



CARRIERE DU HOURDEL

ETUDE DES EFFETS DE L'EXPLOITATION DE LA CARRIERE DU HOURDEL : ASPECTS GEOTECHNIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

EXAMEN DES RISQUES LITTORAUX

RAPPORT D'ETUDE 2018

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



N° 8 71 6010 - Carrière du Hourdel – Rapport d'étude 2018

02	Version finale	CCL	LHM	LHM	10/08/2018
01	Insertion des commentaires GSM du 09/07/2018	CCL	LHM	LHM	19/07/2018
00	Rapport d'étude – Mise à jour 2018	CCL	LHM	LHM	30/06/2018
03	<i>Rapport final 871 3736</i>	<i>CCL - GGT</i>	<i>ELC</i>	<i>ELC</i>	<i>06/04/2017</i>
Version	Description	Rédaction	Vérifié	Approuvé	Date

OBJET DE L'ETUDE

SOGREAH a réalisé en 2007 une étude des effets de l'approfondissement et de l'extension de la zone d'extraction de la carrière du Hourdel, incluant notamment :

- les effets du projet sur la façade littorale : aspects géotechniques et aspects hydrogéologiques ;
- et l'examen des risques littoraux.

En 2016, ARTELIA a réalisé pour GSM une actualisation de l'étude de 2007, prenant en compte le nouveau projet d'exploitation. Cette étude actualisée a notamment été l'occasion de prendre en compte la topographie naturelle de la berge Nord suite à l'intégration d'une cote fixe par les services de l'état dans l'arrêté préfectoral actuel.

GSM souhaitant déposer son dossier de demande d'autorisation environnementale à l'été 2018, elle a demandé une mise à jour des risques littoraux en 2018 avec les dernières informations de topographie du site.

La présente étude porte donc sur :

- une actualisation, avec prise en compte de la topographie naturelle du site, des effets des extensions et de l'approfondissement de l'extraction le long du littoral sur :
 - les risques de déstabilisation éventuels du cordon littoral, c'est-à-dire de la bande présentant une largeur de l'ordre de 100 à 120 m comprise entre la berge Nord de la carrière et la route blanche RD102 (aspects géotechniques),
 - les perturbations éventuelles sur la piézométrie et les écoulements des eaux souterraines (aspects hydrogéologiques).
- une actualisation des risques d'érosion et de submersions marines au droit du littoral de la carrière, avec prise en compte de la topographie naturelle du site. Il s'agit préalablement d'étudier l'évolution jusqu'en 2018 du cordon littoral en façade maritime (en particulier du poulvier qui progresse d'Ouest en Est) pour examiner l'effet que son évolution vers l'Est pourrait apporter par rapport à la situation de 2007-2011.

o0o

SYNTHESE ET CONCLUSIONS

La carrière du Hourdel, plan d'eau d'une superficie d'environ 45 ha, se situe dans un poulcier fossile du cordon littoral du Vimeu sur le littoral Picard, entre la ville de Cayeux-sur-Mer et la pointe du Hourdel (baie de Somme).

Le gisement de la carrière est constitué de galets d'une richesse minérale naturelle rare dans une matrice sableuse. La société GSM exploite une partie de la carrière et a le projet d'approfondir et étendre la carrière.

GSM a demandé à ARTELIA de vérifier les effets de l'extension et approfondissement sur la stabilité de la berge de la carrière côté littoral et sur les écoulements des eaux souterraines. Bien que l'exploitation de la carrière n'ait pas de lien direct avec le littoral, GSM a également demandé à ARTELIA Eau & Environnement de définir les risques d'érosion et de submersion marine le long du littoral au droit de la carrière sur l'ensemble de la zone exploitée (actuelle et projetée).

Ces études ont été réalisées en 2007 par SOGREAH (maintenant ARTELIA Eau & Environnement). Une actualisation de celle-ci a été réalisée en 2016 sur l'intégralité des aspects traités : effets du projet sur les aspects géotechniques et hydrogéologiques et également examen des risques littoraux.

La présente étude de 2018 constitue une mise à jour de l'étude précédente de 2016 sur les risques littoraux en particulier, à partir notamment des données de topographie disponibles à ce jour. Les conclusions sur les effets de l'extension et approfondissement de la carrière sont inchangées par rapport à l'étude de 2016.

LES CONDITIONS NATURELLES

Les conditions naturelles du site d'étude ont été rappelées et/ou mises à jour pour les volets présentant des nouvelles données. En particulier de nouvelles photographies aériennes et données topographiques du cordon littoral au droit de l'extension de la carrière ont été collectées et étudiées. Ces nouvelles données ont notamment permis de mettre à jour l'évaluation des risques littoraux.

EFFET DU PROJET SUR LA BERGE DE LA CARRIERE EN FACADE LITTORALE (BERGE NORD)

Les potentiels effets du projet sur la berge de la carrière côté littoral sont étudiés à travers deux aspects : **la stabilité géotechnique de cette berge et l'évolution des écoulements des eaux souterraines.**

- Plusieurs calculs géotechniques ont été réalisés en considérant notamment les hypothèses suivantes :
 - les caractéristiques de sols ont été estimées à partir de la pente d'équilibre en situation actuelle ;
 - le plan d'eau de la carrière est considéré à la cote +2,6 mIGN69 qui correspond au niveau le plus bas enregistré et donc le niveau le plus défavorable pour le calcul de stabilité de la berge ;
 - un talus saturé en eau a été considéré dans les deux configurations de talus testées (sensibilité à une cote haute ou basse du talus), ce qui correspond à une hypothèse défavorable pour le calcul de stabilité de la berge.

Il ressort de ces calculs qu'avec une cote d'exploitation à -6,5 m IGN69 (cote projet d'approfondissement), le coefficient de sécurité a tendance à augmenter légèrement, par rapport à une cote d'exploitation à -0,5 m IGN69 (cote actuelle).

Avec un niveau bas ou haut du talus à respectivement +3,2 ou +4,5 m IGN69 (correspondant respectivement aux niveaux minimal et maximal de la berge Nord), pour autant que la pente pour l'approfondissement du bassin à -6,5 m IGN69 soit conservée, il n'y aura pas de risque de glissement de terrain qui pourrait éroder la berge du plan d'eau en façade littorale. Cette condition est avérée tant que des charges ne sont pas amenées en tête de talus (route, stockage de matériaux, activités diverses). Les nouvelles hypothèses de cote de talus, correspondant au terrain naturel de la berge Nord, ne remettent pas en cause la stabilité de celui-ci et confirment les conclusions de l'étude de 2007.

- Des calculs d'écoulements souterrains ont également été réalisés à partir du modèle numérique mis en place lors de l'étude de 2007.

Il ressort des calculs mis à jour que les extensions et l'approfondissement de l'extraction n'ont pas d'incidence significative sur les niveaux de la nappe et sur l'écoulement et donc n'entraîneraient pas de perturbation significative de la piézométrie en raison du faible gradient piézométrique et de la présence du niveau imposé de la Manche. De plus, l'impact du projet sur les sites protégés Natura 2000 et ZNIEFF ne sera pas significatif.

Un calcul supplémentaire de sensibilité a été mené sur *l'incidence du changement climatique* sur la piézométrie du site. Il apparaît les conclusions suivantes :

- la surélévation du niveau marin entraîne principalement une hausse du niveau piézométrique (de plus en plus importante vers l'aval) et une baisse du gradient hydraulique de la nappe, avec les hypothèses considérées ;
- les résultats des simulations réalisées avec la prise en compte de la surélévation du niveau marin de 0,5 m (simulations de 2011) ne mettent pas en évidence de modification majeure de l'impact du projet d'extension et d'approfondissement de la gravière du Hourdel sur l'écoulement de la nappe superficielle ;
- en considérant une surélévation du niveau marin de 1,0 m, les directions d'écoulement souterrain au droit de la carrière ne sont pas modifiées et la piézométrie à l'intérieur des terres est remontée de 0,5 à 1 m par rapport à la situation hydrogéologique sans prise en compte de la surélévation du niveau marin. L'incidence propre du projet d'extension n'est pas modifiée en conditions de surélévation du niveau marin de 1,0 m par rapport à l'incidence propre du projet d'extension calculée en situation actuelle.

LES RISQUES LITTORAUX : EVOLUTION RECENTE DU LITTORAL

L'évolution du littoral sur la période récente 2007 – 2018 a été étudiée à partir des nouveaux levés topographiques disponibles et des orthophotographies aériennes. Il ressort les principales évolutions suivantes :

- La remontée des fonds sableux au Nord du littoral du Hourdel, au large et à l'Est des crochons de galets ;
- Le décrochement de l'extrémité (concernant un linéaire de plus de 300 mètres) du cordon actif de galets de 2007 ;
- La reprise de progression d'un cordon actif ainsi que l'apparition d'un nouveau cordon extérieur ;
- L'engraissement du littoral au droit de la partie Nord-Est de la carrière, correspondant en partie aux galets issus de l'ancien cordon actif qui se sont rabattus sur la côte et ont poursuivi leur cheminement à l'Est sous l'effet du transit littoral ;

- Le rapprochement du chenal Sud de la baie de Somme qui s'étire d'Est en Ouest contre le littoral et prenant la place des bancs sableux.

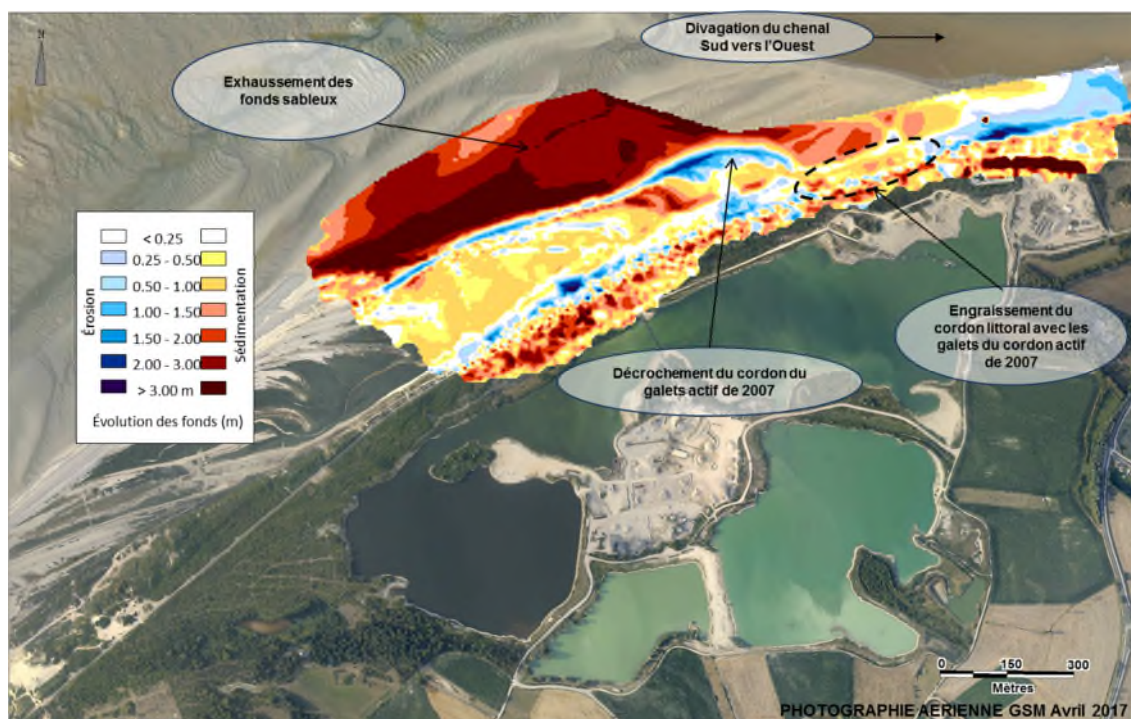


Figure 1. Evolution de la topographie entre Mars 2007 et Mai 2018

Ainsi, le littoral est globalement mieux protégé en 2018 qu'en 2007 grâce à l'exhaussement des fonds devant la quasi-totalité du linéaire de la carrière et de la présence de galets le long du littoral (issus du crochon de 2007). Néanmoins, les évolutions passées et récentes montrent que les fonds de ce littoral peuvent varier rapidement, notamment de par la proximité de la baie de Somme et de la divagation de ses chenaux.

LES RISQUES LITTORAUX : RISQUE EROSION

Sur la base de l'analyse de l'évolution du littoral, le littoral du Hourdel au droit de la carrière GSM se trouve :

- toujours en accrétion pour la partie Ouest avec un cordon de galet qui continue à avancer vers l'est,
- dépendant de la divagation du chenal sud de la Baie de Somme pour la partie Est.

Le risque d'érosion est limité sur la moitié Sud-Ouest du linéaire d'étude grâce à la protection des crochons de galets. Sur la moitié Nord-Est, le littoral est mieux protégé qu'en 2007 grâce à l'exhaussement des fonds, et la présence du cordon littoral de galet.

Néanmoins, la divagation du chenal Sud peut être responsable de phénomènes érosifs sur cette portion du littoral, comme ce qui est observé ces dernières années et comme ce qui a été déjà été observé dans le passé. A l'inverse lorsque le chenal Sud s'éloigne du littoral, le risque érosion diminue et le littoral présente plutôt un faciès d'engraissement.

Nous précisons que compte-tenu de la distance séparant le littoral de la berge de la carrière, la carrière n'a pas d'influence sur les processus d'érosion du littoral.

LES RISQUES LITTORAUX : RISQUE SUBMERSION

Le risque de submersion marine a été analysé en considérant l'aléa de référence correspondant à un événement d'occurrence centennal au cours duquel le niveau marin atteint +6,8 m IGN69 (niveau statique). De plus, il a été pris en compte la surélévation dynamique (élévation locale du niveau marin dans la zone de déferlement des vagues) correspondant à la houle centennale, portant le niveau de la mer le long du littoral à +7,5 m IGN69.

Compte tenu du niveau du cordon dunaire littoral supérieur à la cote de +8 m IGN69 dans ce secteur, il n'y a pas de risque de submersion marine au droit de la carrière.

Toutefois, pour des conditions de tempêtes extrêmes, des projections des vagues les plus fortes (le jet de rive) pourront atteindre jusqu'à la cote +11,0 m IGN69 et inonder localement le cordon littoral et la route blanche.

Nous rappelons que, compte-tenu de la distance séparant le littoral de la berge de la carrière, la carrière n'a pas d'influence sur les risques de franchissement des vagues en période de tempêtes.

oOo

SOMMAIRE

OBJET DE L'ETUDE	I
SYNTHESE ET CONCLUSIONS	A
1. PRESENTATION GENERALE	1
1.1. LOCALISATION DU SITE D'ETUDE	1
1.2. PRESENTATION DU LITTORAL D'ETUDE	1
1.2.1. DESCRIPTION DU LITTORAL ENTRE AULT ET LE HOURDEL	1
1.2.2. DESCRIPTION DU LITTORAL AU DROIT DE LA CARRIERE DU HOURDEL	4
1.2.3. VISITE DU SITE	4
1.2.4. HISTORIQUE DES INTERVENTIONS HUMAINES SUR LE LITTORAL	5
1.3. PRESENTATION DU PROJET GSM	6
1.3.1. LA CARRIERE DU HOURDEL	6
1.3.2. LE PROJET GSM	7
2. LES CONDITIONS NATURELLES	8
2.1. TOPOGRAPHIE DU LITTORAL AUX ABORDS DE LA CARRIERE	8
2.2. LES FONDS MARINS	9
2.3. LES CONDITIONS HYDROMETEOROLOGIQUES	10
2.3.1. LES VENTS	10
2.3.2. LES NIVEAUX MARINS	10
2.3.2.1. Références altimétriques	10
2.3.2.2. Niveau marin	10
2.3.3. LES COURANTS DE MAREE	13
2.3.4. LES CONDITIONS DE HOULE	14
2.3.4.1. Statistiques des houles au large	14
2.3.4.2. Houles extrêmes (au large)	16
2.3.4.3. Mesures de houle à la bouée de Cayeux-sur-Mer	17
2.3.4.4. Propagation des houles vers la côte	18
2.3.4.5. Dissipation de l'énergie de la houle dans le déferlement	19
2.3.4.6. Le jet de rive des vagues	23
2.4. LE REGIME SEDIMENTOLOGIQUE DU LITTORAL	24
2.4.1. ORIGINE ET NATURE DES MATERIAUX	24
2.4.2. LES MOUVEMENTS DES SEDIMENTS	25
2.4.2.1. Mouvements dans le profil (perpendiculaire à la côte)	26
2.4.2.2. Transit littoral (parallèle à la côte)	26
2.4.2.3. Transport éolien	26
2.4.3. LES INTERVENTIONS REALISEES SUR LE LITTORAL	26
2.4.3.1. Les extractions des Industriels du Galet	26
2.4.3.2. Le recyclage des galets de la Mollière	27
2.4.3.3. Apports de matériaux	27
2.4.4. COMPARAISON AVEC LE LITTORAL AU SUD DE CAYEUX-SUR-MER	27

3. EFFET DU PROJET SUR LA FAÇADE LITTORALE	28
3.1. ASPECTS HYDROGEOLOGIQUES	28
3.1.1. METHODOLOGIE	28
3.1.2. HYDROGEOLOGIE LOCALE	28
3.1.3. MODELE CONCEPTUEL	29
3.1.4. CONSTRUCTION DU MODELE	29
3.1.4.1. Maillage	29
3.1.4.2. Conditions de potentiel imposé	30
3.1.4.3. Condition de flux	30
3.1.4.4. Représentation des plans d'eau de la carrière	30
3.1.5. CALIBRATION DU MODELE NUMERIQUE	30
3.1.6. EXPLOITATION DU MODELE : INTEGRATION DES VARIATIONS ALTIMETRIQUES DES BERGES DU PLAN D'EAU	31
3.1.7. INCIDENCE DE LA CARRIERE SUR LA SALINITE DES EAUX SOUTERRAINES	33
3.1.8. INCIDENCE DE LA SURELEVATION DU NIVEAU MARIN (PRISE EN COMPTE DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE)	34
3.1.8.1. Incidence d'une surélévation du niveau marin de 1m sur la piézométrie	34
3.1.8.2. Conclusion	36
3.2. ASPECTS GEOTECHNIQUES	36
3.2.1. PREAMBULE	36
3.2.2. RESULTATS	37
4. LES RISQUES LITTORAUX	40
4.1. EVOLUTION DU LITTORAL	40
4.1.1. ÉVOLUTION DU CORDON DE GALETS SUR LE LITTORAL AU NORD DE CAYEUX	40
4.1.2. EVOLUTION DU LITTORAL AU DROIT DE LA CARRIERE	43
4.1.3. EVOLUTION DU BANC SABLEUX	49
4.1.4. DIVAGATION DU CHENAL SUD DE LA BAIE DE SOMME	50
4.2. RISQUE EROSION	51
4.3. RISQUE SUBMERSION	51
BIBLIOGRAPHIE	55
ANNEXE A SORTIES GRAPHIQUES TALREN (VOLET GEOTECHNIQUE)	56
ANNEXE B EVOLUTION DU CORDON LITTORAL ENTRE 2007 ET 2018 AU DROIT DE LA MOITIE NORD DE LA CARRIERE	57

FIGURES

Figure 1. Evolution de la topographie entre Mars 2007 et Mai 2018	c
Figure 2. Localisation du site d'étude	1
Figure 3. Littoral des Bas-Champs et du Hourdel	2
Figure 4. Plage de galets et falaises d'Ault en arrière-plan (source : Google Earth)	3
Figure 5. Epis au droit du Hable d'Ault – Cayeux-sur-Mer en arrière-plan (source : Google Earth)	3
Figure 6. Vue sur le littoral du Hourdel (source ARTELIA)	3
Figure 7. Littoral à l'Est du blockhaus du Hourdel	4
Figure 8. Création des épis de Cayeux-sur-Mer 2013-2015	5
Figure 9. Origine des matériaux de rechargements pour les épis de Cayeux-sur-Mer 2013-2015	6
Figure 10. Projet d'exploitation GSM (source GSM 2018)	7
Figure 11. Levé topographique de Mai 2018	8
Figure 12. Levé topographique de Mars 2007	9
Figure 13. Levé bathymétrique des fonds marins en 2004	9
Figure 14. Climat de vent Cayeux-sur-Mer de 1988 à 2015	10
Figure 15. Carte de niveaux extrêmes de PHMA (100 ans) – SHOM, 2012	12
Figure 16. Mesures de courant SHOM	13
Figure 17. Base de données CANDHIS (CETMEF) – Données du 21/08/1999 au 06/02/2001	17
Figure 18. Bathymétrie modélisée et exemple d'épure SWAN	18
Figure 19. Epure de propagation de la houle centennale - Niveau PMVE	20
Figure 20. Epure de propagation de la houle centennale - Niveau extrême 100 ans	20
Figure 21. Profil de propagation des houles au littoral	21
Figure 22. Propagation de la houle sur le profil 1	22
Figure 23. Propagation de la houle sur le profil 2	22
Figure 24. Définition du set-up, swash et run-up	23
Figure 25. Nature des sédiments	24
Figure 27. Modèle conceptuel hydrogéologique proposé	29
Figure 28. Condition de potentiel imposé	30
Figure 29. Mesures altimétriques de la berge du plan d'eau	31
Figure 30. Bathymétries des plans d'eau	32
Figure 31. Incidence du projet de réaménagement sur les cotes piézométriques de la carrière par rapport à la situation actuelle	33
Figure 32. Profil de salinité (g/l) au sein de l'aquifère superficiel à proximité des plans d'eau de la carrière (CG Somme, 2014)	34
Figure 33 : comparaison de la piézométrie simulée à marée haute avec l'intégration du changement climatique	35
Figure 34. Zone théorique d'une remontée piézométrique supérieure à la topographie autour de la carrière à marée haute (zones en rouge) pour une surélévation du niveau marin de 1 m	36
Figure 35. Stabilité géotechnique du talus de la carrière – Situation actuelle	38
Figure 36. Suivi du cordon actif entre 1993 et 2007 (analyse de la progression de l'extrémité du cordon actif effectuée à partir des levés topographiques)	41
Figure 37. Suivi du cordon actif entre 2007 et 2010 (analyse de la progression de l'extrémité du cordon actif effectuée à partir des levés topographiques)	41
Figure 38. Suivi du cordon actif entre 2010 et 2012 (analyse de la progression de l'extrémité du cordon actif effectuée à partir des photos aériennes)	42

Figure 39. Suivi du cordon actif entre 2012 et 2015 (analyse de la progression de l'extrémité du cordon actif effectuée à partir des photos aériennes)	42
Figure 40. Suivi du cordon actif entre 2015 et 2017 (analyse de la progression de l'extrémité du cordon actif effectuée à partir des photos aériennes)	43
Figure 41. Evolution de la topographie entre Mars 2007 et Mai 2018	44
Figure 42. Evolutions détaillées de la topographie entre Mars 2007 et Mai 2018	46
Figure 43. Evolutions de profils - P1.....	47
Figure 44. Evolutions de profils – P2.....	47
Figure 45. Evolutions de profils – P3.....	48
Figure 46. Evolutions de profils – P4.....	48
Figure 47. Evolution de l'isobathe +3m IGN69 entre 2007 et 2015	49
Figure 48. Evolution de l'isobathe +3m IGN69 depuis 2015	50
Figure 49. Divagation du chenal Sud de la baie de Somme	51
Figure 50. Localisation des profils en long	52
Figure 51. Profil longitudinal du cordon dunaire littoral (données GSM).....	53
Figure 52. Profil longitudinal de la route D102 (levé GSM, sept. 2016)	53

TABLEAUX

Tableau 1 – Transferts et apports de matériaux pour les travaux des épis de Cayeux-sur-Mer	5
Tableau 2 – Niveaux caractéristiques de la marée à Cayeux-sur-Mer (50° 11'N - 001° 29'E)	11
Tableau 3 – Niveaux extrêmes de pleine mer sur la zone d'étude (SHOM/CETMEF, 2012)	11
Tableau 4 – Vitesses maximales des courants au large de Dieppe (SHOM, 2000)	13
Tableau 5 – Vitesse maximale de flot et de jusant en vive eau dans le chenal au droit de la pointe du Hourdel (coefficient de marée 108)	14
Tableau 6 – Fréquences d'occurrence (en %) des houles par direction de provenance	15
Tableau 7 – Répartition des houles du large par classe de hauteur	15
Tableau 8 – Distribution (%) des périodes de houle par classe de hauteur	16
Tableau 9 – Estimation des hauteurs significatives de houle extrême au large	16
Tableau 10 – Coefficient de réfraction et direction de provenance de houle par -5 m IGN69 au droit du littoral du Hourdel	19
Tableau 11 – Caractéristiques de houle à 500 m au large du littoral du Hourdel (par -1 m IGN69)	21
Tableau 12 – Caractéristiques granulométriques du sable du littoral au droit de la carrière	25
Tableau 13 – Résultats des calculs de stabilité du talus	38
Tableau 14 – Progression vers le Nord-Est de l'extrémité du cordon de galets depuis 1939	40

o0o

1. PRESENTATION GENERALE

1.1. LOCALISATION DU SITE D'ETUDE

Le site d'étude se situe dans le hameau du Hourdel, sur la commune de Cayeux-sur-mer, dans le département de la Somme en région Nord-Pas-de-Calais-Picardie.



Figure 2. Localisation du site d'étude

1.2. PRESENTATION DU LITTORAL D'ETUDE

1.2.1. Description du littoral entre Ault et le Hourdel

Le cordon littoral des Bas-Champs et du Vimeu sur le littoral picard, s'étend sur 16 km entre Ault et le Hourdel. Celui-ci est orienté N200°-N20° entre Ault et Cayeux-sur-Mer, et pivote vers l'Est à partir de Cayeux-sur-Mer pour s'orienter sensiblement Ouest-Est au niveau du Hourdel.

Ce cordon littoral, principalement constitué de galets, a commencé à se développer il y a quelques milliers d'années lorsque la mer a atteint le niveau qu'on lui connaît actuellement. Entre Ault et Cayeux-sur-Mer, soit sur 7 km, le cordon sépare la mer de terrains situés plus bas que cette dernière lors des pleines mers de vive eau.

Les galets proviennent de l'abrasion par la mer des silex libérés par l'érosion des falaises crayeuses du littoral Haut Normand. Ils transitent le long du littoral du Sud vers le Nord sous l'action des houles du secteur dominant de Sud-Ouest à Ouest.

Le littoral situé entre Ault et la pointe du Hourdel rassemble les entités suivantes :

- la falaise vive crayeuse d'Ault, défendue depuis 1982 devant Ault, par une protection longitudinale en enrochements,
- la falaise morte qui s'étend à l'Est d'Ault,
- le cordon littoral des Bas-Champs, composé de galets, graviers et sables, qui s'étend sur 16 km entre Ault et Le Hourdel et est constitué de flèches élémentaires et des pouliers qui ont assuré sa progression jusqu'au Hourdel,
- la plaine maritime des Bas-Champs - Les Mollières qui correspond au remblaiement, à la cote +4 à +5 m IGN69, de la zone lagunaire entre le cordon et la falaise morte,
- le Hable d'Ault situé entre Ault et Cayeux-sur-Mer, en arrière du cordon, qui constitue un plan d'eau aux formes digitées qui a servi d'abri pour les bateaux du 14 au 18^e siècle avant la fermeture du cordon,
- les dunes entre Brighton et La Mollière dans la zone où l'estran est suffisamment large pour permettre le transport éolien,
- au niveau de la carrière, entre les hameaux de la Mollière et du Hourdel, le haut de plage est bordé par un massif dunaire. Ce massif dunaire peut notamment être soumis à la déflation éolienne qui fait progressivement basculer le cordon sur la route RD102 qui le longe, laquelle devait, avant qu'elle ne soit fermée à la circulation, être régulièrement désensablée.

Les figures suivantes illustrent le littoral entre Ault-Onival et le Hourdel.

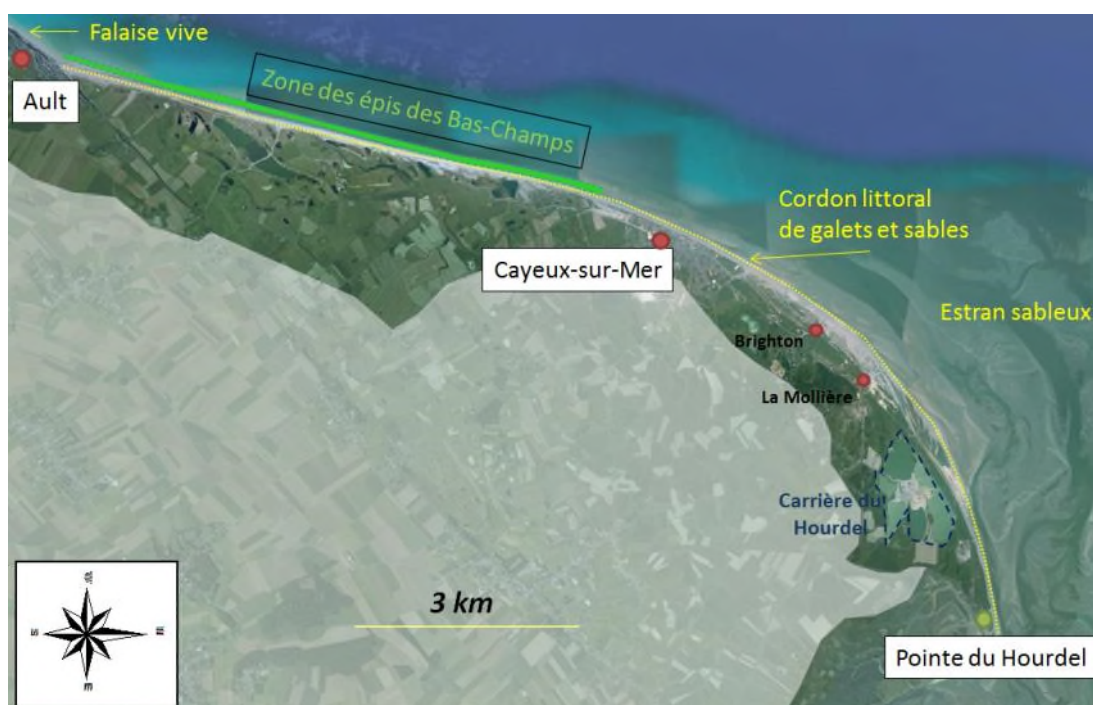


Figure 3. Littoral des Bas-Champs et du Hourdel



Figure 4. Plage de galets et falaises d'Ault en arrière-plan (source : Google Earth)



Figure 5. Epis au droit du Hable d'Ault – Cayeux-sur-Mer en arrière-plan (source : Google Earth)



Figure 6. Vue sur le littoral du Hourdel (source ARTELIA)

1.2.2. Description du littoral au droit de la carrière du Hourdel

La carrière du Hourdel se trouve à 2 500 m de la pointe du Hourdel. La dynamique hydrosédimentaire du littoral au droit de la carrière est très active.

