



# Tests méthodologiques pour l'évaluation des impacts hydromorphologiques d'aménagements côtiers en Seine- Normandie dans le cadre de la DCE

Rapport final

BRGM/RP-64951-FR

Septembre 2015





# Tests méthodologiques pour l'évaluation des impacts hydromorphologiques d'aménagements côtiers en Seine- Normandie dans le cadre de la DCE

## Rapport final

**BRGM/RP-64951-FR**  
Septembre 2015

Étude réalisée dans le cadre des opérations  
de Service public du BRGM 2014

**O. Brivois, F. Desmazes, H. Müller**

**Vérificateur :**

Nom : GARCIN Manuel  
Fonction : Ingénieur littoral  
Date : 23/02/2016

Signature :



**Approbateur :**

Nom : PENNEQUIN Didier  
Fonction : Directeur Régional HNO  
Date :

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement  
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Mots-clés :** Impacts hydromorphologiques, aménagements côtiers, Directive Cadre sur l'Eau, hydrodynamique, morphologie côtière.

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

**Brivois O., Desmazes F., Müller H.** (2015) – Tests méthodologiques pour l'évaluation des impacts hydromorphologiques d'aménagements côtiers en Seine-Normandie dans le cadre de la DCE. Rapport final. BRGM/RP-64951-FR, 121 p., 65 fig., 6 tabl., 1 ann.

## Synthèse

Dans le cadre de la mise en place, au niveau national, de la surveillance hydromorphologique des masses d'eau côtières de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), cinq métriques, relatives à différentes pressions ou activités anthropiques, ont été proposées. Ce projet, cofinancé par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et réalisé dans le cadre d'un accord tripartite AESN/BRGM/DRIEE, vise à développer et à tester, sur des sites littoraux normands, une ou des méthodes d'évaluation de deux de ces métriques, relatives aux impacts des aménagements littoraux, à savoir :

- La métrique 2 (M2 : Modification des échanges sédimentaires à la côte) : le pourcentage de longueur de linéaire côtier de chaque masse d'eau où la sédimentation est modifiée (érosion, accrétion) par la présence d'aménagements ou d'interventions anthropiques (rechargement, exploitation, etc.) ;
- Et la métrique 3 (M3 : Modification des courants et des vagues) : le pourcentage de surface de chaque masse d'eau pour laquelle l'hydrodynamique (courants, vagues) est modifiée.

Les travaux méthodologiques, relatifs à la métrique 2, ont été effectués sur les quatre sites d'étude normands sélectionnés pour le projet (d'Arromanches-les-Bains à Ouistreham, la plage d'Utah Beach, le Havre de Siemie et un secteur à falaise autour de Criel/Mer), présentant différents types d'aménagements, dans des contextes hydromorphologiques variés.

Sur ces sites, nous avons cherché à évaluer, pour chaque aménagement présent, sa « longueur d'influence sur le trait de côte ». Cette longueur est définie comme la somme des longueurs des impacts directs (emprise de l'aménagement à la côte) et des impacts indirects (longueur de côte pour laquelle les échanges sédimentaires et la morphologie sont modifiés par la présence de l'aménagement autour de celui-ci).

Avant d'évaluer ces impacts, une phase préliminaire d'analyse rigoureuse des données SIG disponibles (bases de données sur les ouvrages, masses d'eau DCE, trait de côte officiel) est nécessaire afin de déterminer quels aménagements sont à prendre en compte (erreurs ou oublis dans les bases de données sur les ouvrages ; typologie trompeuse quant à la nature, naturelle ou anthropique, de l'aménagement ; position de l'aménagement par rapport à la définition géographique de la masse d'eau).

Suite à cette étape, l'évaluation des impacts directs à la côte (longueur ou largeur des aménagements relativement à la côte) a été réalisée, à l'aide d'outils SIG, à partir des bases de données départementales sur les ouvrages et des ortho-littorales (version 2, IGN). La longueur des aménagements est fournie par les bases de données sur les ouvrages ; l'information sur la largeur des ouvrages transversaux en est par contre généralement absente mais peut être estimée, en première approche, à l'aide des ortho-photos ou des données Lidar.

