présente étude.

5.3.2. Adaptation du modèle au contexte de l'étude

5.3.2.1. Emprise et topo-bathymétrie

L'emprise du modèle, construit pour la présente étude AVP, couvre la totalité de la baie d'Authie jusqu'au Pont à Cailloux en amont de celle-ci (voir la figure ci-après). La frontière maritime s'étend sur une dizaine de kilomètres au large de la baie.

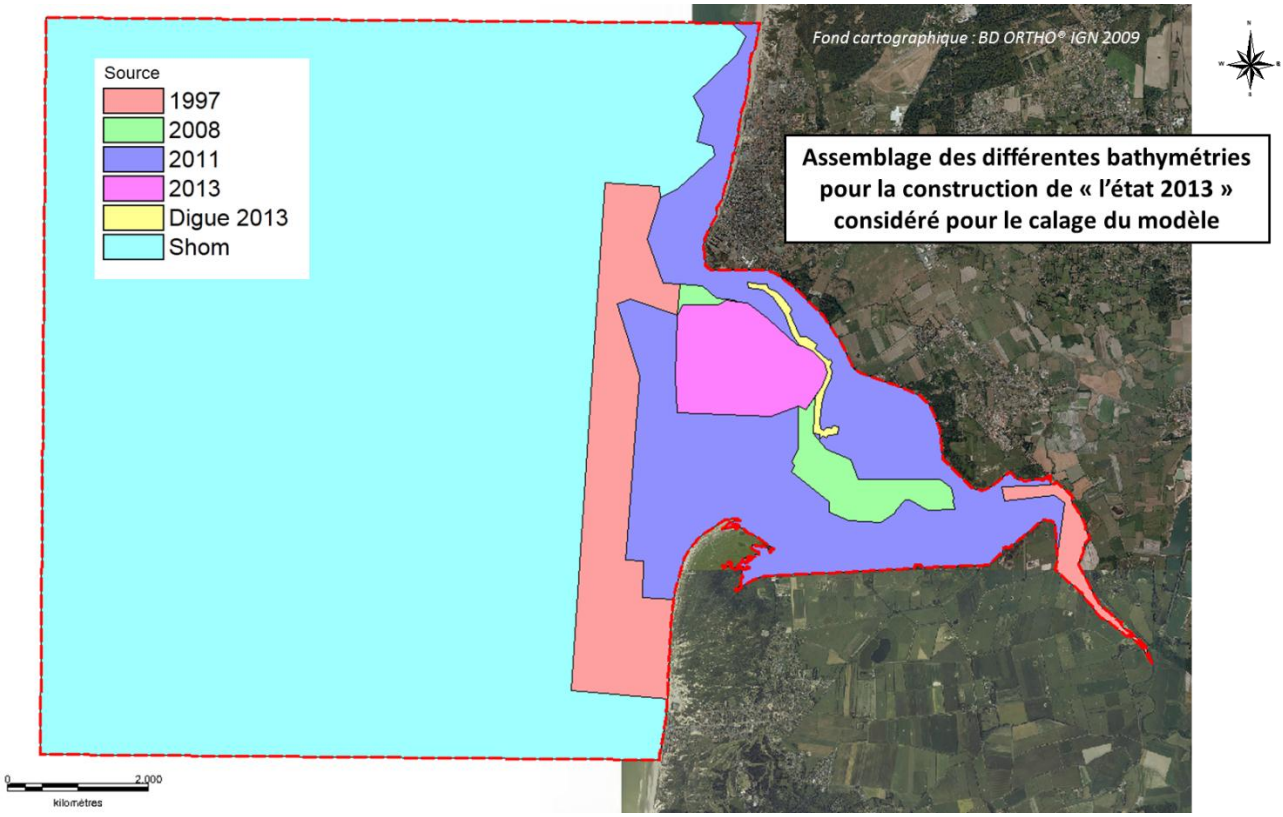


Figure 51. Emprise du modèle pour l'étude AVP et sources des données bathymétriques (« état 2013 » ayant servi au calage du modèle)

Deux modèles numériques de terrain (projection de la topo-bathymétrie sur le maillage du modèle) ont été établis pour cette étude :

- Le MNT « état 2013 », basé sur le levé de mars 2013 dans la zone de projet, qui a servi au calage du modèle hydrodynamique (les mesures de courants et niveaux d'eau disponibles datant également de mars 2013),
- Le MNT « état 2014 », basé sur le levé de juin 2014 réalisé dans la zone de rechargement (TC1, voir §3.1.3), qui a été utilisé pour l'exploitation du modèle (état de référence).

Sur les zones non couvertes par ces levés 2013-2014, les données topo-bathymétriques collectées et utilisées dans le cadre des études antérieures sur la baie d'Authie, ont été considérées en fonction de leur emprise, de leur date (les données les plus récentes ont été privilégiées), et de la cohérence des recoupements entre les différents levés. Il s'agit des données suivantes (Figure 51):

- LIDAR 2011 (source : projet CLAREC),
- LIDAR 2008 (source : DDTM59),
- Levé bathymétrique 1997 (source : Port Autonome de Dunkerque),
- Dalle bathymétrique 21601 (source : SHOM).

5.3.2.2. Maillage du modèle

La précision du modèle est directement reliée à la qualité du maillage. Cette précision n'est pas à rechercher par un nombre prohibitif de mailles de calcul, mais par une analyse fine de la géométrie et de la représentation fidèle des chenaux, ouvrages, estrans, flèches sableuses…que seul permet un maillage non structuré.

La taille des mailles du modèle a été adaptée afin de représenter fidèlement la bathymétrie tout en permettant d'avoir une bonne résolution numérique et des temps de calculs hydrodynamiques acceptables au regard du planning d'étude. Le maillage est suffisamment précis pour représenter les caractéristiques des principales formes sédimentaires dans l'estuaire et à ses abords (chenaux, bancs, estrans,…), ainsi que les ouvrages en dur présents sur le site (digue submersible, épis).

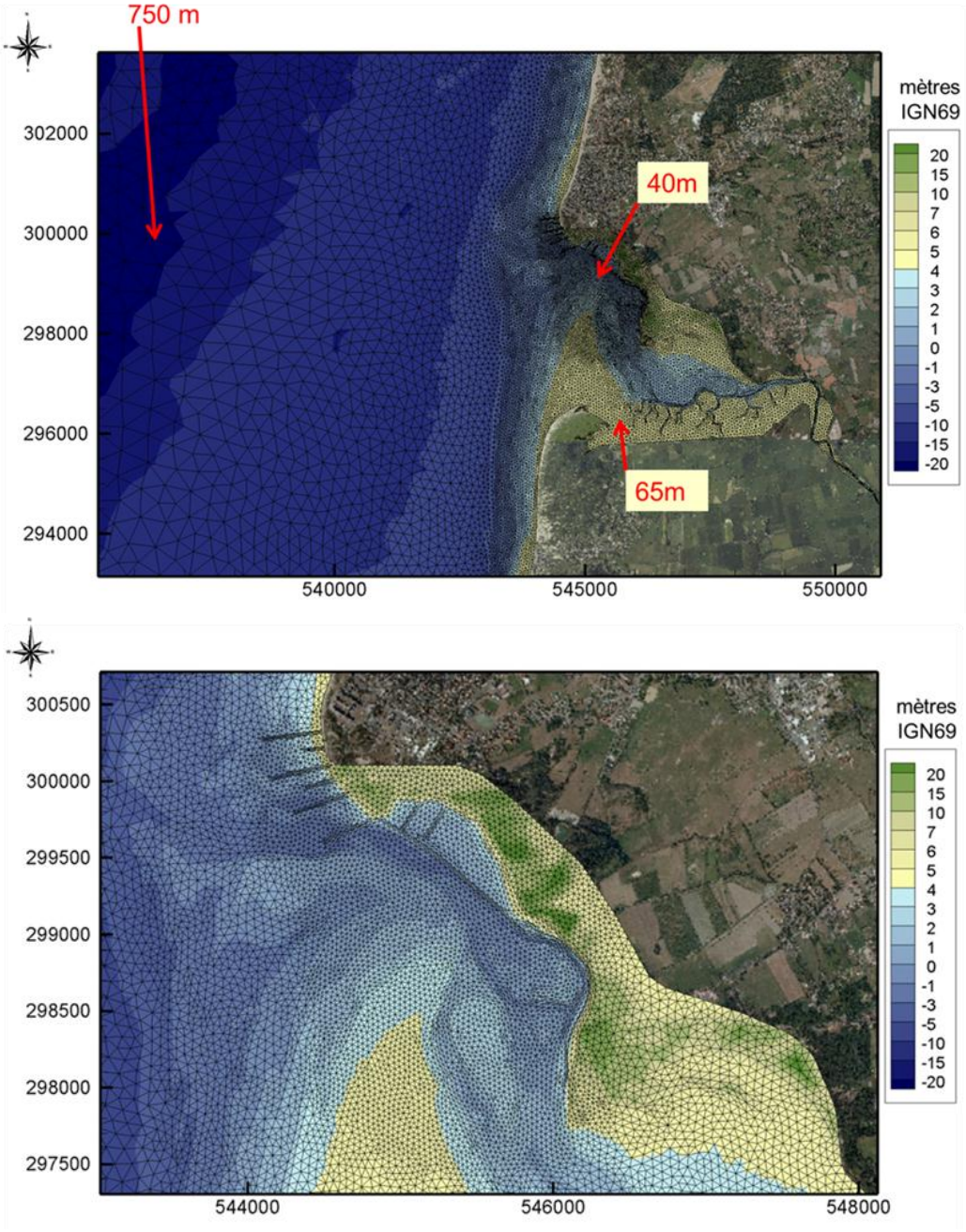


Figure 52. Maillage du modèle

5.3.2.3. Forçage du modèle hydrodynamique

Le forçage du modèle hydrodynamique s'effectue en imposant :

- La marée astronomique à la frontière maritime,
- Les débits des apports fluviaux de l'Authie.

A. Forçage maritime

Aux frontières maritimes du modèle ont été appliquées des conditions limites de type vitesses et niveaux d'eau, extraites d'un modèle hydrodynamique de grande emprise de la Manche développé par ARTELIA. Ce modèle régional de propagation d'ondes de marée, dont la bathymétrie est issue des cartes SHOM, s'étend sur environ 900 kilomètres de côtes françaises et 650 kilomètres de côtes anglaises.

B. Forçage fluvial - L'Authie

Le modèle hydrodynamique a été forcé au niveau du Pont à Cailloux en amont de la baie d'Authie. Les conditions limites de débits de la rivière Authie ont été extraites du modèle unidimensionnel (1D) produit dans le cadre des études antérieures sur la baie d'Authie, et repris pour le PAPI BSA.

5.3.3. Calage hydrodynamique du modèle

TELEMAC-3D effectue une résolution des équations tridimensionnelles de l'hydraulique (Navier-Stokes). Ces équations sont, moyennant certaines hypothèses, l'expression mathématique de lois physiques de la mécanique des fluides. Les hypothèses qui conduisent à ces équations induisent dans celles-ci la présence de paramètres dits de « calage » qui globalisent certains processus, essentiellement de frottement du fluide sur le sol.

Le principe du calage consiste donc à améliorer la représentativité du modèle par la reproduction d'événements naturels observés. Cette démarche itérative s'effectue par ajustement progressif des principaux paramètres de réglage, qui sont :

- La rugosité des fonds, qui traduit le frottement plus ou moins important de l'eau sur le sol en fonction de son état de surface ou de son occupation,
- La finesse du maillage qui permet de représenter avec une fidélité croissante le terrain.

Le calage du modèle hydrodynamique constitue une étape fondamentale de la modélisation car il conditionne la qualité et la validité des résultats ultérieurs du modèle.

Les données utilisées pour le calage du modèle sont les mesures de niveau et de courantologie acquises sur la rive nord de la baie d'Authie par la société iXSurvey pour la période s'échelonnant du 15/02/2013 au 06/03/2013 (voir la figure ci-après et le §3.4.3).

Les résultats du calage du modèle aux points A et C (pour plusieurs profondeurs d'eau entre 0,7 m et 4,5 m) sont présentés en Annexe 5 ; ils montrent globalement une bonne correspondance des résultats du modèle avec les mesures en nature 2013, permettant de valider cette étape de calage.

Le modèle est donc prêt à être exploité pour l'état de référence (2014) et les scénarios à étudier.

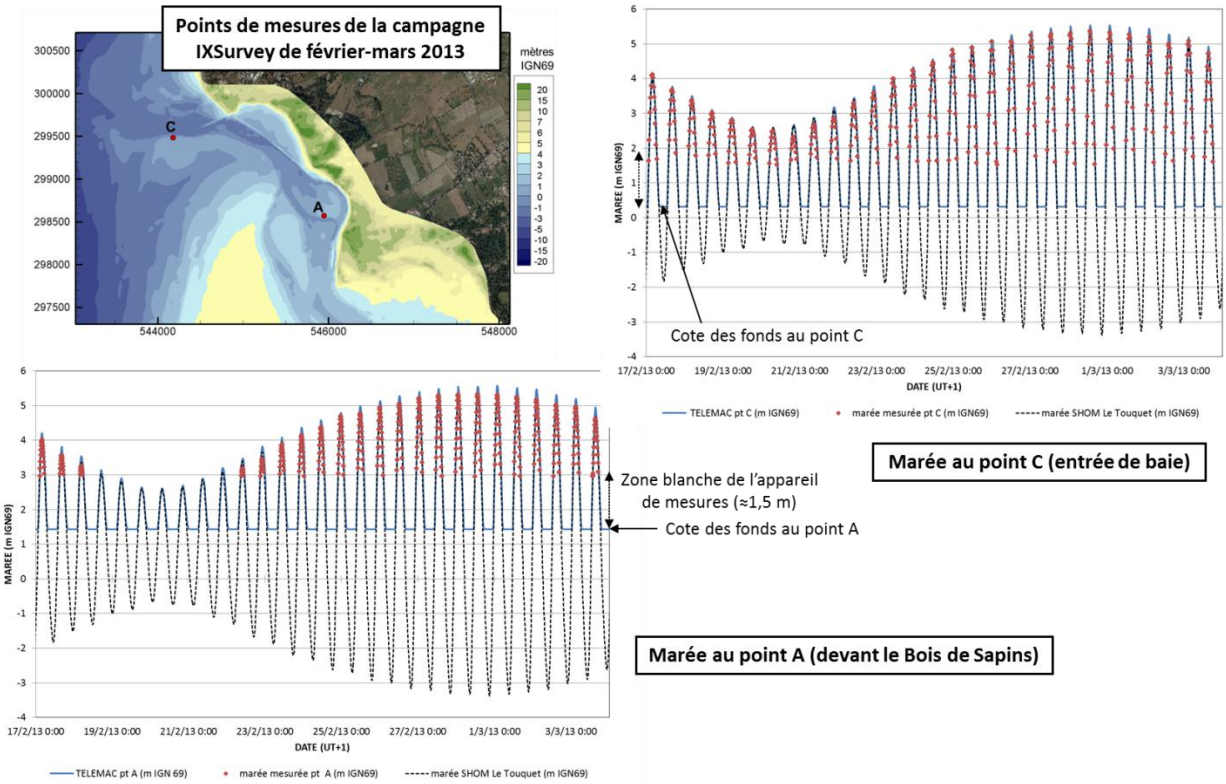


Figure 53. Calage du modèle - Marée aux points de mesures 2013 (A et C)

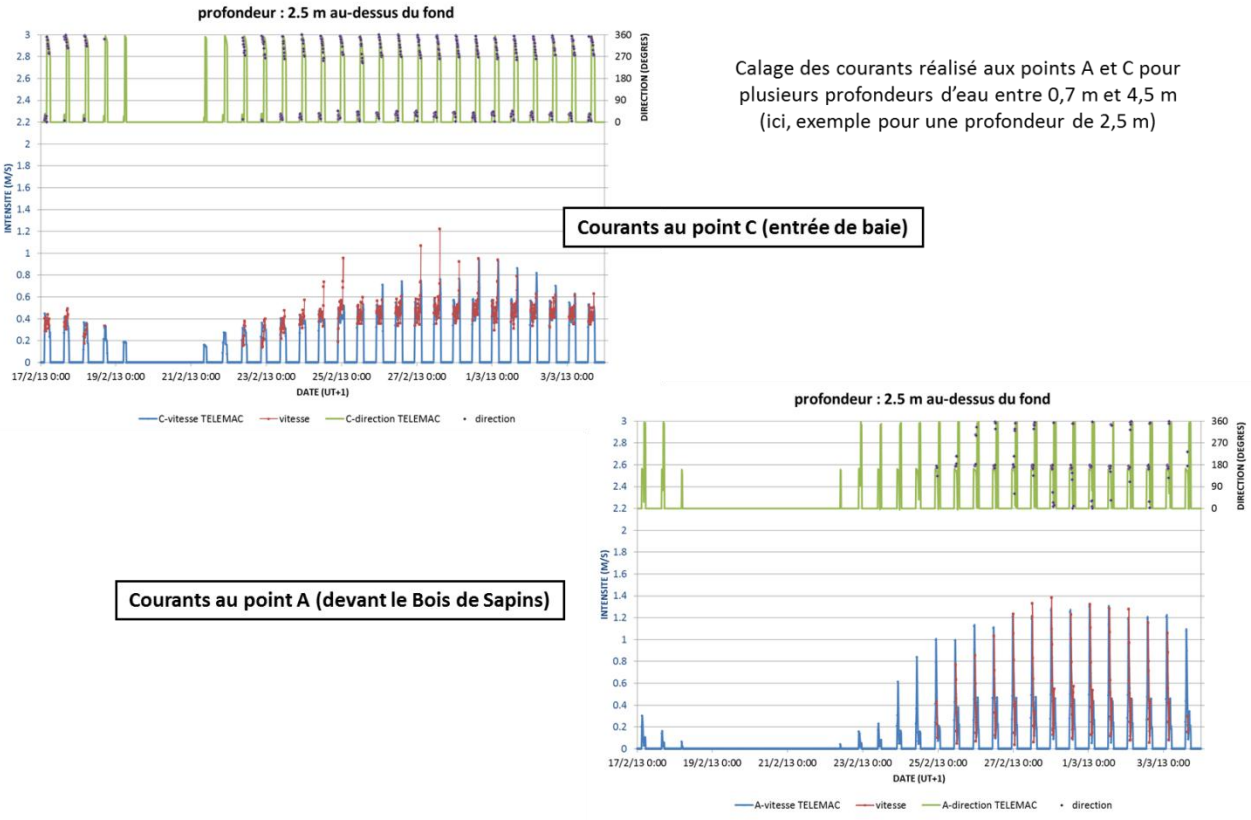


Figure 54. Calage du modèle - Courants aux points de mesures 2013 (A et C)

5.4. MODELISATION DE L'ETAT DE REFERENCE

5.4.1. Principe de modélisation

L'état de référence est basé sur le levé de juin 2014 dans la zone de rechargement du Bois de Sapins ; la bathymétrie et le maillage sont présentés sur la figure ci-dessous. Afin d'analyser les évolutions temporelles de la houle et des contraintes hydrauliques, 10 points sondes sont répartis au niveau du Bois de Sapins (BS), du Bec de Perroquet (BP) et de la Pointe de Routhiauville (PR).

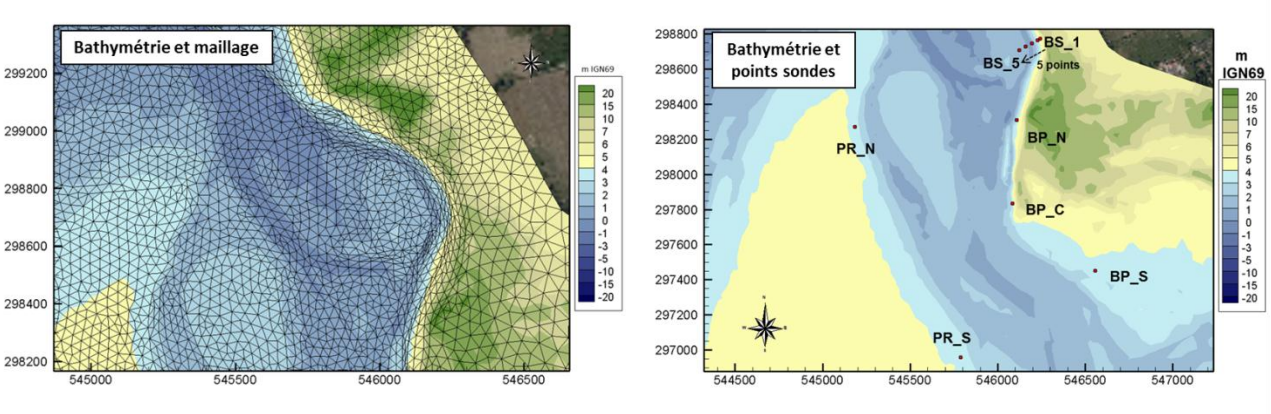


Figure 55. Etat de référence 2014 - Bathymétrie, maillage et points sondes

5.4.2. Résultats des modélisations

Les résultats de l'état référence sont fournis à l'Annexe 6 ; ils permettent de décrire la dynamique des houles (voir §3.4.4.2) et des courants (voir §3.4.3) dans la zone d'étude.

De manière générale, les résultats de contraintes sont très sensibles à la houle, et ils attestent d'une grande mobilité sédimentaire dans la baie. Les zones de contraintes les plus marquées correspondent à l'entrée de baie où l'influence de la houle est prépondérante, ainsi qu'aux chenaux dans la baie du fait de la canalisation des courants (Figure 56 en page suivante).

Globalement, les contraintes sont plus fortes au flot (actions combinées de la houle et du courant) qu'au jusant (action de la houle plus faible et opposée au courant). L'influence du jusant, alors que les niveaux d'eau dans la baie sont plus faibles, est par contre prépondérante dans les chenaux qui sont des zones à forte mobilité.

Dans la zone de rechargement (points sondes BS), on note l'action prédominante de la houle en haut estran (BS_1, BS_2), alors que l'action du courant s'intensifie en allant vers le bas estran (BS_3 à BS_5) ; pour les houles fortes, l'action de la houle reste prépondérante sur l'ensemble des points. On observe bien l'effet de cumul des actions de la houle et du courant au flot, mais leur opposition au jusant.