Les petits fonds au large du Hourdel sont constitués par un large estran sableux à très faible pente correspondant à l'entrée de la baie de Somme. Sur ce large estran, les vagues déferlent plus rapidement avant d'atteindre le littoral ce qui réduit l'énergie de la houle et son potentiel érosif. Les chenaux de remplissage et de vidange de la Baie de Somme méandrent sur cet estran et leur position est très évolutive notamment au droit du littoral de la carrière.

Au niveau du cordon littoral de galets, le cordon de galets s'étend progressivement vers l'Est sous l'effet du transit littoral. Ainsi le secteur situé au Nord de Cayeux-sur-Mer jusqu'au Hourdel se trouve globalement dans une zone d'accumulation des galets. Des crochons successifs se développent lors des périodes de fortes agitations.

1.2.3. Visite du site

Une visite de site a eu lieu le 24 mars 2016. Cette visite a permis de constater l'avancée du cordon de galets vers l'Est et un estran de galets plutôt « confortable » jusqu'en haut de l'estran. La figure suivante illustre la morphologie sédimentaire du littoral au droit de la carrière du Hourdel.



Figure 7. Littoral à l'Est du blockhaus du Hourdel

La visite de site a également permis de collecter des données nécessaires à la présente étude, dont les éléments sont présentés dans les chapitres suivants.

1.2.4. Historique des interventions humaines sur le littoral

Historiquement, du fait de l'anthropisation du littoral Haut Normand et Picard et notamment de sa sectorisation par des jetées portuaires et épis, qui bloquent le transit naturel des galets vers le Nord, et de l'extraction passée des galets (3 millions de m³ entre 1900 à 1972), le secteur des Bas-Champs et du Vimeu s'est trouvé en déficit de matériaux ce qui a contribué à augmenter la fragilisation progressive naturelle du cordon de galets.

Afin de fixer le cordon littoral sur le secteur des Bas-Champs, des épis transversaux ont été implantés à partir de 1966 sur le littoral entre Ault-Onival et l'Amer Sud de Cayeux-sur-Mer.

Par ailleurs, pour entretenir le cordon et compenser le déficit des apports naturels, des apports de galets sont réalisés régulièrement à Ault-Onival, tout au long du cordon entre les épis ainsi qu'à l'extrémité Nord du système de défense à l'Amer Sud de Cayeux-sur-Mer.

D'après les informations données par le Syndicat Mixte Baie de Somme (SMBS), les interventions ayant eu lieu depuis 2007 sur le littoral d'étude consistent en la création de 24 épis au droit de la ville de Cayeux-sur-mer entre 2013 et 2015. Ces travaux ont été accompagnés de rechargements de matériaux (galets).



Source photographie SMBSGLP

Figure 8. Création des épis de Cayeux-sur-Mer 2013-2015

Ces travaux ont engagés la mobilisation de matériaux sur les quantités présentées au tableau suivant et illustrés à la Figure 9.

Tableau 1 – Transferts et apports de matériaux pour les travaux des épis de Cayeux-sur-Mer

Zone d'emprunt	Quantités (m ³)	
	Tout-venant	Gros galets
Brouettage plage Cayeux	149 000	
Plateformes SMBS et SILMER	133 000	15 000
Extractions la Mollière	92 000	
Chenal du Hourdel	62 000	
Dragage/ emprunt en mer	29 000	15 000
Carrières diverses		81 000
TOTAL	465 000 m ³	111 000 m ³



Figure 9. Origine des matériaux de rechargements pour les épis de Cayeux-sur-Mer 2013-2015

Ces travaux ont été achevés en 2015, ce qui laisse aujourd'hui peu de recul sur la situation sédimentaire en place.

D'autre part, des rechargements ponctuels peuvent avoir eu lieu suite à des tempêtes ; le cas s'est notamment présenté en Décembre 2006 puis Avril 2007, où le service Maritime a rechargé le pied du cordon dunaire au droit de la carrière du Hourdel, le long de la RD102 sur un linéaire de 650 m avec des matériaux (sable et galets) prélevés à la pointe du Hourdel. Les volumes mis en jeu étaient de 10 000 m³ environ et 3200 m³ environ pour Décembre 2006 et Avril 2007 respectivement.

Aucun autre rechargement n'a eu lieu depuis Avril 2007 sur le littoral au droit de la carrière du Hourdel à notre connaissance.

1.3. PRESENTATION DU PROJET GSM

1.3.1. La carrière du Hourdel

La baie de Somme est le seul pôle industriel en France pour l'extraction et la production de galets siliceux, richesse minérale naturelle rare. Le site du Hourdel, implanté au cœur de la baie de Somme, est exploité par GSM depuis 1982.

La carrière du Hourdel s'étend sur 1 800 m, le long du littoral, au droit de l'extrémité du cordon de galets, dans les pouliers fossiles du cordon. Elle est séparée de la route blanche par une bande de terre de 100 à 150 m de large. Le bassin s'étend sur une superficie de l'ordre de 43 hectares. Le gisement de la carrière est constitué de galets dans une matrice sableuse.

Au droit de la carrière, le niveau piézométrique est mesuré à quelques mètres sous la surface. L'extraction des galets se réalise donc sous eau.

1.3.2. Le projet GSM

Le projet GSM reprend la majeure partie du périmètre actuellement autorisé par arrêté préfectoral en date du 26 avril 2011 et s'étend vers le sud avec la reprise d'ancien plan d'eau d'extraction (plan d'eau de pêche communal et ancienne carrière Silmer) et une zone d'extension au lieu-dit La Barge.

La figure suivante présente le projet de phasage pour l'actuel dossier de demande d'autorisation d'exploiter.

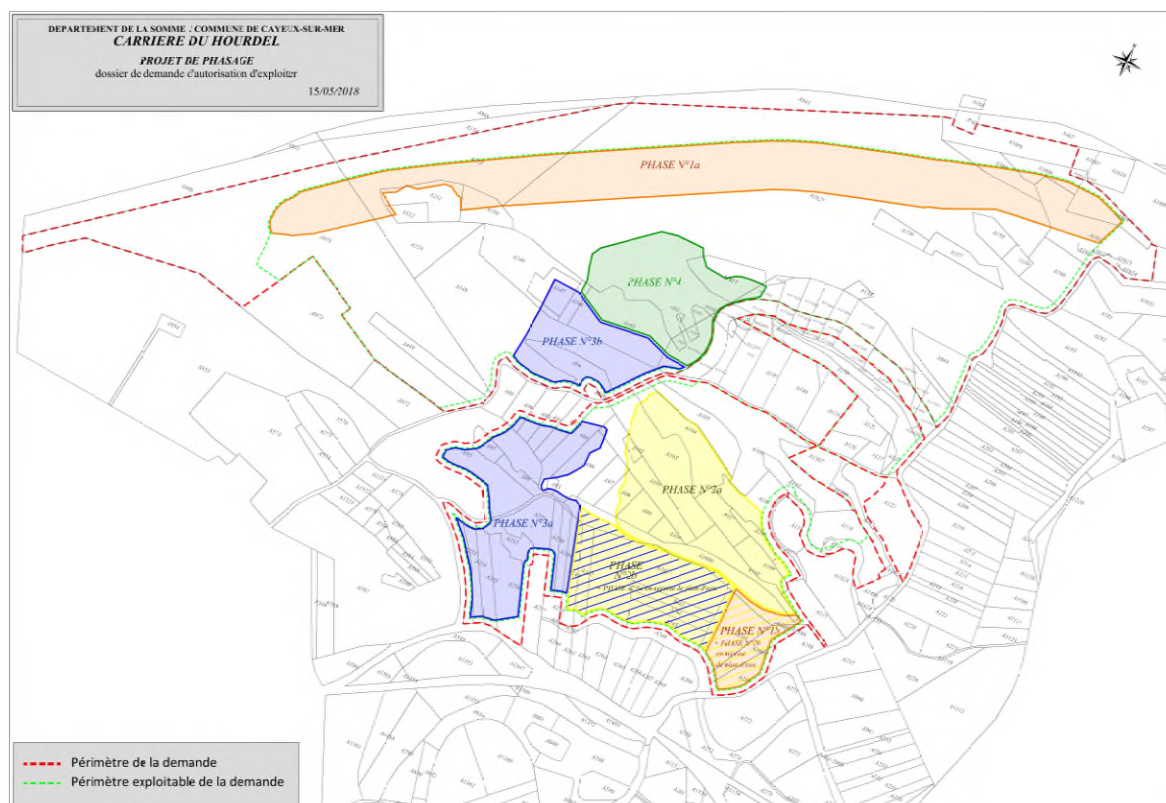


Figure 10. Projet d'exploitation GSM (source GSM 2018)

Dans son dossier précédent GSM a été autorisé à approfondir en façade littorale jusqu'à la cote de -6.5 mIGN69 sur la base d'un arrêté préfectoral qui stipule que la cote du talus de la carrière soit à minima à +4 m IGN 69, cote qui avait été considérée dans la modélisation hydrogéologique et les calculs de stabilité géotechnique lors des études précédentes (SOGREAH / ARTELIA, 2007 & 2011) car jugée comme représentative du site.

Cependant la topographie de la berge Nord sur l'ensemble de son linéaire varie entre +3.2 et +4.5 mIGN69. La mise à niveau du talus de la carrière à la cote de +4 mIGN69 représente une contrainte sévère pour GSM. C'est pourquoi GSM a demandé à ARTELIA Eau et Environnement de reprendre ces modélisations et calculs afin de modéliser les niveaux topographiques réels de la berge et de vérifier dans quelles mesures des cotes légèrement plus basses ou plus hautes du talus de la carrière pourraient modifier les conclusions des études précédentes.

Ces simulations, considérant les cotes haute et basse du talus de la carrière, doivent également intégrer les effets du réchauffement climatique (prise en compte de la surélévation du niveau marin).

2. LES CONDITIONS NATURELLES

Une étude avait été réalisée en 2007 par SOGREAH à la demande GSM et avait fait l'objet d'une mise à jour en 2016.

Les données présentées à la suite sont extraites de ces deux études et mises à jour lorsque cela est possible en fonction des données disponibles en 2018.

2.1. TOPOGRAPHIE DU LITTORAL AUX ABORDS DE LA CARRIERE

GSM effectue régulièrement des levés topographiques du littoral et des terrains en retrait le long de la carrière. Ces levés ont été traités avec le Système d'Informations Géographiques (SIG) MAPINFO qui permet, après la préparation d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), de représenter graphiquement le terrain, par des aplats de couleur.

La **Figure 11** présente le levé topographique le plus récent datant de Mai 2018. Les cotes altimétriques sont repérées par rapport au 0 IGN69.

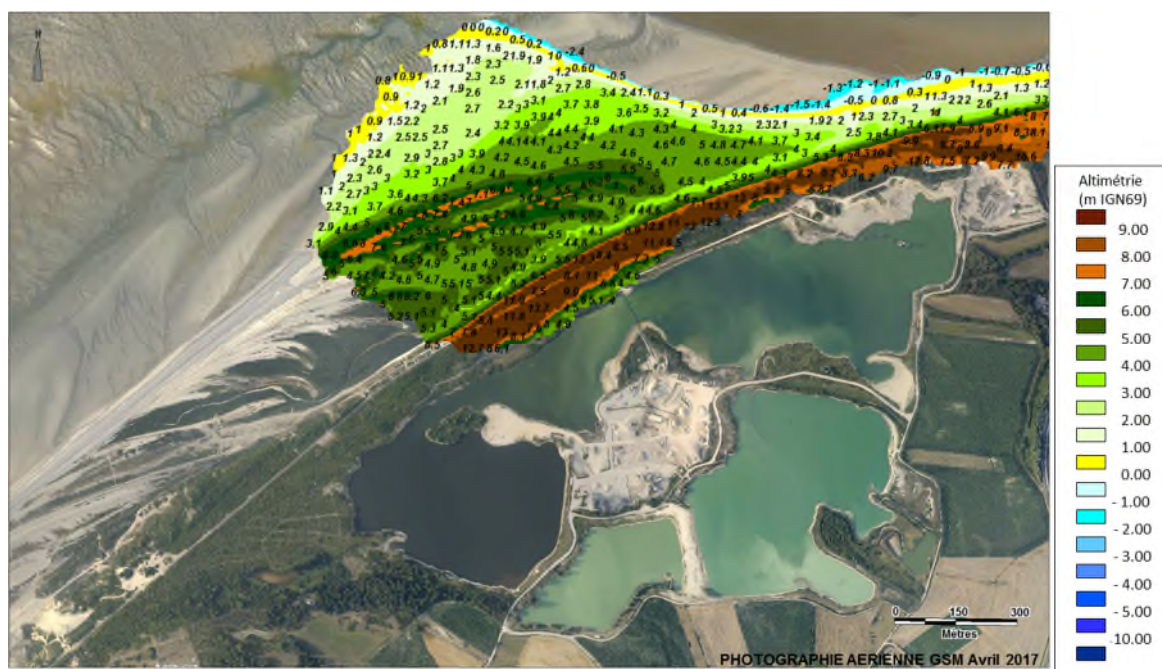


Figure 11. Levé topographique de Mai 2018

Le levé de Mars 2007 (présenté à la **Figure 12**) a été complété avec les éléments suivants :

- la bathymétrie de la carrière levée par GSM, en Octobre 2006,
- des données topographiques complémentaires, pour la zone située à l'Est du bassin de la carrière, provenant du levé photogrammétrique de 2007, réalisé dans le cadre de l'étude de la dépollérisation expérimentale de la ferme de la Caroline.

Ces deux levés à dates distinctes (2007 et 2018) vont permettre en particulier de réaliser des cartes différentielles d'évolution des fonds entre ces dates.

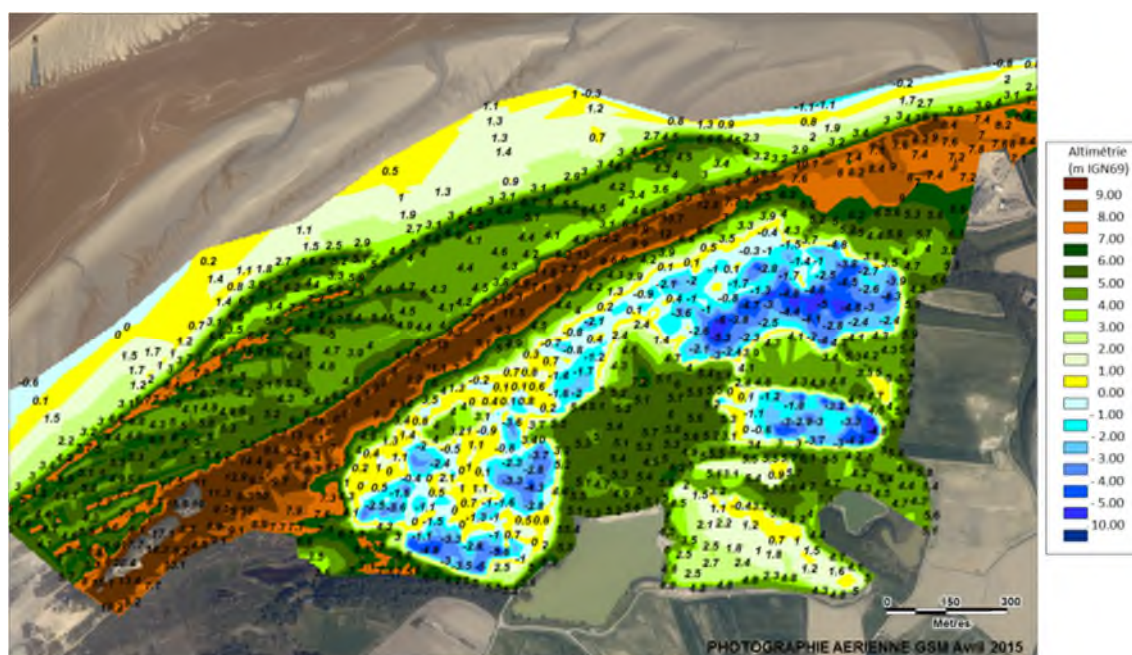


Figure 12. Levé topographique de Mars 2007

2.2. LES FONDS MARINS

Le levé bathymétrique le plus récent des fonds marins au large du littoral du Vimeu a été réalisé en 2004. La Figure 13 présente la bathymétrie au large du littoral du Hourdel.

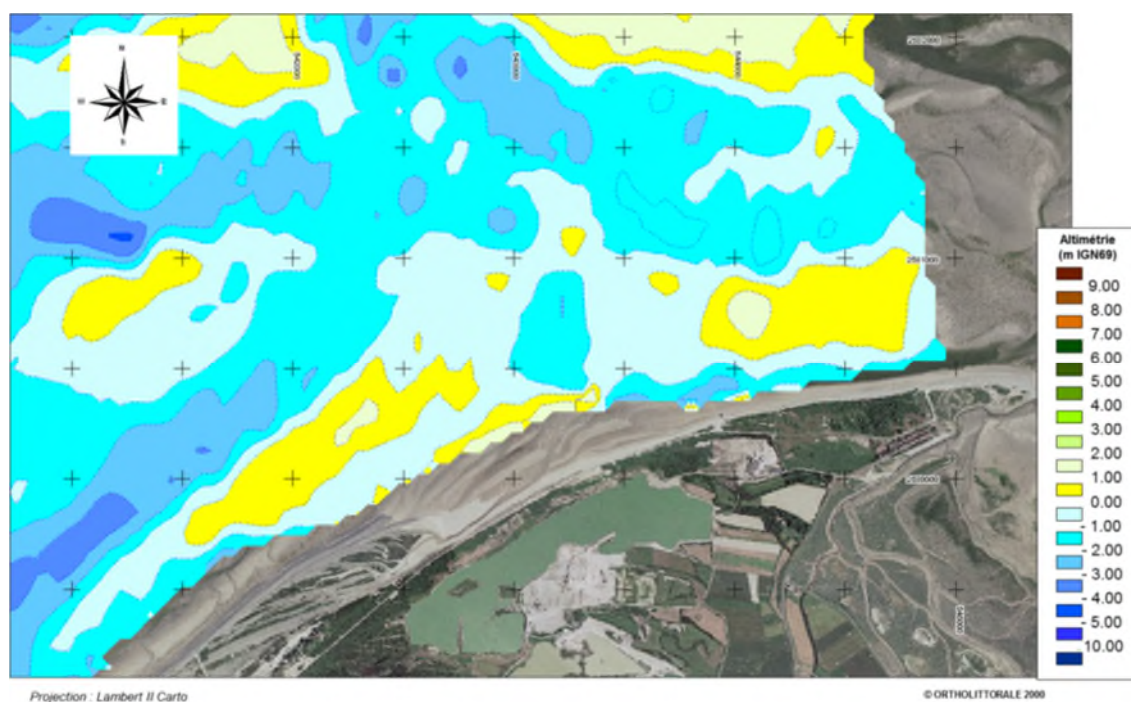


Figure 13. Levé bathymétrique des fonds marins en 2004

2.3. LES CONDITIONS HYDROMETEOROLOGIQUES

2.3.1. Les vents

Les statistiques des vents de Cayeux-sur-Mer sur la période de 1988 à 2015 (Figure 14) montrent que les vents les plus fréquents proviennent des secteurs Sud-Est, Ouest et Nord-Nord-Ouest. Les vents les plus violents proviennent majoritairement du secteur Sud-Ouest à Ouest. A noter cependant que l'évènement le plus fort enregistré (vent de vitesse 28 m/s) avait une provenance du secteur Nord-Ouest à Nord.

En moyenne sur l'année, le vent dépasse 50 km/h (13,9 m/s) environ 3% du temps.

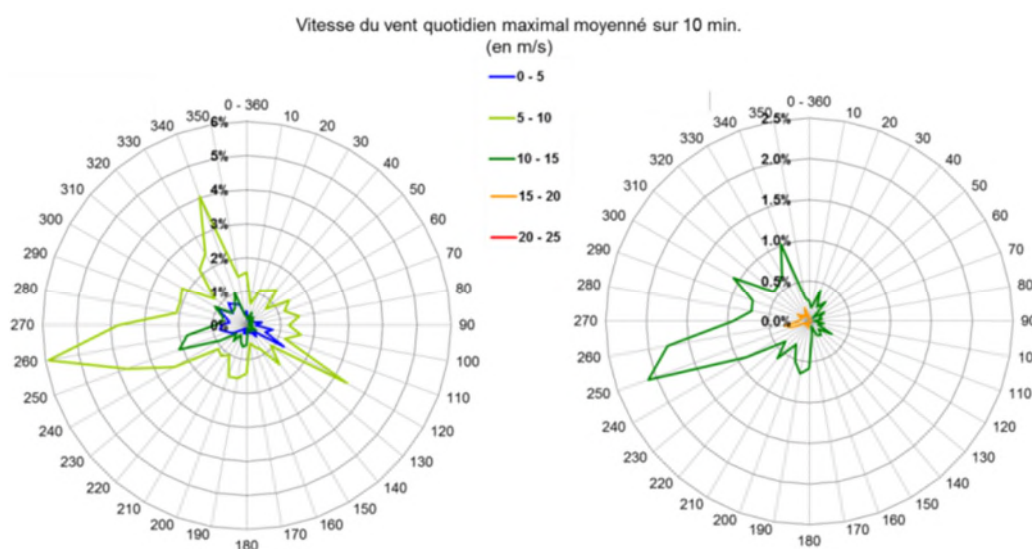


Figure 14. Climat de vent Cayeux-sur-Mer de 1988 à 2015

Les vents génèrent la houle dont les caractéristiques sont liées à la direction et à la vitesse du vent ainsi qu'à la longueur du plan d'eau sur lequel celui-ci souffle (le fetch). La prédominance des vents du secteur Sud-Ouest à Ouest conduit effectivement à la prédominance des houles provenant de ce secteur qui à leur tour génèrent un transport sédimentaire vers le Nord-Est (vers la Baie de Somme). Les vents génèrent également un transport éolien à l'origine des formations dunaires. Enfin, il est à l'origine des surcotes du niveau moyen de la mer accentuant les actions des vagues sur le haut estran.

2.3.2. Les niveaux marins

2.3.2.1. Références altimétriques

Le niveau de référence altimétrique pris en compte pour cette étude est le 0 IGN69.

Le Zéro hydrographique (0 ZH ou 0 CM) correspond pour chaque point de la côte au niveau théorique le plus bas atteint par la marée à ce point. Il est déterminé par le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) pour chaque port de référence. Au niveau de Cayeux-sur-Mer, le Zéro Hydrographique se situe à -4,97 m IGN69.

2.3.2.2. Niveau marin

A court terme, les variations du niveau de la mer résultent de deux composantes :

- d'une part, du régime de la marée astronomique, prédictible,

- d'autre part, d'évènements météorologiques (vent, champ dynamique de pression atmosphérique) plus aléatoires et prévisibles uniquement à court terme.

A plus long terme, les niveaux relatifs de la mer par rapport aux fonds marins sont affectés par les mouvements verticaux de la croûte terrestre (subsidence, compaction) et par la surélévation du niveau marin due au changement climatique.

a) *La marée astronomique*

Les niveaux caractéristiques de la marée à Cayeux définis par le SHOM sont présentés dans le tableau ci-après (Référence Altimétries Maritimes de 2016).

Tableau 2 – Niveaux caractéristiques de la marée à Cayeux-sur-Mer (50° 11'N - 001° 29'E)

Secteur directionnel de provenance du vent	Coefficient	Niveau (m ZH)	Niveau (m IGN69)
Plus Haute Mer Astronomique	120	10,58	5,61
Pleine Mer de Vive Eau Moyenne	95	9,85	4,88
Pleine Mer de Morte eau Moyenne	45	8,00	3,03
Niveau Moyen	-	5,49	0,52
Basse Mer de Morte Eau Moyenne	45	2,95	-2,02
Basse Mer de Vive Eau Moyenne	95	1,20	-3,77
Plus Basse Mer Astronomique	120	0,42	-4,55

b) *Estimation des niveaux extrêmes maximaux*

A ces niveaux de marée peuvent se superposer des décotes ou des surcotes dues à la pression atmosphérique, d'une part, et à l'effet du vent, d'autre part. Les niveaux observés résultent donc de la combinaison des niveaux prédits et des écarts à ces niveaux provenant essentiellement des conditions météorologiques.

Les niveaux extrêmes maximaux sont estimés à partir de travaux réalisés par le SHOM et le CETMEF qui fournissent les niveaux marins extrêmes le long des côtes de la façade Manche / Atlantique. Ces travaux, publiés en 2008, ont été révisés en 2012 (SHOM/CETMEF, 2012), notamment suite à l'extension des données marégraphiques utilisées.

Les niveaux se présentent sous forme de cartes régionales de niveau extrême pour les périodes de retour à 10, 20, 50 et 100 ans (voir [Figure 15](#)). Le tableau suivant transcrit les valeurs pour la zone d'étude du Hourdel pour ces périodes de retour.

Tableau 3 – Niveaux extrêmes de pleine mer sur la zone d'étude (SHOM/CETMEF, 2012)

Période de retour (ans)	Niveau de mer extrême m IGN 69 (marée PHMA + surcote)
10	6,10
20	6,15
50	6,25
100	6,30

Il est à noter que le niveau extrême de pleine-mer de période de retour 100 ans (+6,3 m IGN69) est bien moindre que le niveau précédemment établi par le CETMEF et utilisé lors de la précédente étude (+6,8 m IGN69). Afin de rester cohérent avec les travaux réalisés dans le passé et conservatif dans la présente étude, **nous considérons un niveau extrême de +6,8 m IGN69.**

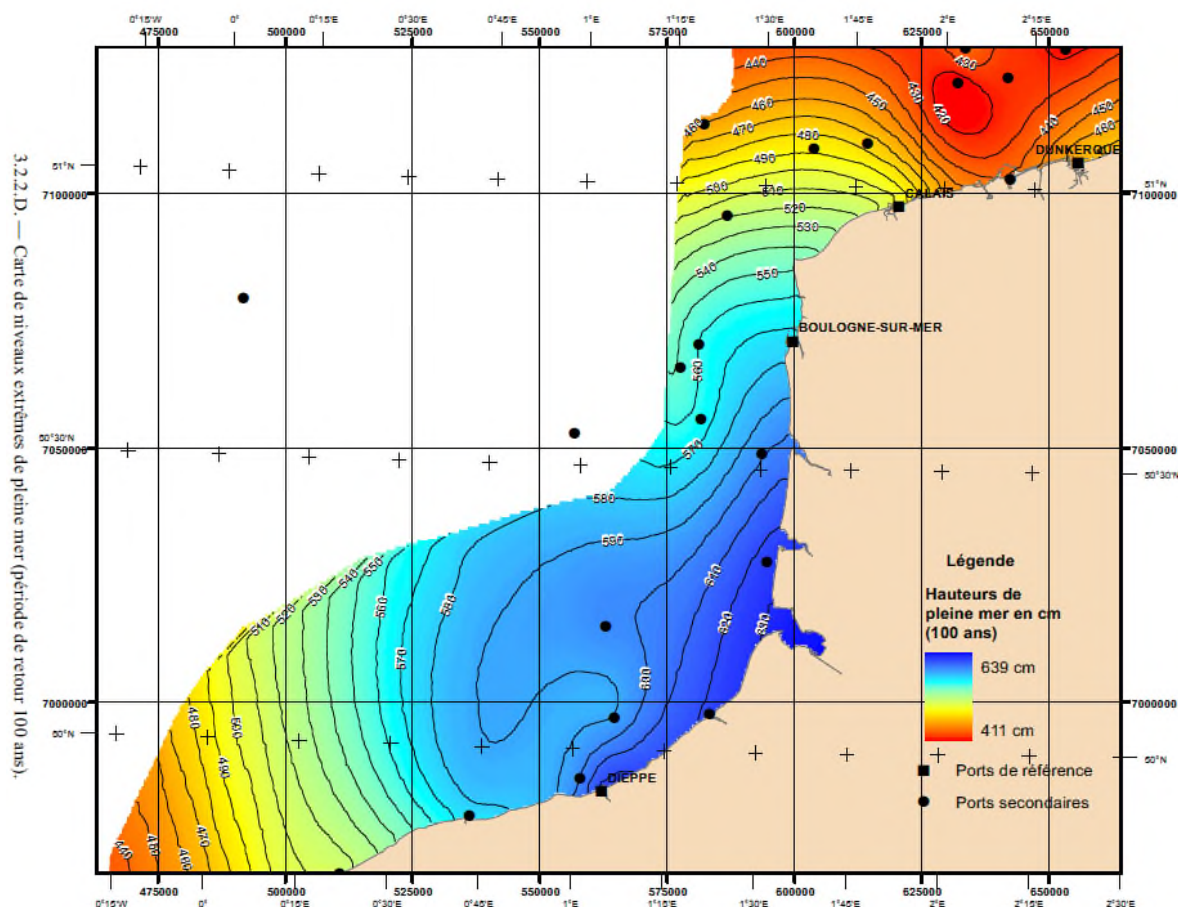


Figure 15. Carte de niveaux extrêmes de PHMA (100 ans) – SHOM, 2012

c) *Evolution à long terme du niveau de la mer*

Le niveau moyen de la mer est affecté par une remontée qui peut être principalement imputée au réchauffement climatique. La note de synthèse n°2 de 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 » établie par La Direction générale de l'énergie et du climat / Service du climat et de l'efficacité énergétique / Observatoire National sur les effets du réchauffement climatique (MEDTL) préconise en conclusion de retenir, « pour les études sur les impacts du changement climatique et les mesures d'adaptation possibles, les 3 hypothèses suivantes pour la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer à l'horizon 2100 » :

- hypothèse optimiste : 0,4 m,
- hypothèse pessimiste : 0,6 m,
- hypothèse extrême : 1,0 m.