Suite à l'identification et l'évaluation des longueurs de côte sous impacts directs, les zones de côte adjacentes, non ou peu artificialisées, ont été étudiées afin d'y mettre à jour d'éventuels impacts indirects dus aux aménagements voisins. Suivant les sites étudiés, ces évaluations ont été plus ou moins réalisables. Sur les côtes sableuses ou à falaises meubles, relativement rectilignes, il a été généralement possible, à partir des ortho-photos et des données LIDAR, d'identifier les zones sous impacts indirects d'aménagements. En contexte sableux estuarien, cette évaluation n'a pas été possible du fait de la relative complexité de la dynamique hydro-morpho-sédimentaire de tels sites. Pour les côtes à falaises dures, les impacts indirects peuvent être évalués si des études menées sur le long terme et dédiées à cette problématique, existent. Elles sont encore assez rares et localisées.

L'évaluation complète des longueurs sous impacts directs et indirects des aménagements présents entre Arronanches les Bains et Ouistreham a permis d'évaluer la métrique 2 (M2) pour les trois masses d'eau côtières de la zone (FRHC12, FRHC13 et FRHC14).

Il n'a pas été possible, sur les sites d'étude, de travailler à l'évaluation de la métrique 3 (modifications des vagues et courants induites par les aménagements), principalement par manque de données sur les conditions hydrodynamiques et leurs éventuelles modifications par les aménagements anthropiques. Notre choix s'est alors porté sur l'utilisation d'un modèle numérique, XBeach (Roelvink et al. 2009), pour simuler une configuration simple et idéalisée d'une plage (profil de plage uniforme, forçages hydrodynamiques constants), avec présence d'un ou plusieurs épis. La comparaison des résultats, obtenus pour les mêmes conditions sans et avec épi, permet alors de visualiser les modifications des vagues, des courants et de la morphologie de la plage induites par l'ouvrage.

Ces premiers résultats ont permis de montrer qu'un modèle numérique permettait d'évaluer l'emprise des modifications de paramètres hydro-sédimentaires qui ne sont pas observables dans la nature sans campagne d'observation spécifique. Si des mesures de terrain sont indispensables pour connaître précisément l'environnement et adapter finement les modèles, des études de modélisation relativement simples permettent de progresser sur l'évaluation de la métrique 3 à l'échelle des masses d'eau.

Aussi même si l'évaluation des impacts indirects des aménagements littoraux nécessite encore d'importants efforts de recherche, la priorité actuelle doit être l'évaluation de leur impact direct, à savoir leur emprise au sol. Il est en effet indispensable que les dimensions des ouvrages soient présentes dans les bases de données SIG dédiées. Une uniformisation à l'échelle nationale, de ces bases de données ouvrages départementales est également indispensable (même typologie et niveau d'information), notamment pour faciliter la mise en œuvre nationale des directives cadre européennes telles que la DCE ou la DCSMM.

# Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>11</b>
1.1. CONTEXTE .....	11
1.2. PROBLEMATIQUE .....	12
1.3. OBJECTIF DU PROJET .....	13
<b>2. Choix des sites d'étude et données disponibles .....</b>	<b>15</b>
2.1. INVENTAIRES DES SITES D'ETUDES POTENTIELS .....	15
2.2. DONNEES DISPONIBLES IDENTIFIEES .....	17
2.3. SITES SELECTIONNES .....	18
<b>3. Méthodologie .....</b>	<b>21</b>
3.1. IMPACTS DES AMENAGEMENTS ET DEFINITION DE LEUR ZONE D'INFLUENCE 21	
3.1.1. Les aménagements longitudinaux de haut de plage .....	21
3.1.2. Les ouvrages transversaux .....	24
3.1.3. Autres aménagements anthropiques .....	28
3.2. LES METHODES D'EVALUATION DE LA ZONE D'INFLUENCE A L'ECHELLE D'UN AMENAGEMENT .....	29
3.2.1. Zone d'impacts directs .....	29
3.2.2. Zone d'impacts indirects .....	29
3.3. DE LA ZONE D'INFLUENCE D'UN AMENAGEMENT A L'EVALUATION DES METRIQUES .....	32
3.3.1. Métrique 2 .....	32
3.3.2. Métrique 3 .....	34
<b>4. Premières évaluations des impacts hydro-morpho-sédimentaires des ouvrages sur les     sites sélectionnés .....</b>	<b>35</b>
4.1. D'ARROMANCHES A OUISTREHAM .....	35
4.1.1. Contexte .....	35
4.1.2. Evaluation des zones d'impacts .....	39
4.2. UTAH BEACH .....	55
4.2.1. Contexte .....	55
4.2.2. Evaluation des zones d'impacts .....	59
4.3. SITES A FALAISE EN SEINE-NORMANDIE : CRIEL-SUR-MER .....	70