Dans le secteur du Bec de Perroquet (points sondes BP), l'influence de la houle reste majoritaire sur la face exposée du poulier (BP_N), mais elle s'estompe au profit du courant en allant vers le fond de baie (BP_C puis BP_S) où l'action de la marée devient prédominante. Au niveau du point BP_S, les contraintes sont relativement faibles favorisant plutôt une tendance au dépôt, ce qui est en accord avec la progression du poulier observée historiquement en nature dans ce secteur.

Sur la face interne du banc de Routhiauville (points sondes PR), l'évolution des contraintes est très dépendante du niveau d'eau et donc du franchissement ou non du banc par la houle. Dans la zone de dragage (PR_N), les contraintes max sont atteintes à Pleine Mer et pour les forts coefficients de marée (franchissement du banc) ; au jusant et/ou pour les petits coefficients de marée, les contraintes diminuent de manière sensible, favorisant plutôt une tendance au dépôt, ce qui est en accord avec l'engraissement du banc observé en nature dans ce secteur.

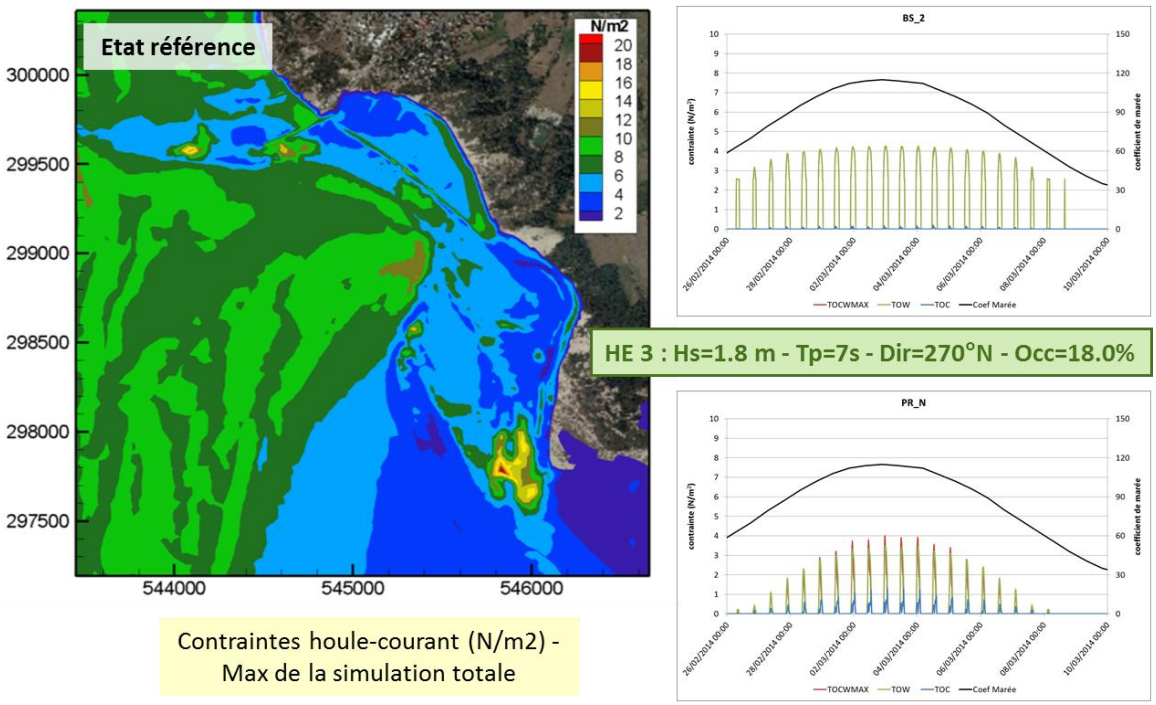


Figure 56. Etat de référence 2014 - Exemple de résultats de contraintes hydrauliques

5.4.3. Conclusion sur l'état de référence

Sur le plan sédimentaire, les résultats de contraintes pour l'état de référence (sans projet) sont bien représentatifs de la mobilité des sédiments dans la zone d'étude et des grandes tendances évolutives observées en nature : érosion au Bois de Sapins et sur la face exposée du Bec de Perroquet, progression de ce dernier vers le Sud-Est, engraissement du banc de Routhiauville sur son flanc interne par les sédiments de la baie (notons que le banc de Routhiauville s'engraisse aussi sur son flanc externe et sa crête sous l'effet de la dérive littorale en provenance du sud).

5.5. MODELISATION DU SCENARIO 1

5.5.1. Principe de modélisation

Le Scénario 1 a consisté à étudier le comportement hydrosédimentaire d'un rechargement massif seul (sans ouvrage de maintien), basé sur le dimensionnement décrit au §4.2. Ses principales caractéristiques sont les suivantes (Figure 57) :

- Volume en place au Bois de Sapins : 255 000 m^3 (dont 250 000 m^3 pour la reconstitution de la plage et 5 000 m^3 pour le comblement de la brèche),
- Configuration initiale du rechargement (avant reprofilage naturel des sables rechargés) :
  - Hauteur de berme = +7 m IGN69,
  - Largeur de berme = 100 m (au centre de la concavité),
  - Linéaire rechargé = 550 m,
  - Pente de plage = 6% environ,
  - Comblement de la brèche à +10 m IGN69,
- Volume dragué en extrémité du banc de Routhiauville : 300 000 m^3 (correspondant à un abaissement moyen du banc de 80 cm).

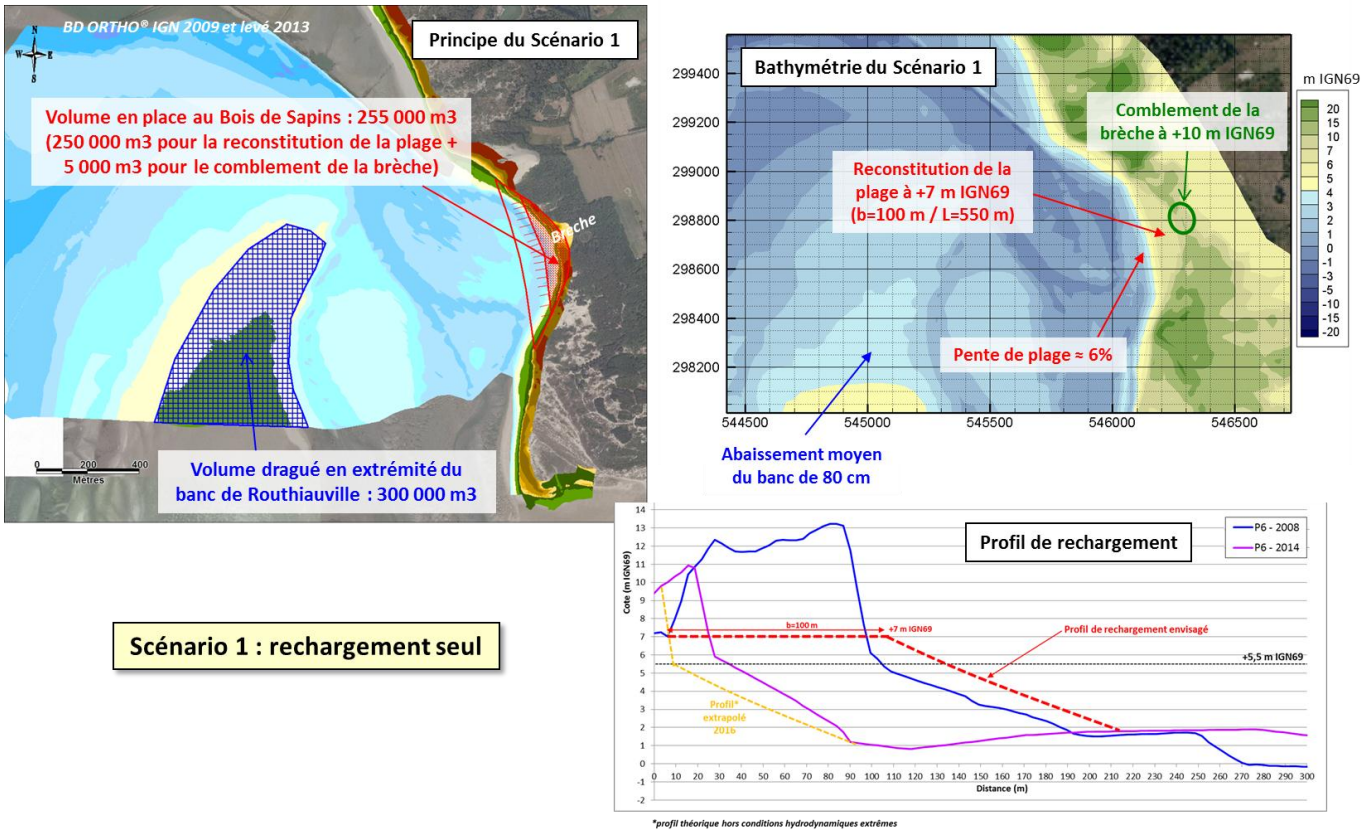


Figure 57. Principe du Scénario 1 de « rechargement seul »

5.5.2. Résultats des modélisations

Les résultats du Scénario 1 sont fournis à l'Annexe 7.

L'analyse des résultats du Scénario 1 amène les conclusions suivantes. Les impacts décrits ci-après correspondent à la comparaison de ce scénario avec l'état référence 2014.

Courants (en l'absence de houle, soit environ 20 % du temps) :

- L'impact sur les courants est localisé au niveau des zones de dragage, de rechargement, et du chenal en extrémité nord de la pointe de Routhiauville ; il n'y a pas d'impact notable en amont du Bec de Perroquet (vers le fond de baie), ni dans l'anse des Sternes.
- Au niveau du chenal en entrée de baie, on observe une diminution de la vitesse des courants (max de 1,3 m/s au flot et au jusant) par rapport à l'état référence, qui est liée à la réduction de l'effet de canalisation entre la pointe de Routhiauville et la digue submersible, du fait de l'abaissement du banc (section hydraulique plus grande, principalement au flot). A noter toutefois que le flot a toujours tendance à s'appuyer au nord, contre la digue submersible, et donc à arriver renforcé dans le secteur du Bois de Sapins.
- Dans la zone de dragage (Routhiauville), on constate un renforcement des courants au flot lié à l'abaissement du banc ; au jusant, les courants ne sont pas modifiés sur le flanc interne du banc.
- Au Bois de Sapins, l'avancée du trait de côte et la réduction de la concavité de l'anse, liées au rechargement, conduisent à rapprocher la zone active de plage de la zone d'action prédominante des courants, en particulier au flot ; ceci est bien visible sur les points sondes BS_3 à BS_5 où les contraintes du courant seul (paramètre TOC) sont plus fortes qu'à l'état référence.

Houles (environ 80 % du temps pour l'ensemble des houles) :

- La zone d'impact sur les houles a sensiblement la même emprise que celle des courants. L'abaissement du banc de Routhiauville sur une épaisseur moyenne de 80 cm entraîne une pénétration plus importante des houles dans cette zone, avec une augmentation des hauteurs de 10 à 20 % par rapport à l'état référence.
- Ce renforcement des houles est bien visible au niveau du Bois de Sapins (points BS), de la face exposée du Bec de Perroquet (points BP_N et BP_C) dans une moindre mesure, et de la zone de dragage (point PR_N). Il n'y a pas d'impact notable aux points PR_S et BP_S.

Contraintes hydrauliques :

- Les cartes de différentiel SC1-ACTUEL (Figure 58 en page suivante) mettent en évidence la zone d'impact sur les contraintes, et donc sur la mobilité des sédiments : cette zone a la même emprise que celle des courants et des houles, et elle est confirmée par les résultats aux points sondes (impact notable aux points BS, BP_N, PR_N, faible impact au point BP_C qui marque la limite sud de la zone impactée, pas d'impact aux points PR_S et BP_S et vers le fond de baie).
- En dehors de cette zone d'impact, les mouvements sédimentaires seront similaires à l'état référence, et les évolutions qui en découlent devraient donc s'inscrire dans la continuité des tendances passées (en l'absence de tout autre facteur ou projet impactant).
- Les remarques générales issues de l'analyse de l'état référence sont également valables pour le scénario 1 : prépondérance de la houle dans l'évolution des contraintes sur les fonds, grande mobilité sédimentaire sur la zone d'étude, contraintes plus marquées en entrée de baie et dans les chenaux, contraintes plus fortes au flot (actions combinées de la houle et du courant) qu'au jusant (action de la houle plus faible et opposée au courant), influence du jusant prépondérante dans les chenaux (zones à forte mobilité).
- Comme pour l'état référence, les résultats de contraintes à l'intérieur de la baie sont du même ordre de grandeur pour les houles modérées d'une part (cas 2, 5, 6 et 7), et pour les houles fortes d'autre part (cas 1, 3 et 4). Par conséquent, seuls les cas n°2 (0,6 m - 270°N), n°3 (1,8 m - 270°N), n°4 (3,7 m - 270°N) et n°6 (0,6 m - 320°N) seront conservés pour les prochains scénarios à tester pour apprécier l'impact de ceux-ci.
- Dans la zone d'impact, les cartes de différentiel SC1-ACTUEL montrent une augmentation des contraintes :
  - en arrière de la pointe de Routhiauville,
  - localement en entrée de baie, contre la digue submersible,
  - dans la zone de rechargement, au niveau de la pente de la plage rechargée (la diminution des contraintes observée sur la berme à +7 m IGN69 est due à la mise hors d'eau de cette zone par rapport à l'état référence),
  - et, dans une moindre mesure, sur la face exposée du Bec de Perroquet.

  Cette augmentation des contraintes est principalement liée à la pénétration plus importante des houles ; elle est d'autant plus marquée que les houles sont fortes. Au Bois de Sapins, la proximité de la zone active de la plage rechargée et de la zone d'action prédominante des courants, aussi bien au flot qu'au jusant, contribue également à cette augmentation.

  Cette augmentation et ses causes principales (houle et/ou courant) sont bien visibles aux points sondes BS, BP_N et PR_N.
- Dans la zone d'impact, on note par ailleurs une diminution des contraintes en partie terminale de la pointe de Routhiauville (action de la houle plus faible liée à l'abaissement des fonds), ainsi que dans le chenal en entrée de baie (action des courants plus faible liée à l'augmentation de la section hydraulique).

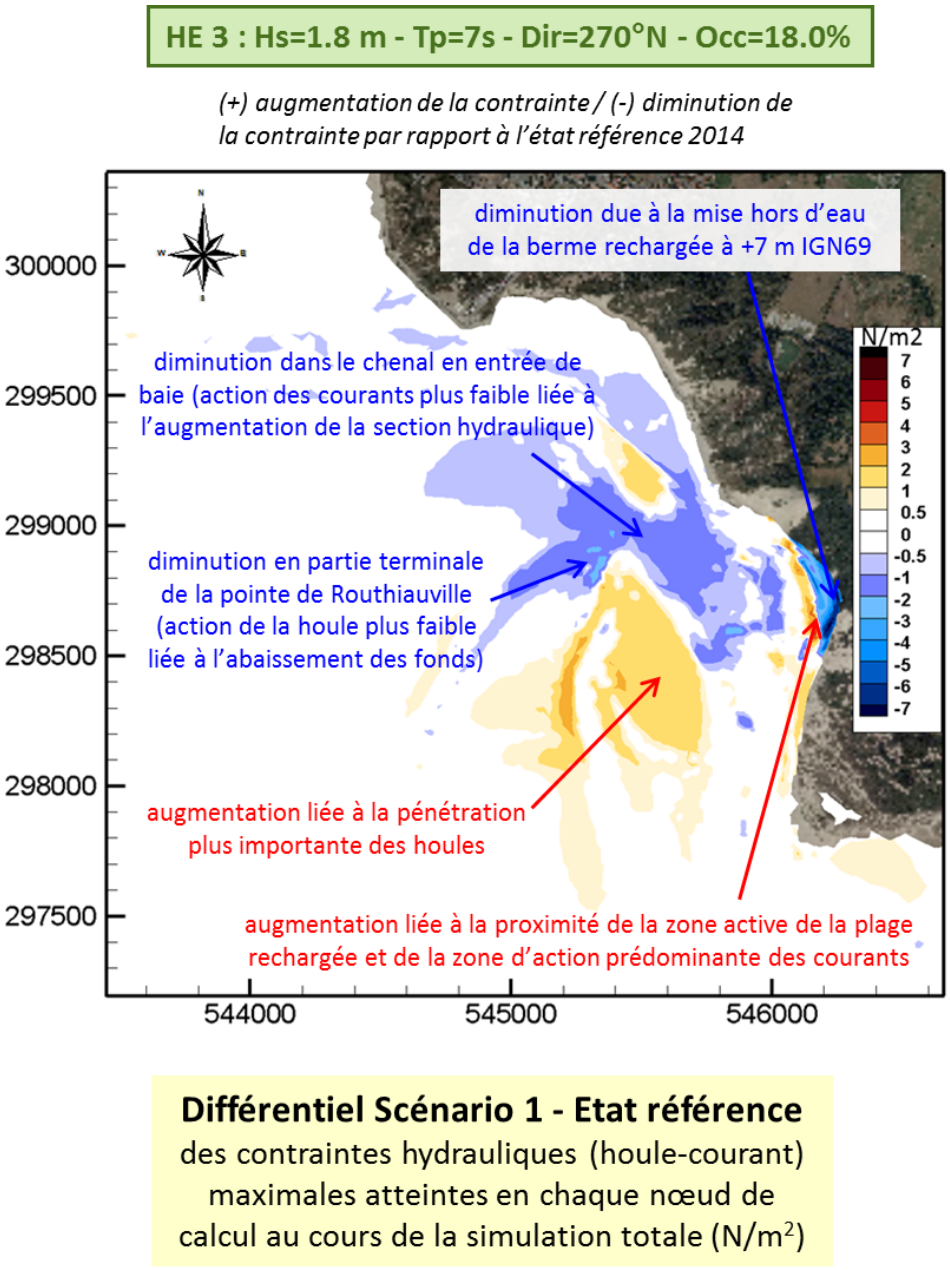


Figure 58. Différentiel de contraintes Scénario 1 - Etat référence

5.5.3. Conclusion sur le Scénario 1

Pour le Scénario 1, on observe une augmentation des contraintes dans la zone active du rechargement qui devrait se traduire par une mobilité des sédiments, et donc une érosion, plus marquées qu'actuellement au droit du Bois de Sapins.

Au regard des pertes moyennes estimées pour l'état référence (de l'ordre de 70 000 m^3/an), on peut s'attendre à une « tenue » du rechargement (255 000 m^3) inférieure à 3 ans.

La solution de « rechargement seul » n'apparaît donc pas totalement satisfaisante sur le plan hydrosédimentaire à court terme (objectif de protection de 5 à 10 ans), et des adaptations peuvent être envisagées dans le cadre du Scénario 2 à tester afin d'améliorer la tenue du rechargement dans le temps.

5.6. MODELISATION DU SCENARIO 2

5.6.1. Principe de modélisation

Le Scénario 2 a consisté à étudier le comportement hydrosédimentaire d'un rechargement massif avec des ouvrages de maintien des sables. Ses principales caractéristiques sont les suivantes (Figure 59) :

- Conservation des volumes dragués / en place (300 000 m^3 / 255 000 m^3) du Scénario 1,
- Sur le banc de Routhiauville : modification de la zone d'extraction (extension vers l'enracinement du banc et plus faible épaisseur d'extraction) pour limiter la pénétration des houles dans la baie,
- Dans la zone de rechargement : mise en place de deux ouvrages légers pour dévier les courants de flot (déflecteur nord) et de jusant (déflecteur sud) ; les caractéristiques des ouvrages modélisés sont précisées sur la figure ci-dessous.

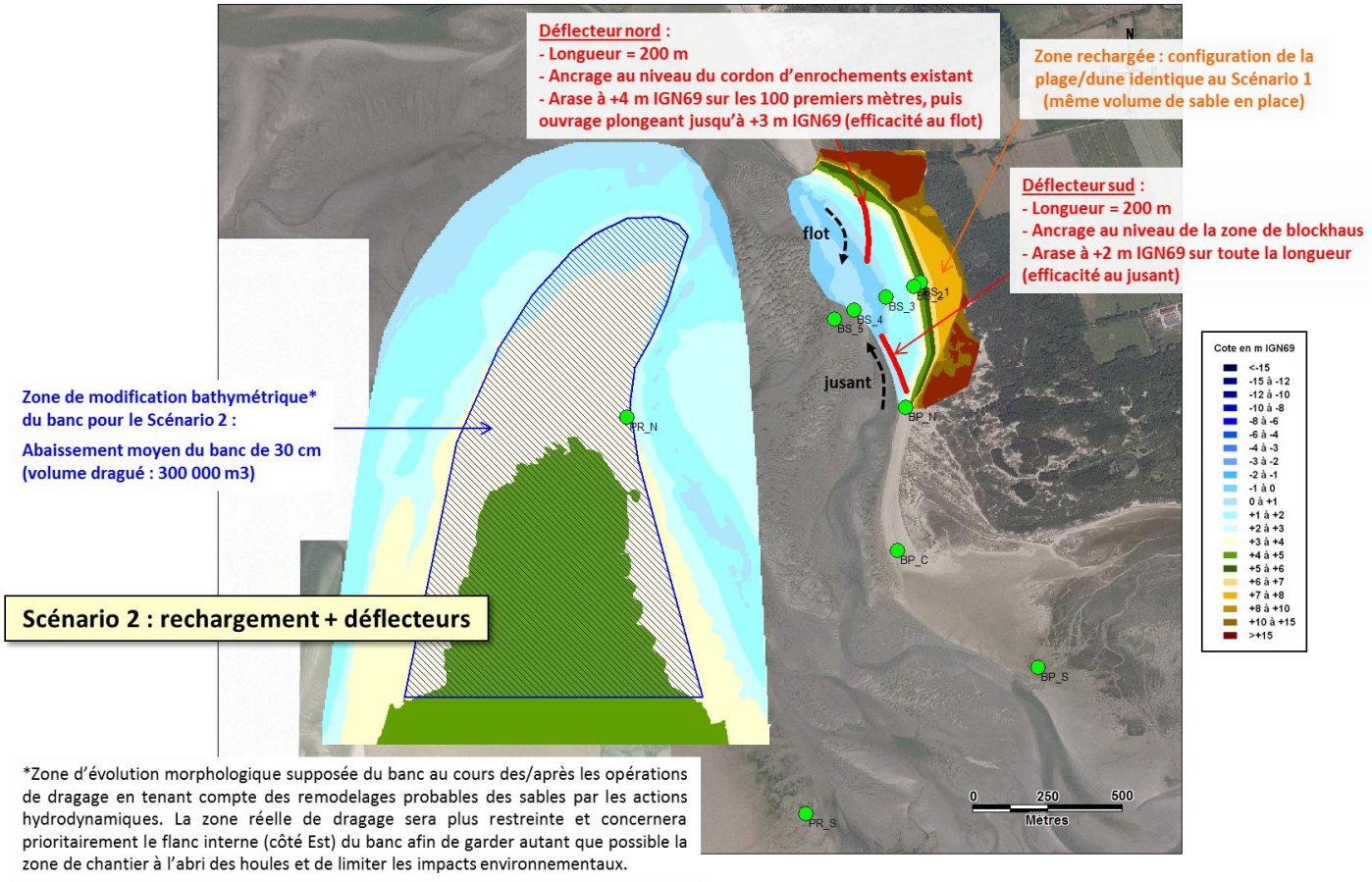


Figure 59. Principe du Scénario 2 de « rechargement + déflecteurs »

5.6.2. Résultats des modélisations

Les résultats du Scénario 2 sont fournis à l'Annexe 8.