Les hypothèses d'augmentation du niveau de la mer due au réchauffement climatique considérées dans cette étude sont les suivantes : 20 cm à l'heure actuelle et 60 cm à l'horizon 2100 (hypothèse pessimiste du MEDTL).

2.3.3. Les courants de marée

Les champs de courants de marée à différents instants en vive eau et morte eau au large du littoral de Dieppe sont établis par le SHOM.

Les courants aux abords du littoral sont sensiblement parallèles au rivage et de type alternatif :

- le flot porte vers le Nord-Est et dure 5 h à 5 h 30,
- le jusant porte au Sud-Ouest et dure en moyenne 7 h.

Tableau 4 – Vitesses maximales des courants au large de Dieppe (SHOM, 2000)

Flot		Jusant	
VE moyenne	ME moyenne	VE moyenne	ME moyenne
1,15 m/s	0,50 m/s	0,85 m/s	0,45 m/s

a) Entrée de baie

Des mesures ont été réalisées par le SHOM en morte eau et vive eau, en deux points : d'une part au large de l'entrée de la baie de Somme et, d'autre part, au sud de l'Amer Sud de Cayeux-sur-Mer (voir les figures ci-dessous).

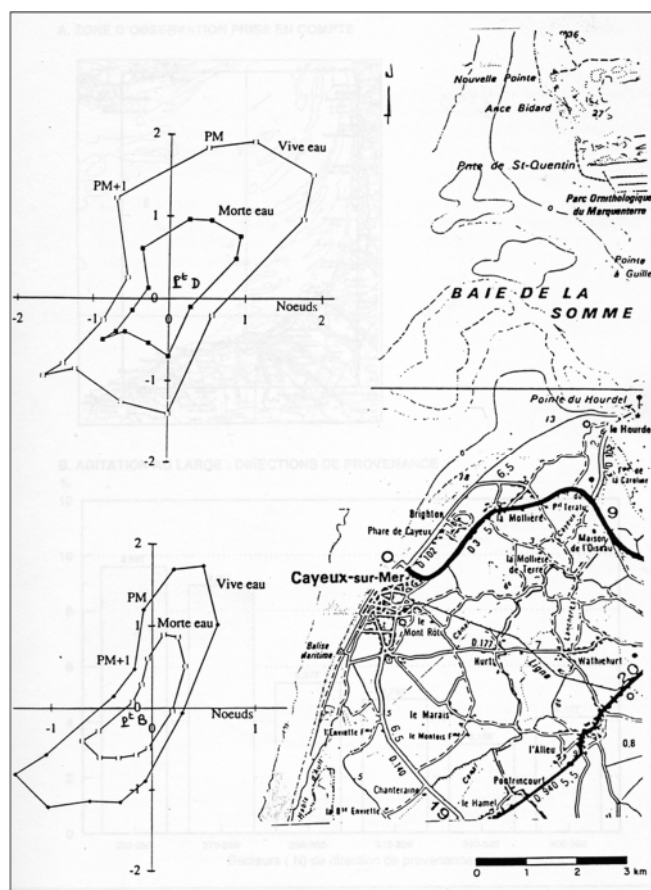


Figure 16. Mesures de courant SHOM

- On retrouve devant le cordon des Bas-Champs, les mêmes ordres de grandeurs que les vitesses estimées au large de Dieppe : de l'ordre de 0,7 à 0,8 m/s en flot, de l'ordre de 0,6 m/s en jusant, en vive eau.

- Au droit de la baie, les courants sont très giratoires, supérieurs à 0,3 m/s en vive eau avec des vitesses maximales de 1,2 m/s en flot et 0,95 m/s en jusant.

b) Pied de cordon

Des mesures par suivi de trajectoires à 50 et 100 m du rivage ont montré que la vitesse de flot pouvait atteindre 0,5 m/s et, très exceptionnellement 0,7 m/s pendant quelques minutes lors de marée de vive eau exceptionnelle (coefficient 113).

Enfin, il est intéressant de mentionner les mesures à poste fixe effectuées en 1965 par le LCHF à l'aide d'un courantomètre placé en pied du cordon de galets à 0,8 m au-dessus des fonds par marées de vive eau (coefficients de marée entre 100 et 113) :

- les vitesses avec une agitation de l'ordre de 0,5 m restaient inférieures à 0,2 m/s,
- le maximum de courant était observé en flot 1h30 avant la pleine mer locale, le flot s'annulant entre 1h et 1h30 après la PM.

Les vitesses observées en pied de cordon sont insuffisantes pour jouer un rôle dans le transport des galets. Les courants observés à 50 à 100 m du rivage peuvent tout juste assurer le début d'entraînement des sables mais conjugués à l'action des houles, ils sont susceptibles d'accroître la capacité de transport locale.

c) Chenal du Hourdel

Les données de vitesses de courants mesurées à l'entrée de la baie de Somme dans le chenal au droit de la pointe du Hourdel que nous possédons datent de Septembre 1992. Les mesures ont été réalisées en trois profondeurs (surface, mi-profondeur, fond) en période de vive eau, marée moyenne et morte eau.

Tableau 5 – Vitesse maximale de flot et de jusant en vive eau dans le chenal au droit de la pointe du Hourdel (coefficient de marée 108)

VE moyenne	Surface		Mi-profondeur		Fond	
	Vitesse (m/s)	Direction	Vitesse (m/s)	Direction	Vitesse (m/s)	Direction
Flot	2,45	N110°	2,55	N110°	2,29	N110°
Jusant	2,09	N310°	2,04	N310°	2,32	N310°

Les vitesses des courants dans le chenal sont donc élevées. Les vitesses de flot seraient, en ce point, supérieures à celles du jusant en surface et à mi-profondeur de la colonne d'eau. Le courant de flot ne dure que 2 à 3 heures. L'arrivée du flot dans la baie de Somme se fait préférentiellement en bordure Sud donc à proximité du Hourdel.

2.3.4. Les conditions de houle

2.3.4.1. Statistiques des houles au large

La définition du régime des houles au large repose sur l'analyse des statistiques issues des observations de navires sur la période 1960-1993 dans la zone au large du littoral des Bas-Champs. Nous ne possédons pas de données plus récentes présentant une telle emprise temporelle (33 ans de données).

- latitude : 49°44' N – 50°50' N,
- longitude : 0°20'E – 1°40'E.

Sur les 57 225 observations collectées et après éliminations des doublons et valeurs douteuses, 30144 observations ont été retenues et traitées pour établir les distributions statistiques en hauteurs, périodes et directions puis disposer d'une première estimation des valeurs extrêmes des hauteurs.

Les fréquences des directions de provenance et la répartition des observations par classe de hauteur pour le secteur maritime 250°N-360°N (quart Nord-Ouest) sont données dans les tableaux ci-après.

Tableau 6 – Fréquences d'occurrence (en %) des houles par direction de provenance

Direction de provenance (°N)	Classe des hauteurs Hs (m)				Total (%)
	0,1 m - 1,0 m	1,0 m - 2,0 m	2,0 m - 3,0 m	>3,0 m	
250°N à 260°N	4,8	2,7	1,5	0,5	9,6
270°N à 280°N	4,5	2,5	1,4	0,6	8,9
290°N à 300°N	2,8	1,4	0,8	0,3	5,3
310°N à 320°N	2,9	1,3	0,5	0,1	4,8
330°N à 340°N	2,1	0,8	0,3	0,0	3,2
350°N à 360°N	2,6	1,0	0,4	0,1	4,1
TOTAL	19,7	9,7	5,0	1,6	36,0

Tableau 7 – Répartition des houles du large par classe de hauteur

Classes de hauteur (m)	Fréquence d'apparition (%)
Calmes	64,05
0,1 - 0,5 m	12,77
0,5 - 1,0 m	7,07
1,0 - 2,0 m	9,55
2,0 - 3,0 m	4,92
3,0 - 4,0 m	1,24
4,0 - 5,0 m	0,27
> 5 m	0,13

L'examen de ces résultats conduit aux remarques suivantes :

- les agitations intervenant dans la dynamique littorale agissent 36 % du temps,
- pendant 77% du temps, la hauteur Hs de l'agitation est inférieure à 0.5 m ; 1,6% des agitations sont supérieures à 3 m,
- pour toutes les classes de hauteur, les fréquences diminuent régulièrement entre le 250° N (environ direction Ouest-Sud-Ouest) et le 360°N (direction Nord),
- le secteur de provenance de houle 250° N à 280° N (secteur Ouest) correspond aux agitations dominantes tant en durée qu'en hauteur.

La distribution des périodes de la houle par classe de hauteur est donnée dans le tableau suivant.

Tableau 8 – Distribution (%) des périodes de houle par classe de hauteur

T (s)	Classe des hauteurs Hs (m)				Total (%)
	< 1,0 m	1,0 m - 2,0 m	2,0 m - 3,0 m	>3 m	
<= 5 s	14,30	8,30	2,90	0,30	25,8
6 - 7 s	0,40	0,80	1,80	1,00	4,00
8 - 9 s	0,04	0,10	0,10	0,20	0,44
>= 10 s	0,07	0,04	0,03	0,13	0,27
Indéterminé	5,00	0,30	0,10	0,06	5,46
Total	19,80	9,60	4,90	1,60	35,90

On constate que :

- 25,8 % des houles intervenant dans la dynamique littorale ont une période inférieure ou égale à 5 s ;
- les houles dont la période est supérieure ou égale à 10 s représentent moins de 0,3 % des observations.

2.3.4.2. Houles extrêmes (au large)

Une extrapolation des valeurs les plus fortes ($H_s > 4,5$ m) a été effectuée pour estimer les valeurs de houle extrêmes pour différentes périodes de retour (méthode du seuil). Il est à noter que toutes les observations sélectionnées correspondent à des directions de provenance comprises dans le secteur Ouest 250° N - 280° N, les périodes étant généralement comprises entre 8 et 10 s.

Les résultats obtenus ont été confrontés pour les périodes de retour de 10 et 100 ans, aux estimations de houle extrêmes réalisées pour des sites voisins, dans le but de vérifier la cohérence générale. Le tableau suivant présente cette comparaison.

Tableau 9 – Estimation des hauteurs significatives de houle extrême au large

Site - Caractéristiques des données ayant été utilisées pour l'extrapolation	Période de retour (années)						
	houle annuelle	2	5	10	20	50	100
Données synships au large des Bas-Champs (1960-1993)		5,6	6,3	6,8	7,3	7,9	8,4
Houle au large de Dieppe Evaluation à partir des données de vents Météo France 1951-1980 (formulation théorique [6], 1973)				5,8			7,3
Extrapolation réalisée à partir de mesures effectuées à Antifer sur la période (03/07/1972-11/05/1982)				5,6			7,2
Houle à Dieppe (IFREMER, 2004)	4,3			5,7			

On retiendra les estimations maximales de 6,8 m et 8,4 m pour les hauteurs significatives des houles de période de retour décennale et centennale respectivement, puisqu'il s'agit des données présentant l'emprise temporelle la plus étendue (33 ans) et étant les plus au droit de la zone d'étude.

2.3.4.3. Mesures de houle à la bouée de Cayeux-sur-Mer

La base de données CANDHIS du CETMEF (Centre d'Etudes Maritimes et Fluviales) présente les mesures de houle (hauteur significative H1/3 et période de pic Tp) à la bouée DATAWELL mise en place devant le littoral de Cayeux-sur-Mer par 25 m de profondeur aux coordonnées 50°17,85'N, 01°10,35'E. Ces données contiennent 3298 mesures réalisées entre le 21/08/1999 et le 06/02/2001 sur les mois d'Août à Mars (pas de mesures d'Avril à Juillet). Cette bouée a été arrêté le 06/02/2001, il n'existe donc pas de données plus récentes à ce point.

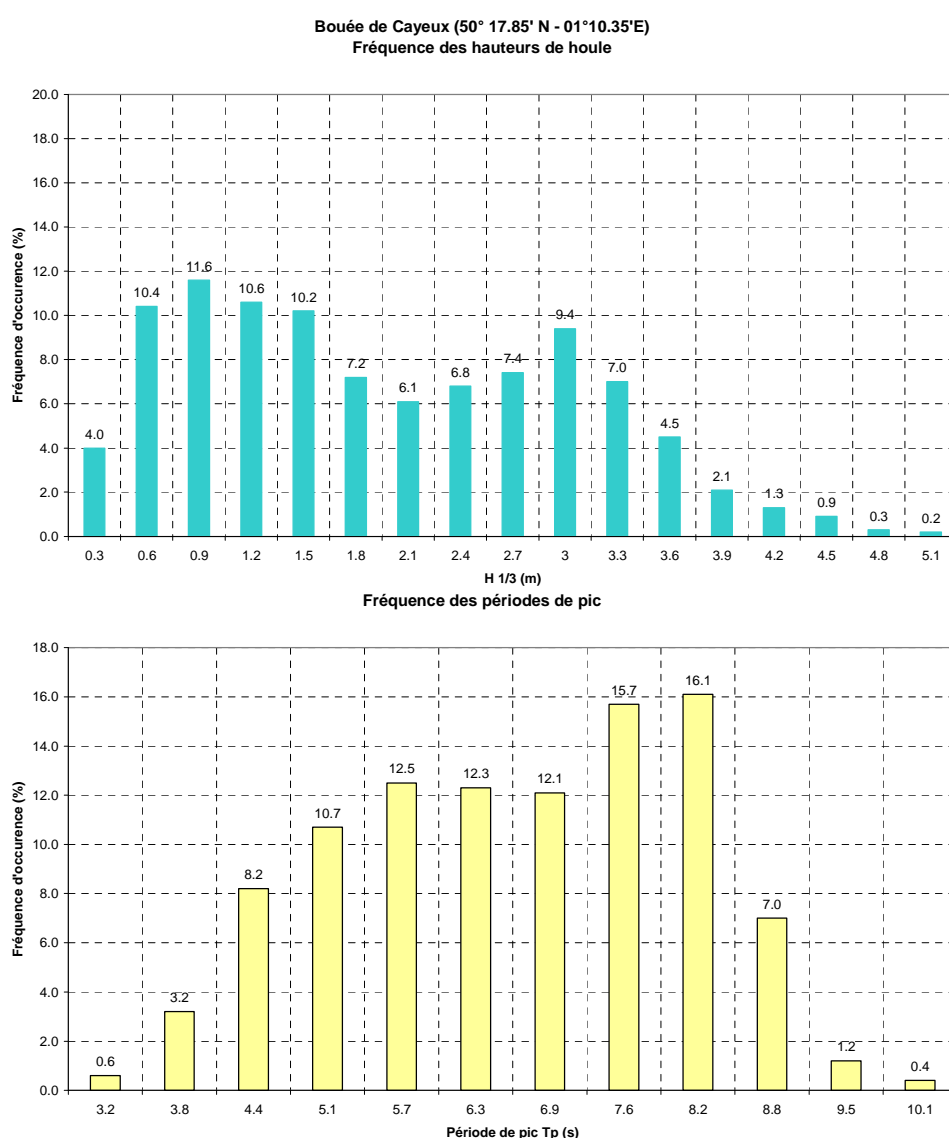


Figure 17. Base de données CANDHIS (CETMEF) – Données du 21/08/1999 au 06/02/2001

L'échantillon de mesures est relativement réduit et il ne couvre pas toute la période annuelle. Il n'est donc pas représentatif de régime annuel des houles. On peut néanmoins faire les commentaires suivants :

- 46 % des houles mesurées sont supérieures à 2 m et 2,5 % sont supérieures à 4 m,
- les houles de 7 à 8 s de période représentent 44 % des observations et les périodes supérieures à 8,5 s correspondent à 8,6 % des observations.

2.3.4.4. Propagation des houles vers la côte

En se propageant vers la côte, la houle est fortement influencée par la bathymétrie. Un modèle mathématique (logiciel SWAN) a été mis en œuvre lors d'études précédentes pour simuler la propagation des houles du large vers la côte. Il permet de calculer la propagation de la houle jusque dans la zone de déferlement en tenant compte des effets de la réfraction (modification des hauteurs et directions des houles sous l'effet des variations des fonds).

La bathymétrie modélisée a été établie à partir des cartes du SHOM (zone du large) et des levés topo-bathymétriques de 2004. Les figures suivantes présentent la bathymétrie modélisée et un exemple d'épure de réfraction pour une houle du N245° (Ouest-Sud-Ouest) de période 7 s.

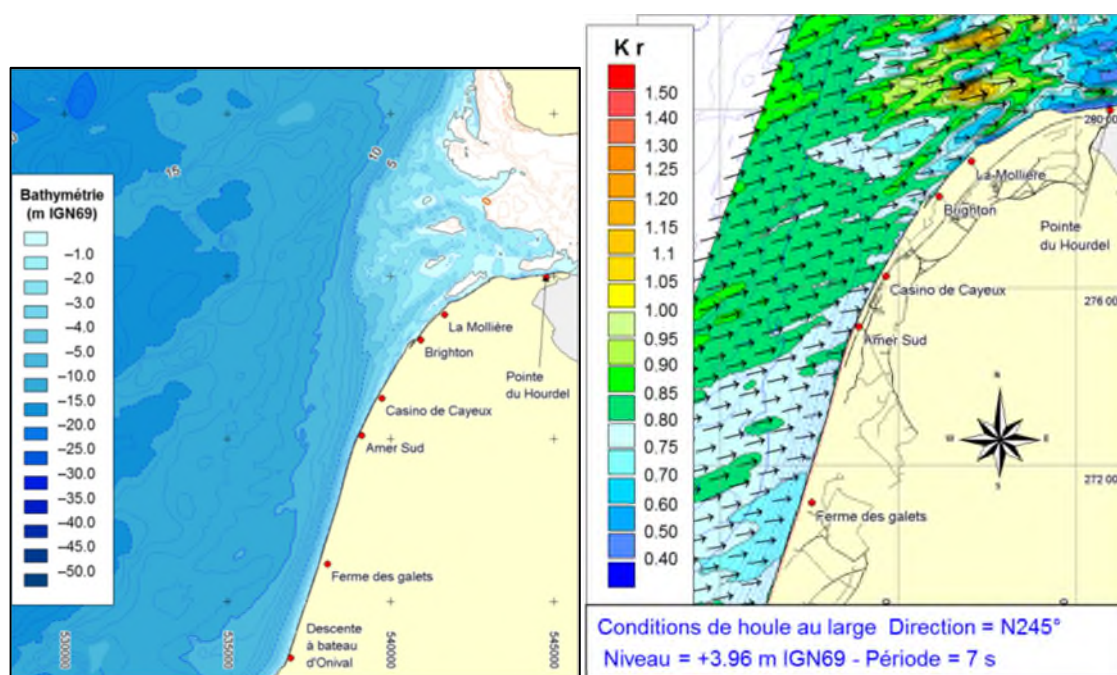


Figure 18. Bathymétrie modélisée et exemple d'épure SWAN

Le modèle a été utilisé pour évaluer les effets de la réfraction des houles courantes sur les fonds marins. Le tableau suivant présente le coefficient de réfraction¹ et la direction des houles au niveau de l'isobathe -5 m IGN69 estimé dans le cas d'un niveau de mer moyen de +3,96 m IGN69. Celui-ci est en effet représentatif des niveaux de mer pour lesquels les houles parviennent jusqu'au littoral et sont susceptibles de provoquer des mouvements sédimentaires le long de ce dernier.

¹ Les calculs en houle courante ont été réalisés en considérant une houle unitaire au large ($H_s = 1\text{ m}$), situé par -5 m IGN 69. La valeur du coefficient de réfraction permet, par une simple règle de trois, de connaître la valeur d'une houle usuelle en ce point (si cette houle ne déferle pas). Par exemple, une houle de 1,5 m de hauteur H_s au large et de 7 s de période, provenant du 245°N, se présentera au point considéré avec une direction du 255°N et une hauteur H_s de 1,5 m fois 0,80, soit 1,2 m.

Tableau 10 – Coefficient de réfraction et direction de provenance de houle par -5 m IGN69 au droit du littoral du Hourdel

Direction de provenance au large (°N)	Période de la houle (s)					
	5		7		10	
	Coef. de réfraction	Direction (°N)	Coef. de réfraction	Direction (°N)	Coef. de réfraction	Direction (°N)
245	0,85	252	0,80	255	-	-
265	0,95	265	0,90	267	-	-
270	0,95	270	0,92	270	1,00	275
285	0,95	282	0,95	282	1,00	285
295	0,95	295	0,92	290	-	-
305	0,90	300	0,88	295	-	-
325	0,90	320	-	-	-	-
345	0,90	335	-	-	-	-

Ces résultats montrent que les houles parvenant sur les fonds de -5 m IGN69 (actuellement situés à plus de 3 km au large du littoral) au droit du Hourdel sont encore peu atténuées par le phénomène de réfraction : pour les houles du secteur considéré du N245° au N345° (Ouest-Nord-Ouest), les coefficients de réfraction restent supérieurs à 0,8 et la variation de la direction de la houle par rapport à sa valeur au large reste inférieure à 10°.

2.3.4.5. Dissipation de l'énergie de la houle dans le déferlement

En revanche, en traversant la zone des petits fonds à l'entrée de la baie de Somme entre l'isobathe -5 m et le littoral, les plus fortes vagues déferlent, ce qui conduit à dissiper l'énergie de la houle et à réduire progressivement sa hauteur significative.

Pour illustrer ce phénomène, deux simulations ont été réalisées pour la houle de période de retour centennale de hauteur significative au large de 8,4 m et de période 10 s. Il a été considéré une direction de provenance de N280°. Les simulations ont été réalisées pour deux niveaux marins :

- +4,90 m IGN69 correspondant au niveau des pleines mers de vive eau moyenne (coefficient 95),
- +6,80 m IGN69, correspondant au niveau extrême maximal de période de retour centennale.

Les épures de propagation de la houle sur les petits fonds à l'entrée de la baie de la Somme sont présentées sur les figures suivantes.

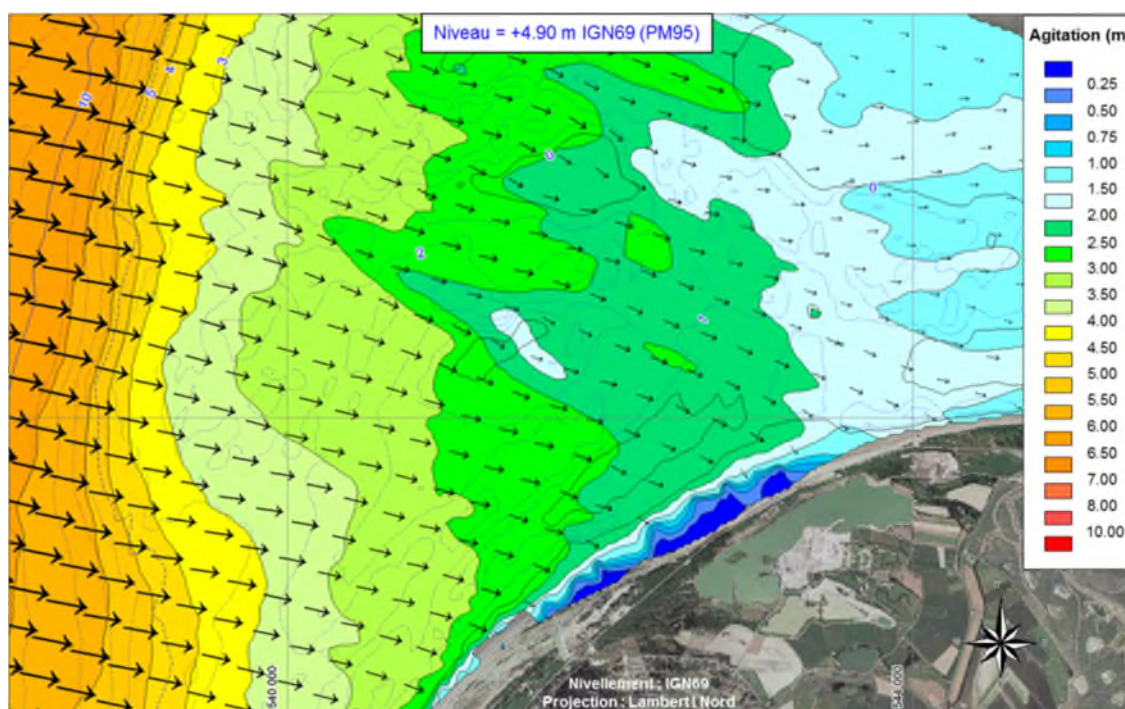


Figure 19. Epure de propagation de la houle centennale - Niveau PMVE

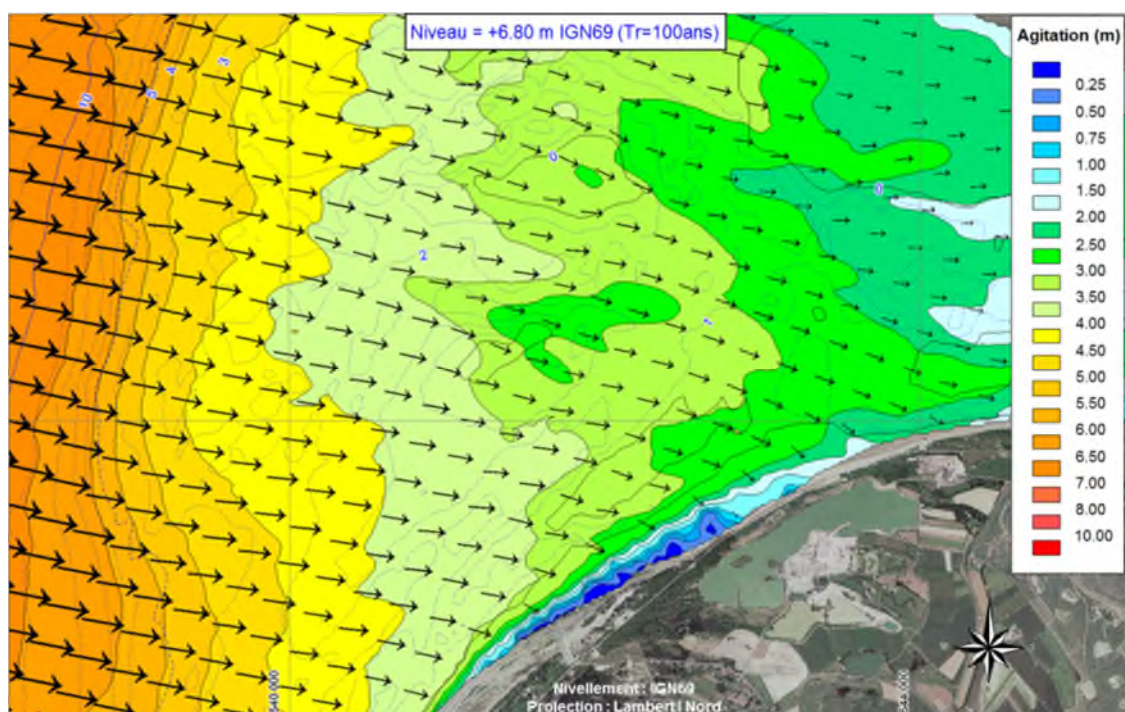


Figure 20. Epure de propagation de la houle centennale - Niveau extrême 100 ans

On peut observer la forte atténuation de la hauteur de houle dans sa traversée de l'estran sableux jusqu'au littoral du Hourdel. Les caractéristiques de la houle calculées au droit de la carrière à 500m du littoral par des fonds de l'ordre de -1 m IGN69 (au large du cordon de galets) sont les suivantes :

Tableau 11 – Caractéristiques de houle à 500 m au large du littoral du Hourdel (par -1 m IGN69)

HOULE AU LARGE DE PERIODE DE RETOUR CENTENNALE : $H_m0= 8,4$ m $T_p= 10$ s $Dir.=N280^\circ$		
Niveau marin au large (m IGN69)	Hs (m)	Direction (°N)
+4,90	2,10	302°N (~ONO – NO)
+6,80	2,85	295°N (~NO)

Le déferlement sur les petits fonds conduit à réduire fortement la hauteur de la houle (de l'ordre de 66 à 75%). La hauteur significative de houle à -1 mIGN69 est égale à respectivement 25% et 33% de la hauteur significative de houle au large, en fonction du niveau marin considéré.