4.3.1. Contexte.....	70
4.3.2. Evaluation des zones d'impacts.....	71
4.4. HAVRE DE SIENNE .....	75
4.4.1. Contexte.....	75
4.4.2. Evaluation des zones d'impacts.....	76
4.5. DISCUSSION ET CONCLUSION .....	85
<b>5. Etude théorique des impacts hydrodynamiques d'un épi .....</b>	<b>89</b>
5.1. CHOIX DU MODELE .....	89
5.1.1. Modèles hydrodynamiques à surface libre.....	89
5.1.2. Modèles de propagation de vagues.....	89
5.1.3. Modèles morphodynamiques.....	90
5.2. CONFIGURATION RETENUE, ANALYSE DES PREMIERS RESULTATS ET DEFINITIONS DES ZONES D'INFLUENCES.....	92
5.2.1. Description de la configuration et des conditions marines.....	92
5.2.2. Résultats préliminaires .....	95
5.2.3. Proposition de zones d'influence .....	98
5.3. COMMENT VARIE L'EMPRISE DE LA ZONE D'INFLUENCE .....	102
5.3.1. Influence des vagues.....	102
5.3.2. Dimension de l'épi .....	104
5.3.3. Nombre d'épis .....	106
5.4. CONCLUSION.....	108
<b>6. Conclusions et perspectives.....</b>	<b>109</b>
<b>7. Bibliographie.....</b>	<b>113</b>

## Liste des illustrations

Figure 1 : Situation géographique et emprise des sites d'étude sélectionnés. ....	19
Figure 2 : Effets d'un mur de protection sur une plage (les flèches symbolisent la dérive littorale et le trait en pointillé la position du trait de côte avant installation de l'ouvrage) (Paskoff, 1993). ....	22
Figure 3 : Représentation des zones d'influence relatives à la métrique 2 (flèche rouge) et à la métrique 3 (rectangle coloré). ....	24
Figure 4: Evolution du trait de côte suite à l'installation d'une jetée (la flèche blanche en mer représente la dérive littorale) (source : P.-A. Bourque sur <a href="http://www2.ggl.ulaval.ca">http://www2.ggl.ulaval.ca</a> ) .....	25