L'analyse des résultats du Scénario 2 amène les conclusions suivantes. Les impacts décrits ci-après correspondent, sauf mention contraire, à la comparaison de ce scénario avec l'état référence 2014.

Courants (en l'absence de houle, soit environ 20 % du temps) :

- L'impact sur les courants est localisé au niveau des zones de dragage, de rechargement et du chenal en extrémité nord de la pointe de Routhiauville ; il n'y a pas d'impact notable en amont du Bec de Perroquet (vers le fond de baie), ni dans l'anse des Sternes.
- De manière générale, l'impact sur les courants est plus faible pour le Scénario 2 que pour le Scénario 1 par rapport à l'état référence, du fait de l'abaissement moins important du banc de Routhiauville suite au dragage (30 cm en moyenne pour le Scénario 2, contre 80 cm pour le Scénario 1).
- Pour le Scénario 2, la section hydraulique au niveau du chenal en entrée de baie n'est que faiblement modifiée par rapport à l'état référence, d'où une légère diminution de la vitesse des courants dans ce secteur. La réduction de l'effet de canalisation entre la pointe de Routhiauville et la digue submersible est ainsi moins marquée pour le Scénario 2 que pour le Scénario 1.
- Dans la zone de dragage, on n'observe pas de modification par rapport à l'état référence, ni au flot, ni au jusant. La crête du banc, bien que légèrement abaissée suite au dragage, reste suffisamment haute pour empêcher le franchissement du banc par les courants au flot. Au jusant, les courants ne sont pas modifiés sur le flanc interne du banc.
- Au Bois de Sapins, l'implantation de deux déflecteurs en accompagnement du rechargement a un impact très localisé sur les courants, en arrière de ces ouvrages (diminution des courants au niveau de la plage rechargée) et au droit immédiat de ceux-ci (réorientation et légère augmentation des courants localement devant les deux déflecteurs).

Houles (environ 80 % du temps pour l'ensemble des houles) :

- La zone d'impact sur les houles a sensiblement la même emprise que celle sur les courants (pas d'impact notable en amont du Bec de Perroquet, ni dans l'anse des Sternes). Elle s'étend toutefois un peu plus vers le sud au niveau du flanc interne du banc de Routhiauville, jusqu'à la limite sud de la zone de dragage. L'abaissement du banc sur une épaisseur moyenne de 30 cm entraîne une pénétration légèrement plus marquée des houles dans cette zone par rapport à l'état référence, principalement pour les fortes houles et les grands coefficients de marée. Néanmoins, cette pénétration des houles dans la baie reste bien inférieure à celle observée pour le Scénario 1 ; la pointe de Routhiauville continue d'amortir significativement les houles en entrée de baie dans le cas du Scénario 2.
- Ce léger renforcement des houles dans une partie de la baie, lié à l'abaissement du banc de Routhiauville, est visible au niveau de la zone de dragage (point PR_N) et de la face exposée du Bec de Perroquet (point BP_N). En revanche, il n'y a pas d'impact notable aux points BP_C, BP_S et PR_S.
- Au Bois de Sapins, malgré le renforcement des houles dans la baie, on constate une diminution de l'agitation à l'arrière des deux déflecteurs, de l'ordre de 10 à 20% par rapport à l'état référence (points BS_1, BS_2 et BS_3) ; les ouvrages ont donc un rôle bénéfique du point de vue de l'atténuation de la houle au niveau de la plage rechargée.

Contraintes hydrauliques :

- Les cartes de différentiel SC2-ACTUEL (Figure 60 en page suivante) mettent en évidence la zone d'impact sur les contraintes, et donc sur la mobilité des sédiments : cette zone a la même emprise que celle des houles (incluant celle des courants) et elle est confirmée par les résultats aux points sondes (impact notable aux points BS, BP_N, PR_N, faible impact au point BP_C qui marque la limite sud de la zone impactée, pas d'impact aux points PR_S et BP_S et vers le fond de baie).
- En dehors de cette zone d'impact, les mouvements sédimentaires seront similaires à ceux de l'état référence, et les évolutions qui en découlent devraient donc s'inscrire dans la continuité des tendances passées (en l'absence de tout autre facteur ou projet impactant).

- Les remarques générales issues de l'analyse de l'état référence sont également valables pour le Scénario 2 : prépondérance de la houle dans l'évolution des contraintes sur les fonds, grande mobilité sédimentaire sur la zone d'étude, contraintes plus marquées en entrée de baie et dans les chenaux, contraintes plus fortes au flot (actions combinées de la houle et du courant) qu'au jusant (action de la houle plus faible et opposée au courant), influence du jusant prépondérante dans les chenaux (zones à forte mobilité).
- Dans la zone d'impact, les cartes de différentiel SC2-ACTUEL permettent de distinguer deux secteurs :
  - la zone de plage rechargée du Bois de Sapins, protégée par les deux déflecteurs (nommée « anse du Bois de Sapins » ci-après),
  - la zone de la baie située à l'extérieur de ces ouvrages.

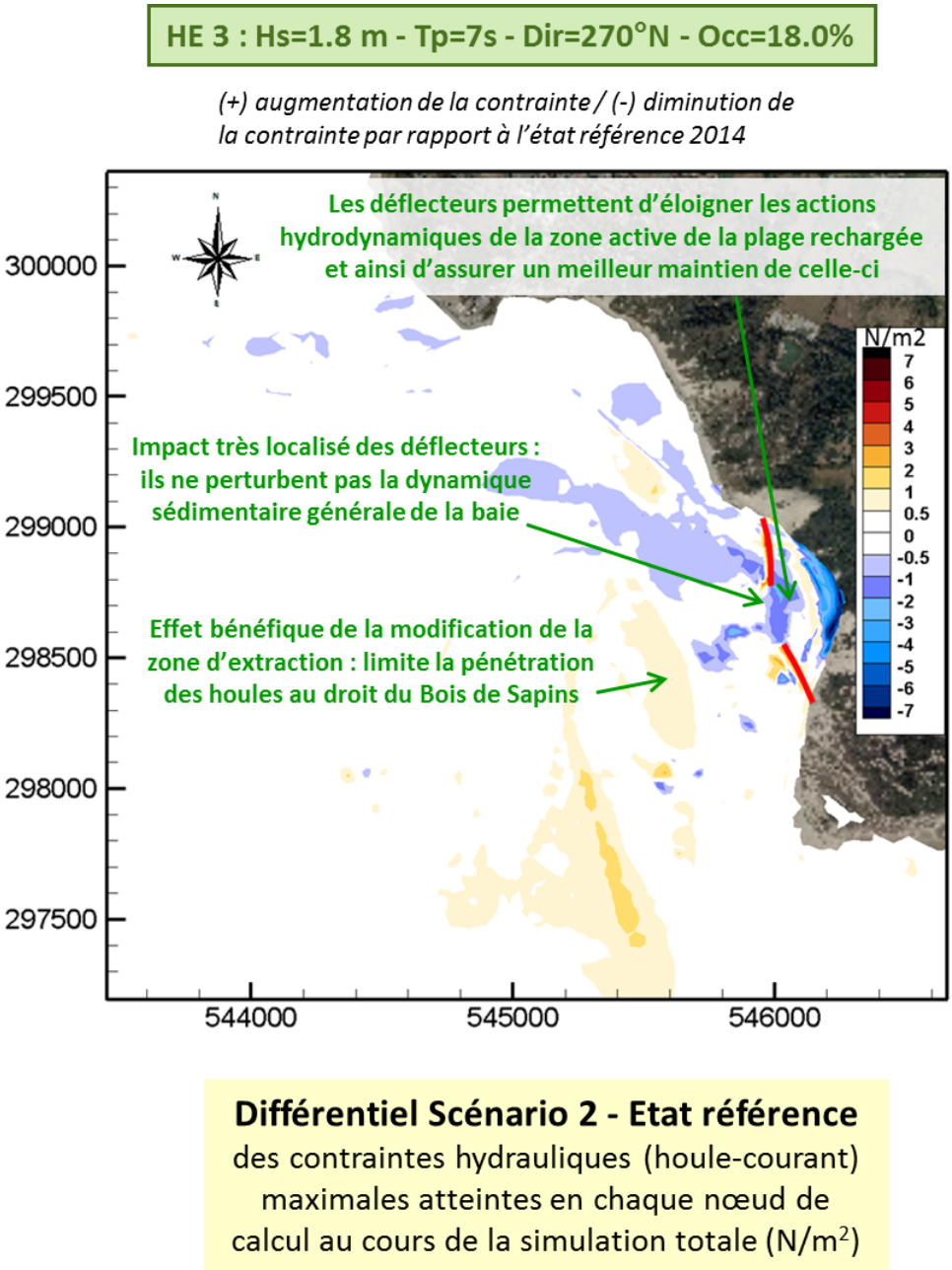


Figure 60. Différentiel de contraintes Scénario 2 - Etat référence

5.6.3. Analyse par expertise de la mobilité des sédiments

A l'extérieur de l'anse du Bois de Sapins, l'impact sur les contraintes est globalement plus faible pour le Scénario 2 que pour le Scénario 1 par rapport à l'état référence (visible par comparaison des cartes SC2-ACTUEL et SC1-ACTUEL pour un même cas de houle).

Ceci traduit l'effet bénéfique de la modification de la zone d'extraction qui permet, dans le Scénario 2, de limiter la pénétration des houles derrière la partie nord de la pointe de Routhiauville grâce à un abaissement plus faible du banc.

On peut noter une légère augmentation des contraintes sur le flanc interne du banc de Routhiauville, face au Bec de Perroquet, du fait du dragage étendu vers l'enracinement du banc. Cependant, cette augmentation reste faible et très localisée ; elle n'impacte pas le Bec de Perroquet et ne se propage pas en amont de celui-ci (vers le fond de baie).

Ces observations sont confirmées par les résultats aux points sondes : contraintes similaires pour le Scénario 2 et l'état référence aux points BP_C, BP_S et PR_S ; légère augmentation des contraintes aux points PR_N et BP_N liée à la houle (mais augmentation plus faible que pour le Scénario 1).

Ces résultats montrent également que les déflecteurs ont un impact très localisé sur les contraintes, dans leur proximité immédiate, et donc qu'ils ne perturbent pas la dynamique sédimentaire générale de la baie.

Dans l'anse du Bois de Sapins, les cartes de différentiel SC2-ACTUEL mettent en évidence une diminution des contraintes, notamment dans la zone active (pente) de la plage rechargée, qui devrait se traduire sur le terrain par un meilleur maintien des sables rechargés à l'arrière des ouvrages, par rapport à la situation actuelle et au Scénario 1 de rechargement seul.

Cette amélioration est bien visible sur les profils de contraintes maximales houles-courants (Figure 61), pour le cas de houle n°2 (houle la plus fréquente avec une occurrence de 42,3%).

Les profils P1 et P3 montrent l'effet direct positif des ouvrages qui permettent de réduire les contraintes en arrière, aussi bien en termes de valeurs maximales que de « tenue » de ces valeurs le long du profil. Cette réduction est un peu plus marquée à l'arrière du déflecteur nord (ouvrage « haut », efficacité au flot) qu'à l'arrière du déflecteur sud (ouvrage « bas », efficacité au jusant).

Le profil P2, bien que localisé dans une zone qui ne bénéficie pas de la protection directe des ouvrages, indique également une diminution des contraintes du Scénario 2 par rapport à l'état référence (excepté très localement au niveau de la partie supérieure de la plage rechargée où la faible augmentation est liée au changement marqué de configuration des fonds par rapport à l'état référence).

Pour ce profil, la contrainte maximale du Scénario 1 a également été tracée afin de confirmer l'amélioration apportée par le Scénario 2: en effet, la courbe du Scénario 2 (rouge) reste nettement en-dessous de la courbe du Scénario 1 (verte) dans toute la zone protégée par les ouvrages, et à l'inverse, la contrainte devient plus importante pour le Scénario 2 à l'extérieur de cette zone.

Les déflecteurs permettent d'éloigner les actions hydrodynamiques, notamment l'action des courants, de la zone active de la plage rechargée, et ainsi d'assurer un meilleur maintien des sables rechargés à l'arrière des ouvrages.

Ceci est également visible par comparaison des résultats de contraintes aux points sondes BS entre les scénarios 1 et 2 (comparaison directe rendue possible par la position et la cote identiques des points entre les deux scénarios), avec :

- globalement, une diminution des contraintes aux points situés dans l'anse du Bois de Sapins qui bénéficient de la protection des ouvrages (BS_1, BS_2, BS_3),

- au contraire, une augmentation des contraintes aux points situés à l'extérieur de l'anse (BS_4 et BS_5), liée principalement à des courants renforcés au flot, et dans une moindre mesure, au jusant.

NB : La comparaison des résultats de contraintes aux points sondes BS entre le Scénario 2 et l'état référence est rendue délicate par le changement marqué de configuration des fonds et l'emplacement différent de ces points.

Enfin, on peut noter sur les cartes de différentiel SC2-ACTUEL des augmentations très localisées de la contrainte à l'extrémité des deux déflecteurs, liées à une accélération des courants dans ces zones qui pourrait induire des fragilités au niveau de la partie terminale des ouvrages (zones nécessitant une surveillance particulière).

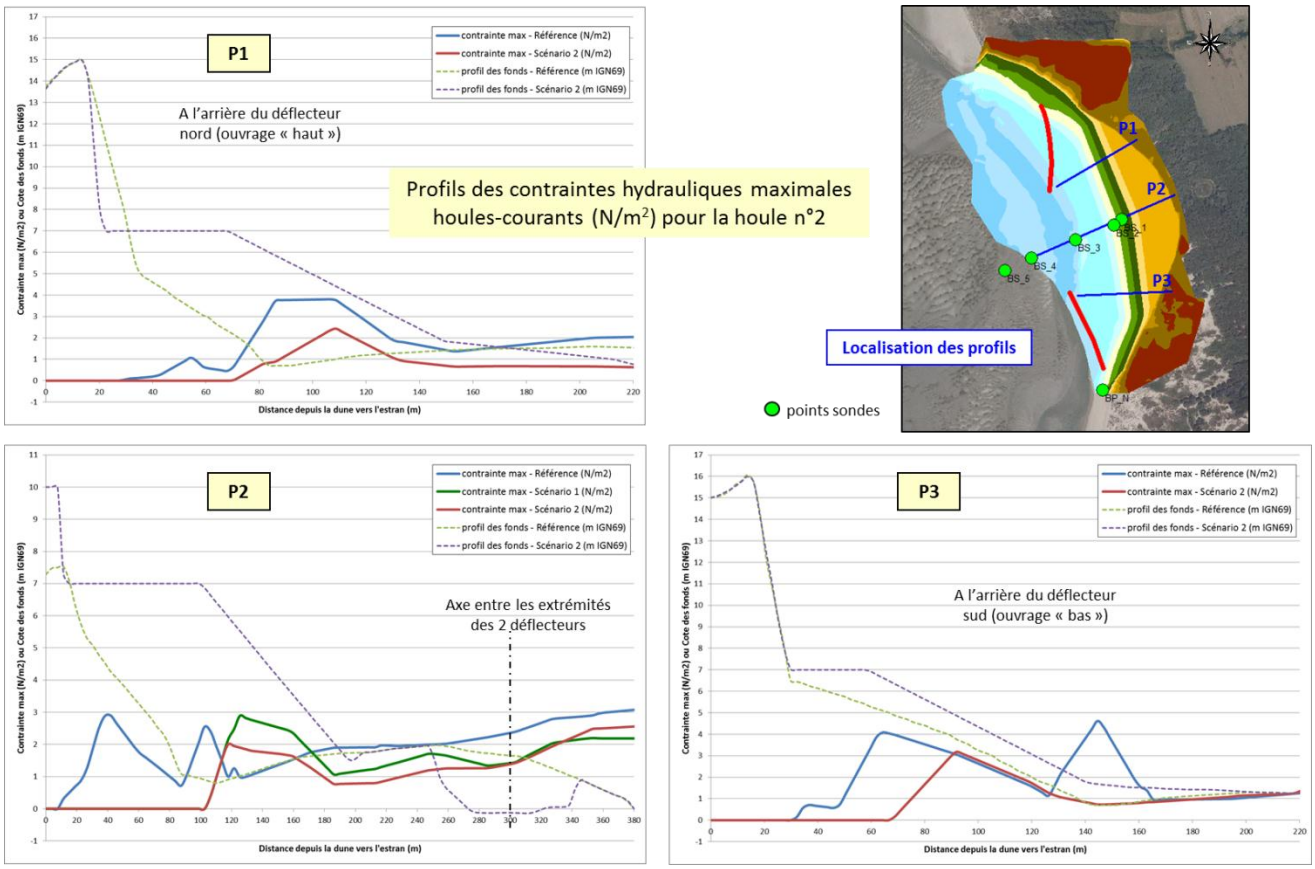


Figure 61. Analyse par expertise de la mobilité des sédiments

5.6.4. Conclusion sur le Scénario 2

Les adaptations proposées pour le Scénario 2 et testées dans le modèle (modification de la zone d'extraction sur le banc de Routhiauville pour limiter la pénétration des houles dans la baie, et mise en place de deux déflecteurs dans la zone de rechargement pour dévier les courants de flot et jusant) ont un effet positif sur le plan hydrosédimentaire puisqu'elles permettent d'assurer un meilleur maintien des sables rechargés à l'arrière des ouvrages, tout en limitant les impacts sur le reste de la baie. De plus, le déflecteur nord (ouvrage « haut ») devrait contribuer à l'accumulation de sédiments dans son « ombre » (sur sa face interne).

Il convient de préciser que ces ouvrages légers n'ont pas vocation à fixer le trait de côte, mais simplement à assurer un meilleur maintien de la plage rechargée en limitant les départs de sédiments de l'anse du Bois de Sapins. Cette zone restera toutefois mobile et continuera inévitablement à subir des pertes sédimentaires.

Une estimation de ces pertes a été réalisée par comparaison des résultats des contraintes du Scénario 2 avec l'état référence, et en considérant différentes formules théoriques de transport qui mettent en relation la contrainte sur le fond et le débit solide du sédiment (voir Annexe 8).

Sur cette base, les pertes de sédiments au niveau du Bois de Sapins seraient réduites de moitié environ par rapport à l'état référence (pour rappel, pertes moyennes actuelles de l'ordre de 70 000 m^3/an), soit entre 30 000 et 40 000 m^3/an. La « tenue » du rechargement (255 000 m^3) serait alors comprise entre 5 et 10 ans selon les conditions hydrodynamiques et l'avènement d'événements tempétueux. Cette estimation reste toutefois théorique et seul un suivi topographique régulier du dispositif une fois installé permettra de connaître les pertes réelles sur la zone de projet.

Par ailleurs, il est fort probable que le meilleur maintien du sable au Bois de Sapins entraînera une sous-alimentation des secteurs situés plus au sud. On peut donc s'attendre à une légère augmentation de l'érosion sur la face exposée du Bec de Perroquet (au sud immédiat du blockhaus, recul moyen actuel de -7 à -12 m/an) et à un ralentissement de la progression de la flèche sableuse vers le sud (avancée moyenne actuelle de l'ordre de +20 m/an, correspondant à dépôts moyens de +15 000 à +20 000 m^3/an). A noter que ce dernier point est plutôt favorable vis-à-vis du maintien du caractère maritime de la baie.

Le Scénario 2 apparaît donc satisfaisant sur le plan hydrosédimentaire et répond à l'objectif de protection de 5 à 10 ans : les pertes de sédiments au niveau du Bois de Sapins (estimées entre 30 000 et 40 000 m^3/an pour ce Scénario 2) seraient réduites de moitié environ par rapport à l'état référence, grâce aux ouvrages déflecteurs qui assurent une meilleure tenue du rechargement.

5.7. COMPARAISON DES SCENARIOS MODELISES

Afin de conclure sur cette phase de modélisation hydrodynamique, une comparaison visuelle des différents scénarios modélisés (état de référence 2014, Scénario 1 de « rechargement seul » et Scénario 2 de « rechargement + déflecteurs ») est présentée dans les figures en pages suivantes pour les courants, les houles et les contraintes hydrauliques.