A noter : nous précisons que la bathymétrie utilisée pour ces calculs est celle de 2004 et ne considère donc pas le rehaussement des fonds observé depuis 2007 au large de la carrière et des crochons. L'actualisation des fonds marins montrerait davantage de réfraction de la houle sur les fonds et donc donnerait des caractéristiques de houle plus faible (hauteur de houle Hs) pour les 2 calculs réalisés. Pour une configuration 2018, la valeur de hauteur de houle considérée à 500 m au large du littoral ($H_s=2,85$ m pour le niveau marin à +6,80 mIGN69) est donc probablement maximisée.

La propagation de la houle dans sa partie terminale sur les 500 derniers mètres entre l'estran sableux au large du cordon de galets et le haut de plage a été modélisée le long de deux profils représentatifs du littoral au droit de la carrière (voir Figure 21). Ces deux profils ont été schématisés à partir des éléments topographiques et bathymétriques passés et actualisés :

- Une première configuration avec le levé topographique du littoral de 2007 et bathymétrie au large de 2004 estimée à partir de la bathymétrie de 2004;
- Une seconde configuration avec le levé topographique du littoral de 2018 et bathymétrie au large estimée à partir de la bathymétrie de 2004.

Ces quatre calculs ont été réalisés pour la condition précédente la plus défavorable, soit dans le cas du niveau marin de +6,80 m IGN69 (hauteur de houle de $H_s=2,85$ m en début de profil).



Figure 21. Profil de propagation des houles au littoral

a) Evolution de la hauteur de houle le long des profils

Les figures suivantes présentent l'évolution des profils et la variation de la hauteur de houle le long des deux profils modélisés.

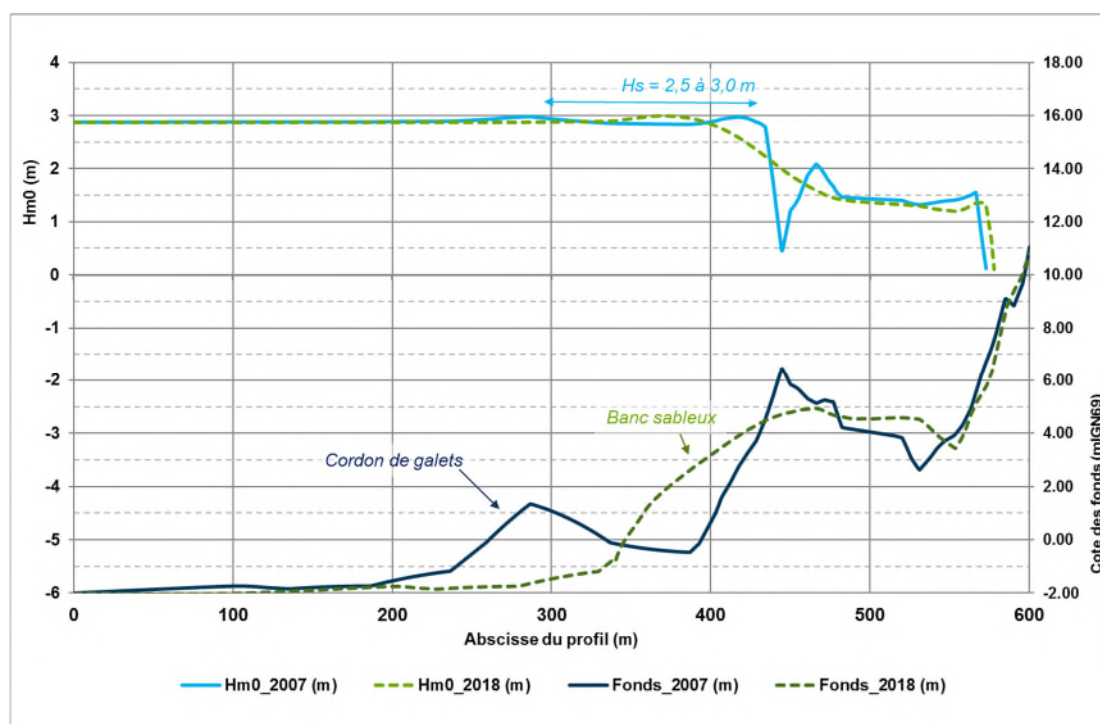


Figure 22. Propagation de la houle sur le profil 1

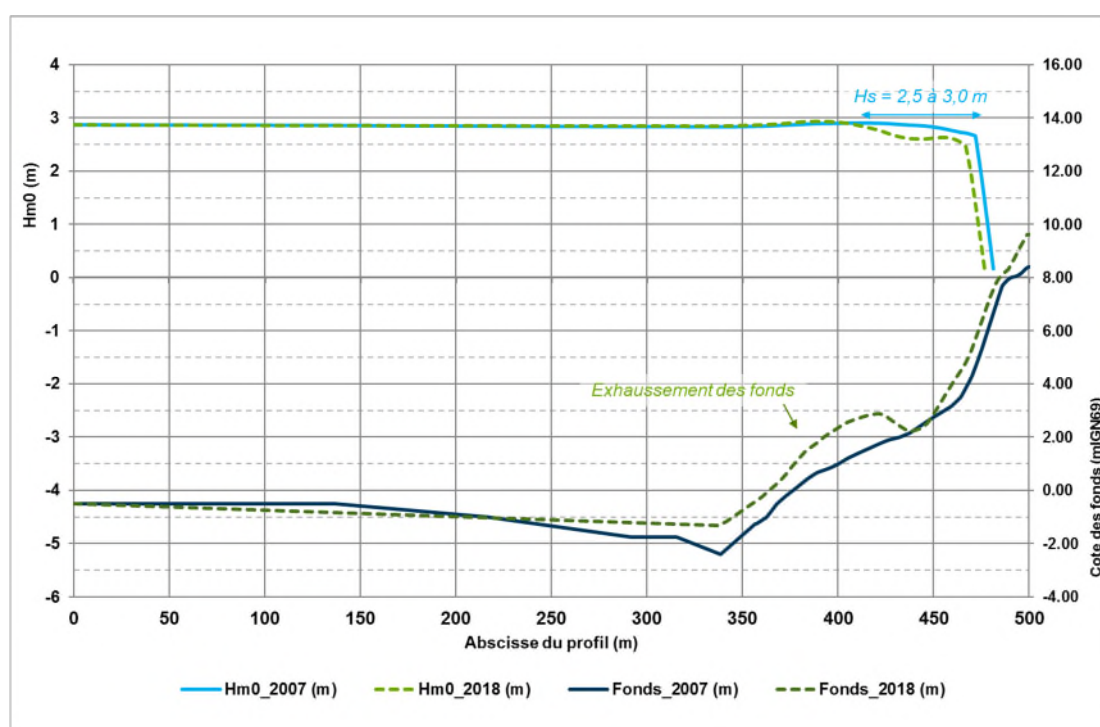


Figure 23. Propagation de la houle sur le profil 2

Les calculs ont permis de mettre en évidence l'atténuation significative de la houle à l'approche du littoral. En 2007, au droit du profil 1, la dissipation d'énergie de la houle sur le cordon de galet est bien visible (hauteur de houle passant de 3 m à 0.5 m avant et après le crochon). En 2018, la situation est relativement proche de celle de 2007, l'atténuation de la houle apportée en 2007 par le crochon de galet est proche de celle apportée en 2018 par la présence du banc sableux. A l'approche du littoral, l'attaque de la houle est quasi-similaire à celle de la situation 2007 pour les 2 profils considérés.

b) Estimation de la surcote du niveau marin due au déferlement (set up)

Par ailleurs, cette modélisation a permis d'estimer la valeur de la surcote du niveau marin (set up) due au déferlement des vagues sur le littoral pour ces conditions extrêmes à 0,6 à 0,7 m (composée d'une surcote d'environ 0,3 m du large à l'approche du littoral (de -15 m IGN69 à -1 m IGN69) et d'une surcote de 0,4 m à l'approche de la cote (de -1 m IGN69 au cordon dunaire).

En prenant un niveau statique (sans effet de set up) correspondant au niveau centennal de +6,8 m IGN69, le déferlement des vagues le long de la zone côtière entraînerait donc une élévation dynamique de ce niveau qui atteindrait +7,5 m IGN69. Ce niveau qui intègre les effets dynamiques de la houle centennale, peut effectivement être considéré comme la condition de niveau de mer aux abords du littoral la plus critique.

Ces niveaux de mer de +6,8 m IGN69 (niveau statique centennal) et de +7,5 m IGN69 (niveau statique centennal intégrant une élévation du niveau dynamique due à des fortes vagues) seront considérés comme valeurs de référence pour l'examen du risque de submersion traité dans le chapitre 4.

2.3.4.6. Le jet de rive des vagues

Très localement, le long de la frange côtière, le jet de rive des vagues et les paquets de mer peuvent franchir le haut de plage. Sur la base du niveau statique centennal de +6,8 m IGN69, la cote maximale atteinte par ce jet de rive peut être estimée à partir des formulations théoriques disponibles, sur la base des paramètres suivants:

- la configuration du profil de plage,
- la condition de houle de période de retour centennale calculée précédemment.

Le jet de rive (ou swash) correspond aux fluctuations verticales temporelles du niveau d'eau dues à la montée des eaux sur l'estran. Les deux processus dynamiques, que sont le set-up (η) et le swash (S), se conjuguent pour donner le run-up (R), lequel est défini comme l'élévation maximale du niveau d'eau sur la plage par rapport au niveau d'eau statique (SWL) dans le graphe ci-dessous).

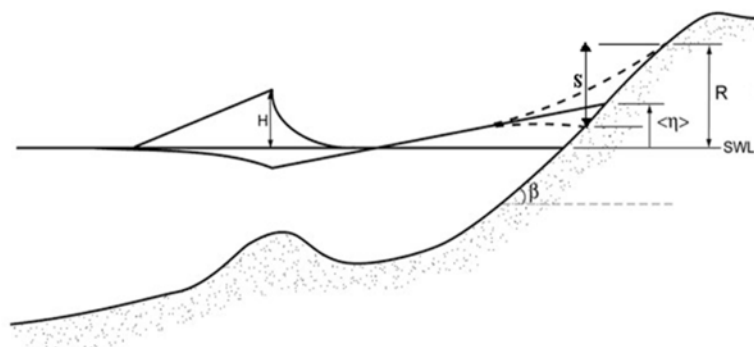


Figure 24. Définition du set-up, swash et run-up

La formulation de calcul du jet de rive est sensible à la pente du profil de plage. En considérant une pente entre 15 et 20% (configuration 2007), le jet de rive peut atteindre de l'ordre de 3,5 à 4 m. En

configuration 2018, le jet de rives peut atteindre de l'ordre de 2,0 m à 3,5 m en considérant une pente entre 10 et 15%.

Ainsi, en configuration 2018, la cote maximale atteinte par le jet de rive est de l'ordre de **+9.5 à +11,0 m NGN**.

2.4. LE REGIME SEDIMENTOLOGIQUE DU LITTORAL

2.4.1. Origine et nature des matériaux

Le littoral au droit de la carrière du Hourdel est constitué de deux types de sédiments : les galets du cordon et les sables de l'estran (Figure 25).

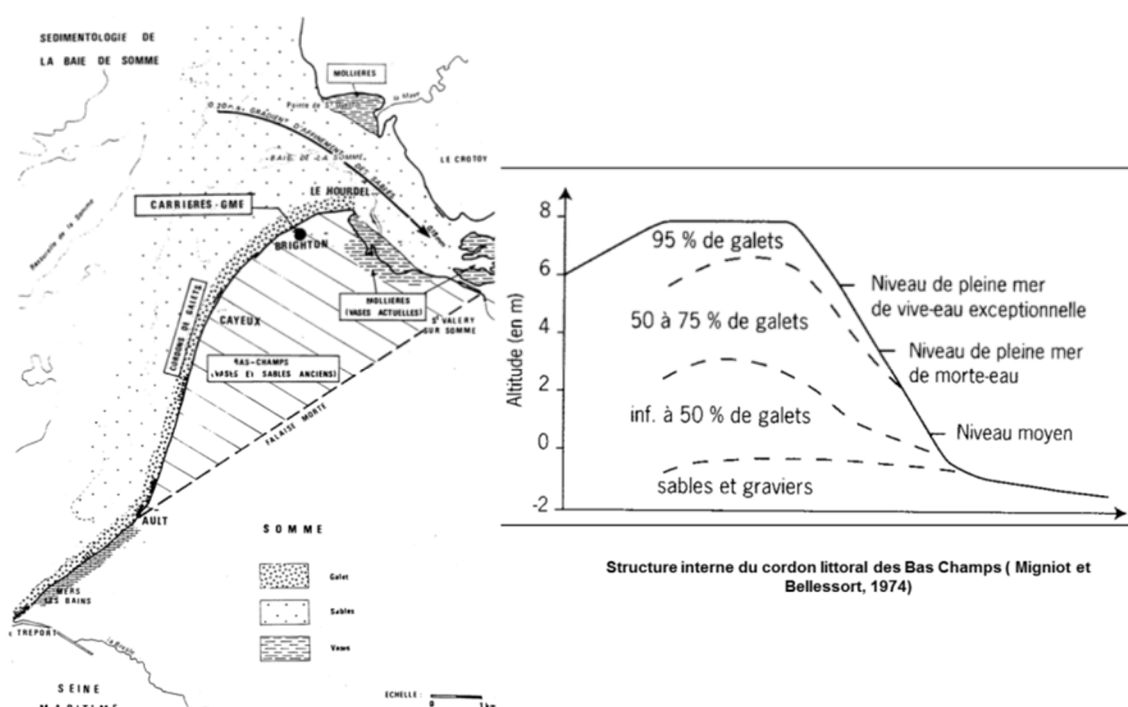


Figure 25. Nature des sédiments

Les galets qui constituent le haut estran des plages proviennent, pour la plus grande part de l'érosion actuelle des falaises et, de façon secondaire, de l'érosion du platier qui accompagne le recul de la falaise. Le volume de galets produit annuellement par l'érosion des falaises a été estimé à 500 à 1 000 m³/an environ entre le Tréport et Ault (CPIBP, 2001) correspondant à un recul des falaises de 8,15 m entre 1966 et 1995.

Du fait de la présence d'ouvrages importants (digue du Tréport, épi Majeur de Mers-les-Bains), en amont du littoral d'Ault par rapport au transit littoral résultant, l'alimentation naturelle de la plage de galets du Vimeu est faible : de l'ordre de 2 000 à 3 000 m³/an (dont les 500 à 1 000 m³/an correspondant à la production des falaises). Cette alimentation provient du stock sédimentaire de galets situés en divers endroits en amont-transit, accumulé au fil des années passées et qui se vident progressivement au gré des conditions climatiques (par exemple : plages de Mers, Ault...).

Les sables du platier rocheux qui constitue l'estran et les petits fonds marins ont, quant à eux, une origine marine géologique (pas d'apports significatifs provenant des fleuves et des rivières).

Le cordon littoral des Bas-Champs repose sur l'estran sableux, la cote des fonds en pied du cordon est proche du 0 IGN. La teneur en galets va en croissant du pied de cordon à sa crête :

- de l'ordre de 50 % entre 0 et +2 m IGN69,
- de 50 à 75 % entre +2 et +6 m IGN69,
- de 90 % et plus au-dessus de +6 m IGN69 et sur la face côté mer.

Dans la zone de Brighton à la Mollière (jusqu'au droit de la carrière GSM), la répartition granulométrique moyenne des matériaux du cordon de galets serait la suivante d'après la campagne de sondages réalisée par ATM-3D en 2004 :

- sables et graviers (0-20 mm) : 41%,
- petits galets (20-50mm) : 55%,
- galets moyen à gros (50-200 mm) : 4%.

D'après l'ensemble des prélèvements réalisés sur la période 2003-2006, la fraction des galets de diamètre > 20 mm sur le site de la Mollière, donc au Sud-Ouest immédiat de la carrière (amont transit), serait comprise entre 36 et 59 %, la valeur moyenne se situant à 48 %.

Il est légitime de penser que cette répartition a peu évolué depuis les campagnes précédentes ; nous la considérons comme représentative du site.

Au Nord-Est de la zone protégée par le cordon entre la Mollière et le Hourdel, le littoral est constitué d'un estran sableux et les galets apparaissent en quantité beaucoup plus faible. Deux échantillons sableux ont été prélevés en milieu de plage, au droit de la carrière lors de la mission de reconnaissance réalisée les 5 et 6 Février 2007. L'analyse granulométrique de ces échantillons a donné les résultats suivants.

Tableau 12 – Caractéristiques granulométriques du sable du littoral au droit de la carrière

	N° Echantillon	
	n°1	n°2
Localisation du point de prélèvement (Lambert II Carto)	x= 543 685 y= 2 580 205	x= 543 845 y= 2 580 250
Diamètre caractéristique D16	0,20 mm	0,20 mm
Diamètre caractéristique D50	0,25 mm	0,24 mm
Diamètre caractéristique D84	0,32 mm	0,31 mm

Les sables de la plage au droit de la carrière sont donc des sables fins à moyens. On notera également l'absence d'une fraction de fines ($D < 0,063$ mm) dans les échantillons prélevés. Nous considérons ces caractéristiques granulométriques comme représentatives des sables en place actuellement.

2.4.2. Les mouvements des sédiments

L'agitation due à la houle est la principale cause des mouvements de sédiments le long du littoral. Toutefois, les courants conjugués à l'action des houles sont susceptibles d'accroître la capacité de transport de ces dernières. Par ailleurs, le rôle des courants est plus important sur l'estran sableux à l'entrée de la Baie de Somme (comme observé au large de la zone d'étude) car ils provoquent des remaniements permanents des chenaux et des bancs ayant une influence sur l'évolution du littoral (période d'engraissement ou d'érosion du littoral en fonction du développement ou de la disparition des bancs sableux de l'estran, comme cela peut également être observé devant les autres baies du

littoral de la côte d'Opale). Enfin dans les chenaux, les fortes vitesses des courants peuvent être en mesure de déstabiliser les berges et de mobiliser les matériaux.

2.4.2.1. Mouvements dans le profil (perpendiculaire à la côte)

De façon générale, les agitations qui parviennent frontalement à la côte ou avec une très faible obliquité génèrent des mouvements dans le profil de plage (perpendiculairement à la côte). Ainsi en période de tempête, on peut assister à l'érosion du haut de plage au profit de l'engraissement des petits fonds marins. Ces mouvements sédimentaires façonnent le profil de plage et sont accompagnées d'un triage granulométrique. Il en résulte classiquement un profil en deux parties, comme ce qui est observé sur le littoral d'étude :

- le cordon de galets au-dessus de l'isobathe 0 IGN69 avec une pente de 10 à 15 %,
- l'estran sableux sous l'isobathe 0 avec une pente de l'ordre de 1 à 2 %.

Les mouvements dans le profil permettent toutefois les échanges de la fraction sableuse entre l'estran et le cordon de galets.

2.4.2.2. Transit littoral (parallèle à la côte)

Lorsque la houle parvient obliquement au littoral, le déferlement des vagues provoque un courant littoral qui transporte les sédiments parallèlement à la côte (transit littoral). Du fait de la prédominance des vents et de la houle du secteur Sud-Ouest, le transit littoral dans la zone d'étude est orienté du Sud-Ouest vers le Nord-Est². Le transit de galets a été estimé à 70 000 à 80 000 m³/an au niveau de Cayeux-sur-Mer et entre 2 500 et 3 500 m³/an au niveau du Hourdel. Le changement d'orientation du littoral et la dissipation de l'énergie des vagues sur les zones de faible fonds à l'entrée de la baie de Somme conduisent en effet à réduire la capacité de transport au droit du littoral du Hourdel. La vitesse de déplacement des galets serait de l'ordre de 1 km/an d'après des mesures expérimentales réalisées sur le cordon des Bas-Champs (SOGREAH, 1992).

Peu de données sont disponibles sur l'intensité du transport de sables dans le transit littoral. L'ordre de grandeur de 100 000 à 200 000 m³/an est avancé dans SOGREAH, (1992).

2.4.2.3. Transport éolien

Enfin, le développement du large estran sableux à l'entrée de la baie de Somme permet au vent de générer d'importantes actions éoliennes qui se traduisent par le développement des dunes dans la zone Brighton-Le Hourdel. La quantification du transport éolien reste approximative. Sur la base d'un transport de l'ordre de 20 m³/m/an (valeur admise sur le littoral landais), le transport éolien entre Cayeux et le Hourdel serait de l'ordre de 50 000 à 100 000 m³/an.

2.4.3. Les interventions réalisées sur le littoral

Il a été évoqué au 1^{er} chapitre les différentes interventions et travaux réalisés sur le cordon de galets dans le secteur situé au Sud du littoral du Hourdel. Concernant la zone d'étude et ses abords immédiats, les points suivants peuvent être précisés.

2.4.3.1. Les extractions des Industriels du Galet

Des extractions (de l'ordre de 20 à 30 000 m³/an) sont réalisées au Nord immédiat de Cayeux par des industriels du galet et sont restituées sur le cordon entre Ault-Onival et Cayeux (au niveau de

² Compte tenu du rôle important du transit littoral et de son orientation sur la dynamique hydrosédimentaire, les différents secteurs du littoral sont souvent localisés les uns par rapport aux autres en fonction de leur position « amont transit » ou « aval transit » par rapport au sens du trajet des galets, par analogie avec les cours d'eau.

Ault-Onival le plus souvent), d'un même volume de galets d'une granulométrie plus grossière (>40 mm) issus des carrières terrestres. Cette action permet l'entretien de la digue des Bas-Champs.

2.4.3.2. Le recyclage des galets de la Mollière

Comme mentionné au chapitre 1, des galets sont prélevés sur le cordon littoral au lieu-dit « La Mollière », au Sud-Ouest de la carrière, par le Syndicat Mixte Baie de Somme-Grand littoral Picard, à l'occasion de travaux d'entretien du cordon littoral. Les matériaux prélevés sont généralement redéposés sur le cordon plus au Sud (amont transit) pour lutter contre l'érosion du cordon qui se produit au Sud de Cayeux-sur-Mer (on parle alors de recyclage). Sous l'effet du transit, les galets cheminent ensuite vers le Nord pour revenir dans la zone de dépôts naturels. Les opérations de recyclage conduisent à une réduction des apports vers l'aval transit. De ce fait, elles limitent donc la progression du cordon vers le Nord-Est, notamment au droit de la carrière.

Sur la période 2001-2004, ces rechargements étaient de l'ordre de 40 000 m³/an ; en 2013-2015, dans le cadre des travaux des épis de Cayeux ces rechargements étaient de l'ordre de 30 000 m³/an.

2.4.3.3. Apports de matériaux

Aucun rechargement n'a eu lieu sur le littoral au droit de la carrière du Hourdel depuis Avril 2007 à notre connaissance.

2.4.4. Comparaison avec le littoral au Sud de Cayeux-sur-Mer

Nous rappelons que par rapport au littoral des Bas-Champs au Sud de Cayeux-sur-Mer, il doit être mentionné que les risques d'érosion ne sont pas du même ordre. En effet :

- si des phénomènes d'érosions localisées peuvent ponctuellement se produire, le secteur du littoral au niveau de la Mollière/Le Hourdel est globalement un secteur en accumulation, alors que le secteur entre Onival et Cayeux-sur-Mer est un secteur qui souffre du déficit d'apports naturels,
- de plus, la configuration du terrain en arrière du littoral n'est pas la même :
 - au Sud de Cayeux-sur-Mer : terrain immédiatement en retrait, plus bas que le niveau du cordon,
 - au droit de la carrière : terrain en retrait du littoral supérieur à +8 m IGN69,
- par ailleurs, du fait de la présence du large estran sableux à l'entrée de la Baie de Somme, la propagation de la houle est fortement influencée par les petits fonds et les faibles hauteurs d'eau pendant une large partie de la marée. Ceci conduit à une forte dissipation de l'énergie de la houle quand elle parvient jusqu'au littoral,
- du fait de l'orientation du littoral de la Mollière/Le Hourdel, les houles fortes de Sud-Ouest à Ouest parviennent jusqu'au littoral avec une forte obliquité. Dans ces conditions, le phénomène de réfraction conduit à une perte d'énergie significative de la houle ce qui réduit d'autant son potentiel érosif dans le secteur Nord du littoral du Vimeu dans lequel est située la carrière.

oOo

3. EFFET DU PROJET SUR LA FAÇADE LITTORALE

3.1. ASPECTS HYDROGEOLOGIQUES

3.1.1. Méthodologie

Les scénarios hydrogéologiques définis avec GSM ont été réalisés à partir du modèle hydrogéologique créé lors de l'étude de dépollution de la Ferme Caroline en 2014.

Le logiciel Visual-Modflow, standard international dans la modélisation hydrogéologique, a été exploité pour reproduire les écoulements souterrains. Ce choix a été motivé par plusieurs raisons :

- Possibilité de modéliser les écoulements en 3 dimensions,
- Représentation d'un aquifère multicouche,
- Simulation des écoulements en régimes permanent et transitoire.

3.1.2. Hydrogéologie locale

La zone d'étude se situe au sein de la plaine maritime picarde remblayée de dépôts marins en bordure du plateau crayeux turo-sénonien (Figure 27.).

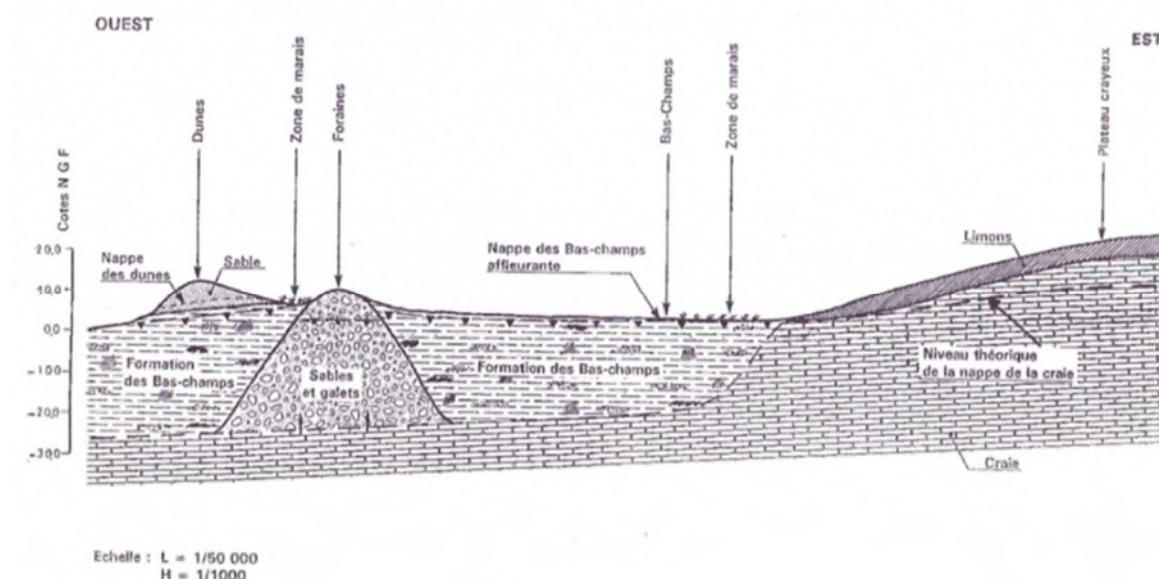


Figure 26. Coupe géologique au droit des Bas-Champs (extrait BRGM 93NPC91)

Cette couverture quaternaire, composée de sédiments sableux plus ou moins fins avec localement la présence de cordons de galets, est le siège d'écoulements souterrains où les suivis piézométriques montrent que la nappe se situe à faibles profondeurs entre 0.3 et 4.2 m par rapport au sol.

3.1.3. Modèle conceptuel

D'après les données disponibles, un modèle conceptuel du fonctionnement de la nappe superficielle a été établi avec les conditions hydrauliques aux limites suivantes :

- La recharge par les précipitations efficaces, prises en compte sous la forme d'un débit surfacique imposé sur la couche supérieure. Dans le modèle, les pluies efficaces ont été intégrées à l'échelle hebdomadaire.
- les cotes de la mer représentées par un potentiel imposé variable dans le temps et dans l'espace afin de prendre en compte le marnage en fonction des coefficients de marées.
- L'apport amont souterrain qui a été considéré comme faible d'après les informations piézométriques.
- Les canaux qui ont été représentés comme des conditions de rivière rechargeant ou drainant la nappe en fonction de la position relative du niveau d'eau dans la rivière et de la nappe. Les profils en long des canaux ont été déduits du LIDAR 2011. En l'absence de données, les hauteurs d'eau dans les canaux ont été considérées comme constantes et un colmatage a été pris en compte.

Ces conditions aux limites sont illustrées par la **Figure 27**.