Figure 5 : Exemple d'interactions entre des épis, les vagues (lignes de crête en bleu), les courants (lignes vertes) et le trait de côte (source : P. Zbigniew sur <a href="http://www.coastalwiki.org">www.coastalwiki.org</a> ).	25
Figure 6: Représentation des zones d'influence relative à la métrique 2 (flèche rouge) et à la métrique 3 (zone colorée dégradée) (source du dessin : P.-A. Bourque sur <a href="http://www2.ggl.ulaval.ca">http://www2.ggl.ulaval.ca</a> )	27
Figure 7 : Exemple de digitalisation autour des ouvrages longitudinaux (surfaces mauves) à Mont Fleury (au Nord de Ver s/ Mer). Source des données ouvrages : DDTM14.	33
Figure 8 : Exemple de digitalisation autour des ouvrages transversaux (surfaces mauves) devant Courseulles-sur-Mer (Source des données ouvrages : DDTM14).	33
Figure 9 : Carte de situation du site d'étude entre Arromanches et Ouistreham.	36
Figure 10 : Grands ensembles morphologiques des côtes du Calvados (source : Atlas de sensibilité du littoral aux pollutions marines, 2010). Le site d'étude est délimité par un rectangle en pointillé.	37
Figure 11 : Visualisation de la masse d'eau HC13 (surface bleu clair transparent) et du trait de côte Histolitt_v2 (trait vert) au niveau du port de Courseulles-sur-Mer (fond de carte ortho-littorale_v2 IGN).	39
Figure 12 : Visualisation du port artificiel d'Arromanches-les-Bains et de la projection de celui-ci sur le trait de côte Histolitt (en vert).	41
Figure 13 : Vue de l'Ortho-littorale v2 à Tracy-sur-Mer (Source IGN). Trait jaune : ouvrage longitudinale ; trait rouge : trait de côte histolitt ; traits bleus continus : cales ; trait bleu pointillé : exutoire (source DDTM14).	42
Figure 14 : Visualisation des données LiDAR devant Asnelles (Source : RGE Alti, IGN) et des ouvrages présents (DDTM 14).	43
Figure 15 : Ortho-littorale v2 devant Asnelles (source IGN) et ouvrages présents (source DDTM 14). Les zones identifiées d'impact indirect sont représentées en pointillés.	44
Figure 16 : Visualisation des données LiDAR au niveau du port de Courseulles-sur-Mer (Source : RGE Alti, IGN). La légende des aménagements côtiers est donnée sur les figures précédentes. Zoom autour de l'exutoire en bas à gauche de la figure.	45
Figure 17 : Visualisation des données LiDAR entre Courseulles/Mer et Bernières/Mer (données RGE Alti de l'IGN). Localisation du profil topographique extrait entre A et B.	46
Figure 18 : Profil topographique de la coupe AB extrait à partir des données LiDAR IGN.	46
Figure 19 : Visualisation de l'Ortho-littorale v2 au niveau de la falaise du Cap Romain (entre Bernières/Mer et St-Aubin/Mer), source : IGN. La légende des aménagements est donnée sur la Figure 15.	47
Figure 20 : Visualisation des données LiDAR (RGE Alti, IGN) au niveau de la falaise du Cap Romain. La différence de niveau topographique est bien visible de part et d'autre de l'épi de la zone C.	48
Figure 21 : Ortho-littorale v2 (IGN) de la zone de la Baie, entre Luc/Mer et Lion/Mer. Les zones d'impacts indirects sont représentées en pointillé.	49
Figure 22 : Visualisation des données LiDAR (RGE Alti de l'IGN) et des aménagements présents dans la zone du parking de bord de mer de Colleville-Montgomery Plage.	50
Figure 23 : Profil topographique extrait des données LiDAR correspondant à la coupe AB de la figure précédente.	50
Figure 24 : Visualisation des données LiDAR (RGE Alti, IGN) à Ouistreham au niveau du terminal ferry.	51
Figure 25 : Evolution historique de la plage à l'Ouest de l'estuaire de l'Orne de 1947 à 2012 (Source : LiCCo), la plage est représentée en rouge.	52