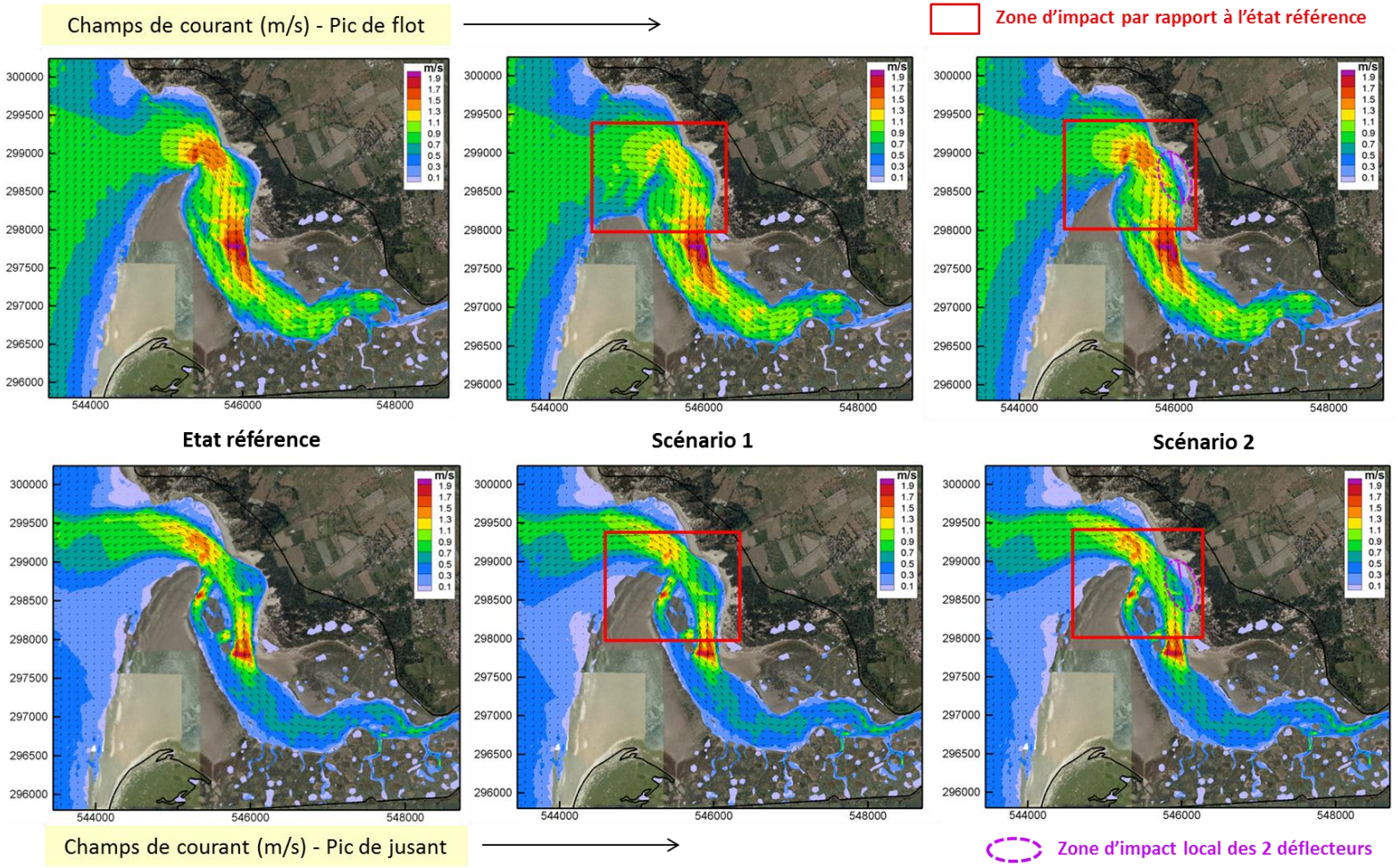


Figure 62. Modélisation hydrodynamique - Comparaison des résultats de courants

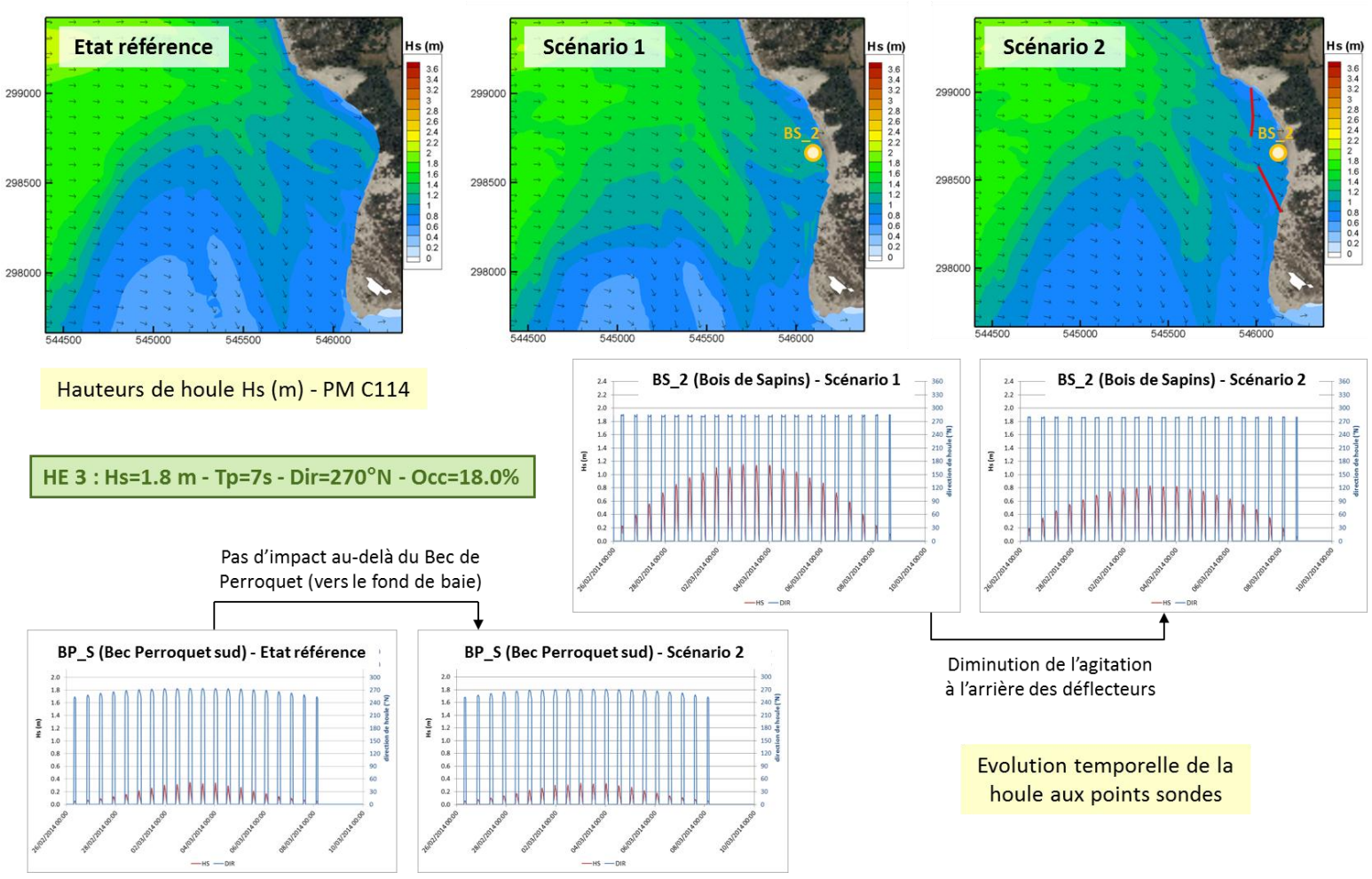


Figure 63. Modélisation hydrodynamique - Comparaison des résultats de houles

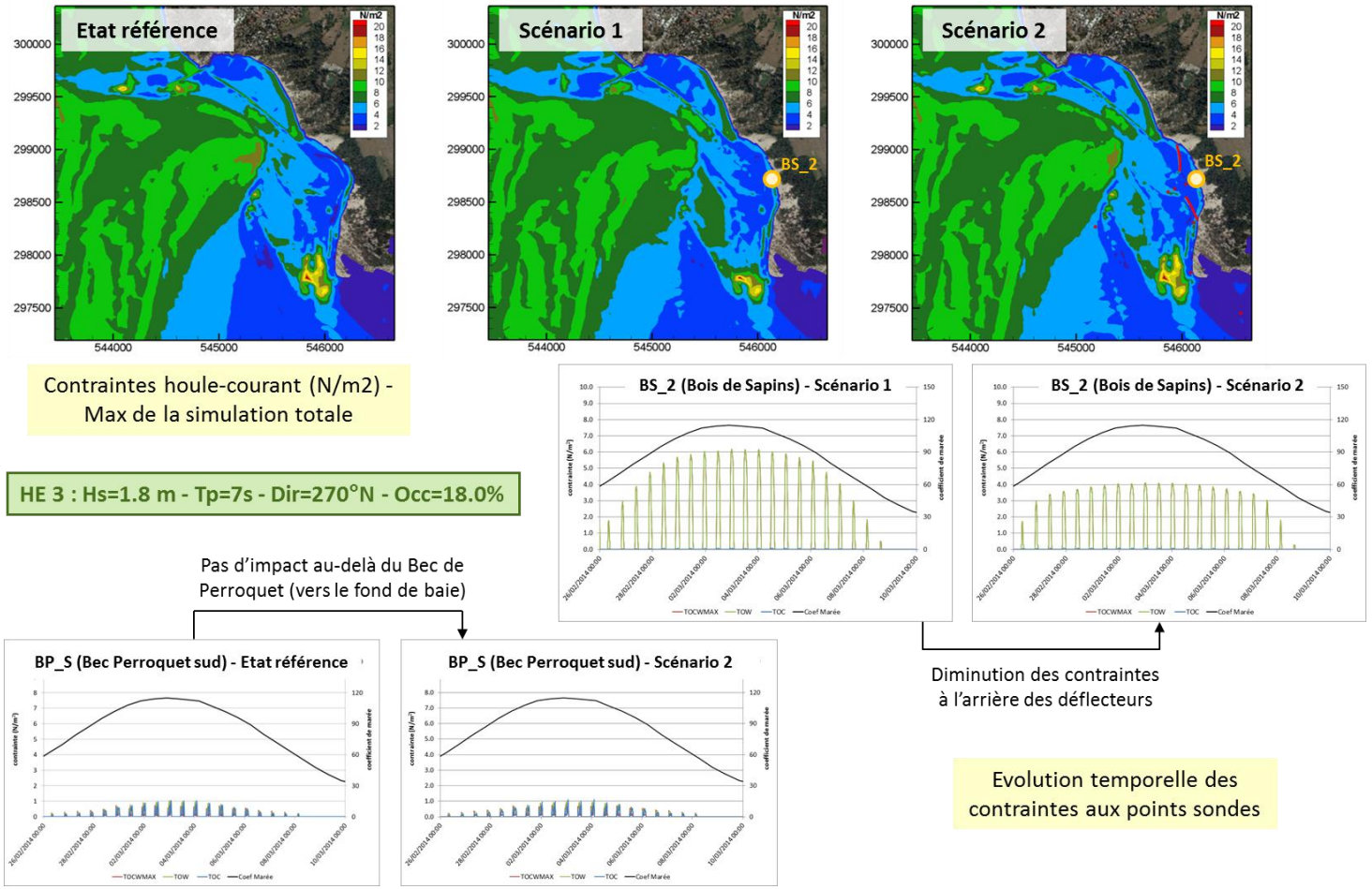


Figure 64. Modélisation hydrodynamique - Comparaison des résultats de contraintes hydrauliques

6. ETUDE COMPLEMENTAIRE : RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES ET FAISABILITE PAR VOIE TERRESTRE

Comme précisé au §4.1.5, l'analyse de la faisabilité de la solution terrestre «excavation mécanique et traversée de l'Authie » (extraction des sables à la pelle hydraulique et transport par tombereau grâce à une piste provisoire franchissant l'Authie) nécessite de procéder à des reconnaissances géotechniques afin de vérifier la nature et la portance des sols dans la zone de projet.

Cette campagne de reconnaissances géotechniques complémentaires a été réalisée fin 2015 et a fait l'objet d'un rapport « Etude complémentaire : reconnaissances géotechniques et analyse de la faisabilité du projet par voie terrestre » [05], présenté à la CCOS le 08 janvier 2016.

Les principaux résultats et les conclusions de cette étude de faisabilité sont exposés ci-après.

6.1. OBJET DE L'ETUDE COMPLEMENTAIRE

L'objet de cette étude géotechnique complémentaire est de déterminer la faisabilité de réalisation du rechargement massif prévu au droit du Bois de Sapins (300 000 m^3 de sables prélevés sur la pointe de Routhiauville) en créant une piste provisoire en travers de la baie, franchissant les bras de la rivière à marée basse.

Cette étude complémentaire comprend les prestations suivantes :

- La définition et la préparation par ARTELIA de la campagne géotechnique complémentaire nécessaire (rédaction du cahier des charges),
- La réalisation de reconnaissances géotechniques de niveau G1 par FONDASOL, sous-traitant retenu pour cette opération,
- L'analyse par ARTELIA des résultats de la campagne géotechnique,
- L'étude par ARTELIA de la faisabilité de la solution de travaux de rechargement massif du Bois de Sapins par voie terrestre.

6.2. CAHIER DES CHARGES DES RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES

Le cahier des charges des reconnaissances et études à réaliser a été établi en fonction de l'objectif recherché. Il s'agissait d'un cahier des charges de principe qu'il a été nécessaire d'adapter au cours des reconnaissances de terrain en fonction des contraintes rencontrées sur site (portance des sols), et des courtes périodes d'intervention possible (marée à forts coefficients pour permettre un niveau d'eau bas, mais durée utile faible, conditions hivernales avec durée du jour réduite due à la météo et à la marée).

Il prévoyait la réalisation d'un minimum de 22 sondages et d'un essai de roulage.

L'objectif de cet essai de roulage était de compléter les investigations géotechniques classiques afin de faire un lien entre les reconnaissances, observations et essais sur le terrain, et la faisabilité du projet de traversée de la rivière Authie.

La mission géotechnique demandée était de type G1 PGC (Principes Généraux de Construction).

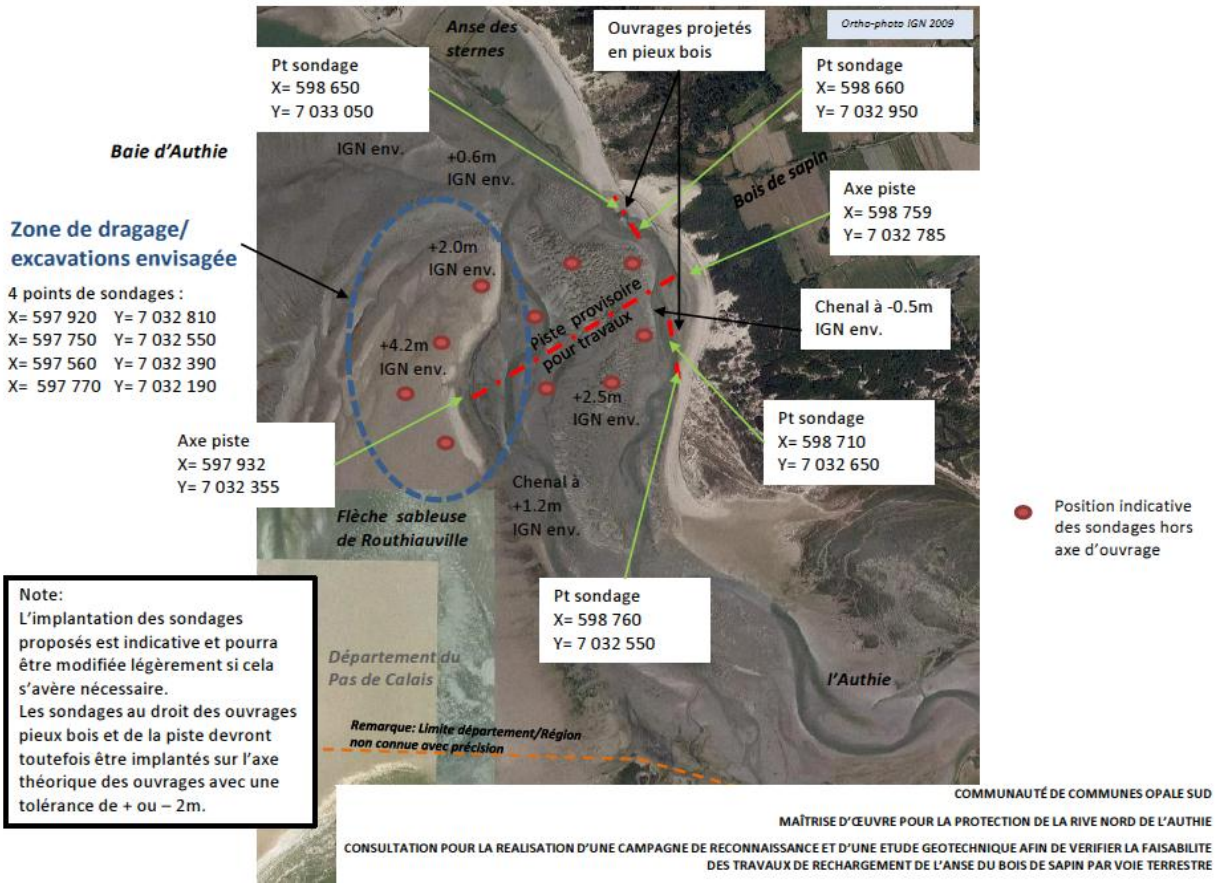


Figure 65. Reconnaissances géotechniques prévues au cahier des charges

6.3. SYNTHESE DES RESULTATS DE LA CAMPAGNE GEOTECHNIQUE

6.3.1. Déroulement de la campagne

La campagne géotechnique a été confiée à la société Fondasol, agence de Saint-Omer dans le Pas-de-Calais. La mission géotechnique de niveau G1 PGC (Principes Généraux de Construction) a permis de préciser la nature des sols dans la zone envisagée pour la traversée de l'Authie, ainsi que sur la zone d'emprunt de la pointe de Routhiauville. Le secteur des futurs ouvrages déflecteurs envisagés (côté Bois de Sapins) a également fait l'objet de sondages.

Etant donné les difficultés d'accès et contraintes du site, les sondages ont été réalisés par des moyens manuels (tarière à main et pénétromètres légers), et donc rapides à mettre en œuvre.

Outre les sondages géotechniques prévus dans l'axe de piste envisagé, des sondages ont également été réalisés de part et d'autre de cet axe afin d'apprécier l'éventuelle hétérogénéité des sols dans la zone.

Six sondages à la tarière ont permis le prélèvement d'échantillons qui ont fait l'objet d'analyses en laboratoire afin de déterminer les caractéristiques des sols en place.

Un essai de roulage avec un engin de chantier type pelle hydraulique avec chenilles « marais », adapté aux sols meubles, a également été effectué.

Le rapport G1 PGC des travaux de reconnaissances et d'essais de Fondasol est joint en Annexe 9 (référence du rapport « NSO 15.115 - pièce n°001 - Indice A » en date du 22/12/2015).

Deux interventions ont été réalisées par Fondasol, sous forts coefficients de marée (rappelés entre parenthèses) :

1. 26 au 29 octobre 2015. Fenêtre matinale privilégiée (97 et 113).
2. 26 et 27 novembre 2015. Fenêtre crépusculaire privilégiée (104).

Les sondages réalisés lors de ces deux interventions sont représentés sur la figure suivante.

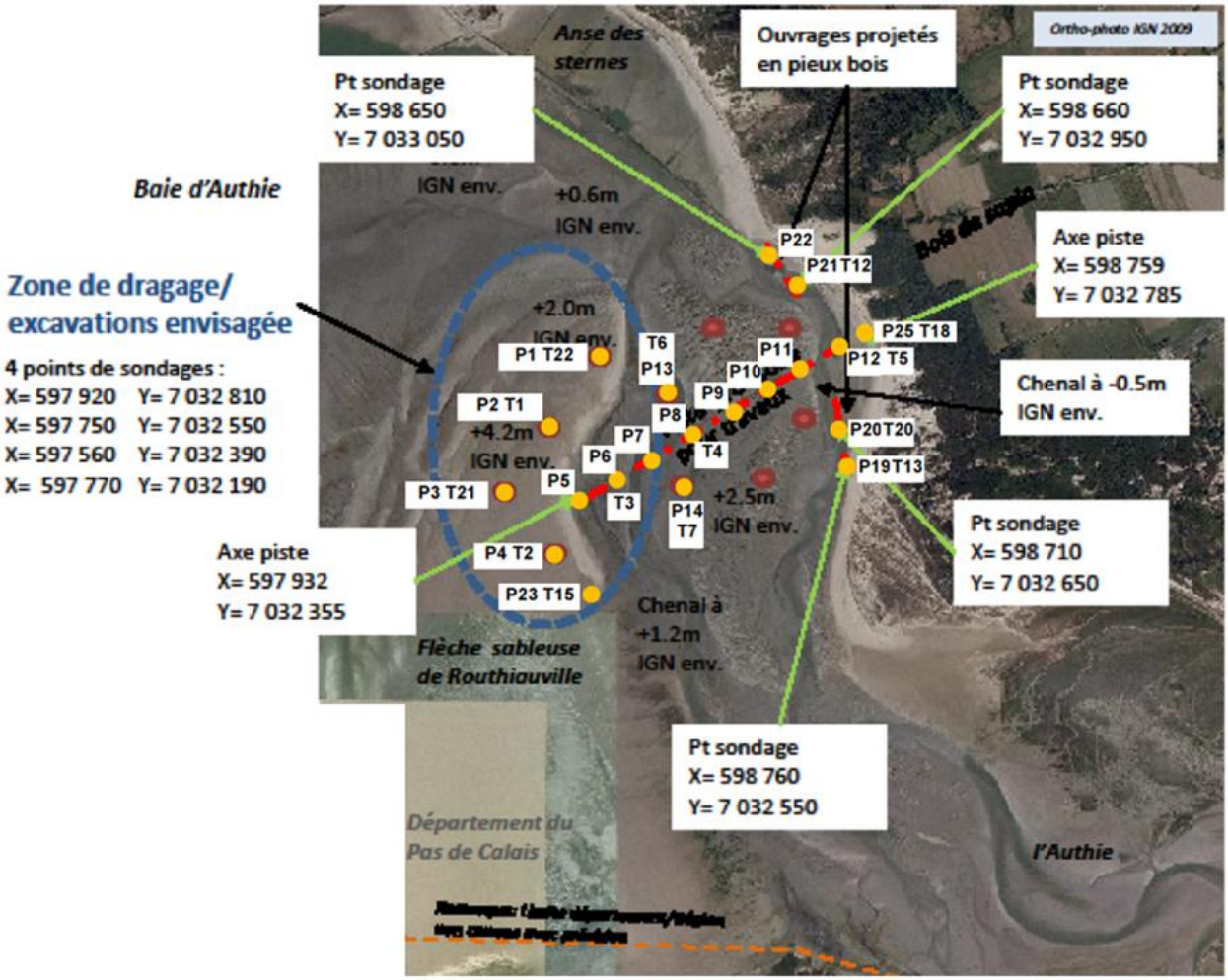


Figure 66. Reconnaissances géotechniques réalisées (étiquettes « P » pour sondage au pénétromètre léger et « T » pour sondage à la tarière à main)

6.3.2. Difficultés rencontrées par Fondasol

Fondasol a rencontré plusieurs difficultés au cours de ses reconnaissances :

- L'accès au banc de sables présent dans le lit de l'Authie, face au Bois de Sapins, s'est avéré impossible lors de la première intervention (fin octobre) en raison de la présence d'une importante couche de vase, alors que lors de la deuxième intervention (fin novembre), l'accès au même endroit s'est avéré plus aisé. Cela confirme la forte mobilité des sédiments dans la baie.
- Un engin de travaux s'est enlisé lors d'une tentative d'accès sur la pointe de Routhiauville par le Sud, ce qui montre la difficulté de circulation sur l'estran qui présente des zones de portances très hétérogènes.