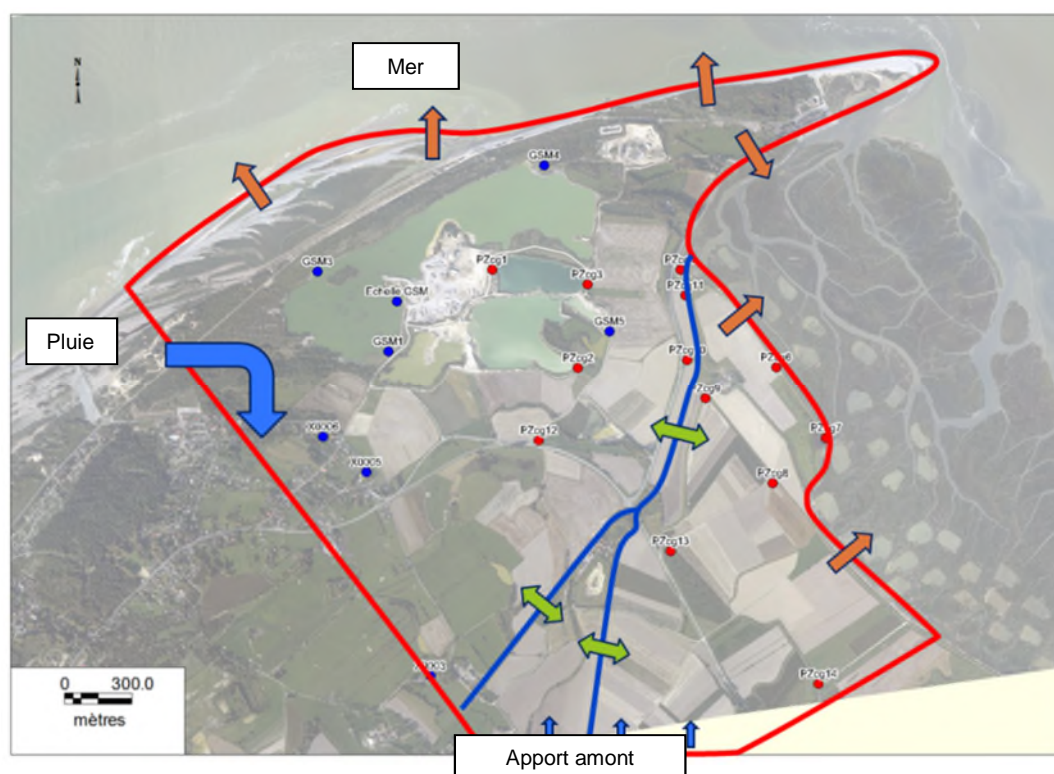


Figure 27. Modèle conceptuel hydrogéologique proposé

3.1.4. Construction du modèle

3.1.4.1. Maillage

La méthode de résolution numérique des équations d'hydraulique souterraine, par différences finies, impose de discrétiser la zone d'étude avec un maillage. Cette discrétisation de l'espace définit la maille élémentaire où tous les paramètres hydrauliques sont homogènes. Le modèle a été discrétisé

en maille élémentaire carrée de 10 m de côté. Ce maillage fin permet de représenter correctement le contour des différents plans d'eau.

3.1.4.2. Conditions de potentiel imposé

Compte tenu de la distance importante entre le projet et la condition limite à l'Est, un niveau imposé a été figuré pour représenter le niveau de déversement de la nappe de la craie vers l'aquifère quaternaire.

La Manche et la Somme ont été représentées comme des conditions de potentiel imposé à distance variable. En effet, il faut prendre en considération le marnage de la mer en fonction des coefficients de marées (cf. schéma ci-dessous).

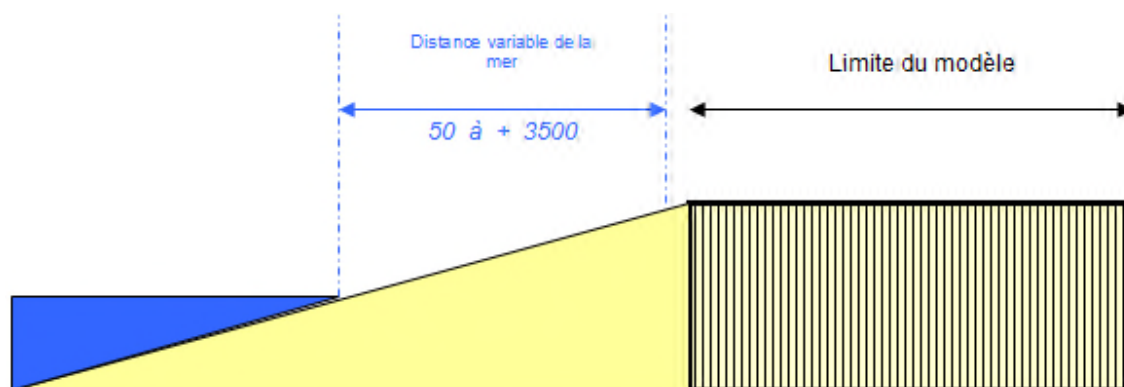


Figure 28. Condition de potentiel imposé

3.1.4.3. Condition de flux

Deux zones d'infiltration des pluies ont été distinguées :

- au-dessus des cordons de galets comme zone préférentielle d'infiltration,
- les formations sableuses qui limitent la percolation des pluies.

La recharge nette des pluies prend en considération l'influence des canaux qui drainent une fraction importante des précipitations vers la mer.

3.1.4.4. Représentation des plans d'eau de la carrière

La bathymétrie précise des plans d'eau a été intégrée lors de la construction du modèle. Le LIDAR de 2011 a été exploité.

Pour l'ensemble des plans d'eau, la perméabilité a été fixée à 10 m/s (secteur à écoulement libre).

3.1.5. Calibration du modèle numérique

Afin de pouvoir exploiter le modèle pour la simulation de scénarios prévisionnels, une calibration du modèle a été réalisée par comparaison avec les observations de terrain. A partir des mesures acquises entre septembre 2012 et septembre 2013 dans le cadre de l'étude de faisabilité de la dépoldérisation de la Ferme Caroline (CG Somme, 2014), le calage a consisté à reproduire les directions et les gradients d'écoulement au sein de l'aquifère superficiel en régime transitoire. Il a été effectué en deux temps :

- sur une période de 365 jours afin de reproduire la réactivité de la nappe en fonction des événements pluvieux.

- sur une période de 1 mois, pour reproduire la réactivité de la nappe face à la marée.

3.1.6. Exploitation du modèle : intégration des variations altimétriques des berges du plan d'eau

Suite à la demande de GSM, du fait de l'interprétation de la précédente étude par la DREAL, un scénario intégrant les variations spatiales de l'altimétrie des berges du grand plan d'eau de la carrière GSM a été réalisé. Sachant qu'en 2007 une altimétrie simplifiée des berges avait été intégrée (+4 m IGN69) ; **l'objectif de ce scénario est d'évaluer si les variations spatiales de la topographie des berges modifient l'incidence du projet sur la nappe superficielle.**

Les points de mesures altimétriques permettant la représentation des berges sont figurés ci-dessous.

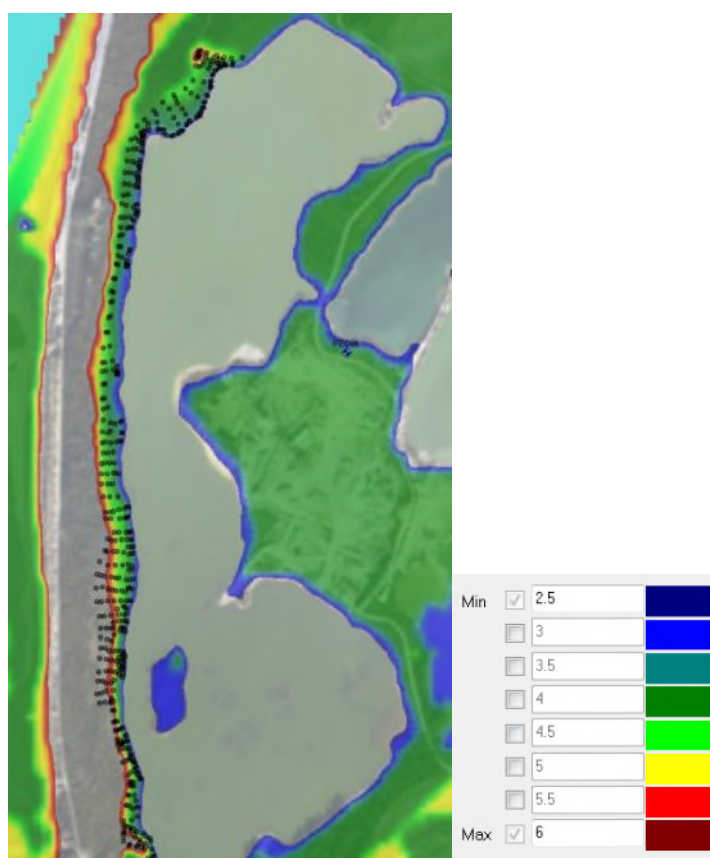


Figure 29. Mesures altimétriques de la berge du plan d'eau

Les bathymétries actuelle des plans d'eau et celle projetée sont présentées sur la **Figure 30**.

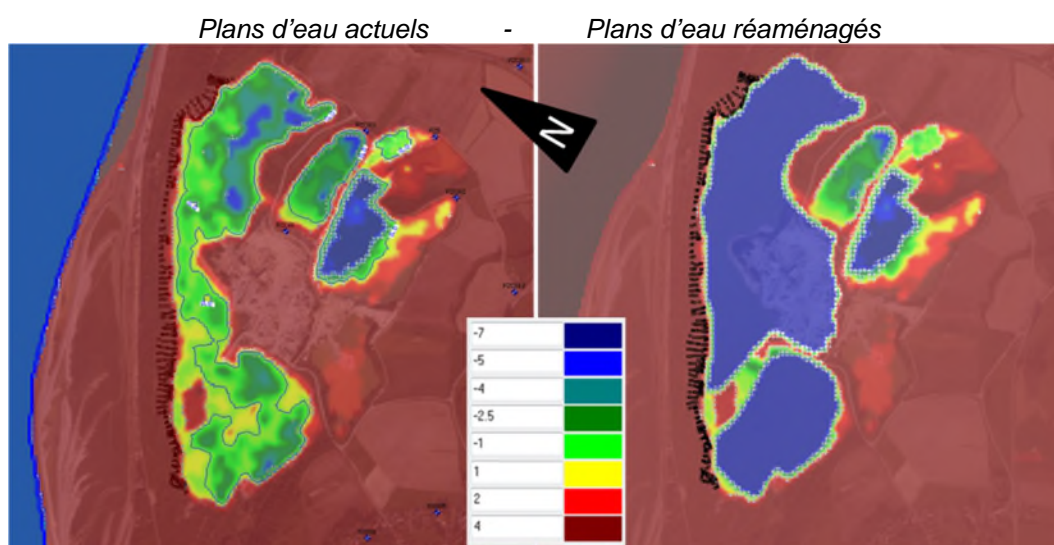


Figure 30. Bathymétries des plans d'eau

Afin de pouvoir aisément comparer les résultats de ce scénario avec ceux présentés dans le dossier déposé en 2007, le plan de réaménagement prévu dans l'étude de 2007 a été repris pour évaluer l'incidence du projet. Ainsi le projet d'extension de l'exploitation des granulats sur le site de la Barge n'a pas été pris en considération dans ce scénario.

L'incidence du projet a été évaluée par rapport à la situation actuelle en considérant les variations spatiales de l'altimétrie de la berge Nord du grand plan d'eau de la carrière GSM. La figure ci-après présente les écarts piézométriques du projet d'exploitation de la carrière par rapport à la situation actuelle. **On retiendra que ces écarts piézométriques sont faibles, de l'ordre de 0,2 m sur l'ensemble de la zone.**

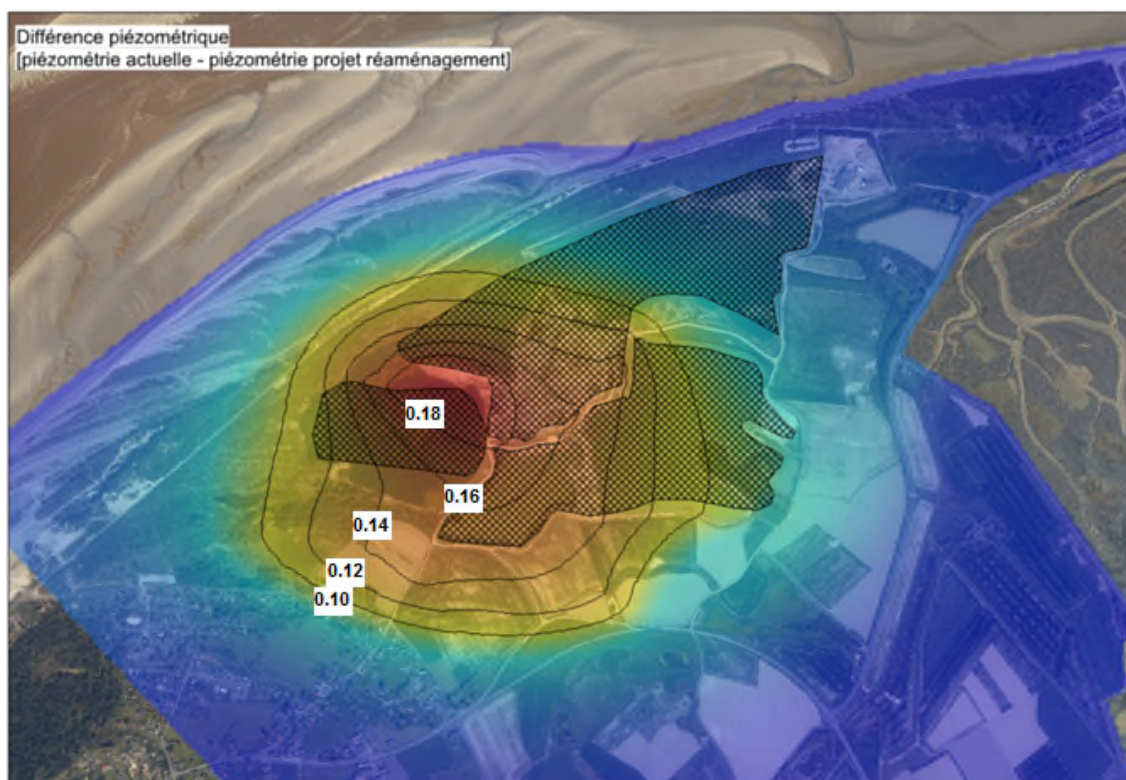


Figure 31. Incidence du projet de réaménagement sur les cotes piézométriques de la carrière par rapport à la situation actuelle

L'incidence du projet est du même ordre de grandeur que celle présentée dans le rapport de 2007 en considérant une altimétrie simplifiée des berges. Le décalage obtenu par rapport à l'étude de 2007 n'est pas dû à l'intégration fine des berges mais à l'actualisation des paramètres hydrodynamiques du modèle hydrogéologique effectuée en 2014.

On peut en conclure que les extensions et l'approfondissement de l'extraction avec l'altimétrie des berges actuelles n'ont pas d'incidence significative sur les niveaux de la nappe et sur l'écoulement et donc n'entraîneraient pas de perturbation significative de la piézométrie en raison du faible gradient piézométrique et de la présence du niveau imposé de la Manche. **L'altimétrie variable actuelle de la berge Nord ne remet donc pas en cause la faible incidence du projet sur les niveaux de la nappe.**

3.1.7. Incidence de la carrière sur la salinité des eaux souterraines

Sur le secteur du Hourdel, des mesures de la salinité des eaux souterraines ont été effectuées dans le cadre de l'étude de dépollérisation de la Ferme de la Caroline (CG Somme 2014).

Les profils de salinité de l'aquifère superficiel montrent que sur toute son épaisseur, la salinité est homogène avec une valeur de 11,4 g/l à partir de 6 m de profondeur (Figure 32). Etant donnée l'absence de stratification de l'aquifère, l'approfondissement du plan d'eau aura une incidence mineure sur le profil de salinité au sein de l'aquifère.

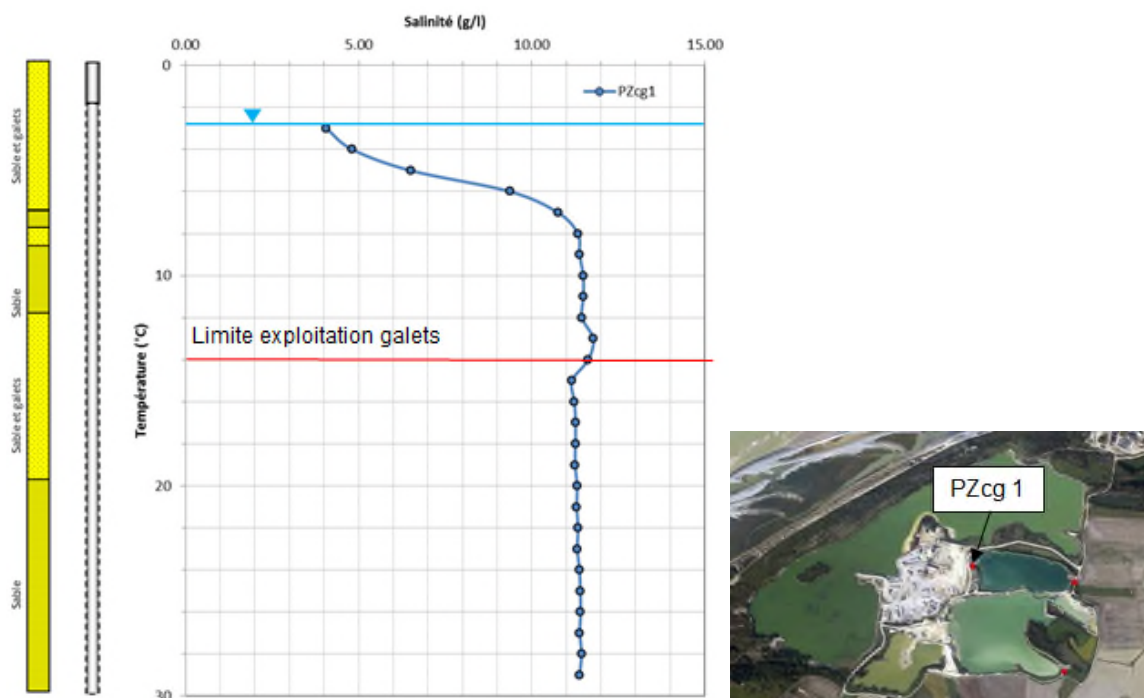


Figure 32. Profil de salinité (g/l) au sein de l'aquifère superficiel à proximité des plans d'eau de la carrière (CG Somme, 2014)

3.1.8. Incidence de la surélévation du niveau marin (prise en compte du réchauffement climatique)

Dans le cadre de la présente étude, un scénario supplémentaire a été réalisé pour évaluer l'incidence de l'élévation du niveau marin sur la nappe phréatique en considérant une élévation de 1 m du niveau marin en accord avec GSM (surélévation de 1m des cycles de marée considérés initialement). Cette surélévation a été appliquée sur toutes les conditions aux limites du modèle hydrogéologique représentant la mer. Les cotes surélevées du niveau marin ont été intégrées sur une période simulée de 1 mois permettant ainsi de représenter l'incidence du réchauffement climatique sur plusieurs cycles de marée.

Ce scénario fait suite à une première prestation effectuée en 2011 suite aux remarques et questions soulevées par les services de l'Etat (DDTM) sur ce même sujet. A l'époque, une surélévation du niveau marin de 0,5 m avait été simulée pour évaluer son incidence sur le comportement de la nappe superficielle.

3.1.8.1. Incidence d'une surélévation du niveau marin de 1m sur la piézométrie

Le modèle hydrogéologique actualisé en 2014 a été exploité pour évaluer l'incidence de l'élévation de 1 m du niveau marin sur la piézométrie.

La simulation a été réalisée en régime transitoire pour intégrer le marnage en fonction du coefficient de marée (période de 30 jours).

Les conditions aux limites de la Manche et de la baie de Somme ont été élevées de 1 mètre sur toute la période simulée. Tous les autres paramètres du modèle sont identiques aux scénarios antérieurs. La figure suivante compare les deux situations (Figure 33).

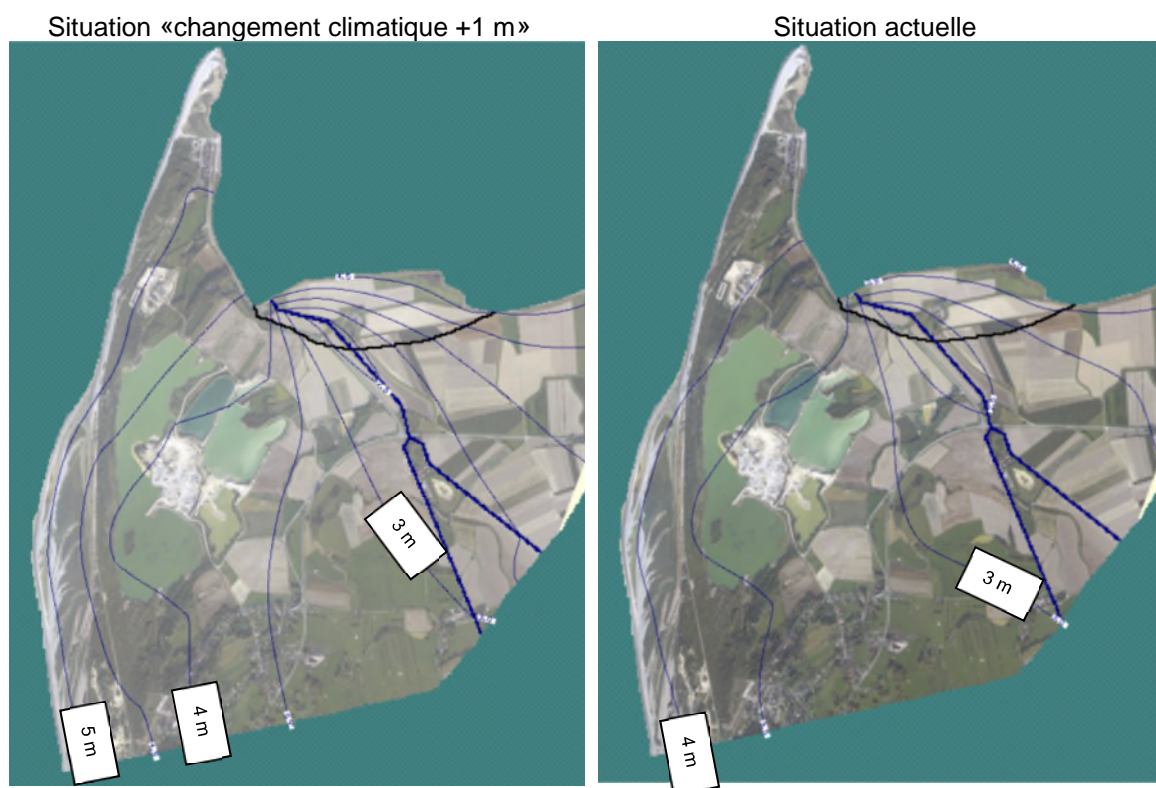


Figure 33 : comparaison de la piézométrie simulée à marée haute avec l'intégration du changement climatique

Au droit de la carrière, les directions d'écoulement souterrain ne sont pas modifiées par l'élévation du niveau marin. La piézométrie est ainsi remontée de 0,5 à 1 m. Les canaux, présents en amont de la carrière, permettent de tamponner l'effet de l'élévation du niveau marin sur la piézométrie à l'intérieur des terres.

La carte suivante (Figure 34) figure la différence altimétrique entre le terrain naturel et la piézométrie simulée à marée haute. Quelques secteurs sont alors concernés par une piézométrie supérieure au terrain. En fonction de la nature plus ou moins argileuse du sol, ce phénomène de remontée de la nappe pourra être contenu et le risque d'affleurement de la nappe limité.

La remontée piézométrique mise en évidence dans cette simulation est exclusivement induite par l'élévation du niveau marin. En effet, d'un point de vue hydrodynamique, la création des plans d'eau au droit de la carrière amortit sur leur pourtour l'incidence de l'élévation du niveau marin.

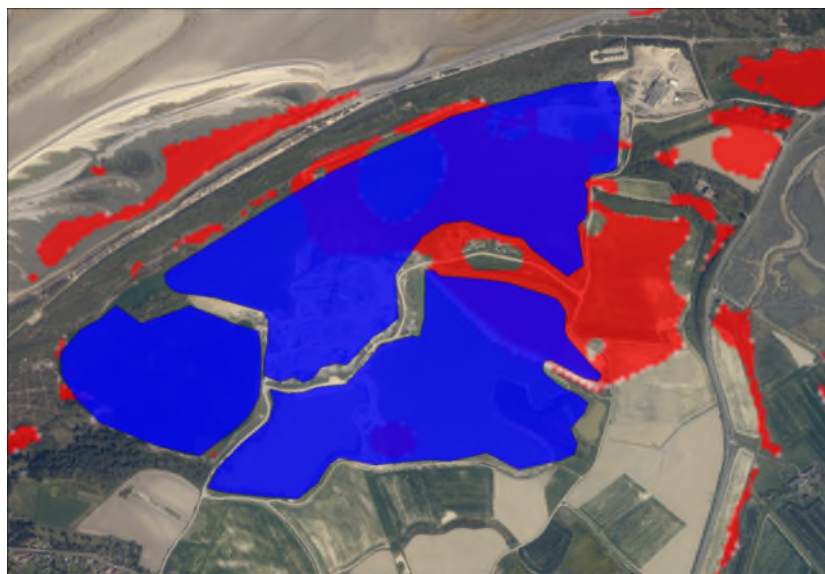


Figure 34. Zone théorique d'une remontée piézométrique supérieure à la topographie autour de la carrière à marée haute (zones en rouge) pour une surélévation du niveau marin de 1 m

3.1.8.2. Conclusion

Cette étude d'impact hydrogéologique a permis d'aboutir à la conclusion que la surélévation du niveau marin entraîne principalement une hausse du niveau piézométrique (de plus en plus importante vers l'aval) et une baisse du gradient hydraulique de la nappe, avec les hypothèses considérées.

En considérant une surélévation du niveau marin de 1,0 m, les directions d'écoulement souterrain au droit de la carrière ne sont pas modifiées et la piézométrie à l'intérieur des terres est remontée de 0,5 à 1 m par rapport à la situation hydrogéologique sans prise en compte de la surélévation du niveau marin.

D'autre part, l'incidence propre du projet d'extension et d'approfondissement de la gravière du Hourdel sur l'écoulement de la nappe superficielle reste la même que celle évaluée pour le niveau actuel de la mer (conformément aux résultats des simulations de 2011 réalisées avec la prise en compte de la surélévation du niveau marin de 0,5 m).

3.2. ASPECTS GEOTECHNIQUES

3.2.1. Préambule

L'objectif de cette section est d'évaluer la stabilité géotechnique au glissement du talus intérieur du cordon littoral séparant la « route blanche » de la carrière du Hourdel.

Les conditions géotechniques du sous-sol considérées dans la présente étude pour évaluer l'équilibre de la digue littorale sont les mêmes que lors de l'étude SOGREAH / ARTELIA de 2007 & 2011.

L'actualisation de l'évaluation de la stabilité géotechnique consiste à mettre à jour les profils étudiés en tenant compte de l'approfondissement des fonds au pied de la berge Nord du grand plan d'eau de la carrière GSM.

À titre de rappel, les conditions et la méthodologie sont les suivantes :

- Évaluation de la pente d'équilibre du talus de la façade littorale de la carrière dans la configuration actuelle,
- Modélisation numérique du talus de la carrière dans sa configuration actuelle d'équilibre au moyen d'un logiciel d'analyse de stabilité des ouvrages géotechniques tenant compte de la topographie mise à jour,
- Modélisation du talus dans sa configuration future approfondie et vérification de la stabilité de cette situation.

La stabilité du talus a été évaluée avec le logiciel TALREN v5. Ce code de calcul est un outil d'analyse de la stabilité des ouvrages géotechniques avec ou sans renforcement. Ainsi, il permet de vérifier la stabilité de talus naturels, remblais, barrages et digues avec prise en compte des différents types de renforcements éventuels (tirants précontraints, pieux, géotextiles, terre armée, etc.).

Les hypothèses de calcul sont les suivantes :

- Pente de talus de 16° retenue comme pente représentative de l'état actuel,
- Cotes de sommet de talus :
 - option n°1 : à +4,5 m IGN69,
 - option n°2 : à +3,2 m IGN69 ;

En 2007, la cote de sommet de talus considérée était à +4,0 m IGN69 (valeur moyenne). Nous avons cherché à reproduire ici (au regard des limitations de la modélisation et des simplifications imposées par le modèle) des cas de calculs correspondants à des altitudes extrêmes mesurées le long du talus jouxtant le plan d'eau. C'est ce qui a motivé le choix des valeurs de +3,2 et +4,5 m IGN69 pour les niveaux respectivement minimal et maximal du talus.

- Hauteurs d'eau :
 - les calculs ont été faits en considérant une hauteur d'eau à +2,6 m IGN69 de part et d'autre du talus (niveau d'eau le plus bas et donc le plus défavorable tel que relevé dans les chroniques piézométriques mensuelles disponibles depuis 2003),
 - mais aussi en considérant un talus saturé dans ses 2 configurations (crête à +4,5 et +3,2m IGN 69)

A noter qu'un cas extrême a également été réalisé pour un niveau d'eau côté carrière à -0,5 m IGN69 qui correspondrait à une vidange accidentelle de la carrière (brèche par exemple). Ce cas extrême est peu probable puisqu'il est peu réaliste qu'une telle brèche se produise sur le contour de la carrière. Les résultats de ces simulations sont présentés en Annexe à titre indicatif.

- Cote d'exploitation actuelle de la carrière à -0,5 m IGN69 le long de la berge de la carrière côté littoral,
- Cote d'exploitation après approfondissement de -6,5 m IGN69.
- Une charge de circulation « légère » de 10 kPa (valeur usuelle correspondant à une charge de véhicule lourd) est prise en compte en crête du talus.