Figure 26 : Localisation du site d'étude Utah Beach au sein des masses d'eau DCE. Source : IGN.	55
Figure 27 : Zone d'étude Utah Beach. Source : IGN.	56
Figure 28 : Evolution du trait de côte à Utah Beach entre 1947 et 2010 (en haut au Nord, en bas au Sud). Source LiCCO.	57
Figure 29 : Sites suivis par l'université de Caen dans le cadre de OLIBAN. Source : <a href="http://crec.unicaen.fr/suivi50/sl50_st.php?css=1#">http://crec.unicaen.fr/suivi50/sl50_st.php?css=1#</a>	58
Figure 30 : Evolution géomorphologique des sites suivis par l'Observatoire du Littoral Bas-Normand (OLIBAN) au niveau de la plage d'Utah Beach.	59
Figure 31 : Analyse de la base de données DDTM50 « Structure du trait de côte » au sud de la zone d'étude.	60
Figure 32 : Palissade en bois situé en pied de dune entre les accès 10 et 11 de la base DDTM50 « accès au littoral ». L'enrochement visible sur la photo b) est référencé dans la base DDTM50 « Structure du trait de côte ».	61
Figure 33 : Tracé des polygones permettant le report des secteurs de masse d'eau artificialisés par des ouvrages d'aménagements (protection, accès) sur le trait de côte Histolitt (en bleu) pour la zone d'étude Utah Beach.	62
Figure 34 : Illustration du problème lié au choix du trait de côte pour l'évaluation de l'impact direct des ouvrages littoraux pour la métrique 3.	63
Figure 35 Tracé d'un polygone permettant le report sur le trait de côte Histolitt d'un secteur d'impact indirect d'un enrochement. Source : Ortholittorale v2.	64
Figure 36 : Tracé de polygones permettant le report sur le trait de côte Histolitt des secteurs d'impact indirect d'un ouvrages de protection du trait de côte. Source : Ortholittorale v2.	65
Figure 37 : Impact indirect d'une cale sur l'altimétrie de la plage. A) vue en carte b) coupe transverse de l'altitude. Source : Ortholittorale v2 et Lidar IGN.	66
Figure 38 : Tracé des polygones permettant le report des secteurs de masse d'eau artificialisés par la conchyliculture sur le trait de côte Histolitt (en violet) pour la zone d'étude Utah Beach.	68
Figure 39 : Tracé des polygones permettant le report des secteurs de masse d'eau artificialisés par la conchyliculture sur le trait de côte Histolitt. En violet, les zones d'impact directe, les contours bleus correspondent au secteur d'impact indirect. Source : Ortholittorale v2.	69
Figure 40 : Visualisation de la zone d'étude et des ouvrages présents (source DDTM76). Fond de carte ortho-littorale v2 (IGN).	71
Figure 41 : Mesure des vitesses de recul des falaises autour de l'épi principal de Criel-sur-Mer par analyse diachronique d'ortho-photos datant de 1966, 1995 et 2008 (Source : Letortu, 2013).	72
Figure 42 : Visualisation de l'ortho-littorale v2 au niveau de Criel/Mer (au centre de l'image) et de Mesnil Val Plage (au nord-est de l'image).	73
Figure 43 : (a) Vue aérienne de la falaise (T. Dewez 5 oct. 2010) précisant la position des deux plus gros éboulements A et B enregistrés entre décembre 2005 et avril 2008 par scanner laser terrestre. (b) Cartes des fréquences d'éboulement sur la falaise dans l'intervalle entre décembre 2005 et avril 2008.	74
Figure 44 : Zone d'étude Havre de Sienne. Sources : IGN et DDTM50.	76
Figure 45 : Passerelle en bois située à la pointe d'Agon. Source Google Street view	77
Figure 46 : Présence d'une exploitation agricole au niveau du trait de côte.	77