- L'intervention aux horaires de marée basse a impliqué qu'une partie des reconnaissances se déroule de nuit (le matin ou le soir). Cela constitue une contrainte supplémentaire à prendre en compte lors des travaux, notamment pour la sécurité des intervenants.
- Lors de l'essai de roulage, la forte pente du sable au droit du lit de l'Authie à marée basse s'est avérée délicate à franchir pour un engin de travaux équipé de chenilles, et la hauteur d'eau, associée à la mobilité des fonds, n'a pas permis une traversée complète du lit de l'Authie (voir §6.3.5).

6.3.3. Synthèse des résultats de sondages

Le plan n°02 (voir le cahier de plans en Annexe 10) montre la localisation des sondages et essais de roulage réalisés.

20 sondages au pénétromètre dynamique et 14 sondages à la tarière à main ont été réalisés.

Les points de sondages ont été répartis régulièrement sur la zone d'emprunt envisagée, le tracé de la piste, et la zone à protéger.

Les profondeurs atteintes par ces sondages, effectués par des techniques légères, sont 1 à 3 m. Les sondages ont été réalisés sous eau, à marée basse.

Les alluvions rencontrées sont des sables, lâches en surface, avec des valeurs de résistance au pénétromètre dynamique variant de :

- Qd = 0 à 2,5 MPa,
- Hors lit de l'Authie, les valeurs augmentent un peu, et atteignent 10 MPa au droit de la zone d'emprunt et 5 MPa au droit de la zone à protéger.

Des sables vasards sont décrits par les sondages :

- T4 situé en partie ouest du lit de la rivière Authie,
- T15-P23 situé au sud de la zone d'emprunt envisagée,
- T18-P25 situé en rive droite de la rivière Authie.

Ces sables vasards superficiels n'ont pas été identifiés lors des essais en laboratoire. Les essais pénétrométriques réalisés au droit de ces horizons indiquent des valeurs de Qd effectivement faibles :

- T15-P23 : Qd ≤ 2,5 toute hauteur, fin de sondage -3m/tête,
- T18-P25 : Qd ≤ 2,5 sur une profondeur de 1,2 m.

6.3.4. Synthèse des essais en laboratoire

Les sables propres rencontrés sont de classes D1 et B5 selon les GTR (Guide des Terrassements Routiers) : les teneurs en fines sont faibles, mais leur teneur en eau est élevée.

Le diamètre passant médian D50 varie de 200 à 250 µm.

6.3.5. Compte-rendu et analyse des essais de roulage

Deux essais de roulage avec une pelle hydraulique « marais » de 13 tonnes, c'est-à-dire munie de patins élargis (80 cm), mais sans tuiles à forte motricité, ont été effectués :

1. Dans l'axe de la piste projetée : 60 m « à sec » puis 40 m dans le bras de l'Authie,
2. Sur un axe situé 200 m au nord de la piste projetée, avec 80 m dans l'eau.

Un orniérage de 20 cm a été constaté à terre. L'essai de traversée a été poursuivi dans l'eau. A partir d'une hauteur d'eau d'un mètre environ, l'engin ne pouvait plus se déplacer et a dû se dégager à l'aide du balancier et du godet.

Ces essais de roulage ont ainsi montré qu'un engin équipé de chenilles adaptées pouvait circuler sur l'estran, mais qu'il s'enfonçait localement, notamment dans la traversée de la rivière et lorsqu'il s'immobilisait (la traversée de l'Authie n'a pas pu être réalisée en raison du niveau de l'eau et de cet enfoncement de l'engin, voir les figures suivantes).

Figure 67. Photo de l'essai de roulage – partie terrestre

Figure 68. Photo de l'essai de roulage – bras de l'Authie

6.4. CONCLUSIONS SUR LA FAISABILITE TECHNIQUE DU RECHARGEMENT MASSIF PAR VOIE TERRESTRE EN TRAVERSANT L'AUTHIE

6.4.1. Les principaux enseignements des reconnaissances réalisées

Les reconnaissances géotechniques complémentaires réalisées permettent de préciser les points suivants :

- Les fonds de la baie sont constitués de sables lâches à moyennement denses dans les zones d'écoulement (lit de l'Authie), et de sables moyennement denses sur les dépôts permanents (Pointe de Routhiauville).
- Sur ces sables, on constate localement des dépôts de vases et des dépôts de sables lâches sur des épaisseurs variables d'ordre décimétrique (20 à 60 cm environ, très variable selon la zone), voire métrique. Ces dépôts sont très mobiles : entre les deux interventions réalisées par Fondasol, des zones inaccessibles en raison de la présence de vase le 26 octobre se sont avérées accessibles sur un sable porteur le 26 novembre.
- La traversée de l'Authie par les tombereaux n'est envisageable que moyennant la réalisation d'une piste « lourde » en matériaux granulaires charpentés et insensibles à l'eau d'une épaisseur d'au moins un mètre.
- Pour la mise en œuvre des matériaux granulaires de la piste de travaux, l'engin (bouteur) devra être de type « bull marais », avec des patins élargis et des tuiles à forte motricité, voire des pelles amphibies munies de dispositifs d'ancrage pour travailler sous courant. Les matériaux devront être mis en œuvre à l'avancement.
- Pour les zones non revêtues par la piste de travaux (plage du Bois de Sapins et pointe de Routhiauville), la portance du sable est en partie fonction de sa teneur en eau. Il est donc nécessaire de n'intervenir sur le sable qu'une fois ce dernier partiellement drainé ce qui a pour conséquence de réduire la durée utile de travaux lors de la marée basse.
- L'accès à la zone d'emprunt par la pointe de Routhiauville ou par la pointe du Haut Banc à Berck prend du temps. Les engins de chantier ne pouvant, en général, rester sur le Domaine Public Maritime, ce temps de mise en place réduira sans doute la période de travail sur la zone d'emprunt.
- Selon la période de l'année, le travail à marée basse nécessitera une intervention nocturne qui constitue une contrainte supplémentaire (dispositifs de sécurité des opérateurs).

6.4.2. Conclusion sur la faisabilité technique de la traversée de l'Authie par des engins de travaux

Sur la base des enseignements listés ci-avant, la traversée de l'Authie par des engins de travaux s'avère donc envisageable moyennant :

- L'aménagement d'une piste de chantier sur tout ou partie du linéaire de traversée, qui devra être entretenue pendant toute la durée des travaux,
- Le busage de la piste au droit des principaux bras de l'Authie,
- La prévision d'un entretien journalier de la piste étant donné la grande mobilité des sables et vases afin de maintenir l'ouvrage en état. Cet entretien représente un aléa fort pour la réalisation des travaux.
- L'adaptation de la durée de travail d'excavation et de transport des sables aux horaires de marée, en prenant en compte :
  - Le ressuyage du sable (plage et pointe de Routhiauville),

- Le temps d'accès des engins d'excavation au site d'emprunt (amenée et repli),
- Les moyens de sécurité liés à la marée, aux conditions météorologiques et au travail nocturne inévitable pour certaines marées.

Au droit des ouvrages déflecteurs prévus au projet, les sondages réalisés ont montré que le sable était dense et homogène. Il n'a pas été possible d'atteindre la profondeur initialement prévue (6 m) mais aucune couche de tourbe n'a été rencontrée lors des sondages. Il ne peut cependant être exclu que des couches de tourbe ne soient présentes localement dans la zone de projet. Les moyens de mise en œuvre d'une solution de type pieux (voir l'analyse des ouvrages de maintien des sables au §7) devront donc envisager cette possibilité (préforage à la tarière pour la mise en place des pieux).

6.5. LE RECHARGEMENT MASSIF PAR VOIE TERRESTRE

A l'issue de l'étude complémentaire de faisabilité, il a été décidé en accord avec la CCOS, et au regard des objectifs de la présente maîtrise d'œuvre, de compléter l'étude d'Avant-Projet sur la base d'une solution de dragage de la pointe de Routhiauville et de rechargement massif du Bois de Sapins par voie terrestre, avec traversée de l'Authie à l'aide d'une piste « lourde ».

Cependant, même si les reconnaissances réalisées permettent d'envisager techniquement la réalisation d'une piste provisoire, il convient également, afin de conclure sur la faisabilité globale du projet, de prendre en compte les contraintes budgétaires (le coût de réalisation et de maintien de la piste implique un coût des travaux dépassant largement le montant initial envisagé par le maître d'ouvrage) et environnementales (la « faisabilité » de cette solution terrestre vis-à-vis des enjeux environnementaux doit être vérifiée).

Ces compléments d'analyse sont présentés aux §9 (estimations des coûts) et §11 (conclusion sur la faisabilité du rechargement massif du Bois de Sapins).

Il faut d'ores et déjà noter que cette solution implique un coût et une durée de travaux bien au-delà des objectifs initiaux fixés dans les critères de projet (voir §4.1.2 et §9.2.1).

Le rechargement par voie terrestre via la route est également chiffré pour comparaison (§9.2.2).

6.5.1. La solution étudiée au stade Avant-Projet

Le plan n°05 (voir le cahier de plans en Annexe 10) montre l'implantation indicative de la piste provisoire et les sections de principe de la piste envisagée.

Comme indiqué plus haut, cette piste devra couvrir l'ensemble du linéaire de traversée de la baie, soit environ 1000 m à minima.

Les travaux consisteraient en :

- Décaper les vases de surface sur l'emprise de la piste et au-delà sur une bande de 5 à 10m.
- Mettre en place un géotextile et le cas échéant une géogrille.
- Mettre en place un remblai calibré pour la couche de fondation.
- Au droit des bras de l'Authie, les buses ou dalots seront mis en place sur la fondation filtre/ remblai. Une souille sera réalisée afin de mettre en place un large tapis en enrochements pour prévenir les affouillements.
- Finition du remblai de la piste à la cote minimale de +1.0 m IGN69.
- Dans toutes les zones où la piste se situe au-dessus du terrain naturel, les effets de seuils qui vont apparaitre à chaque marée nécessitent la mise en place d'une protection du talus de la piste et d'un tapis anti-affouillement. Cette protection provisoire sera réalisée à l'aide d'enrochements calibrés et/ou de tapis poreux, type gabions ou équivalent.

- Au droit des passages busés, il sera nécessaire de protéger les cônes d'entonnement (guidage du flot vers les dalots ou buses). Ces protections pourront être réalisées à l'aide de palplanches.

La tenue de cette piste provisoire constitue un aléa fort pour le chantier. Elle va en effet grandement influencer les cadences de rechargement.

Une piste trop légère serait peu coûteuse lors de sa réalisation mais impliquerait un entretien quotidien coûteux et de nature à empêcher la circulation des engins sur une partie de la fenêtre de marée basse.

S'agissant d'un ouvrage provisoire, cette piste sera à la charge des entreprises ; il conviendra donc de prévoir dans le document d'appel d'offre des spécifications de nature à imposer une tenue minimale de cette piste pendant toute la durée des opérations.

L'aléa lié à la rapide évolution des fonds et à la divagation du lit de l'Authie ne pourra par contre être totalement maîtrisé et ne sera pas de la responsabilité de l'entreprise. Il constitue donc pour le maître d'ouvrage un risque de dérive tant financière du projet que de durée globale des travaux.

Le tracé de la piste, ainsi que le type de piste et les coupes de principe, figurés sur les plans en Annexe 10 sont indicatifs et devront être adaptés en fonction de la configuration des fonds et du site au moment des travaux. On s'assurera notamment que la piste a un impact minimal sur le cours de l'Authie et ne génère pas d'augmentation de l'érosion à la côte. Il faudra toutefois prévoir une gestion de cet impact au cas par cas, en cours de travaux, en raison de la grande mobilité des fonds qui pourra être localement accentuée par les travaux.

Ces caractéristiques techniques seront à affiner au stade PROJET et lors de l'élaboration des documents d'appel d'offre (mission ACT). Le type de piste pourra être ouvert à variante, sous condition de prise en compte par l'entreprise de l'ensemble des contraintes du site développées dans le présent rapport (justifications techniques requises).

6.5.2. La durée des travaux

La durée de réalisation du rechargement massif par voie terrestre est estimée comme suit :

Rechargement avec traversée de l'Authie : 7 mois

Rechargement par la route : 6 mois

On constate que les délais envisageables sont significativement supérieurs au critère identifié dans les critères de base du projet (voir §4.1.2.4), ce qui a un impact sur l'efficacité du rechargement par rapport aux pertes naturelles d'une part, et sur l'environnement (naturel et humain) d'autre part.

Ces durées seront difficilement réduites car elles sont liées aux contraintes de marée d'une part (pour les deux solutions), et à la capacité d'absorption du trafic routier d'autre part (solution par la route).

7. LES OUVRAGES DE MAINTIEN DU SABLE

7.1. OBJECTIFS DES OUVRAGES

La modélisation numérique réalisée pour le Scénario 1 (rechargement seul, voir §5.5) a montré que l'augmentation des contraintes hydrauliques dans la zone active du rechargement allait se traduire par une forte mobilité des sédiments, et donc entraîner une érosion plus marquée qu'actuellement au droit du Bois de Sapins (comparaison avec l'état de référence), pouvant limiter la « tenue » du rechargement sur une durée inférieure à 3 ans.

La solution « rechargement seul » ne permet donc pas de satisfaire l'objectif de protection de 5 à 10 ans (critère de projet).

Il a donc été proposé, en Scénario 2 (voir §5.6), la mise en place de deux ouvrages déflecteurs pour dévier les courants de flot (déflecteur nord) et de jusant (déflecteur sud).

A l'issue des modélisations, le Scénario 2 apparaît satisfaisant sur le plan hydrosédimentaire et répond à l'objectif de protection de 5 à 10 ans : les pertes de sédiments au niveau du Bois de Sapins (estimées entre 30 000 et 40 000 m^3/an pour ce Scénario 2, avec des ouvrages « pleins ») seraient réduites de moitié environ par rapport à l'état référence, grâce aux ouvrages déflecteurs qui assurent une meilleure tenue du rechargement.

Il convient également de préciser que ces ouvrages légers n'ont pas vocation à fixer le trait de côte, mais simplement à assurer un meilleur maintien de la plage rechargée en limitant les départs de sédiments de l'anse du Bois de Sapins pendant la durée de protection provisoire. Cette zone restera toutefois mobile et continuera inévitablement à subir des pertes sédimentaires.

7.2. SOLUTIONS TECHNIQUES EXISTANTES

Dans ce paragraphe, les différentes solutions techniques a priori envisageables pour la réalisation de ces déflecteurs sont passées en revue et analysées.

7.2.1. Enrochements

La solution technique la plus courante pour réaliser un épi est l'utilisation d'enrochements naturels, comme réalisé pour la protection de l'anse des Sternes.

Cette solution présente l'avantage d'être pérenne et durable, mais ne constitue pas à proprement parler une solution « légère ».

Figure 69. Cordon en enrochements de l'anse des Sternes

7.2.2. Palplanches

Un rideau de palplanches autostable pourrait être envisagé pour la réalisation de cet ouvrage, mais cette solution présente de nombreux inconvénients.

Un rideau de palplanches constitue en effet un mur continu, peu poreux. Dans le cas du Bois de Sapins, il serait soumis à l'impact direct de la houle et des courants, et surtout à de forts risques d'affouillements qui nécessiteraient la mise en place d'un large tapis en enrochements à son pied. Cette solution ne constitue donc pas un ouvrage « léger » à proprement parler.

De plus, l'utilisation de palplanches ne permettrait pas une bonne intégration à l'environnement du site. Ci-dessous, l'exemple de l'extrémité de la digue submersible de l'anse des Sternes dans son état actuel.

Figure 70. Palplanches affaissées à l'extrémité de la digue submersible des Sternes

7.2.3. Pieux bois

Les pieux bois, placés en une ou deux rangées, permettent de perturber le flux du courant et de limiter le départ du sable en arrière de la protection. Il s'agit toutefois d'un ouvrage poreux d'où la nécessité d'une réflexion sur la disposition et l'écartement des pieux en fonction de la configuration du site à protéger (dispositif expérimental la plupart du temps).

Cette solution présente l'avantage de bien s'intégrer dans l'environnement du site.

Figure 71. Exemple de rideau double de pieux bois sur le littoral de Berck

NB : Une rangée de pieux bois (avec des filets de pêche réformés, voir les photos ci-après) a été mise en place par la CCOS au droit du Bois de Sapins avant les grandes marées de mars 2015, en complément d'un rechargement de 3 000 m^3 de sable provenant de la plage de Berck. Le coût de cette opération est d'environ 60 000 €.

Figure 72. Pieux bois mis en place au Bois de Sapins en mars 2015

Sources des photos : ADCMBA SOS Baie d'Authie

7.2.4. Système S-Able

En novembre 2014, la CCOS a fait installer un dispositif expérimental nommé S-Able au niveau du blockhaus (au sud immédiat du Bois de Sapins, voir la figure ci-dessous). Ce dispositif breveté de filet, développé par la société ABLE et appelé « dune de turbulence », devrait permettre d'après son constructeur de « limiter les effets de l'érosion sur le site du Bois de Sapins en amenant le cours de l'Authie à déplacer son lit et en assurant une sédimentation progressive pour une surface allant jusqu'au Bois de Sapins » [21].

Le coût de ce dispositif est d'environ 150 000 €.

D'après la CCOS, il est prévu de rehausser de 2 m ce filet S-Able, actuellement ensablé.

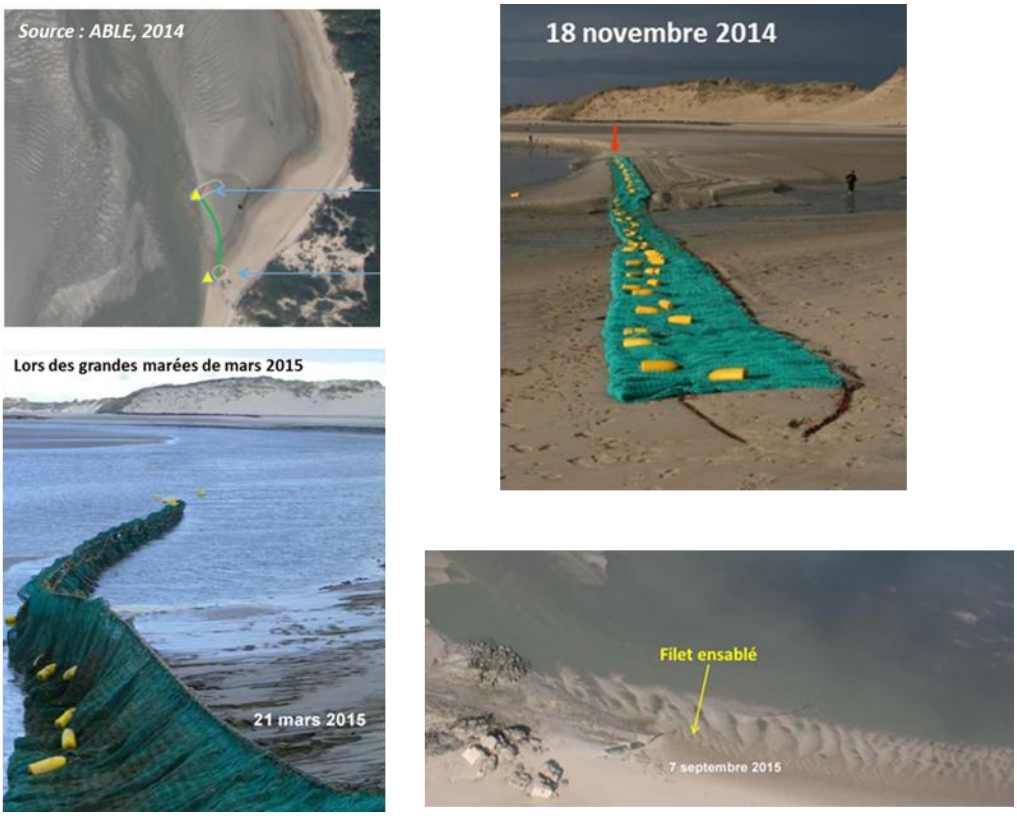


Figure 73. Dispositif expérimental S-Able - Anse du Bois de Sapins

Sources des photos : ADCMBA SOS Baie d'Authie

7.2.5. Boudin géo-composite

Cette solution technique est composée d'un boudin en géotextile ou en matériau équivalent, rempli de sables, et reposant sur un tablier anti-affouillement maintenu en place par des tubes d'ancrage également remplis de sables (Figure 74).

Ces ouvrages sont relativement fragiles (abrasion, UV, vandalisme,…), avec une durée de vie plus courte que des ouvrages classiques type enrochements. Ils nécessitent un entretien fréquent.

Ces ouvrages sont très sensibles à l'action directe des vagues et des courants ; en outre, sur des sites comme le Bois de Sapins où les courants sont forts et peuvent transporter des corps flottants (typiquement des branchages), le risque de dégradation du géotextile est accru.

Pour ces raisons, ils sont généralement plutôt envisagés en protection directe de pied de dune, avec maintien autant que possible d'une couverture de sable pour limiter leur exposition aux aléas météo-océaniques et aux corps flottants. Dans ces conditions, ils visent à assurer un « seuil » de garantie de protection en cas de recul brutal du trait de côte en tempête.