L'étude croisée des cas listés précédemment constitue l'analyse de la stabilité géotechnique du talus et permet de constater l'influence du niveau d'eau dans l'évolution de la stabilité.

3.2.2. Résultats

Les sorties « TALREN » présentant graphiquement le résultat des calculs de stabilité 0 à 4 du talus sont données en annexe A.

Les figures indiquent le cercle de glissement le plus critique avec son centre et son facteur de sécurité correspondant (en rouge). Les valeurs grisées indiquent l'ensemble des centres de cercle de glissement calculés mais non critiques (cf. exemple donné par la figure ci-après).

L'angle de frottement caractéristique du sol en place a été estimé (par itérations successives) en considérant que le talus dans sa situation actuelle (cote moyenne à +4 m IGN69) est en équilibre (coefficient de sécurité de 1). **C'est ainsi que, compte tenu des hypothèses adoptées, l'angle de frottement représentatif du sol a été estimé à 17,5°.**

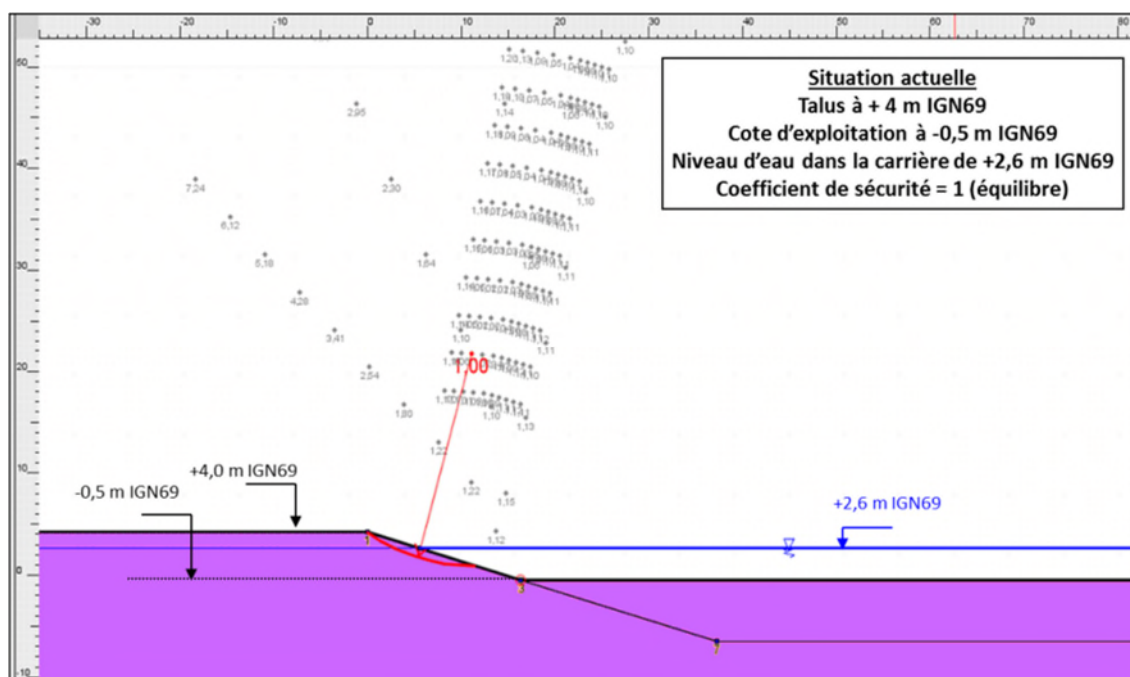


Figure 35. Stabilité géotechnique du talus de la carrière – Situation actuelle

Dans un second temps, des calculs de stabilité ont été réalisés pour différentes configurations. Ces calculs conduisent à des coefficients de sécurité variant entre 0,90 et 1,10, comme synthétisé dans le tableau ci-après.

Tableau 13 – Résultats des calculs de stabilité du talus

N° cas de calcul	Niveau d'eau côté mer (m IGN69)	Niveau d'eau côté carrière (m IGN69)	Cote d'exploitation (en m IGN69)	
			Cote d'exploitation à -0,5 m IGN 69	Cote d'exploitation à -6,5 m IGN 69
	OPTION 0 : Crête du talus à +4,0 m IGN69			
0	+2,6	+2,6	1,00	1,11
	OPTION 1 : Crête du talus à +3,2 m IGN69			
1	+2,6	+2,6	1,00	1,10
2	+3,2	+2,6	1,06	1,10
	OPTION 2 : Crête du talus à +4,5 m IGN69			
3	+2,6	+2,6	0,93	1,05
4	+4,5	+2,6	0,90	1,04

NB : les valeurs inférieures à 1,00 sont indiquées en rouge.

Ces calculs montrent que :

- avec un niveau bas du talus à +3,2 m IGN69 (calculs 1 et 2), un niveau bas du plan d'eau à +2,6 m IGN69 et pour autant que la pente pour l'approfondissement du bassin à -6,5 m IGN69 soit conservée, il n'y aura pas de risque de glissement de terrain qui pourrait éroder la berge du plan d'eau en façade littorale. Cette condition est avérée tant que des charges ne sont pas amenées en tête de talus (route, stockage de matériaux, activités diverses). Ceci pourrait conduire à une instabilité car la pente actuelle est à l'équilibre (facteur de sécurité proche de 1).
- avec un niveau haut du talus à +4,5 m IGN69 (calculs 3 et 4), les situations où le risque d'instabilité est le plus marqué (valeurs $<1,0$) correspondent à la cote d'exploitation -0.5 m IGN69 (sans approfondissement).
- avec une cote d'exploitation à -6,5 m IGN69, par rapport à une cote d'exploitation à -0.5 m IGN69, la part de sol déjàugé ayant tendance à augmenter la part de sol hors nappe (celle qui pèse le plus), le coefficient de sécurité a tendance à augmenter légèrement (risque d'instabilité plus faible).

Il est à noter que la prise en compte d'une charge en crête (10 kPa de circulation) participe à l'instabilité potentielle du massif. Il est toutefois à noter que la charge n'est présente que ponctuellement dans le temps au sommet de la digue, ce qui nuance la notion d'instabilité. Dans l'idéal, et pour garantir le non glissement, les véhicules devront se positionner le plus loin possible du bord du talus.

Enfin, nous rappelons que ces calculs sont réalisés selon les hypothèses détaillées précédemment.

En conclusion, les nouvelles hypothèses de cote de talus, correspondant au terrain naturel de la berge Nord, ne remettent pas en cause la stabilité de celui-ci et confirment les conclusions de l'étude de 2007.

L'approfondissement du bassin de la carrière n'aggrave pas le risque de glissement de terrain sur la façade littorale.

Nous rappelons également que l'évolution du littoral est indépendante de la cote d'exploitation de la carrière.

oOo

4. LES RISQUES LITTORAUX

Préalablement, il convient de rappeler que l'évolution du littoral et celle de la carrière sont indépendantes. La cote d'exploitation de la carrière n'influence pas l'évolution du littoral.

4.1. EVOLUTION DU LITTORAL

4.1.1. Évolution du cordon de galets sur le littoral au nord de cayeux

Les analyses menées dans le cadre de l'étude du confortement des zones urbanisées du Vimeu ont montré que le littoral de galets au Nord de Cayeux-sur-Mer se trouve dans un secteur en accumulation. En effet, du fait du changement d'orientation du littoral dans sa partie Nord et de la présence du large estran sableux, les houles parviennent au littoral plus fortement atténuées qu'au Sud de Cayeux-sur-Mer, ce qui conduit à la réduction de la capacité de transport de ces dernières et donc aux dépôts des matériaux transportés. Ainsi malgré les extractions qui sont pratiquées dans ce secteur, les bilans sédimentaires sur le cordon de galets réalisés sur la période de 1994 à 2004 mettent en évidence une sédimentation évaluée à 10 000 à 20 000 m³/an dans le secteur au Nord de Cayeux-sur-Mer (SOGREAH, 2007).

Le tableau suivant présente le taux d'avancée de l'extrémité du cordon vers le Nord-Est (vers le Hourdel), d'après les études précédemment réalisées complétées par les nouvelles données de photographies aériennes du site à partir de 2012.

Tableau 14 – Progression vers le Nord-Est de l'extrémité du cordon de galets depuis 1939

Période	Avancée (m)	Taux d'avancée annuel (m/an)
1939 à 1952	400	31
1952 à 1981	1500	38
1981 à 1986	200	40
1986 à 1993	400	57
1993 à 2000	330	47
2000 à 2005	520	104
2005 à 2007	430	215
<i>Dislocation et décrochement du cordon de galets, lesquels sont venus alimenter le littoral en s'accolant à celui-ci ; prise en compte d'un crochon situé plus en amont transit (cf. figure 47) pour les estimations des taux d'avancée (changement de cordon actif de galets)</i>		
2007 à 2010	480	160
2010 à 2012	280	140
2012 à 2015	-85 / +50 / +50	/
2015 à 2017	+55 m	28

Ces vitesses d'avancées sont illustrées dans les figures suivantes.

La vitesse d'avancée de l'extrémité du cordon a été très importante entre 2000 et 2007 (Figure 36). En 2007 ou peu après 2007, le cordon actif s'est décroché pour alimenter le littoral en galets ; un crochon situé plus en amont transit (plus à l'ouest) est alors devenu le cordon actif. Celui-ci connaît une forte progression entre 2007 et 2010 (voir Figure 37).

Entre 2010 et 2012, le cordon extérieur progresse et viens rejoindre le cordon le plus au Nord ; ils se réarrangent et progressent vers l'Est alors que les cordons abrités reculent (**Figure 38**). Entre 2012 et 2015 en revanche, les cordons abrités progressent (+50 m et +50 m environ) alors que le cordon extérieur recule de -85 m environ (**Figure 39**). Entre 2015 et 2017, le crochon extérieur actif a progressé de 55 m environ et s'est rapproché du littoral (**Figure 40**). On note également l'apparition d'un large crochon extérieur.

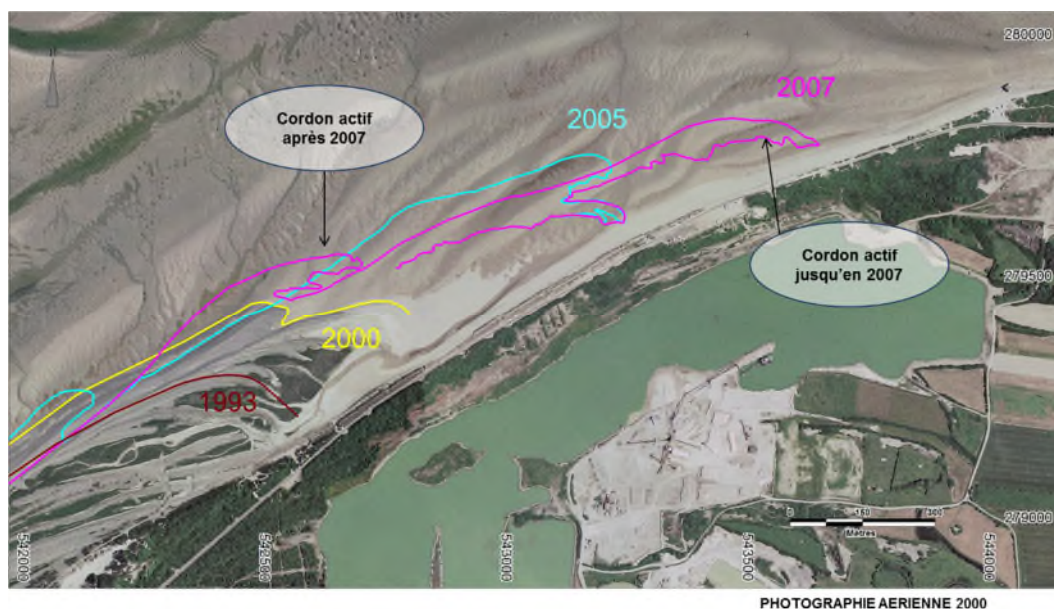


Figure 36. Suivi du cordon actif entre 1993 et 2007 (analyse de la progression de l'extrémité du cordon actif effectuée à partir des levés topographiques)

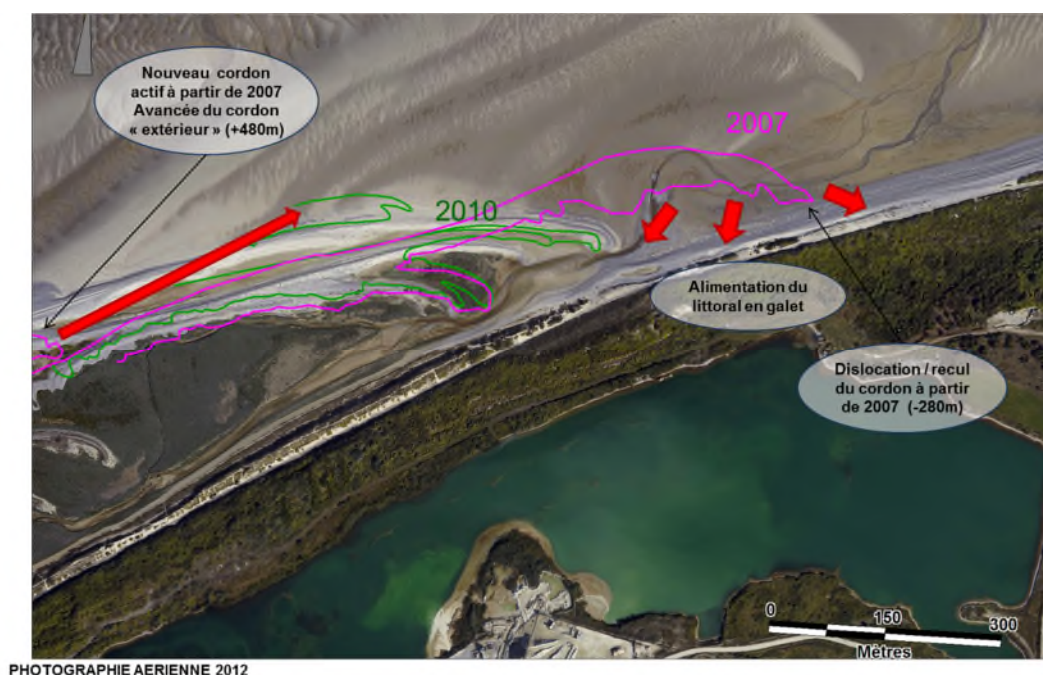


Figure 37. Suivi du cordon actif entre 2007 et 2010 (analyse de la progression de l'extrémité du cordon actif effectuée à partir des levés topographiques)

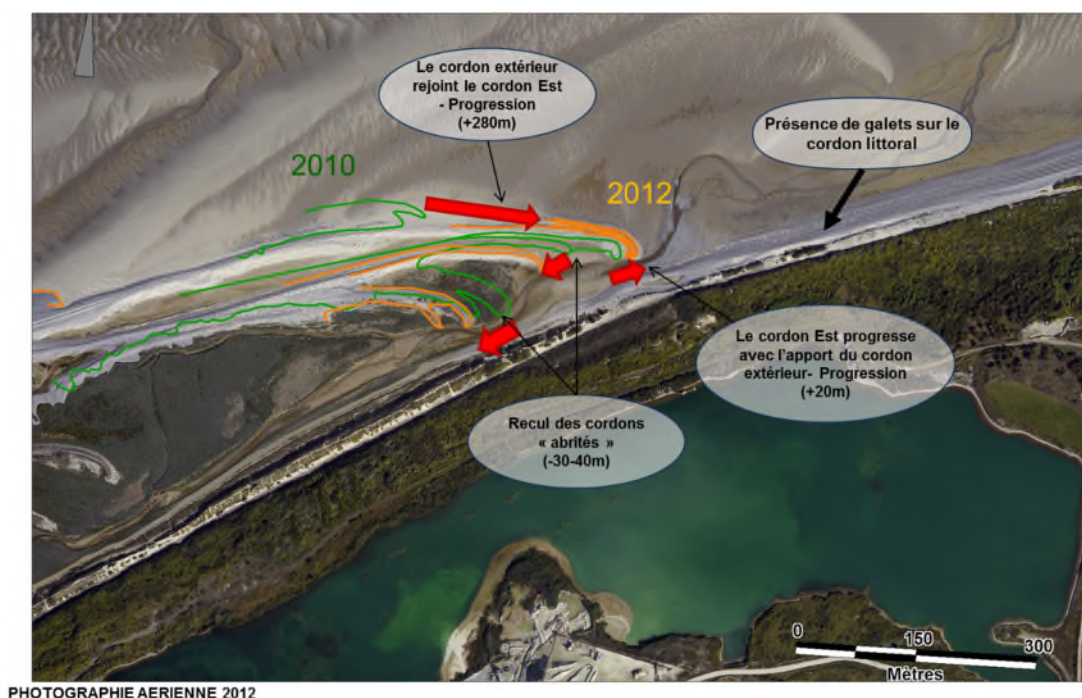


Figure 38. Suivi du cordon actif entre 2010 et 2012 (analyse de la progression de l'extrémité du cordon actif effectuée à partir des photos aériennes)

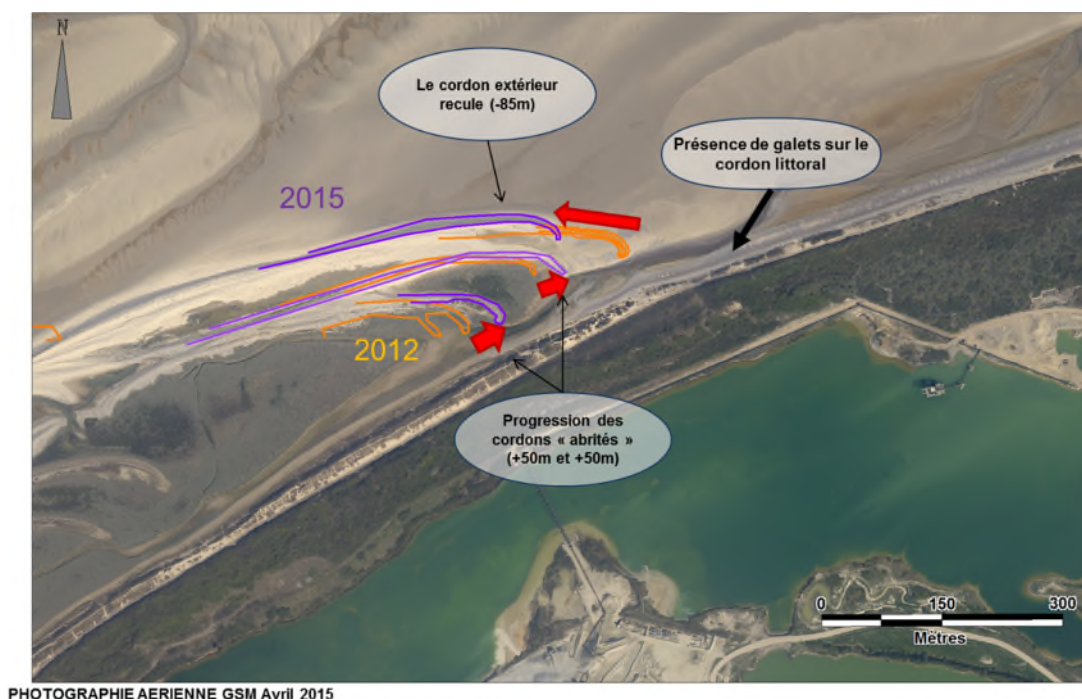
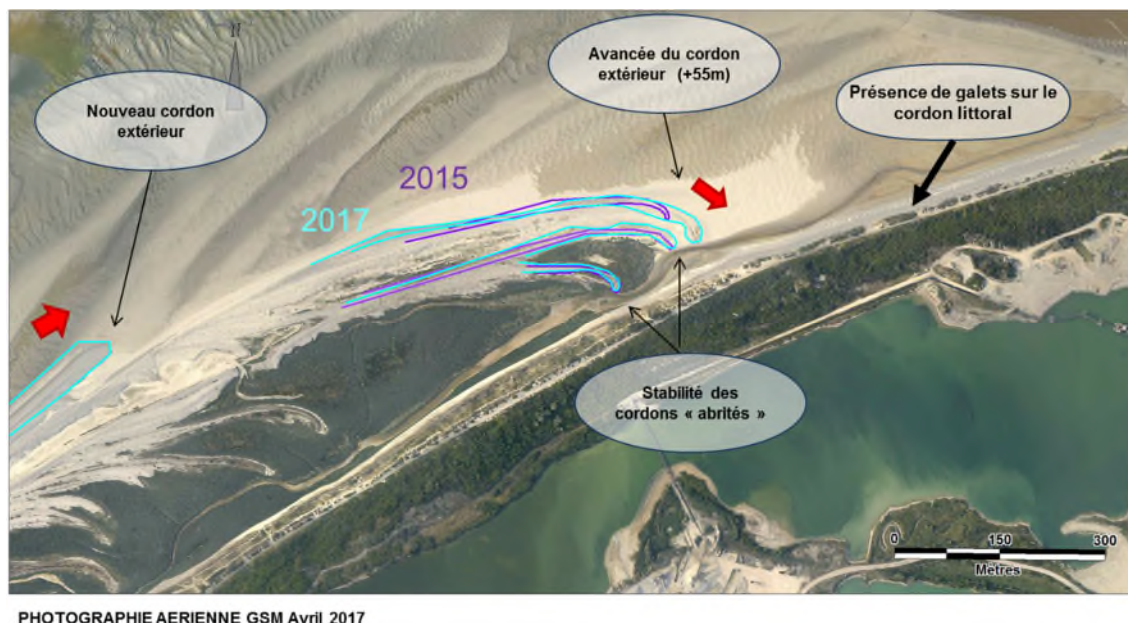


Figure 39. Suivi du cordon actif entre 2012 et 2015 (analyse de la progression de l'extrémité du cordon actif effectuée à partir des photos aériennes)



PHOTOGRAPHIE AERIENNE GSM Avril 2017

Figure 40. Suivi du cordon actif entre 2015 et 2017 (analyse de la progression de l'extrémité du cordon actif effectuée à partir des photos aériennes)

A noter que ces notions d'avancées et de recul sont issues de l'analyse des photographies aériennes (prises à un instant t) et peuvent être confirmées ou précisées à partir des levés topographiques présentés au chapitre suivant. Nous ne nous attachons pas ici aux apparitions périodiques ou saisonnières de galets qui peuvent être observées, mais repérons les tendances d'ensemble sur le long terme.

4.1.2. Evolution du littoral au droit de la carrière

Le cordon actif de galets s'étend actuellement sur environ 60 % du linéaire de la carrière le long du littoral (environ 1040 m sur les 1800 m). Le développement du cordon de galets a favorisé celui des dunes, les formations sableuses en arrière du cordon étant protégées de la mer. Au Nord-Est de la zone protégée par le cordon, le littoral est constitué d'un estran sableux avec des galets de plus en plus présents (quantités faibles en 2007 et raisonnables en 2018) grâce à la dislocation du cordon actif de galets entre 2007 et 2010. Par endroit, le poulcier fossile affleure en limite du haut estran. Des formations dunaires se développent immédiatement en arrière de la plage.

Les paragraphes suivants rappellent l'évolution du littoral au droit de la carrière :

- Evolution avant 1992

Sur la période 1947-1992, le littoral sableux dans le secteur La Mollière-Le Hourdel a reculé de l'ordre de 30 m. Cette érosion apparaît surtout s'être développée après 1971 : le recul du littoral a été de 15 à 20 m entre 1971 et 1983 (SOGREAH, 1992).

- Evolution entre 1994 et 2007

Pour la période 1994-2007, les évolutions du littoral au droit de la carrière du Hourdel sont assez singulières car liées au développement de l'extrémité du cordon de galets d'une part, et à la divagation du chenal Sud à la baie de Somme, d'autre part. L'analyse a mis en évidence sur l'emprise de la zone considérée :

- une tendance à l'accumulation sur la période 1994-2001, avec toutefois l'érosion du haut de plage au droit de l'extrémité Nord-Est de la carrière,

- une tendance à l'érosion sur la période 2001-2004, vraisemblablement liée au remaniement du littoral à l'extrémité du cordon lors de son avancée vers l'Est et/ou aux extractions réalisées pour les opérations d'entretien de la digue des Bas-Champs (prélèvements de matériaux aval transit au Nord-Est et rechargements/dépôts amont transit au Sud-Ouest du cordon),
- une tendance à la sédimentation sur la période de 2004 à 2007.

Le littoral apparaît globalement en sédimentation sur la période de 1994 à 2007 dans l'emprise de la zone considérée, du fait notamment de l'avancée du cordon de galets au droit du littoral du Hourdel.

• Evolution de 2007 à 2018

Pour la période de 2007 à 2018, l'analyse des évolutions du littoral a été réalisée à partir des levés topographiques disponibles, notamment ceux de Mars 2007, Août 2010, Décembre 2011, Décembre 2015, Mars 2017 et Mai 2018. La **Figure 41** présente l'évolution de la topographie entre Mars 2007 et Mai 2018.

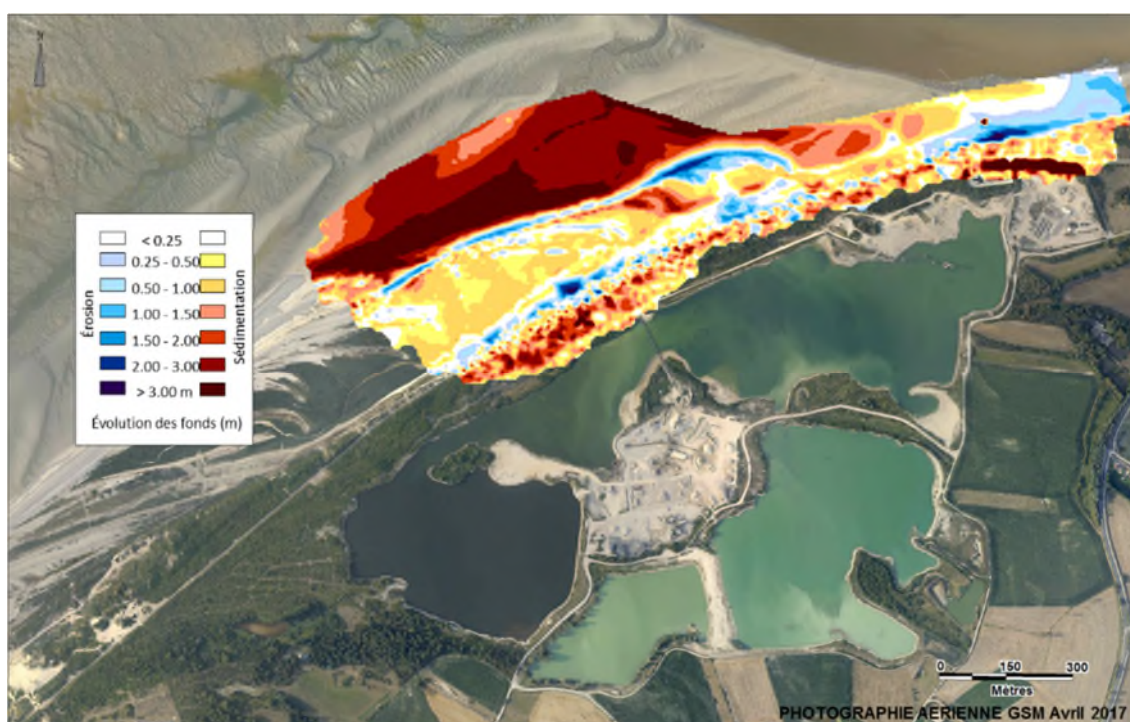


Figure 41. Evolution de la topographie entre Mars 2007 et Mai 2018

Il ressort les évolutions suivantes :

- La remontée des fonds sableux au Nord du littoral du Hourdel, au large et à l'Est des crochons de galets ;
- Le décrochement de l'extrémité (concernant un linéaire de plus de 300 mètres) du cordon actif de galets de 2007 ;
- L'engraissement du littoral au droit de la partie Nord-Est de la carrière, correspondant en partie aux galets issus de l'ancien cordon actif qui se sont rabattus sur la côte et ont poursuivi leur cheminement à l'Est sous l'effet du transit littoral ;
- La divagation du chenal Sud de la baie de Somme qui se rapproche du littoral et s'étire d'Est en Ouest.

L'analyse des levés de dates intermédiaires (voir la **Figure 42** avec la même échelle couleur que pour la **Figure 41**) ainsi que la réalisation de quatre profils en travers du cordon littoral (**Figure 43** à **Figure 46**) permettent d'illustrer et préciser ces observations.