En revanche, ce type d'ouvrage n'apparaît pas adapté en position avancée sur l'estran, comme c'est le cas des deux déflecteurs envisagés ici.

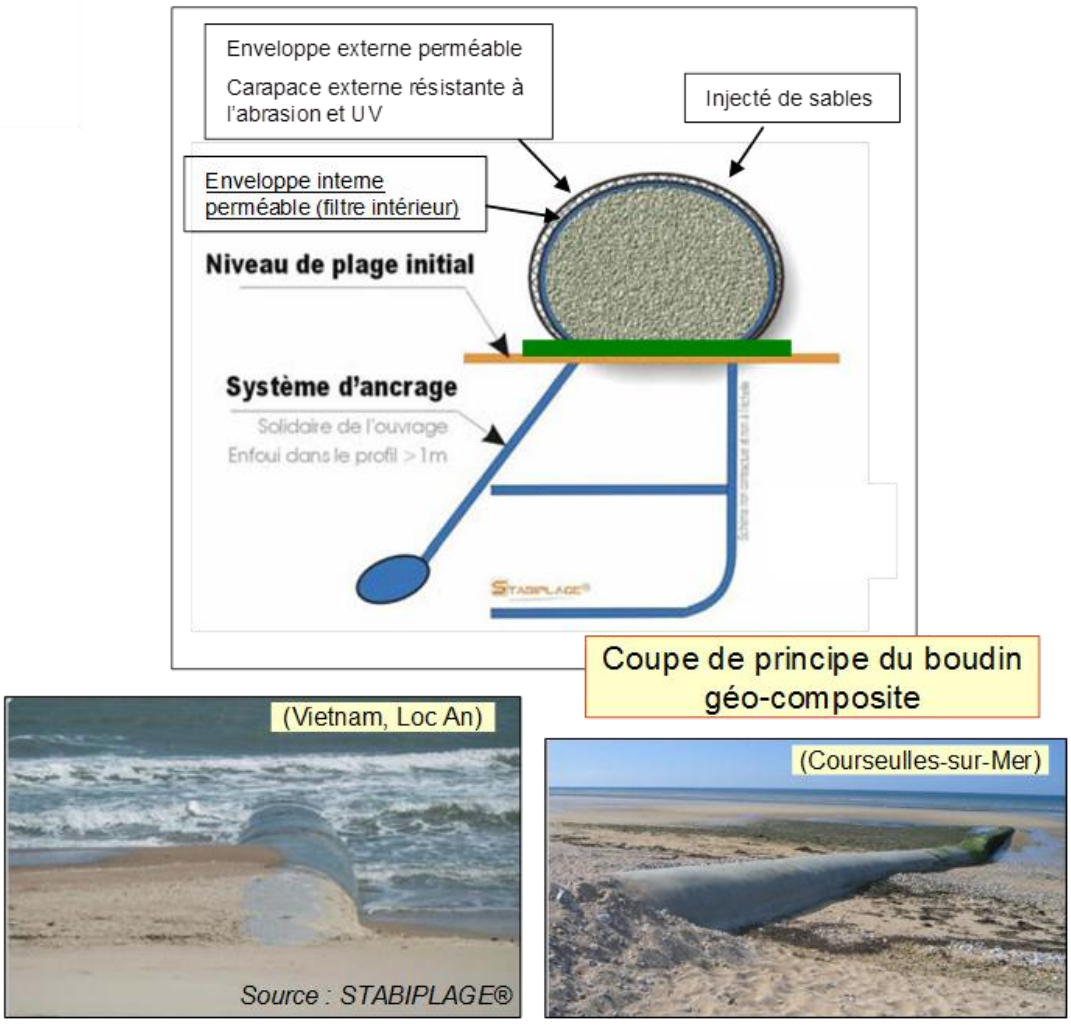


Figure 74. Principe et exemples de boudin géo-composite

NB : En septembre 2014, la CCOS a mis en place 500 big-bags sur un linéaire de 150 m en arrière de la zone basse du Bois de Sapins (protection provisoire en arrière-dune visant à retenir l'eau en cas de submersion marine, voir la figure ci-après). Le coût de ce dispositif est d'environ 90 000 €. Cet ouvrage a été rehaussé en octobre 2015.

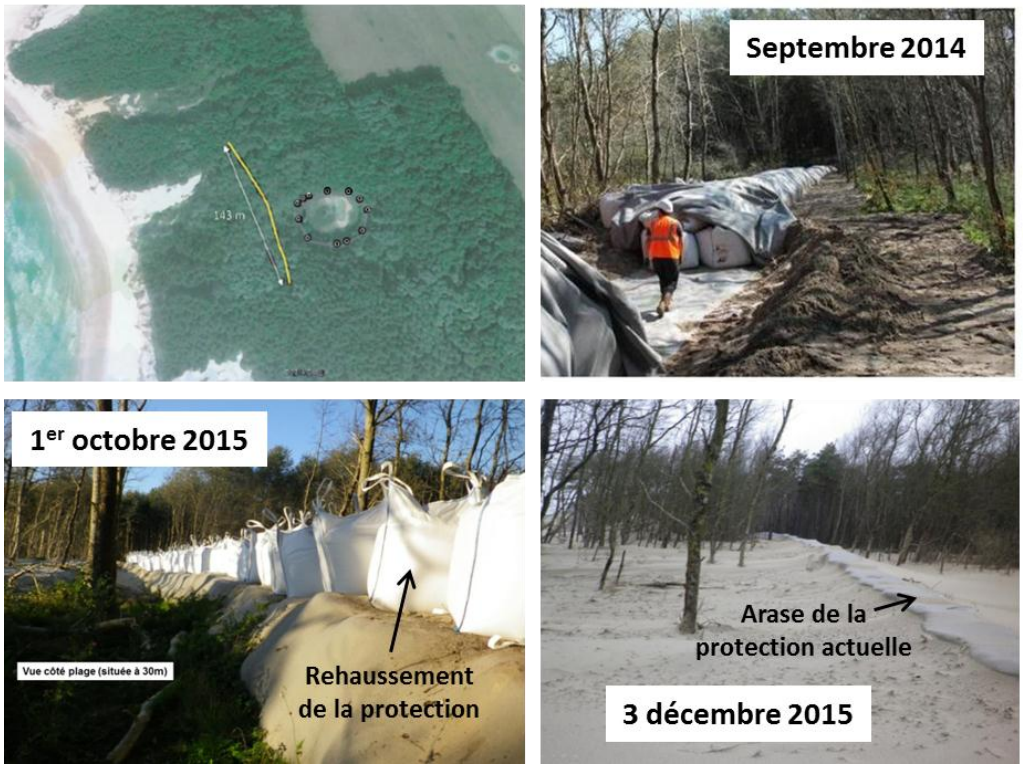


Figure 75. Protection big-bags en arrière de la zone basse du Bois de Sapins

Sources des photos : ADCMBA SOS Baie d'Authie

7.2.6. Comparaison multicritères des solutions techniques pour les déflecteurs

Une comparaison des différentes solutions techniques décrites ci-avant a été réalisée sur la base de plusieurs critères d'évaluation (techniques, financiers, environnementaux) ; cette analyse multi-critères est présentée dans le tableau en page suivante selon un code couleur simple visant à faire ressortir la (ou les) solutions la (les) plus adaptée(s) au site (contraintes) et aux critères de projet (objectif de protection, coût prévisionnel des travaux, maintenance / suivi,…).

Cette analyse met en évidence deux solutions qui paraissent les plus adaptées au contexte et aux objectifs de ce projet :

- La solution pieux bois,
- La solution S-Able.

Ces dispositifs présentent en effet l'intérêt d'être des solutions légères en réponse au caractère provisoire des déflecteurs et au budget limité pour la réalisation de ces ouvrages (pour rappel, non prévus dans l'étude APS et donc non provisionnés dans son estimation des coûts du projet).

Ils ont également l'intérêt d'être relativement simples à mettre en place et de bien s'intégrer dans l'environnement paysager du site de la baie d'Authie.

Par contre, il s'agit de dispositifs expérimentaux qui nécessiteront un suivi régulier et d'éventuelles adaptations pendant la durée de protection attendue (5 à 10 ans), notamment après les tempêtes.

Du point de vue de l'objectif de maintien des sables dans l'anse du Bois de Sapins, ces ouvrages ne pourront avoir la même efficacité que des épis types enrochements, palplanches ou géotextiles, dans la mesure où ils présentent une certaine porosité ; en revanche, leur impact sur la dynamique sédimentaire dans la baie sera moins marqué (une partie des échanges dune-estran et des transits littoraux pourra subsister d'où une moindre sous-alimentation des zones bénéficiant actuellement d'apports en provenance du Bois de Sapins).

Enfin, les effets du filet S-Able vis-à-vis de la marée ne peuvent être considérés comme similaires à des ouvrages type pieux bois dans la mesure où ces derniers ont une cote fixe, contrairement au filet qui se déploie en fonction de la marée et a donc un impact différent au flot et au jusant.

Tableau 6 – Comparaison multicritères des solutions techniques pour les déflecteurs

Solutions → Critères ↓	Enrochements	Palplanches	Pieux bois	Filet S-Able	Boudin géo-composite
Critères techniques					
Réalisation					
Efficacité (maintien du sable)	Ouvrage plein	Ouvrage plein	Ouvrage poreux	Ouvrage poreux	Ouvrage plein
Efficacité à la marée (arase)					
Caractère provisoire - objectif protection (5 à 10 ans)	Solution lourde	Solution lourde	Solution légère	Solution légère	Solution légère
Critères financiers					
Investissement					
Maintenance, suivi			Dispositif expérimental	Dispositif expérimental	Ouvrage fragile si non recouvert de sable
Critères environnementaux					
Insertion paysagère					
Impact sur la dynamique sédimentaire	Ouvrage plein	Ouvrage plein	Ouvrage poreux	Ouvrage poreux	Ouvrage plein

Code couleur :

Satisfaisant - aisé
Moyen
Insuffisant - pénalisant - difficile

7.3. SOLUTIONS ENVISAGEABLES AU STADE AVANT-PROJET

7.3.1. Solution pieux bois

La solution technique la mieux adaptée aux conditions du site de l'anse du Bois de Sapins est la mise en place de pieux bois. En effet, ce dispositif présente l'avantage par rapport au système S-Able de fonctionner linéairement quel que soit le niveau de la marée.

D'autre part, le matériau bois utilisé s'intègre bien au site et ce type de défense a été régulièrement utilisé en différents points de la Côte d'Opale au cours du temps. Il présente donc un aspect « patrimoine de défense contre la mer » que n'offrent pas des dispositifs plus lourds (palplanches) ou moins intégrés (S-Able). La protection est de plus aisément réversible, les pieux pouvant être, si nécessaire, démontés sans impact significatif sur l'environnement.

C'est donc cette solution qui est développée et chiffrée au stade AVP dans le présent rapport.

Le plan n°04, donné en Annexe 10, présente la géométrie des ouvrages proposés.

Les deux ouvrages auront une longueur de 200m, ils seront courbes avec un rayon de 460m pour l'épi Nord et de 1120m pour l'épi Sud.

L'arase de l'épi Nord sera calée à la cote +4.0m IGN69 sur les 100 premiers mètres en partant de la dune, les 100m suivants étant plongeants entre les niveaux +4.0 et +3.0 m IGN69.

L'épi Sud sera arasé sur la totalité de sa longueur à la cote +4.0m IGN69.

La longueur des pieux envisagée à ce stade de l'étude est de 9m. Ils seront placés en deux colonnes séparées d'un mètre entre axes des pieux, et seront implantés en quinconce, à raison d'un pieu tous les 90cm (entraxes). Un tapis en enrochements sera placé en pied d'ouvrage côté mer dans les zones les plus exposées (lit de l'Authie notamment).

L'implantation des ouvrages donnée sur le plan est basée sur la bathymétrie disponible (levé juin 2014). Cette implantation, ainsi que les caractéristiques géométriques des ouvrages, devront être adaptées selon la configuration de l'estran au stade Projet/DCE, puis au moment des travaux. On veillera notamment à adapter leur cote d'arase et éventuellement leur longueur selon le niveau et la configuration du sable. De même, le tracé des ouvrages devra être confirmé ou adapté et un accès en haut de plage sera réservé afin de garder la possibilité d'intervention d'engins de travaux.

Les figures suivantes donnent un exemple de réalisation sur la plage de Wissant (Pas-de-Calais).

Figure 76. Protection par épis en pieux bois – plage de Wissant (62)

7.3.2. Solution S-Able

A la date d'écriture de ce rapport, les suivis du dispositif expérimental S-Able en place au sud du Bois de Sapins, réalisés par le CEREMA, ne sont pas encore conclus et formalisés ; on ne dispose pas d'éléments scientifiques pour analyser l'efficacité de ce dispositif en situation réelle.

Par conséquent, l'opportunité de maintenir le dispositif existant à l'emplacement du déflecteur sud et d'installer un système de ce type pour le déflecteur nord ne peut être étudiée à ce stade et devra être analysée ultérieurement, lorsque le retour d'expérience sur ce dispositif sera suffisant.

Par ailleurs, si le rehaussement de 2 m prévu sur le filet sud existant a lieu, les résultats du suivi de ce filet rehaussé pourront être intéressants vis-à-vis de son comportement à la marée.

Enfin, il conviendrait également de pouvoir analyser le comportement de ce dispositif lors d'un évènement de tempête (concomitance de grands coefficients de marée et de fortes houles).

8. LES RECHARGEMENTS D'ENTRETIEN

8.1. VOLUMES ET FREQUENCE D'ENTRETIEN

Le rechargement massif de 300 000 m^3, complété par l'installation de deux déflecteurs tels que décrits précédemment, permettra de répondre aux objectifs d'exhaussement du niveau de la plage et du cordon et d'éloignement du cours de l'Authie de la rive nord, afin de protéger provisoirement les terres situées en arrière de la dune du Bois de Sapins.

Cependant, cette solution provisoire n'a pas vocation à fixer le trait de côte ; le secteur du Bois de Sapins restera mobile et continuera à subir des pertes sédimentaires. Il convient donc de prévoir des rechargements d'entretien pendant la durée de protection (5 à 10 ans).

Dans le cadre des modélisations hydrodynamiques (voir §5), les pertes de sédiments au niveau du Bois de Sapins ont été estimées entre 30 000 et 40 000 m^3/an pour le Scénario 2, soit réduites de moitié environ par rapport à l'état de référence (pertes de l'ordre de 70 000 à 80 000 m^3/an), grâce aux ouvrages déflecteurs qui assurent une meilleure tenue du rechargement.

Comme expliqué en Annexe 8, les deux déflecteurs ont été représentés pour des contraintes de modélisation avec une perméabilité nulle dans le modèle, et avec leur géométrie réelle (longueur, cote d'arase).

Compte tenu des solutions envisageables pour la réalisation de ces déflecteurs (voir §7, solution pieux bois et solution S-Able sous réserve d'un retour d'expérience satisfaisant) qui présentent une certaine perméabilité, on peut considérer que les pertes sédimentaires au Bois de Sapins seront un peu plus importantes qu'elles ne l'auraient été avec des ouvrages pleins.

Le présent projet prévoit donc des rechargements d'entretien annuels de l'ordre de 40 000 à 50 000 m^3/an pour compenser les pertes par transit naturel (en présence de déflecteurs).

Cette estimation reste toutefois théorique et seul un suivi topographique régulier du dispositif une fois installé permettra de connaître les pertes réelles sur la zone de projet.

8.2. SOURCES D'EMPRUNT ENVISAGEABLES

Les sources d'emprunt envisageables à proximité du site sont les zones actuellement en accrétion.

Ces sources avaient été identifiées et listées dans l'étude SOGREAH 2011 [01] avec pour chacune d'elles une analyse des stocks potentiellement disponibles et contraintes présagées ; les résultats de cette étude sont repris ci-après.

Les sources potentielles identifiées à proximité du site de projet étaient les suivantes (Figure 77) :

- **La pointe de Routhiauville :**
  - Stock sédimentaire important et zone en sédimentation / exhaussement (+80 000 m^3/an), privilégier un « rabotement/décapage » plutôt que la création de zones profondes afin de favoriser le rajeunissement des milieux (positif par rapport au colmatage de la baie) ;
  - Compatibilité granulométrique et qualité des sables vérifiées (voir §4.1.2.3) ;
  - Contraintes techniques (similaires à celles identifiées dans la présente étude pour le rechargement massif) : moyens à mettre en œuvre pour l'extraction du sédiment et son refoulement de l'autre côté de l'Authie, limitation du temps d'intervention du fait de la marée, accessibilité ;
  - Contraintes environnementales : zone reposoir des phoques, mais pas particulièrement riche en termes d'écosystèmes (altitude du banc relativement élevée), zone Natura 2000;

- Contraintes réglementaires : Code Environnement, Etude impact, Evaluation Incidences Natura 2000. La circulaire MEDDAT de juillet 2008 permet de réaliser ce type d'opération hors cadre code minier pour des extractions de sédiment dans une zone appartenant à la même unité sédimentaire que la zone de dépôts ➔ cette contrainte est ici satisfaite (notion de gestion globale du stock sédimentaire) ;
- Contraintes juridiques / administratives : départements différents (DPM Somme), mais même région depuis janvier 2016.

- **<u>La pointe du Bec de Perroquet</u> :**
  - Stock sédimentaire limité (+15 000 à 20 000 m^3/an) ;
  - Compatibilité granulométrique et qualité des sables ➔ à vérifier ;
  - Contraintes techniques : moyens à mettre en œuvre pour l'extraction du sédiment et son refoulement plus au Nord, limitation du temps d'intervention du fait de la marée, accessibilité ;
  - Contraintes environnementales : très grande richesse d'espèces et d'habitats naturels, secteur le plus riche de la rive nord de l'Authie du point de vue des écosystèmes, zone Natura 2000 ;
  - Contraintes réglementaires : Code Environnement, Etude impact, Evaluation Incidences Natura 2000. La circulaire MEDDAT de juillet 2008 permet de réaliser ce type d'opération hors cadre code minier pour des extractions de sédiment dans une zone appartenant à la même unité sédimentaire que la zone de dépôts ➔ cette contrainte est ici satisfaite (notion de gestion globale du stock sédimentaire).

- **<u>Les bancs sableux d'estran de la plage de Berck</u> :**
  - Stock sédimentaire limité (nécessité d'une étude des évolutions passées et récentes de la plage de Berck et de son fonctionnement hydrosédimentaire pour estimer les stocks actuellement disponibles, vu les enjeux existants dans ce secteur : ville de Berck) ;
  - Compatibilité granulométrique et qualité des sables ➔ à vérifier ;
  - Contraintes techniques : moyens à mettre en œuvre pour l'extraction du sédiment et son refoulement dans la baie d'Authie, limitation du temps d'intervention du fait de la marée ;
  - Contraintes environnementales : risques sédimentaires pour le littoral de Berck et celui plus au Nord (transit littoral résultant orienté du Sud vers le Nord), zone Natura 2000 ;
  - Contraintes réglementaires : Code Environnement, Etude impact, Evaluation Incidences Natura 2000. La zone d'extraction de sédiment et la zone de refoulement peuvent-elles être considérées dans la même unité sédimentaire ? A démontrer.

- **<u>Les bancs sableux d'avant-plage ou au large immédiat de la baie</u> :**
  - Stock sédimentaire important, mais pas de tendance à l'exhaussement des fonds ;
  - Compatibilité granulométrique et qualité des sables ➔ à vérifier ;
  - Contraintes techniques : moyens à mettre en œuvre pour l'extraction du sédiment et son refoulement dans la baie d'Authie ;
  - Contraintes environnementales : richesse biologique des bancs d'avant-plage, activité de pêche pour les bancs du large, soustraction du matériau qui transite et alimente le littoral au Nord de Berck (risque sédimentaire plus important), zone Natura 2000 ;
  - Contraintes réglementaires : Code Environnement, Etude impact, Evaluation Incidences Natura 2000. La zone d'extraction de sédiment et la zone de refoulement peuvent-elles être considérées dans la même unité sédimentaire ? A démontrer.
  - Contraintes juridiques / administratives : possibles contraintes selon la localisation de la zone d'emprunt (départements différents).

- **<u>Le dragage du chenal amont de l'Authie</u> :**
  - Une des sources de sédiments pourrait provenir du dragage du chenal amont pour faciliter les accès aux bateaux remontant jusqu'au port de La Madelon et favoriser les écoulements des eaux ;
  - Potentialité de 150 000 à 250 000 m^3 pour un « décapage » du chenal profond de 0,5 m sur 5 km en aval de la Madelon ;
  - Compatibilité granulométrique et qualité des sables ➔ à vérifier (risque de teneurs en fines plus élevées en partie amont de la baie) ;
  - Contraintes techniques : moyens à mettre en œuvre pour l'extraction du sédiment et son refoulement plus au Nord ;
  - Contraintes environnementales : zone Natura 2000 ;
  - Contraintes réglementaires : Code Environnement, Etude impact, Evaluation Incidences Natura 2000. La circulaire MEDDAT de juillet 2008 permet de réaliser ce type d'opération hors cadre code minier pour des extractions de sédiment dans une zone appartenant à la même unité sédimentaire que la zone de dépôts ➔ cette contrainte est ici satisfaite (notion de gestion globale du stock sédimentaire) ;
  - Contraintes juridiques/administratives : départements différents (en partie DPM Somme), mais même région depuis janvier 2016.

Ces sources potentielles d'apport de matériaux sableux sont récapitulées sur la figure ci-dessous.