- La remontée des fonds sableux au large de la carrière a commencé dès 2007.
 - Cet exhaussement des fonds sableux est visible sur la figure d'évolution des fonds de 2007 à 2010 ainsi que sur l'ensemble des 4 profils entre 2007 et 2012.
 - Les profils 3 et 4 illustrent cet exhaussement des fonds de manière très marquée : +3 m entre 2007 et 2012 à 150/200 m du cordon dunaire.
- Le décrochement du cordon actif de 2007 a eu lieu entre 2007 et 2010.
 - Le changement de crochon actif est bien visible sur le profil 2 avec démantèlement d'anciens crochons et apparitions de nouveaux crochons entre 2007 et 2012 ;
 - Entre Décembre 2012 et Décembre 2015, l'érosion d'un crochon « récent » est visible sur les profils 1 et 2, au droit de la moitié Ouest de la carrière ;
- Puis entre 2010 et 2015, les fonds ont continué leur exhaussement devant le littoral de la carrière (fonds sableux) avec probablement également des galets issus des crochons venant se plaquer sur le cordon littoral.
 - La poursuite de l'exhaussement des fonds au large de la carrière est visible sur le profil 2 entre 2012 et 2015 (exhaussement de 2 m à l'extrémité du profil, à 400m du cordon).
- Après 2015, une nouvelle dynamique s'impose avec la divagation du chenal Sud de la baie de Somme, provoquant progressivement l'érosion d'une partie des fonds sableux du Nord vers le Sud. La divagation du chenal et donc l'érosion d'une partie des fonds sableux est bien visible sur les profils :
 - On note la disparition du banc de sable qui s'effectue par l'Est, sur le profil P4 en Mars 2017 et sur le profil P3 en Mai 2018.
 - Cette divagation est également visible sur les figures d'évolutions des fonds entre 2015 et 2017, puis entre 2017 et 2018.
- On note également à partir de 2015 la reprise d'évolution (vers l'Est et en altitude) des cordons de galets.
 - Les profils P1 et P2 illustre cette reprise d'évolution et on distingue l'apparition de nouveaux crochons entre 2015 et 2017

D'autre part, l'Annexe B vient illustrer l'évolution du cordon littoral au droit de la moitié Nord de la carrière entre 2007 et 2018 : la figure présente en détails les fonds au droit d'un profil perpendiculaire au littoral pour les années 2007 et 2018. Il ressort un engraissement du cordon de galets sur une épaisseur atteignant 1.1 m et un engraissement des fonds sableux sur une épaisseur atteignant 1.7m.

Ainsi, le littoral est globalement mieux protégé en 2018 qu'en 2007 grâce à l'exhaussement des fonds devant la quasi-totalité du linéaire de la carrière et de par la présence de galets le long du littoral (issus du crochon de 2007). Néanmoins, les évolutions passées et récentes montrent que les fonds de ce littoral peuvent varier rapidement, notamment de par la proximité de la baie de Somme et de la divagation de ses chenaux.

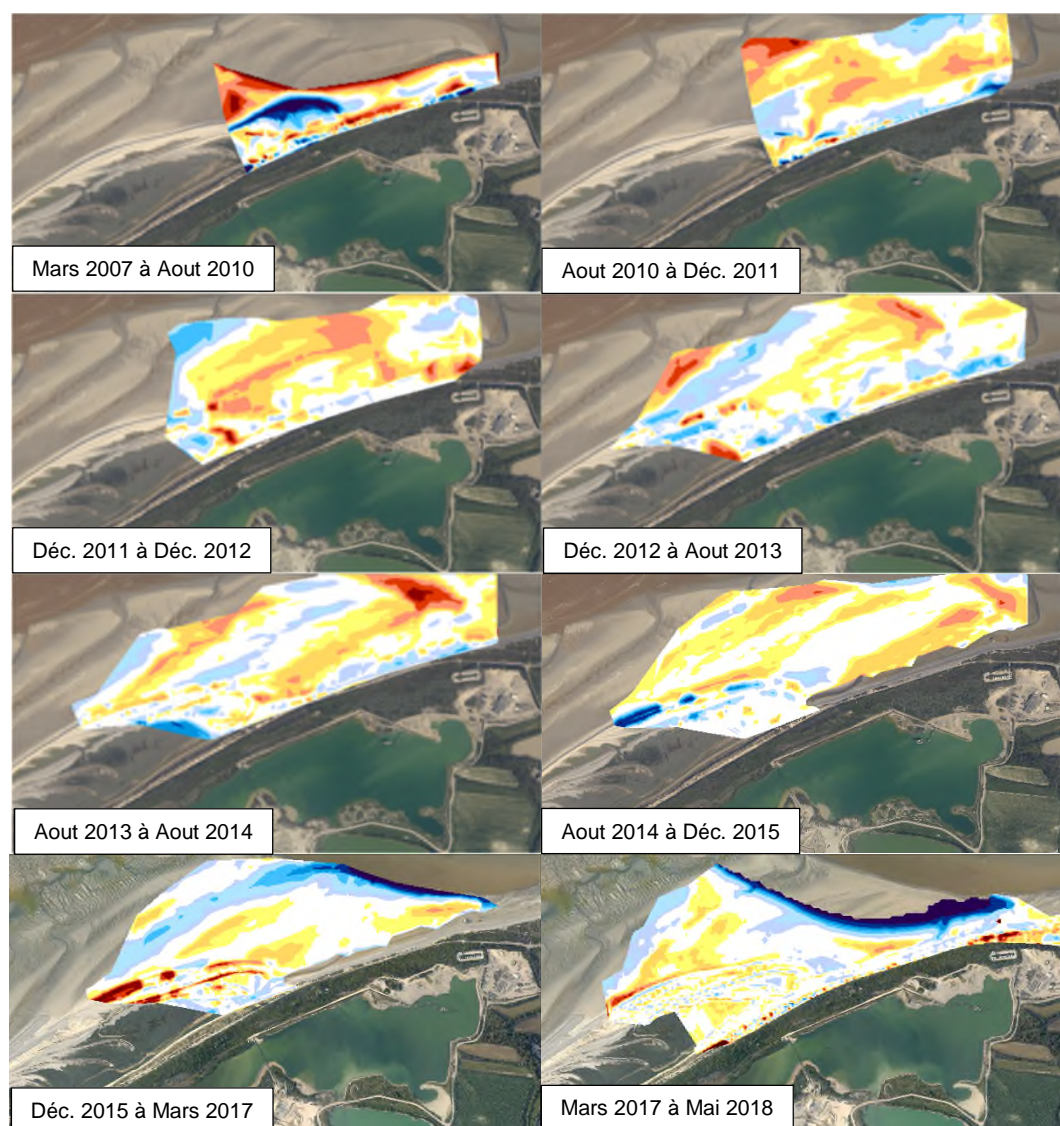
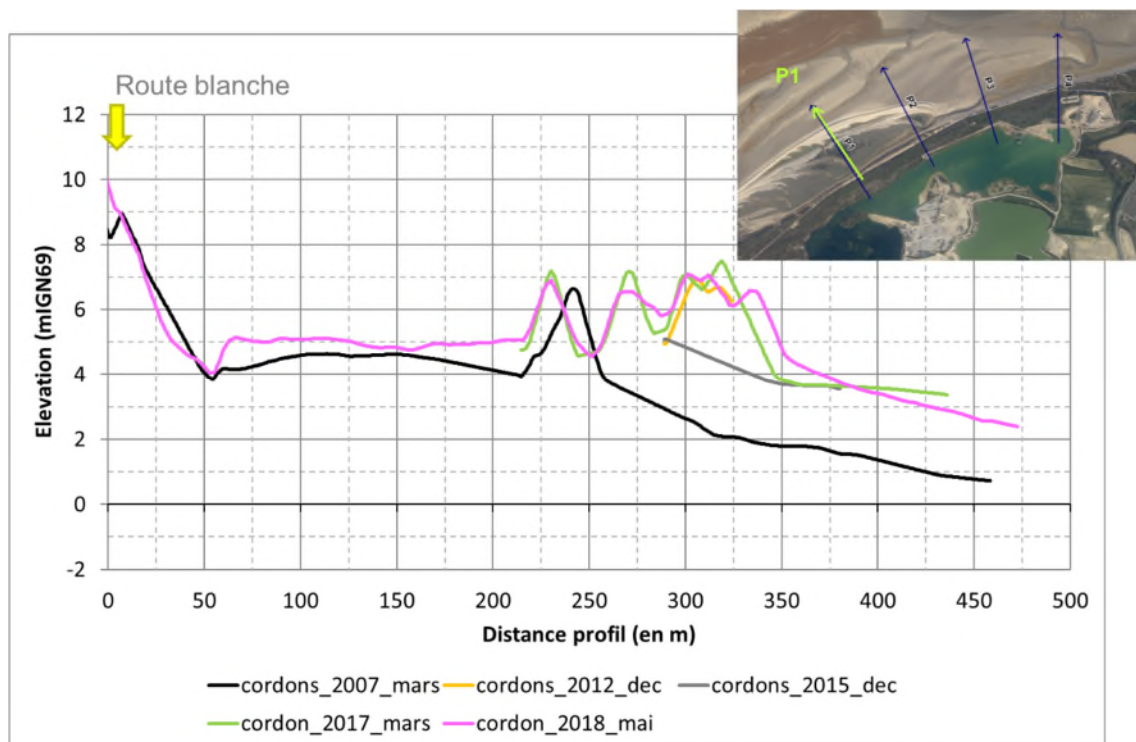
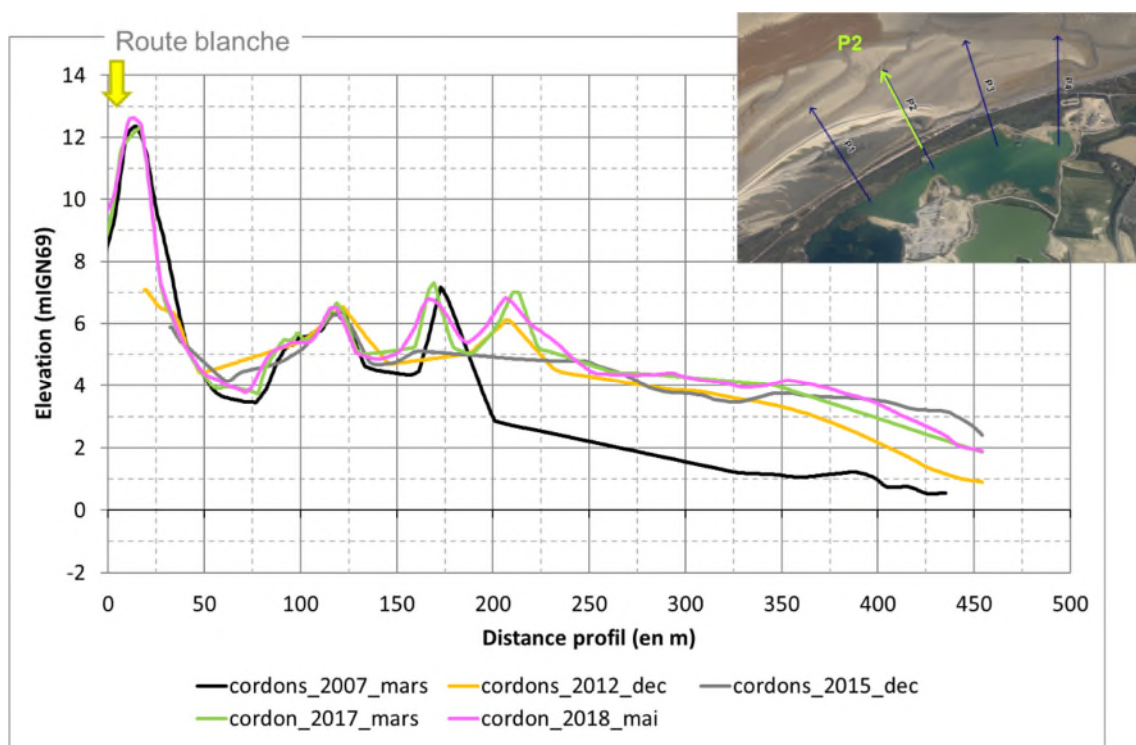
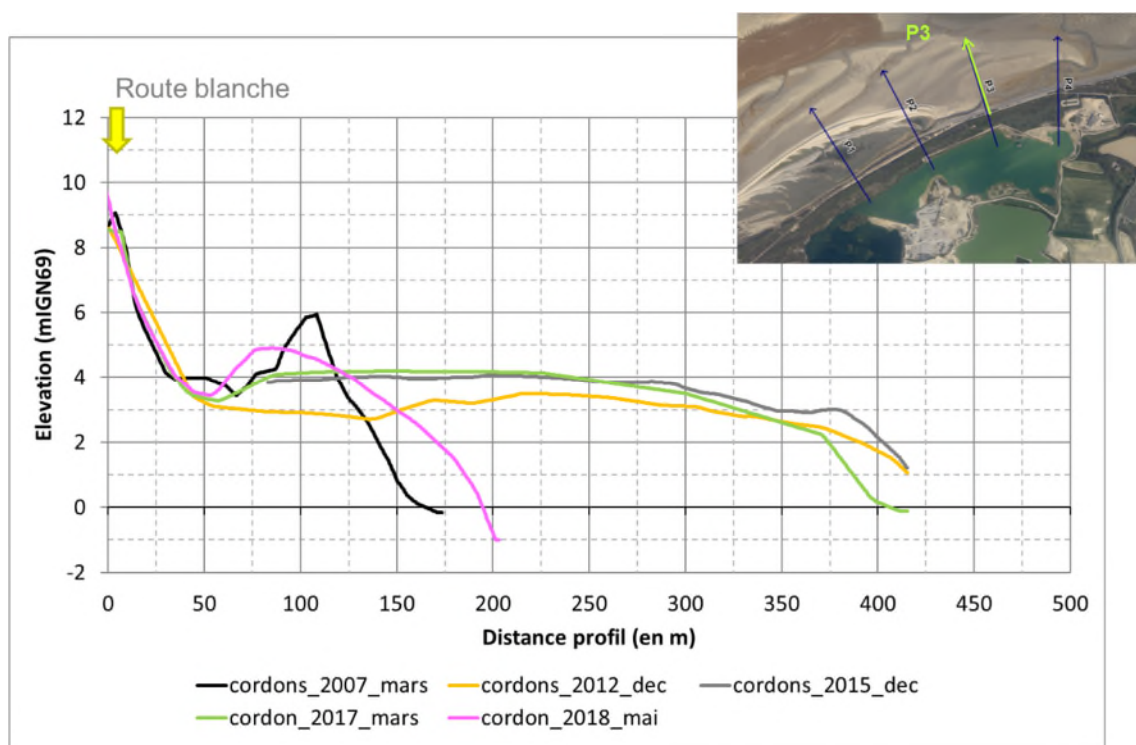
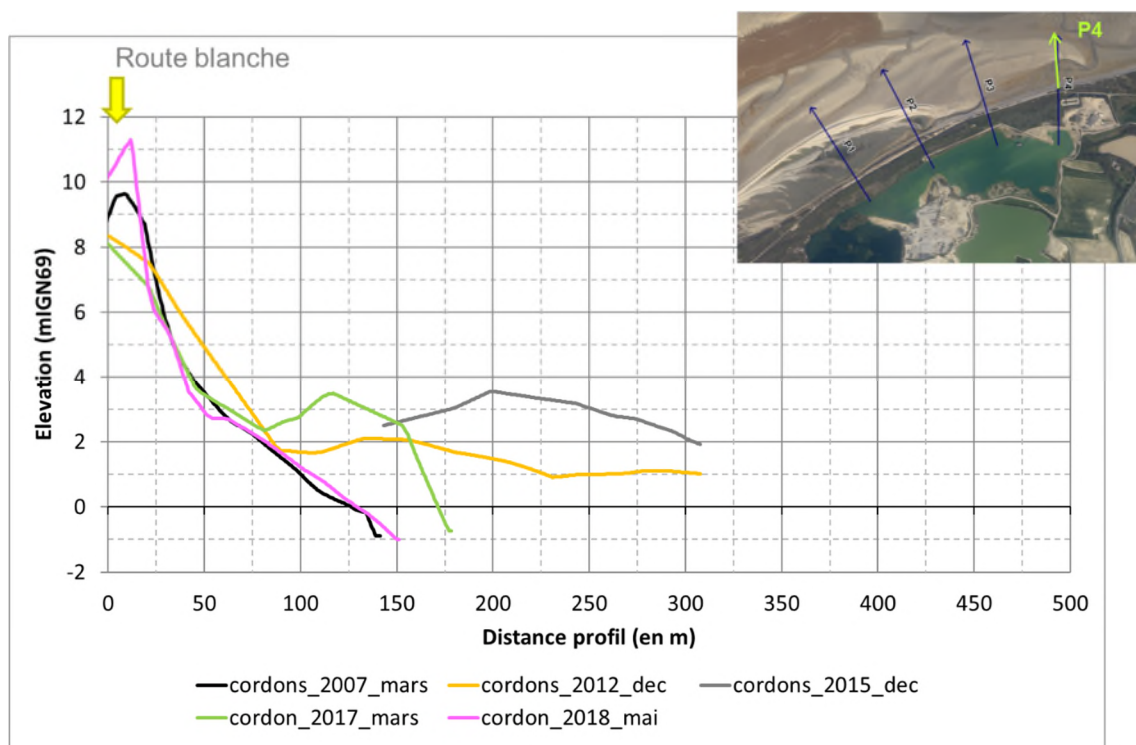


Figure 42. Evolutions détaillées de la topographie entre Mars 2007 et Mai 2018

**Figure 43. Evolutions de profils - P1****Figure 44. Evolutions de profils - P2**

**Figure 45. Evolutions de profils - P3****Figure 46. Evolutions de profils - P4**

4.1.3. Evolution du banc sableux

En 2007, la présence du chenal sud de la baie de Somme contre le littoral se traduit par des fonds relativement bas devant le littoral de la carrière.

A partir de 2007, le chenal s'écarte du littoral laissant la place à la progression d'un banc sableux. Ainsi entre 2007 et 2015 les fonds s'exhaussent devant le littoral et on observe le développement significatif et la progression régulière d'un banc sableux en direction de la baie de Somme parallèlement au littoral, ce banc servant d'assise au cordon de galets.

A partir de 2015, les fonds commencent à s'éroder progressivement de l'Est vers l'Ouest laissant place de nouveau au chenal Sud de la baie de Somme.

L'évolution du banc est illustrée par les figures ci-après (Figure 47 et Figure 48) qui donnent les différentes positions de l'isoligne +3 mIGN69, qui correspond à une cote caractéristique de contour du banc. Notons qu'en 2007, cette isoligne +3 mIGN69 n'existait pas, traduisant ainsi l'absence de banc sableux dans la zone considérée. Entre 2007 et 2015 on distingue bien l'apparition et la progression du banc sableux vers l'Est, puis le recul de celui-ci depuis 2015 pour laisser place au chenal de la baie de Somme.

- On notera que sur la période de 2007 à 2015 le banc a progressé vers l'Est d'en moyenne 160 m/an au niveau de la ligne +3 m IGN69. En 2015 l'extrémité orientale de la zone d'extraction de la carrière projetée a été « débordée » par l'extrémité du banc. Le banc est d'ailleurs visible sur la photographie aérienne de 2015.
- Sur la période 2015 à 2018 le banc a reculé vers l'Ouest de 600 m environ : 250 m entre 2015 et 2017 et 350 m entre 2017 et 2018.

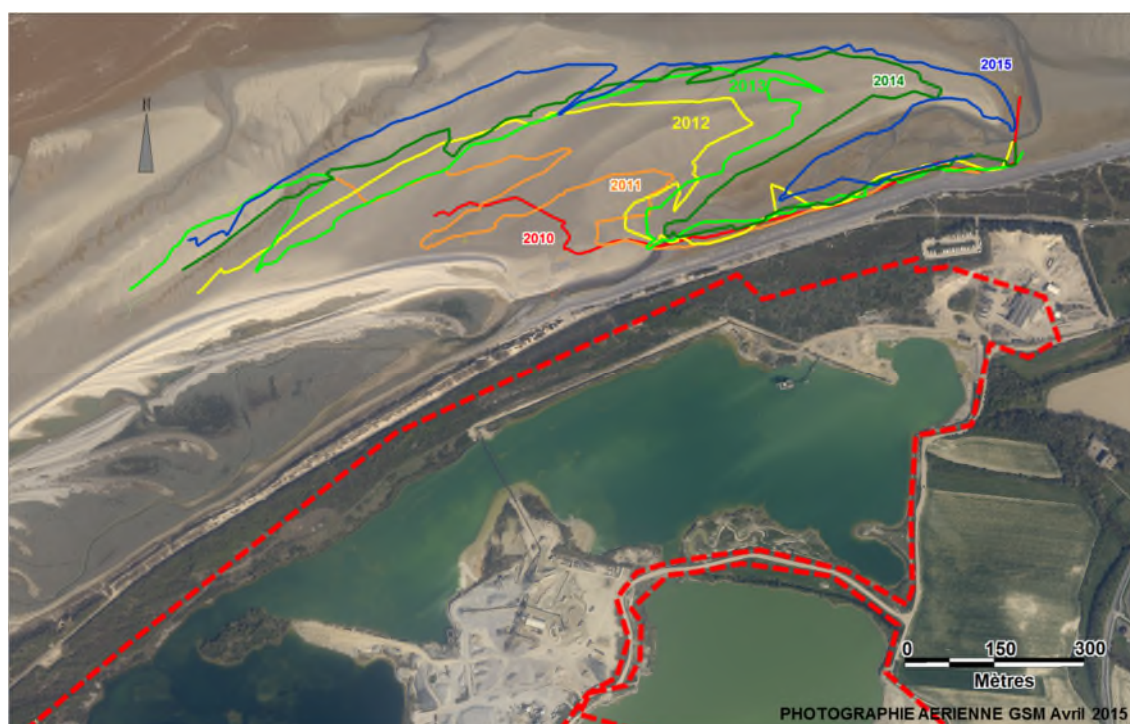


Figure 47. Evolution de l'isolithe +3m IGN69 entre 2007 et 2015



Figure 48. Evolution de l'isobathe +3m IGN69 depuis 2015

4.1.4. Divagation du chenal Sud de la baie de Somme

Les évolutions de la baie de Somme ont un impact important sur la dynamique sédimentaire du littoral de Cayeux au Hourdel, et plus particulièrement le chenal situé au Sud de l'entrée de la baie. En effet, celui-ci subit un phénomène de divagation au cours duquel :

- Soit, il se rapproche du littoral, ce qui favorise les processus érosifs sur ce dernier,
- Soit, il s'en éloigne et dans cette dernière configuration, la proximité des bancs sableux favorise l'engraissement du littoral par le transport éolien.

Historiquement, un chenal Sud longeait la côte du Hourdel jusqu'à Cayeux, ce chenal s'est colmaté au début du 20^e siècle. Ce colmatage (correspondant à la remontée des fonds sableux entre -7 m IGN69 et 0) a permis la progression vers le Nord du cordon de galets qui a disposé du substratum sableux nécessaire à son développement.

En 1991, le chenal Sud longeait le littoral sur 1,2 kilomètre environ à partir de la pointe du Hourdel avant de s'orienter vers le Nord-Ouest. Le linéaire de chenal parallèle au littoral s'est allongé progressivement pendant cette période en longeant le littoral, et a atteint en 2007 l'extrémité Nord-Est de la carrière GSM. Toutefois, sous la pression de l'avancée du cordon de galets, le chenal s'infléchit vers le large au niveau de son point de rencontre avec le cordon de galets. Entre 2007 et 2015, une nouvelle dynamique s'installe avec le chenal qui s'écarte du littoral laissant place à la progression d'un large banc sableux qui progresse vers la pointe du Hourdel et s'étend sur tout le linéaire de la carrière.

Entre 2015 et 2018, une portion du chenal Sud revient se plaquer progressivement contre le littoral, érodant le banc sableux dans sa partie Nord-Est. En 2018, les limites du levé topographique permettent d'estimer la position du chenal, qui semble être proche de sa position 2007.

L'évolution de la position du chenal Sud devant le littoral du Hourdel est présentée à la **Figure 49**.

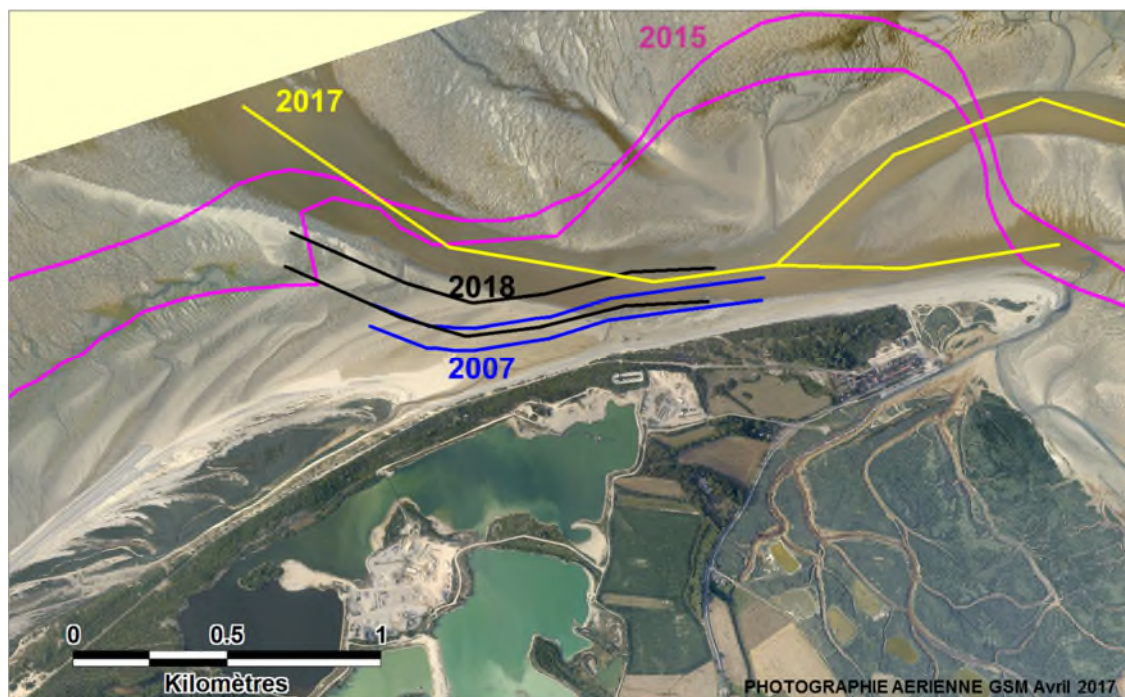


Figure 49. Divagation du chenal Sud de la baie de Somme

4.2. RISQUE EROSION

Sur la base de l'analyse menée précédemment, le littoral du Hourdel au droit de la carrière GSM se trouve :

- toujours en accrétion pour la partie Ouest avec un cordon de galet qui continue à avancer vers l'est,
- dépendant de la divagation du chenal sud de la Baie de Somme pour la partie Est.

Concernant la partie Ouest protégée par le cordon de galet, celle-ci devrait rester protégée du risque érosion. En effet, les crochons de galets vont constituer un obstacle au chenal Sud de la baie de Somme, qui devrait alors s'écarter du littoral. Le taux d'avancée des crochons de galets étant irrégulier et d'intensité moyenne ces dernières années (changements de crochons actifs), il n'est pas possible de prévoir l'évolution future de celui-ci.

Concernant la partie Est du littoral de la carrière, celle-ci a subi différentes phases sur la période récente considérée de 2007 à 2018 : une phase d'engraissement important avec un banc sableux ayant gagné 2 mètres d'épaisseur à certains endroits puis une phase d'érosion de ce banc sableux pour laisser place au chenal Sud de la baie de Somme. Entre 2017 et 2018 le chenal semble s'être étiré contre le littoral, nous faisons l'hypothèse que cette évolution va se poursuivre jusqu'à rencontrer les crochons de galets. Un nouveau cycle interviendra alors ensuite où le chenal s'écartera du littoral favorisant l'engraissement de celui-ci.

4.3. RISQUE SUBMERSION

Le risque de submersion marine a été analysé en considérant l'aléa de référence correspondant à un événement d'occurrence centennal au cours duquel le niveau marin atteint **+6,8 m IGN69 (niveau**

statique). De plus, il a été pris en compte la surélévation dynamique correspondant à la houle centennale (cf. §2.3.4), portant le niveau de mer le long du littoral à **+7,5 m IGN69**.

L'élévation du niveau de la mer due au réchauffement climatique n'est pas prise en compte dans cette estimation. En effet il n'est pas pertinent de projeter une surcote liée au réchauffement climatique sur des fonds actuels puisque les fonds vont naturellement s'adapter progressivement et répondre à l'élévation progressive du niveau. Au vu des vitesses d'évolution des fonds sur ce littoral, les fonds seront, à l'horizon 2100, complètement remodelés et différents des fonds tels qu'ils sont actuellement.

Le niveau du terrain en retrait du haut de plage au droit de la carrière du Hourdel (« cordon dunaire littoral ») a été porté sur la **Figure 51** à partir des éléments du levé topographique de grande emprise de mars 2007, et du levé récent de 2018 (localisation du profil sur la **Figure 50**). Le profil longitudinal correspondant à l'axe de la RD102 fait l'objet de la **Figure 52**.

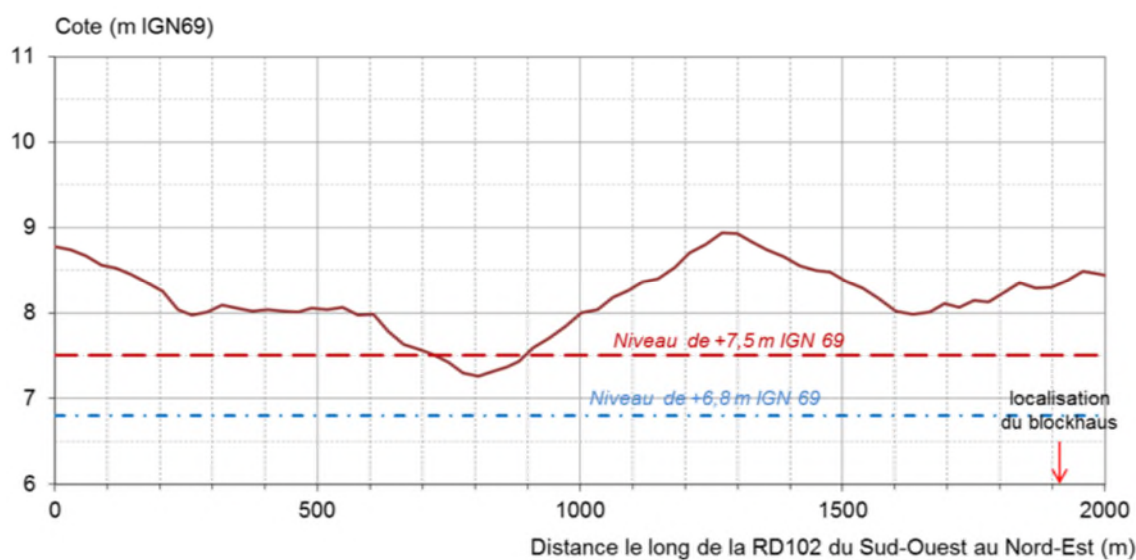


Figure 50. Localisation des profils en long

Pour une meilleure lecture il a été porté sur les graphiques qui suivent :

- la localisation du blockhaus, situé à une distance d'environ 1910 m du point « origine » ;
- la cote du niveau marin centennal de +6,8 m IGN69 (niveau statique) ;
- la cote du niveau marin de +7,5 m IGN69 intégrant la surélévation dynamique (setup).