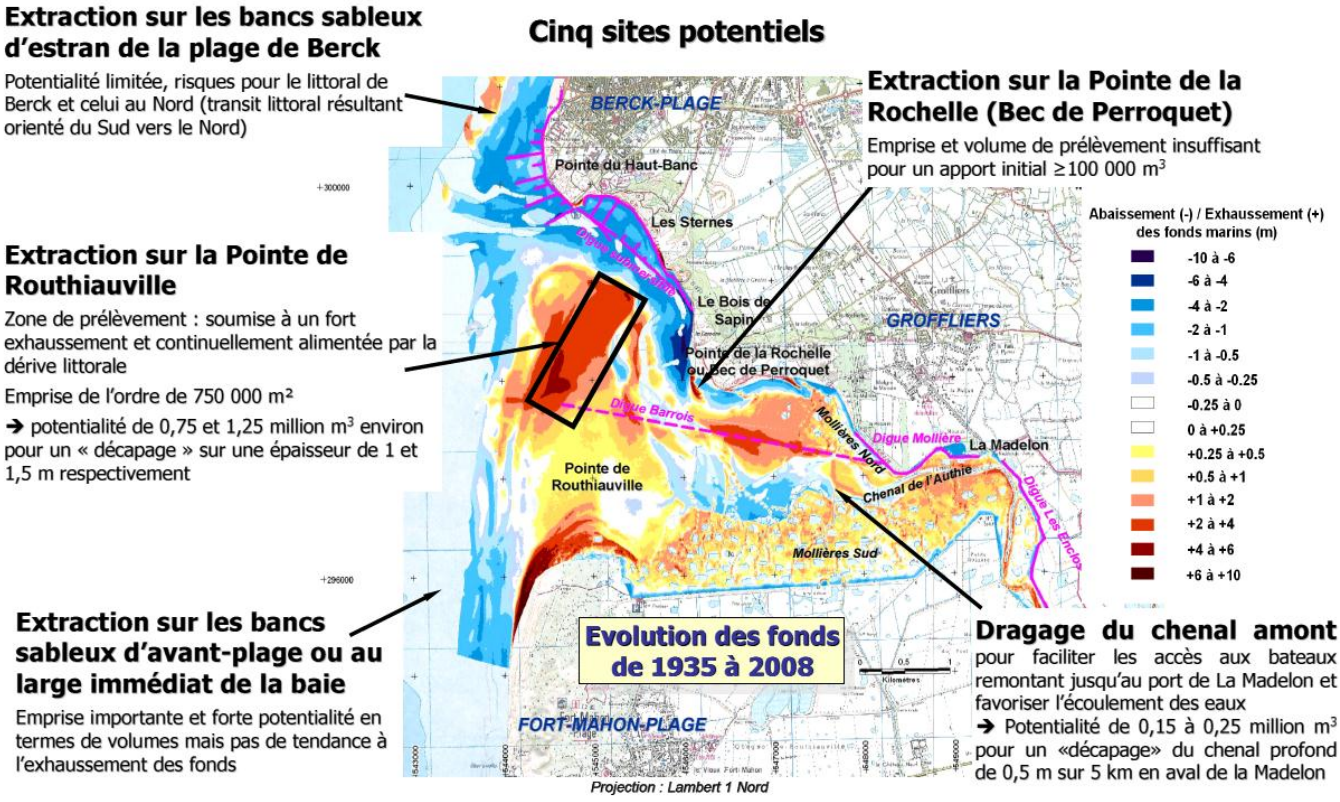


Figure 77. Sites potentiels d'emprunt de sable (SOGREAH, 2011)

Une analyse multicritères de ces différentes sources potentielles d'apport a également été réalisée dans l'étude SOGREAH 2011 [01] ; les résultats sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 7 – Comparaison multicritères des sites potentiels d'emprunt de sable (SOGREAH, 2011)

Couleurs d'évaluation	Satisfaisant-aisé	Moyen	Insuffisant-pénalisant-difficile

Alternatives / Critères d'évaluation	Site 1 Pointe de Routhiauville	Site 2 Pointe de la Rochelle (Bec de Perroquet)	Site 3 Bancs sableux d'estran de la plage de Berck	Site 4 Bancs sableux d'avant-plage ou au large immédiat de la baie	Site 5 Dragage du chenal amont
Contraintes/Faisabilité techniques					
Réalisation*	site exposé			site très exposé	
Pour un apport initial massif		stock sédimentaire limité	stock sédimen. limité		
Pour un apport initial limité					
Pour un entretien régulier					
Distance de refoulement					
Risques sédimentaires			déficit pour le Nord	déficit pour le Nord	
Contraintes/Faisabilité environnementales					
Impacts pendant les travaux					
Impacts sur les richesses biologiques					
Incidences Natura 2000					
Impacts sur les usages actuels					
Contraintes juridiques/administratives					
Unité sédimentaire					
Présence de deux Régions/départements					

** (Impacts sur les richesses biologiques, Incidences Natura 2000, Impacts sur les usages actuels)

** une fois les travaux réalisés

* accessibilité, moyens à mettre en œuvre, délais (limitation par la marée, aléas liés aux intempéries), cotes des fonds, …

Cette analyse conduisait aux conclusions suivantes :

- La flèche sableuse en engraissement de Routhiauville constitue le site le plus satisfaisant comme source d'apport massif.
- Pour les apports limités (rechargements d'entretien), la pointe de Routhiauville et le dragage du chenal de l'Authie seraient des sources envisageables, avec néanmoins des contraintes techniques notables (voir paragraphe suivant) et la question de la compatibilité / qualité des sédiments pour le chenal de l'Authie.

Concernant la plage de Berck qui, selon les informations fournies par la CCOS, serait actuellement en processus d'accrétion marqué, il conviendrait de réaliser une analyse détaillée des évolutions passées et récentes de ce secteur et de son fonctionnement hydrosédimentaire afin d'estimer les stocks potentiellement disponibles, au regard :

- des besoins estimés pour les rechargements annuels d'entretien du Bois de Sapins (40 000 à 50 000 m^3/an sur 5 ans minimum, soit 200 000 à 250 000 m^3),
- des enjeux existants à proximité de ce site d'emprunt (ville de Berck) et éventuels risques sédimentaires pour le littoral de Berck et celui plus au Nord (transit littoral Sud→Nord).

Par contre, ce site potentiel de la plage de Berck présenterait l'avantage d'être moins contraignant techniquement et financièrement (extraction et transport des sables par voie terrestre, comme cela est actuellement fait pour les petits rechargements de 3 000 à 5 000 m^3).

8.3. METHODES DE TRAVAUX ENVISAGEABLES POUR LES RECHARGEMENTS ANNUELS

Pour les trois sites d'emprunt envisageables évoqués ci-dessus, les contraintes et les méthodes de réalisation adaptées pour les volumes d'entretien annuels diffèrent notablement.

On distinguera les solutions par voie terrestre et par voie maritime, telles que décrites à un niveau Avant-Projet pour chaque site ci-dessous.

Ce chapitre suppose que la compatibilité des matériaux des sites d'emprunt ainsi que la possibilité d'exploitation de ces sites vis-à-vis des contraintes environnementales et hydrosédimentaires ont été vérifiées par ailleurs.

8.3.1. Voie terrestre

8.3.1.1. Depuis la pointe de Routhiauville

Pour la pointe de Routhiauville, les contraintes de dragage et d'apport des matériaux sur le site de rechargement sont similaires à celles évoquées au §4.1.3 pour le rechargement massif.

La solution envisageable la plus sûre est une solution par voie terrestre par la route, telle que décrite au §4.1.5.1. Il n'est en effet pas envisageable de créer une piste traversant l'Authie, trop coûteuse et trop lourde à maintenir pour une quantité de matériaux relativement faible nécessaire à un entretien annuel.

D'autre part, les nuisances induites sur le trajet des camions de transport par la route seraient moindres (durée des nuisances plus réduite que pour un rechargement massif), rendant cette solution plus acceptable pour les rechargements d'entretien que pour le rechargement massif.

Pour une quantité de 40 000 m^3, la durée envisageable serait de l'ordre de 2 mois.

8.3.1.2. Depuis la plage de Berck

Pour la plage centrale de Berck, la voie terrestre est la seule solution envisageable.

Elle pourrait être réalisée soit :

- par des engins routiers (camions semi-remorques) entre la plage de Berck et la pointe du Haut-Banc, puis reprise par dumpers,
- par des tracteurs routiers, moyens moins rapides et offrant des bennes de moindre capacité, mais ne nécessitant pas de reprise.

La distance à parcourir est d'environ 5 km.

La durée de travaux sur une même base de 40 000 m^3 serait de l'ordre de 2 mois (variable selon le nombre d'engins mobilisés).

8.3.1.3. Solution utilisant les deux sources envisageables par moyens terrestres

On notera que les deux sites d'emprunt décrits ci-dessus pourraient être utilisés simultanément, répartissant ainsi les nuisances induites, sur les sites d'emprunt d'une part, et sur les riverains des routes et voiries utilisées d'autre part.

La durée de travaux globale serait par contre proche, voire identique (de l'ordre de 2 mois), selon les moyens mis en œuvre.

8.3.2. Voie maritime

Pour les travaux d'entretien qui concernent des volumes et durée de travaux limités par rapport au rechargement massif, des dragages par voie maritime seraient envisageables. Cependant, les fortes contraintes du site sont à considérer comme évoquées, entre autres, au §4.1.3 et au §4.1.4.1.C pour le rechargement massif.

8.3.2.1. Depuis la pointe de Routhiauville

Concernant la pointe de Routhiauville, l'apport d'entretien par voie maritime serait donc rendu envisageable étant donné la quantité de sable nécessaire, plus adaptée aux cadences d'une drague légère. Cette solution resterait toutefois coûteuse en raison de la mobilisation du matériel nautique (coût incompressible quelle que soit la quantité de matériaux en jeu) et des inévitables stand-by liés à l'exposition du site à la houle et aux courants.

Pour une durée raisonnable de travaux, de 2 à 3 mois hors mobilisation/démobilisation, le matériel utilisé devrait atteindre une capacité minimale de 150m^3/h, sur une base de 6h utiles par jour. Le dragage serait alors réalisé par un système amphibie, petite drague adaptée ou ponton sur pieux et pelle hydraulique (voir §4.1.6.2), avec une conduite flottante ou immergée. Dans le cas d'un ponton équipé de pompe de capacité réduite (60 à 80 m^3/h), le doublement du matériel serait nécessaire pour atteindre la cadence voulue.

Le risque de stand-by resterait élevé étant donné la nécessité de travailler hors des périodes de conditions océano-météorologiques favorables (printemps, été), en raison des contraintes environnementales du site qui restent à établir plus précisément (interruption estivale, période de reproduction de la faune sauvage…).

8.3.2.2. Depuis le chenal amont de l'Authie

Pour le dragage du chenal amont de l'Authie, une drague stationnaire légère serait adaptée puisque le site est moins exposé à la houle. La conduite de refoulement serait par contre beaucoup plus longue (2 voire 3 km au minimum selon le tracé de la conduite et les limites de la zone d'emprunt). Cela nécessiterait l'utilisation d'une pompe de refoulement intermédiaire.

Une cadence de dragage de l'ordre de 180m^3/h serait envisageable. De plus, en raison de la situation abritée du chenal, le stand-by prévisible devrait être plus faible.

Une durée de travaux de 2 mois serait donc envisageable pour une quantité de 40 000 m^3, hors mobilisation/démobilisation.

9. ESTIMATIONS DES QUANTITES ET DES COUTS

9.1. GENERALITES

L'estimation des coûts de dragage et de rechargement a été réalisée sur la base de coûts unitaires établis à partir du retour d'expérience de travaux similaires réalisés ces cinq dernières années.

Cependant, étant donné la spécificité du site (contexte géographique et environnemental) et les forts aléas liés aux conditions océano-météorologiques, un pourcentage de divers et imprévus de 20% est considéré.

9.2. RECHARGEMENT MASSIF ET OUVRAGES DE MAINTIEN

Cette section présente les coûts de rechargement massif et des ouvrages de maintien des sables (déflecteurs) tels que décrits au §6.5 et au §7.3 respectivement.

9.2.1. Solution terrestre par traversée de l'Authie

Le tableau ci-dessous détaille les quantités et les coûts unitaires pour la solution par voie terrestre la plus économique.

Rechargement massif - Pointe Routhiauville - Solution voie terrestre avec traversée de l'Authie				
	Unité	**Quantité**	**Coûts en € H.T.**	
			Prix unitaire	**Total**
Mob/Demob terrestre, installations, levés bathy	Fft	1	90 000.00	90 000.00
Piste provisoire traversée de baie - mise en place	Fft	1	1 200 000.00	1 200 000.00
Piste provisoire maintien durant travaux	Fft	1	90 000.00	90 000.00
Fourniture en sable (prélèvement sur la pointe de Routhiauville, transport et régalage)	m3	300 000	8.00	2 400 000.00
Epis déflecteurs	Fft	2	175 000.00	350 000.00
Démantelement de la piste, remise en état du site	Fft	1	84 000.00	84 000.00
Suivi environnemental	Fft	1	30 000.00	30 000.00
Divers et imprévus (20%)				*848 800.00*
			Total H.T.	**5 092 800.00**
			Total T.T.C.	6 111 360.00

Le coût du rechargement massif au m^3 pour un volume de 300 000 m^3 de sable est donc pour cette solution de 17,0 € HT/m^3.

On constate que le budget initial de 2,5 M € HT est largement dépassé.

Il existe de plus, comme précisé au §6.4.2, un fort aléa en ce qui concerne le coût du maintien de la piste provisoire sur la durée des travaux.

9.2.2. Solution terrestre par la route

Cette solution est, comme présentée au préalable, la plus pérenne, les contraintes techniques et les aléas étant moindres que pour la solution précédente.

Par contre, son coût est très élevé par rapport au budget initial de 2,5 M € HT comme le montre le tableau suivant.

Rechargement massif - Pointe Routhiauville - Solution voie terrestre par la route (Fort-Mahon-Berck)				
	Unité	Quantité	Coûts en € H.T.	
			Prix unitaire	Total
Mob/Demob terrestre, installations, levés bathy	Fft	1	100 000.00	100 000.00
Piste provisoire localement sur la pointe de Routhiauville	Fft	1	20 000.00	20 000.00
Fourniture en sable (prélèvement sur la pointe de Routhiauville, transport et régalage, yc reprises)	m3	300 000	17.20	5 160 000.00
Epis déflecteurs	Fft	2	175 000.00	350 000.00
Démantelement de la piste sur la pointe, remise en état du site	Fft	1	6 000.00	6 000.00
Suivi environnemental	Fft	1	15 000.00	15 000.00
Divers et imprévus (20%)				*1 130 200.00*
			Total H.T.	**6 781 200.00**
			Total T.T.C.	8 137 440.00

Le coût du rechargement massif au m^3 pour un volume de 300 000 m^3 de sable est donc pour cette solution de 22,6 € HT/m^3.

9.2.3. Ouvrages déflecteurs

Le sous-détail estimatif pour le chiffrage des épis déflecteurs réalisés en pieux bois est donné dans le tableau suivant :

Pour les 2 épis (2*200m)	Unité	PU € HT	Qtité	Total € HT
Pieux (fourniture et mise en œuvre)	U	320	892	285 440.00
enrochements ep 0.6mx4m large	m^3	45	1008	45 360.00
Géotextile	m^2	6	2940	17 640.00
		Total HT hors divers et imprévus		348 440.00
			Total HT	**348 440.00**

Le coût d'un ouvrage est arrondi à 175 000 € HT.

9.3. RECHARGEMENTS ANNUELS D'ENTRETIEN

Cette section présente les coûts de rechargements annuels tels que décrits au §8.3, pour chaque zone d'emprunt et méthode envisageables.

Un volume d'apport annuel de 40 000 m^3 est considéré comme base de comparaison dans les paragraphes suivants.

9.3.1. Solutions terrestres

9.3.1.1. Depuis la pointe de Routhiauville par la route

Le tableau suivant présente l'estimation du coût d'un entretien annuel selon la méthode décrite au §8.3.1.1.

Rechargements d'entretien - Pointe Routhiauville - Solution voie terrestre par la route (Fort-Mahon-Berck)				
	Unité	Quantité	Coûts en € H.T.	
			Prix unitaire	Total
Mob/Demob terrestre, installations, levés bathy	Fft	1	15 000.00	15 000.00
Piste provisoire localement sur la pointe de Routhiauville	Fft	1	8 000.00	8 000.00
Fourniture en sable (prélèvement sur la pointe de Routhiauville, transport et régalage, yc reprises)	m3	40 000	19.45	778 000.00
Démantelement de la piste sur la pointe, remise en état du site	Fft	1	2 500.00	2 500.00
Divers et imprévus (20%)				*160 700.00*
			Total H.T.	**964 200.00**
			Total T.T.C.	1 157 040.00

Le coût du rechargement au m^3 pour un volume de 40 000 m^3 de sable est donc pour cette solution de 24,1 € HT/m^3.

9.3.1.2. Depuis la plage de Berck par la route

Les deux tableaux suivants présentent l'estimation du coût d'un entretien annuel selon la méthode décrite au §8.3.1.2.

Rechargement d'entretien - Littoral de Berck-Plage - Solution voie terrestre par la route avec reprise sur dumper				
	Unité	Quantité	Coûts en € H.T.	
			Prix unitaire	Total
Mob/Demob terrestre, installations, levés bathy	Fft	1	15 000.00	15 000.00
Piste provisoire localement-accès à la plage de Berck	Fft	1	5 000.00	5 000.00
Fourniture en sable (prélèvement sur la plage de Berck ou sur stock, transport, régalage, yc reprise)	m3	40 000	13.55	542 000.00
Démantelement de la piste, remise en état du site	Fft	1	2 000.00	2 000.00
Divers et imprévus (20%)				*112 800.00*
			Total H.T.	**676 800.00**
			Total T.T.C.	812 160.00

Le coût du rechargement au m^3 pour un volume de 40 000 m^3 de sable est donc pour cette solution mixte semi-remorque/dumpers de 16,9 € HT/m^3.

Rechargement d'entretien - Littoral de Berck-Plage - Solution voie terrestre par tracteur-bennes sans reprise				
	Unité	Quantité	Coûts en € H.T.	
			Prix unitaire	Total
Mob/Demob terrestre, installations, levés bathy	Fft	1	15 000.00	15 000.00
Piste provisoire localement-accès à la plage de Berck	Fft	1	5 000.00	5 000.00
Fourniture en sable (prélèvement sur la plage de Berck ou sur stock, transport et régalage)	m3	40 000	10.70	428 000.00
Démantelement de la piste, remise en état du site	Fft	1	2 000.00	2 000.00
Divers et imprévus (20%)				*90 000.00*
			Total H.T.	**540 000.00**
			Total T.T.C.	648 000.00

Le coût du rechargement au m^3 pour un volume de 40 000 m^3 de sable est donc pour cette solution tracteurs/bennes de 13,5 € HT/m^3.

9.3.2. Solutions maritimes

Le chiffrage du coût d'un dragage par voie maritime dépend fortement de deux paramètres principaux :

- Le coût d'amenée et de repli de la drague,
- La durée effective de travail et les stand-by à prévoir.

Dans le cas de l'Authie, s'ajoutent l'absence de port et les contraintes d'accès au matériel, et les précautions environnementales à considérer (entretien du matériel dans la baie par exemple).

Les prix considérés dans la présente estimation sont donc indicatifs et pourront varier considérablement d'une offre à l'autre. Il est également possible que dans le cadre de travaux de dragage d'entretien concernant un volume limité, il soit difficile de trouver une entreprise prête à répondre à l'appel d'offre.

L'estimation au stade AVP selon la source d'emprunt est décrite dans les sections suivantes.

9.3.2.1. Dragage de la pointe de Routhiauville par moyens nautiques

Le tableau suivant présente l'estimation du coût d'un entretien annuel selon la méthode décrite au §8.3.2.1.

Rechargement d'entretien - Pointe Routhiauville - Solution voie maritime, drague sur ponton et pompes de refoulement				
	Unité	Quantité	Coûts en € H.T.	
			Prix unitaire	Total
Mob/Demob terrestre, installations, levés bathy	Fft	1	25 000.00	25 000.00
Mob/Demob matériel nautique	Fft	1	60 000.00	60 000.00
Montage et maintien de la conduite de refoulement	Fft	1	160 000.00	160 000.00
Fourniture en sable (Dragage, et acheminement par conduite, mise à l'abri drague, stand by)	m3	40 000	9.50	380 000.00
Régalage du sable au profil théorique	m3	40 000	2.00	80 000.00
Stand-by additionnel	j	PM	3 000.00	
Divers et imprévus (20%)				*141 000.00*
			Total H.T.	**846 000.00**
			Total T.T.C.	1 015 200.00

Le coût du rechargement au m^3 pour un volume de 40 000 m^3 de sable est donc pour cette solution de 21,2 € HT/m^3.

9.3.2.2. Dragage du chenal amont de l'Authie par moyens nautiques

Le tableau suivant présente l'estimation du coût d'un entretien annuel selon la méthode décrite au §8.3.2.2.

Rechargement d'entretien - Cours amont de l'Authie - Solution voie maritime, drague sur ponton et pompes de refoulement				
	Unité	Quantité	Coûts en € H.T.	
			Prix unitaire	Total
Mob/Demob terrestre, installations, levés bathy	Fft	1	25 000.00	25 000.00
Mob/Demob matériel nautique	Fft	1	60 000.00	60 000.00
Montage et maintien de la conduite de refoulement, pompe intermédiaire	Fft	1	190 000.00	190 000.00
Fourniture en sable (Dragage, et acheminement par conduite, mise à l'abri drague, stand by)	m3	40 000	8.00	320 000.00
Régalage du sable au profil théorique	m3	40 000	2.00	80 000.00
Stand-by additionnel	j	PM	3 000.00	
Divers et imprévus (20%)				*135 000.00*
			Total H.T.	**810 000.00**
			Total T.T.C.	972 000.00

Le coût du rechargement au m^3 pour un volume de 40 000 m^3 de sable est donc pour cette solution de 20,3 € HT/m^3.

10. EVOLUTION DU CONTEXTE DE GESTION DU LITTORAL DANS LE CADRE DU PAPI BSA

Pour rappel, le rechargement massif du Bois de Sapins doit permettre une protection des terres arrière-littorales à court terme (objectif de 5 à 10 ans), en attendant la mise en œuvre des mesures de gestion pérenne définies dans le cadre du PAPI Bresle-Somme-Authie (PAPI BSA).

Les études du PAPI BSA ont été menées en parallèle de la présente étude et le dossier PAPI a été présenté en Commission Mixte Inondation en novembre 2015. Les principales conclusions de ce dossier pour le secteur du Bois de Sapins sont résumées ci-après [03].

10.1. OBJECTIFS DU PAPI BSA

Lancée en février 2011, la nouvelle génération de Programmes d'Actions de Prévention contre les Inondations (PAPI) correspond aux besoins ressentis par le territoire de traiter les questions de gestion et de prévention des risques à des échelles pertinentes et en lien étroit avec les politiques de développement, d'aménagement et de protection de l'environnement.