Profils longitudinaux du cordon dunaire littoral

**Figure 51. Profil longitudinal du cordon dunaire littoral (données GSM)****Figure 52. Profil longitudinal de la route D102 (levé GSM, sept. 2016)**

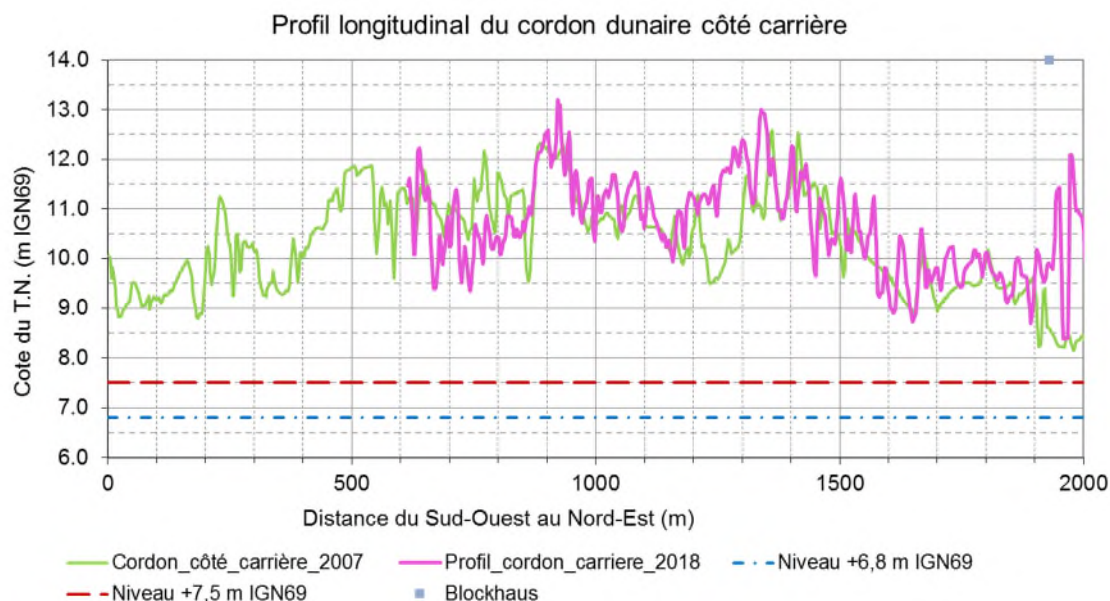


Figure 53. Profil longitudinal du cordon côté carrière

Au regard des niveaux d'eau de projet et de l'altitude des cordons de part et d'autre de la route blanche, les conclusions sur le risque submersion de l'étude de 2007 sont inchangées :

- il n'y a pas de risque de submersion marine au droit de la carrière compte tenu du niveau du cordon dunaire littoral supérieur à la cote de +8 m IGN69 dans ce secteur ;
- toutefois, pour des conditions de tempête exceptionnelle, le haut de plage pourra être franchi par les vagues et leur jet de rive. Il a été estimé que le jet de rive pouvait atteindre jusqu'à +9,5 à +11,0 mIGN69 pour la houle de période de retour centennale (cf. §2.3.4). Ces franchissements pourraient donc inonder localement la route RD102 et certains terrains de part et d'autre.

o0o

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. ARTELIA, 2012. Confortement des zones urbanisées du Vimeu. Implantation d'épis sur la plage de Cayeux. Lot 1 – Maitrise d'œuvre. Projet. Rapport n° 1713123R1-Rev 2 établi le 27 novembre 2012 pour le compte du syndicat mixte Baie de Somme, Grand Littoral Picard.
- [2]. ARTELIA, 2016. Carrière du Hourdel. Actualisation de l'étude des effets de l'approfondissement et de l'extension de la zone d'extraction. Rapport d'étude. Rapport final n° 871 3736, version 03, établi en Avril 2017 pour le compte de GSM.
- [3]. IFREMER, 2004. 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 » établie par La Direction générale de l'énergie et du climat / Service du climat et de l'efficacité énergétique / Observatoire National sur les effets du réchauffement climatique (MEDTL).
- [4]. SHOM 2012. Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique) – 2012.
- [5]. SHOM 2014. Ouvrage de marée – Références altimétriques maritimes – Ports de France Métropolitaine et d'outre-mer – Côtes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée – Edition 2014.
- [6]. SMB 1973 : Sverdrup-Munk-Bretschneider, formulation théorique de 1973
- [7]. SOGREAH 1992.Extractions de matériaux au Hourdel. Etudes d'impact sédimentologique. Rapport n°51294 établi pour le compte du Groupe des Galets de Mer Français (GMF).
- [8]. SOGREAH 2007. Carrière du Hourdel. Effet de l'approfondissement et de l'extension de la zone d'extraction. Examen des risques littoraux. Avis technique. Rapport N° 171 1647 établi en Septembre 2007 pour le compte de GSM.
- [9]. SOGREAH 2011. Carrière du Hourdel. Approfondissement et extension de la zone d'extraction. Avis technique suite aux demandes de la DDTM. Rapport N° 171 3113 - Rev2 établi en Avril 2011 pour le compte de GSM.

ANNEXE A**SORTIES GRAPHIQUES TALREN (VOLET
GEOTECHNIQUE)**

Résultats des calculs géotechniques TALREN

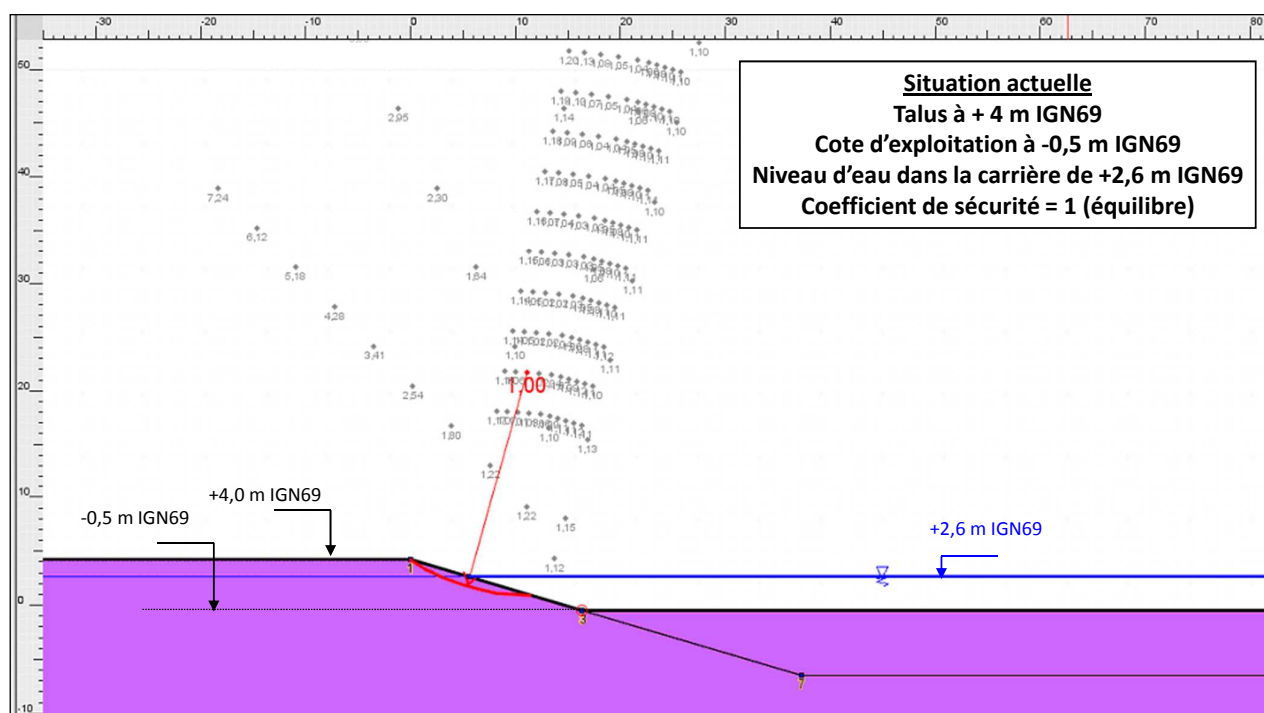
ANNEXE A



Carrière du Hourdel - Actualisation de l'étude de l'effet de l'approfondissement et de l'extension de la zone d'extraction et examen des risques littoraux
ARTELIA Maritime - 871 3736 - CCL- Fév. 2017

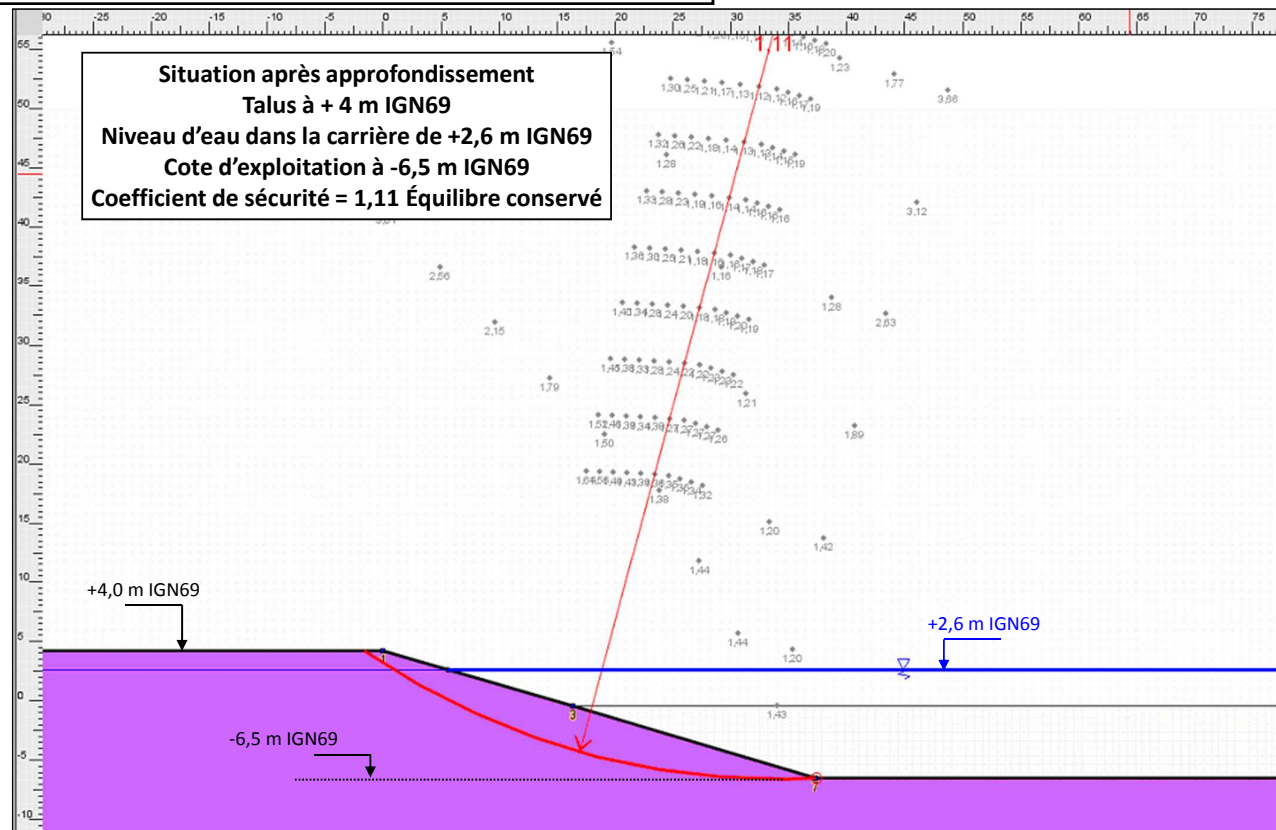
Résultats des calculs géotechniques TALREN - Figure A.1

CALCUL 0 – cote d'exploitation à -0.5 m IGN69)



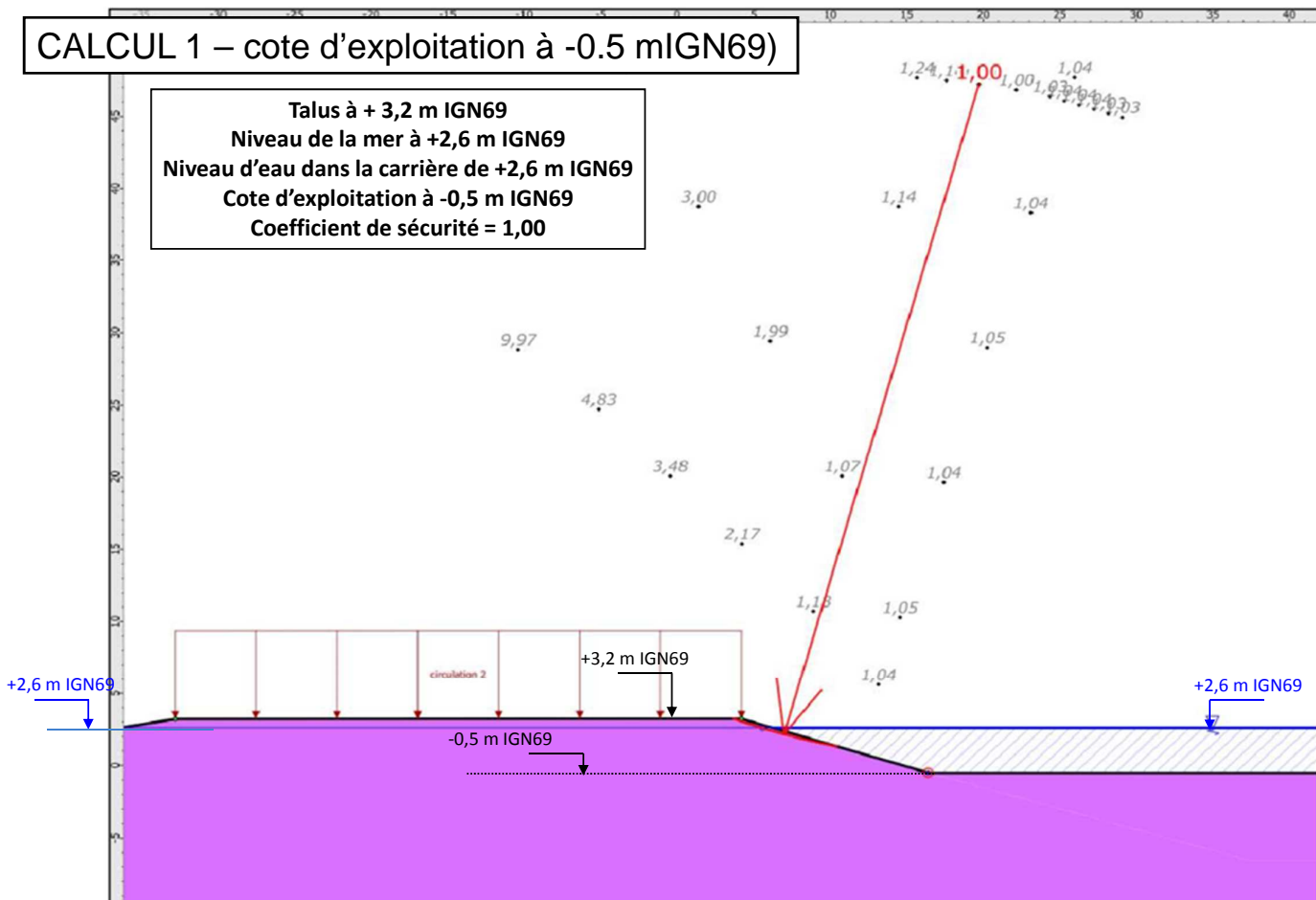
Avec l'hypothèse que la situation actuelle correspond à une situation d'équilibre (coef. de sécurité = 1), l'angle de frottement représentatif du sol est estimé.

CALCUL 0 – cote d'exploitation à -6.5 mIGN69)



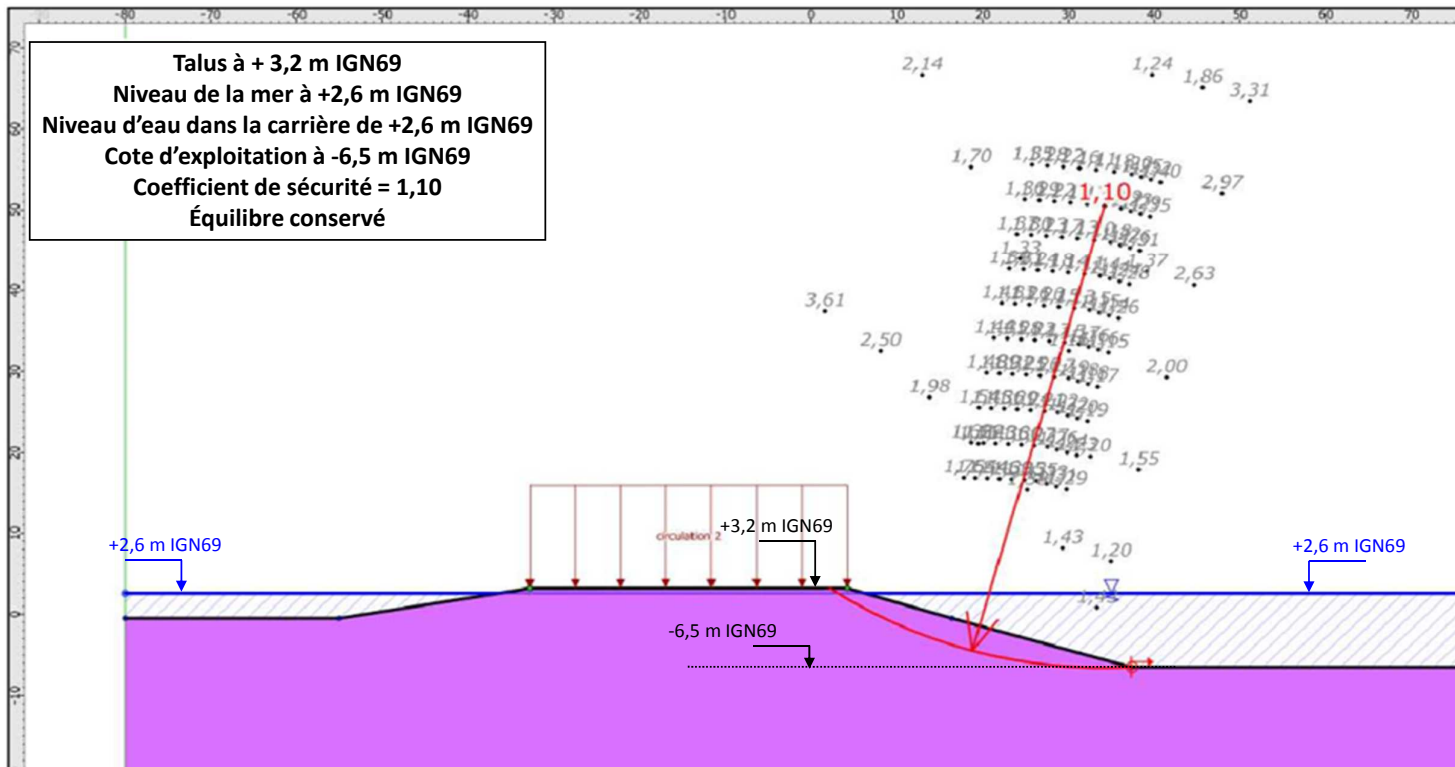
Carrière du Hourdel - Actualisation de l'étude de l'effet de l'approfondissement et de l'extension de la zone d'extraction et examen des risques littoraux
ARTELIA Maritime - 871 3736 - CCL- Fév. 2017

CALCUL 1 – cote d'exploitation à -0.5 mIGN69)



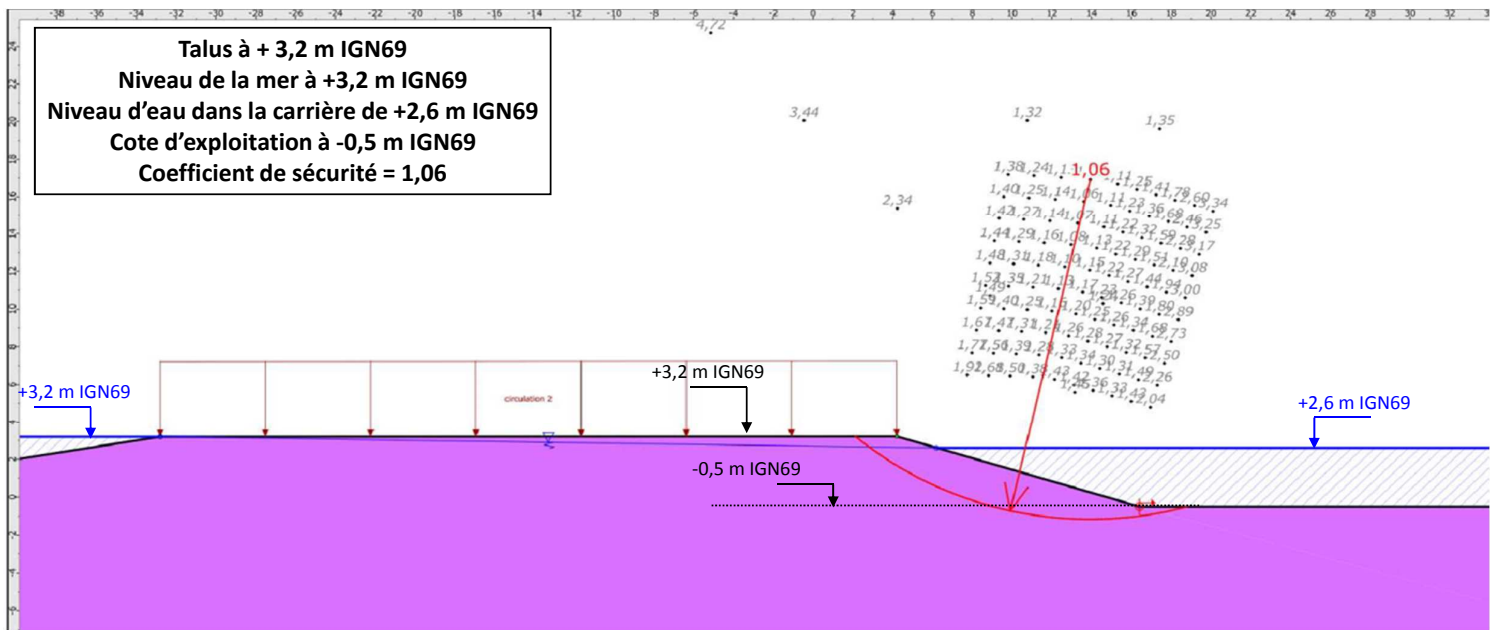
Carrière du Hourdel - Actualisation de l'étude de l'effet de l'approfondissement et de l'extension de la zone d'extraction et examen des risques littoraux
ARTELIA Maritime - 871 3736 - CCL- Fév. 2017

CALCUL 1 – cote d'exploitation à -6.5 mIGN69)



Carrière du Hourdel - Actualisation de l'étude de l'effet de l'approfondissement et de l'extension de la zone d'extraction et examen des risques littoraux
ARTELIA Maritime - 871 3736 - CCL- Fév. 2017

CALCUL 2 – cote d'exploitation à -0.5 mIGN69)

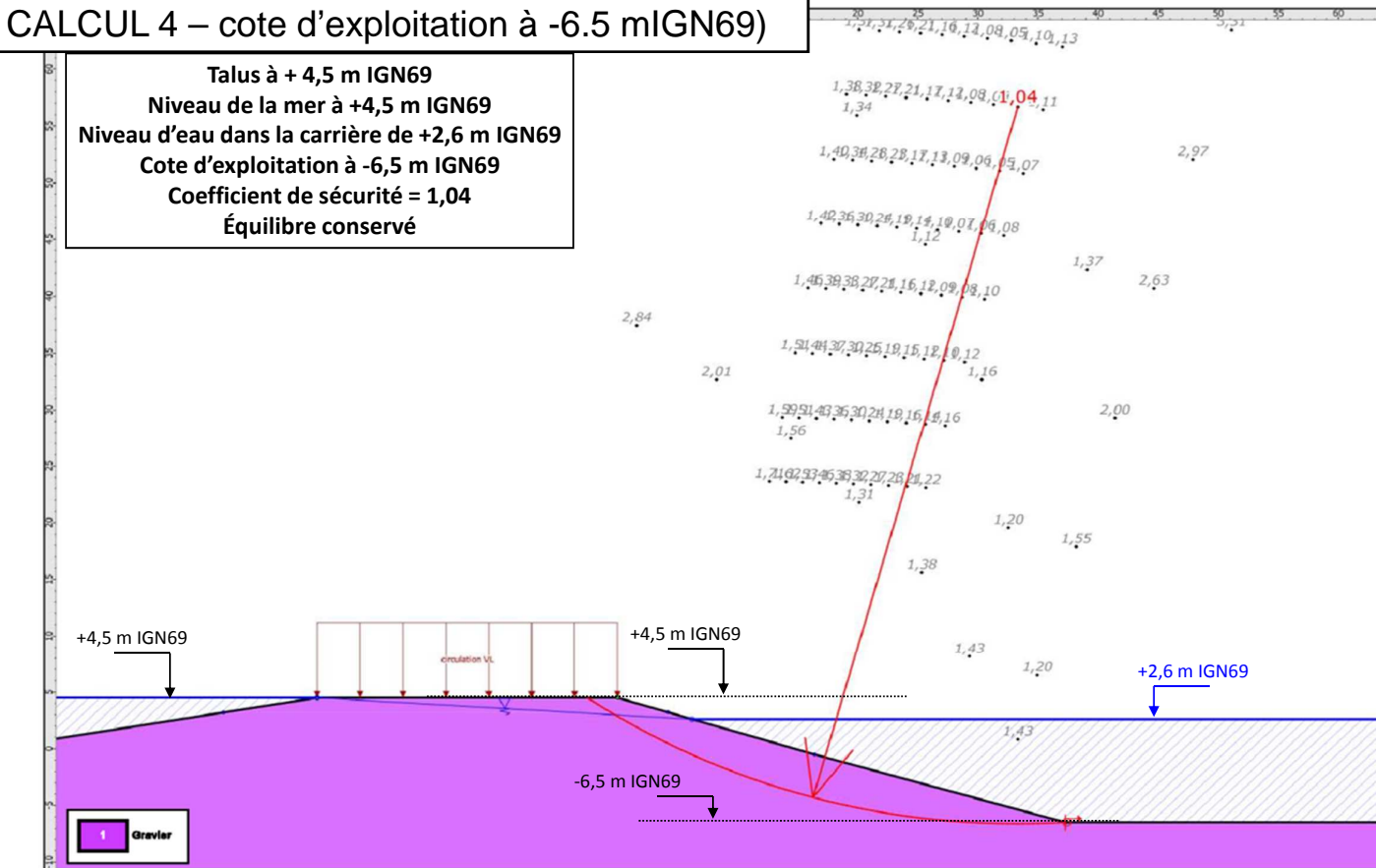


Carrière du Hourdel - Actualisation de l'étude de l'effet de l'approfondissement et de l'extension de la zone d'extraction et examen des risques littoraux
ARTELIA Maritime - 871 3736 - CCL- Fév. 2017





CALCUL 4 – cote d’exploitation à -6.5 mIGN69)



Carrière du Hourdel - Actualisation de l’étude de l’effet de l’approfondissement et de l’extension de la zone d’extraction et examen des risques littoraux
ARTELIA Maritime - 871 3736 - CCL- Fév. 2017

CALCULS EXTREMES

Hypothèse supplémentaire d’une vidange accidentelle de la carrière.

N° cas de calcul	Niveau d’eau côté mer (m IGN69)	Niveau d’eau côté carrière (m IGN69)	Cote d’exploitation (en m IGN69)	
			Cote d’exploitation à -0,5 m IGN 69	Cote d’exploitation à -6,5 m IGN 69
	OPTION 1 : Crête du talus à +3,2 m IGN69			
1b extrême	+2,6	-0.5	1.06	0.99
2b extrême	+3,2	-0.5	1.03	0.96
	OPTION 2 : Crête du talus à +4,5 m IGN69			
3b extrême	+2,6	-0.5	1.02	0.98
4b extrême	+4,5	-0.5	0.94	0.91

ANNEXE B

EVOLUTION DU CORDON LITTORAL ENTRE 2007 ET 2018 AU DROIT DE LA MOITIE NORD DE LA CARRIERE

Profil AA'

Echelle en X : 1/500

Echelle en Y : 1/200