La réalisation sur le littoral picard et du Sud du Nord-Pas-de-Calais d'un PAPI d'intention, puis du PAPI complet, a pour objectifs :

- de compléter le diagnostic de la vulnérabilité du littoral picard et du Sud Pas-de-Calais,
- de définir une stratégie d'intervention partagée par l'ensemble des partenaires et acteurs du littoral,
- de définir un programme d'actions (PAPI complet),
- d'associer l'ensemble des acteurs concernés à cette démarche et de mettre en place une gouvernance effective.

La volonté affichée des différents partenaires est d'inscrire le PAPI Bresle-Somme-Authie dans le projet global de territoire. La stratégie long-terme définie dans le PAPI, tout comme les premières mesures définies dans le cadre du premier programme d'actions (2016-2021), se veulent le reflet de cette volonté.

10.2. DIAGNOSTIC DU SECTEUR NORD DE LA BAIE D'AUTHIE VIS-A-VIS DU RISQUE SUBMERSION

Les premiers débordements modélisés sur le secteur Nord de la baie d'Authie surviennent pour une tempête d'occurrence décennale en l'état actuel (T10 2015). Des inondations par surverse et rupture s'étendent dès lors sur tout le territoire arrière littoral jusqu'à Rang du Fliers et les abords de Berck, impactant de très nombreux enjeux.

Sur le secteur Nord-Est de la Baie d'Authie, les digues de la Mollière et de l'Enclos et la porte à flot sur le Fliers (porte la Madelon) ne sont pas actuellement pas en mesure de jouer convenablement leur rôle du fait d'une hauteur insuffisante des digues et de leur état fortement dégradé. Une inondation des terres arrière littorales (environ 1000 ha) par submersion marine est susceptible de se produire dès une tempête d'occurrence annuelle. Les premiers dommages résultants seraient de l'ordre de 20 millions d'euros. Le secteur de la porte à flot de la Madelon est soumis en outre à la divagation d'un méandre de l'Authie qui entraine une érosion localisée.

Sur le secteur Nord-Ouest de la Baie, le cordon dunaire non protégé (Bois de Sapins) et le secteur protégé (Anse des Sternes) sont directement soumis au flot et subissent une érosion très marquée.

Le secteur du Bois de Sapins en particulier est très affaibli par une brèche en constante évolution. Ce secteur immédiatement au sud de Berck connait une dynamique d'érosion continue depuis de nombreuses années du fait des évolutions morphologiques de la baie. Cette brèche peut donner lieu à des entrées marines importantes lors d'une tempête ou d'une surcote marine exceptionnelle et peut ainsi inonder les quartiers les plus à l'Est de Berck (Figure 78).

Le champ d'inondation suite à une tempête décennale est très vaste (environ 2700 ha), il impacte à la fois les faubourgs de Berck jusqu'à Rang du Fliers, Verton, Waben et Conchil-le-Temple. Il résulte à la fois d'une entrée maritime par la brèche du Bois de Sapins et par la défaillance des digues Est (linéaire de la digue de l'Enclos, secteur de la Madelon, secteur du débouché de l'Authie,…). Les dommages sont de l'ordre de 40 millions d'euros sur l'état actuel (2015).

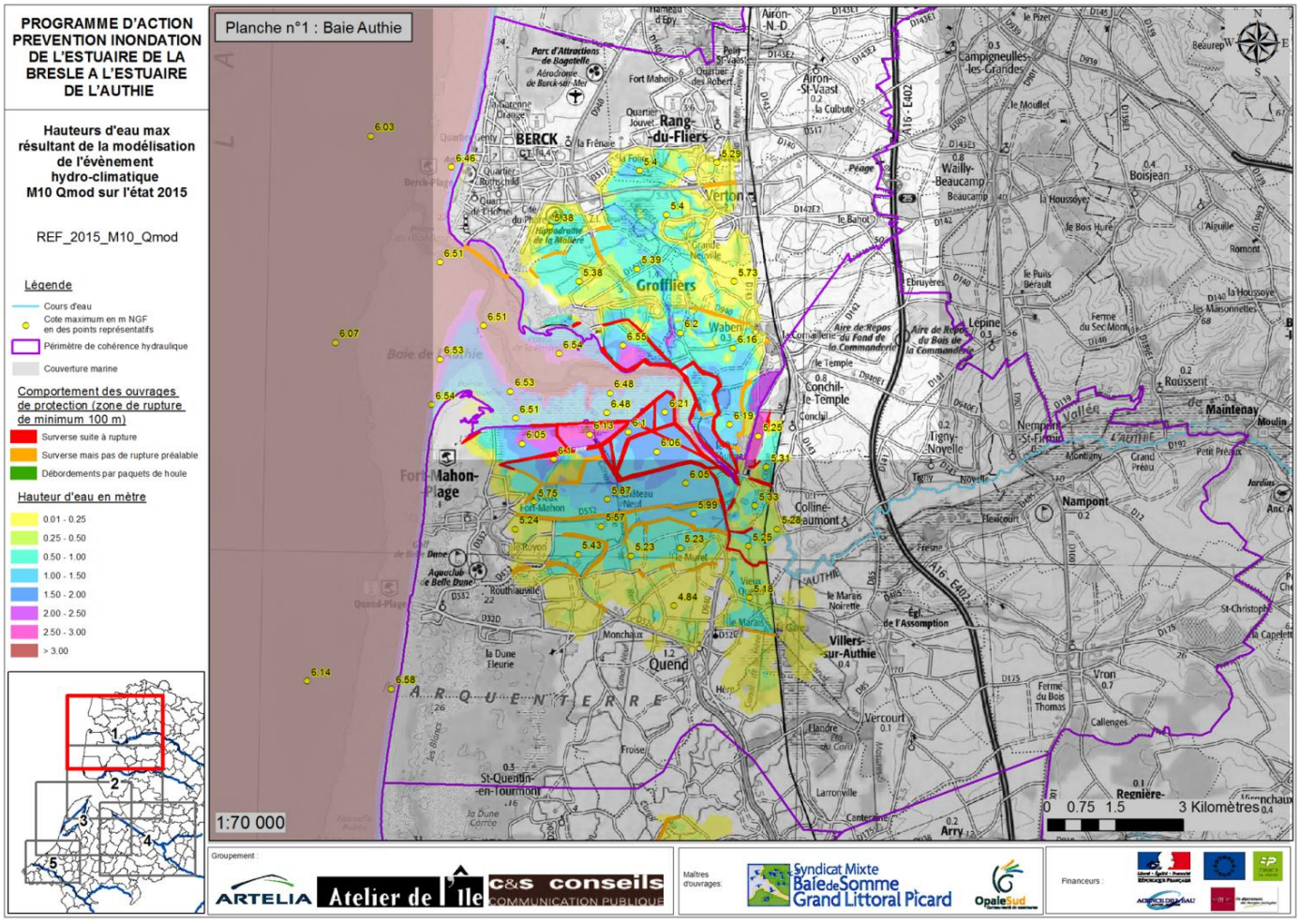


Figure 78. Cartographie du risque inondation en baie d'Authie - Scénario fil de l'eau, situation actuelle (2015) - Tempête d'occurrence décennale (dossier PAPI, 2015)

10.3. STRATEGIE LOCALE PROPOSEE PAR LE PAPI BSA

10.3.1. Objectifs de la stratégie proposée

Les enjeux urbains (tissu dense ou tissu épars) sur l'arrière littoral de ce secteur (Groffliers, Waben, Verton, Berck,…) nécessitent une sécurisation court-terme du fait du risque imminent auquel ils sont exposés (dès une tempête décennale qui interviendrait dans la situation actuelle).

C'est pourquoi la stratégie du PAPI BSA prévoit sur ce secteur à la fois :

- Une sécurisation court terme des enjeux les plus exposés,
- Prioritairement sur le secteur arrière littoral, l'ensemble des actions concourant à l'objectif de prise en compte du risque dans l'aménagement du territoire (SCOT du Montreuillois, le PLU, etc.),
- La faisabilité long-terme de l'adaptation des hameaux urbains en arrière littoral vis-à-vis du risque (Groffliers, arrière de Berck,…),
- La réduction de la vulnérabilité des entreprises est visée sur ce territoire du fait de la présence d'entreprises et d'activités dans les hameaux urbains en zone arrière littoral ; des diagnostics détaillés de vulnérabilité avec la définition d'un plan d'action structurel (actions sur le bâti) ou organisationnel sont à mettre en œuvre sur le court terme,
- Une alerte des populations les plus exposées.

10.3.2. Stratégie vis-à-vis des aménagements structurels

Vis-à-vis des aménagements structurels et de leur sécurisation sur le secteur du Bois de Sapins, la stratégie du PAPI BSA est la suivante :

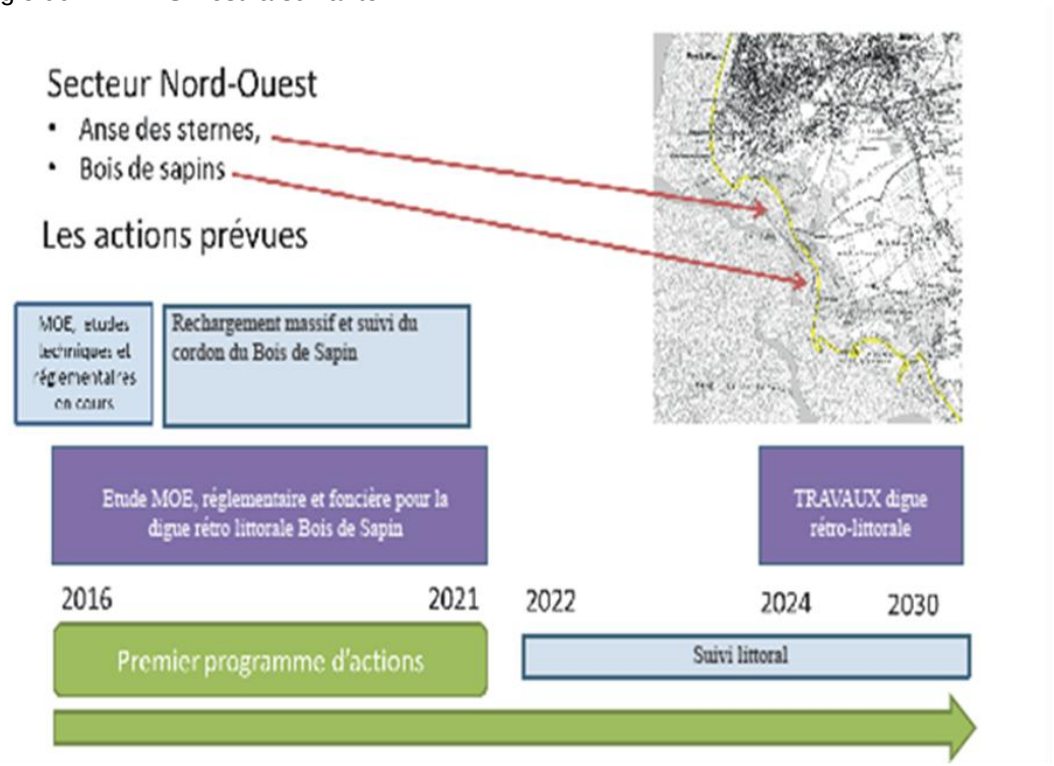


Figure 79. Stratégie du PAPI BSA pour le secteur du Bois de Sapins (dossier PAPI, 2015)

Sur le court terme (premier programme d'actions, 2016-2021) :

- Conduire les études de maîtrise d'œuvre et réglementaires de la digue rétro-littorale ;
- Procéder à la sécurisation du cordon dunaire par la mise en place d'un rechargement massif au droit du cordon de manière à limiter le risque inondation et submersion sur le territoire.

Sur le moyen/long terme (à partir de 2022) :

- Edification de la digue en position rétro-littorale de manière à limiter le risque inondation ;
- Poursuite des actions de suivi du cordon dunaire et de la gestion sédimentaire.

Le confortement du cordon est strictement nécessaire sur le très court terme pour limiter le risque inondation durant la période d'études techniques et réglementaires de la digue rétro-littorale.

L'étude d'une protection rétro-littorale sur ce secteur devra être conduite de manière à permettre d'assurer la protection de l'arrière littoral par sa construction à moyen-terme (second programme d'actions). Elle comprendra les études techniques et réglementaires, à partir d'un tracé précis qui restera à valider sur des bases géotechniques et foncières (le secteur arrière du Bois de Sapins est en limite de propriété du Conservatoire du Littoral).

10.3.3. Coûts associés

Les coûts associés à cette stratégie ont été estimés dans le cadre du PAPI BSA :

- Digue rétro-littorale :
  - Coût estimé des études de maîtrise d'œuvre et réglementaires : 420 000 € HT,
  - Coût estimé des travaux : 4 200 000 € HT,
  - Coût d'entretien estimé : 20 000 € HT / an.
- Confortement du cordon dunaire du Bois de Sapins à court terme :
  - Coût estimé des travaux : 3 000 000 € HT,
  - Coût d'entretien estimé : 350 000 € HT / an.

  Ces coûts de confortement du cordon dunaire sont basés sur les estimations préliminaires du projet de rechargement massif et ne tiennent pas compte des conclusions de la présente étude AVP, dans la mesure où le dossier PAPI a été établi avant et ne disposait donc pas de ces éléments.

11. CONCLUSION SUR LA FAISABILITE DU RECHARGEMENT MASSIF DU BOIS DE SAPINS

Le tableau ci-dessous synthétise les différentes solutions développées au stade Avant-Projet pour le rechargement massif de l'anse du Bois de Sapins (environ 300 000 m^3 de sable), objet de la présente mission de Maîtrise d'Œuvre.

Tableau 8 – Synthèse et comparaison des solutions techniques étudiées pour le rechargement massif depuis la zone d'emprunt de la pointe de Routhiauville

Solutions → Critères ↓	Travaux par voie terrestre et traversée de l'Authie	Travaux par voie terrestre, transport par la route
Durée minimale de réalisation	7 mois	6 mois
Aléas techniques	- Très fort aléa pour le maintien de la piste provisoire en phase travaux - Fort aléa dû à la marée - Impossibilité de laisser les engins sur le DPM hors de la période de travaux	- Accès à la pointe de Routhiauville depuis Fort Mahon (département de la Somme) - Traversée de villages pour le transport routier - Deux reprises des matériaux - Aléa dû à la marée - Impossibilité de laisser les engins sur le DPM hors de la période de travaux
Coût (investissement)	5,1 M€ HT	6,8 M€ HT
Impact sur l'environnement, obtention des autorisations	Impact fort sur la baie en phase travaux Sites Natura 2000 et zones protégées	Fort impact sur les riverains et les voiries, traversée de villages et routes étroites Sites Natura 2000 et zones protégées
Entretiens annuels	Coût d'entretien sur la base de 40 000 m^3 annuel : variable de 540 à 964 k€ HT/an selon la source et la méthode utilisée	

Code couleur :

Satisfaisant vis-à-vis des critères de projet
Aléa moyen vis-à-vis des critères de projet
Aléa fort ou solution ne répondant pas aux critères de projet

On peut constater que, quelle que soit la solution envisagée, le budget initial de 2,5 M € HT s'avère largement dépassé.

Etant donné les moyens terrestres envisagés, la durée des travaux dépasse largement la durée envisagée lors de l'étude de définition (3 à 4 mois) ce qui, en raison des transports sédimentaires importants et de la mobilité du site, implique une forte perte de matériaux en phase travaux.

D'autre part, pour les deux solutions étudiées, l'impact environnemental en phase travaux s'avère élevé et la faisabilité des travaux tels qu'envisagés ne pourra être totalement confirmée qu'à l'issue de l'instruction des dossiers d'autorisation par les services de l'Etat.

En conclusion, à l'issue de l'étude d'Avant-Projet et du complément d'étude de faisabilité réalisé dans le cadre du marché complémentaire confié par la CCOS, maître d'ouvrage, à Artelia, le rechargement massif prévu ne peut être réalisé de manière à satisfaire les critères de projet en termes de coûts et de délais.

Il existe d'autre part un risque de voir les deux solutions techniques étudiées contraintes, voire refusées, à l'issue de l'instruction des dossiers d'autorisation en raison des impacts élevés sur l'environnement naturel et humain.

Enfin, les conditions dans lesquelles pourraient être réalisés le rechargement massif et les rechargements d'entretiens annuels des années suivantes (a minima 5 ans) ne rentrent pas dans le cadre des recommandations du PAPI BSA en termes de coûts (rappelons que le dossier PAPI a été établi et présenté avant l'établissement des conclusions de cet AVP et ne disposait donc que d'estimations de coûts préliminaires basés sur l'étude précédente APS).

oOo

REFERENCES

- [01] SOGREAH, février 2011. Diagnostic, étude d'opportunité et de faisabilité pour l'aménagement de la rive nord de l'Authie. Communauté de Communes Opale Sud. Rapport final n°1711923.
- [02] IDRA Environnement, avril 2013. Protection du cordon dunaire de la rive Nord de l'Authie - Avant-Projet Sommaire. Communauté de Communes Opale Sud.
- [03] ARTELIA Eau & Environnement / Atelier de l'Ile / C&S Conseils, 2013-2015. Programme d'Actions de Prévention contre les Inondations (PAPI) de l'estuaire de la Bresle à l'estuaire de l'Authie. SMBS-GLP et CCOS :
  - Volume 1 : Diagnostic territorial. Rapport AEE-GEN-RP-0001, 2013.
  - Document principal du dossier PAPI et fiches actions, Novembre 2015.
- [04] ARTELIA, janvier 2015. Maîtrise d'œuvre pour la protection de la rive nord de l'Authie - Etude d'impact valant évaluation des incidences Natura 2000 - Etat initial. Communauté de Communes Opale Sud.
- [05] ARTELIA, décembre 2015. Maîtrise d'œuvre pour la protection de la rive nord de l'Authie - Etude complémentaire : reconnaissances géotechniques et analyse de la faisabilité du projet par voie terrestre. Communauté de Communes Opale Sud.
- [06] GEOXYZ, mars 2013. Levés topo-bathymétriques monofaisceaux dans la baie d'Authie, Date : 25 au 28 mars 2013. Communauté de Communes Opale Sud. Rapport d'intervention.
- [07] Augris C., Clabaut P. & Vicaire O., 1990. Le domaine marin du Nord-Pas-de-Calais - Nature, morphologie et mobilité des fonds. Werner - région Nord-Pas-de-Calais.
- [08] Dobroniak C., 2000. Géomorphologie, hydrodynamique et écologie d'un estuaire tempéré macrotidal : l'Authie, Manche Orientale, France - Thèse de doctorat géographie physique - Université du Littoral Côte d'Opale.
- [09] Latteux B., 1999. Baie d'Authie - Synthèse et analyse des données naturelles. Conseil Général de la Somme.
- [10] GEMEL / Dobroniak C., 1999. Comparaison des couvertures sédimentaires d'avril 1994 et de septembre 1998 réalisées dans la zone intertidale de l'estuaire de l'Authie. Conseil Général de la Somme.
- [11] Gallia Sana/Abesim, mars 2013. Acquisition des caractéristiques granulométriques des sables de la rive nord de la baie d'Authie et de la pointe de Routhiauville. Communauté de Communes Opale Sud.
- [12] SHOM, 2012. Ouvrage de marée - Références Altimétriques Maritimes - Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée.
- [13] SOGREAH / EDF-LNHE, 2002. Baie d'Authie - Etude numérique et d'expertise. Conseil Général de la Somme.
- [14] iXSurvey, mars 2013. Acquisition de données de houle et de courantologie sur la rive Nord de la Baie d'Authie. Communauté de Communes Opale Sud.
- [15] BCEOM, 1971. Etude des effets économiques des attaques de la mer contre le littoral - Tome 1 : falaises picardes et baie d'Authie. Ministère de l'Equipement et du Logement.
- [16] P.A. Pirazzoli et al., Juillet 2008. Extreme sea level in English Channel: calibration of the joint probability method. Journal of Coastal Research.
- [17] SHOM/CETMEF, édition 2008. Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique).

- [18] SHOM/CETMEF, janvier 2013. Note méthodologique relative au produit *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France Edition 2012*.
- [19] ONERC (DGEC), 2010. Synthèse n°2 - février 2010 - Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en vue de l'estimation des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation possibles.
- [20] Gallia Sana, 22 juillet 2013. Acquisition des caractéristiques physico-chimiques des sables de la rive nord de la baie d'Authie et de la pointe de Routhiauville. Communauté de Communes Opale Sud.
- [21] ABLE, septembre 2014. S-Able - Installation d'un dispositif expérimental de contrôle de sédimentation de l'Authie - Note technique. Communauté de Communes Opale Sud.

ANNEXE 1

ETAT DES LIEUX - VISITE ARTELIA DU SITE DU 02 JUIN 2014

ANNEXE 2

LEVE TOPOGRAPHIQUE (MISSION TC1)

ANNEXE 3

EVOLUTIONS SEDIMENTAIRES PASSEES DANS LA ZONE DE RECHARGEMENT (BOIS DE SAPINS)

ANNEXE 4

DIMENSIONNEMENT DU RECHARGEMENT

ANNEXE 5

CONSTRUCTION ET CALAGE DU MODELE HYDRODYNAMIQUE

ANNEXE 6

RESULTATS DE MODELISATION DE L'ETAT REFERENCE 2014

ANNEXE 7

RESULTATS DE MODELISATION DU SCENARIO 1

ANNEXE 8

RESULTATS DE MODELISATION DU SCENARIO 2

ANNEXE 9

RAPPORT DE RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES COMPLEMENTAIRES FONDASOL - DECEMBRE 2015

ANNEXE 10

CAHIER DE PLANS - AVANT-PROJET

Liste des plans - Avant-Projet :

01 - Site du Bois de Sapins - Levé topographique - Juin 2014

02 - Plan d'ensemble de la zone de projet - Levés topo-bathymétriques disponibles - Positions des reconnaissances géotechniques

03 - Projet de rechargement - Vue en plan - Scénario 2

04 - Epis déflecteurs - Pieux bois

05 - Solution travaux par voie terrestre - Piste de franchissement de la baie - Principe

06 - Solution travaux par voie terrestre - Apports par la route - Plan de circulation