Figure 47 : Complément de la base DDTM 50 « Structure du Trait de côte » par des secteurs artificialisés comme cette habitation jouxtant le trait de côte dans le Havre de Sienna.....	78
Figure 48 : Pont en ruine et secteur d'habitation au niveau du trait de côte. Source Google Street view.....	78
Figure 49 : Présence de zones artificialisées non cartographiées dans les bases DDTM50 .....	79
Figure 50 : Flèche sableuse de Hauteville au sud de l'embouchure du Havre de Sienna .....	80
Figure 51 : Report des zones de la masse d'eau artificialisée par des ouvrages d'aménagements (protection, portuaire, accès) sur le trait de côte Histolitt (en bleu) pour la zone d'étude Havre de Sienna. ....	82
Figure 52 : Report des zones de la masse d'eau artificialisée par la conchyliculture et les pêcheries sur le trait de côte Histolitt (en rose) pour la zone d'étude Havre de Sienna. ...	84
Figure 53 : Report des zones de la masse d'eau artificialisée sur le trait de côte Histolitt (en violet) pour la zone d'étude Havre de Sienna. ....	85
Figure 54 : Topo-bathymétries initiales uniformes le long de la côte pour les configurations initiales (a) sans et (b) avec épi et (c) profil initial transversal associé.....	94
Figure 55 : Résultats obtenus sans (colonne 1) et avec un épi de 78 m (colonne 2) après 7h simulées ; 1 <sup>ere</sup> ligne : champs de courants, 2 <sup>ème</sup> ligne : hauteurs de vagues, 3 <sup>ème</sup> ligne : topo-bathymétrie finale, pour les conditions de forçage de références (voir paragraphe précédent). ....	96
Figure 56 : Comparaison des premiers résultats avec et sans épi. ....	97
Figure 57 : Surface de modifications des courants, adimensionnée par la longueur de l'épi au carré, fonction de l'écart relatif des courants entre les configurations avec et sans épi. ....	99
Figure 58 : Longueur de modifications des courants à la côte, adimensionnée par la longueur de l'épi, en fonction de l'écart relatif des courants entre les configurations avec et sans épi. ....	100
Figure 59 : Schéma explicatif de la définition de la surface où les courants sont modifiés (A) et de la longueur (L) où les échanges sédimentaires sont modifiés par la présence de l'épi. ....	102
Figure 60 : Variation de A (à gauche) et de L (à droite) en fonction de la hauteur des vagues. ....	102
Figure 61 : Variation de A (en haut à gauche) et L (en bas à droite) en fonction de l'angle d'incidence des vagues. En bas, contour des surfaces d'écarts relatifs supérieurs à 30 % pour les 3 incidences des vagues correspondantes. ....	104
Figure 62 : Surface en m <sup>2</sup> (à gauche) et longueur à la côte en m (à droite) pour lesquelles les courants sont modifiés de plus de 30% par la présence de l'épi. ....	105
Figure 63 : Variation de A (à gauche) et L (à droite) en fonction de la longueur de l'épi.....	105
Figure 64 : Champs de courants (en m/s, à gauche) et topobathymétrie obtenue (cote en m, à droite) après 7 h simulée pour 3 épis. ....	106
Figure 65 : Ecart relatif en % des vitesses de courant entre la configuration avec et sans les 3 épis. ....	107

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Sites d'études potentiels identifiés lors de la réunion de lancement du projet. ....	16
--	----

Tableau 2 : Type, nombre et longueur cumulée des aménagements présents sur le site d'étude. (Source : DDTM 14) ; T : ouvrage transversal, L : ouvrage longitudinal. ....	38
Tableau 3 : Résultats de la métrique 2 et comparaison avec les taux d'artificialisation calculé avec EUROSION pour les 3 masses d'eau de la zone d'étude. ....	53
Tableau 4 : Evaluation de la zone d'influence des aménagements relative à la métrique 2 pour la zone d'étude Utah Beach.....	67
Tableau 5 : Evaluation de la zone d'influence des aménagements relative à la métrique 2 pour la zone d'étude à Criel/Mer. ....	75
Tableau 6 : Evaluation de la zone d'impacts directs des aménagements relative à la métrique 2 pour la zone d'étude au Havre de Sienne (ND : non déterminé).....	83

## Liste des annexes

Annexe 1 Paramètres XBeach .....	117
----------------------------------	-----

# 1. Introduction

## 1.1. CONTEXTE

Depuis plusieurs années, le BRGM participe aux réflexions sur le volet hydromorphologie des masses d'eau littorales (côtières et de transition) de la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE). Cette directive demande de classer, tous les 6 ans, l'état hydromorphologique (restreint à la détermination du très bon état ou non très bon état) de ces masses d'eau via un programme de surveillance. Ce classement consiste à évaluer le niveau de perturbations des paramètres « hydromorphologiques » (liés à la bathymétrie, à la structure et nature du fond et à l'hydrodynamique) induit par les pressions anthropiques (différentes activités, aménagements,...) présentes en zone littorale et en amont.

En France, pour le premier plan de gestion de la DCE, l'état des connaissances sur les pressions présentes et les données disponibles ne permettaient pas de mettre en place un programme de surveillance hydromorphologique des masses d'eau littorales. Une méthode simplifiée d'évaluation de l'état hydromorphologique, à dire d'expert, a donc été élaborée. Chaque masse d'eau est ainsi décrite selon les pressions qui s'y exercent et dans la limite de la connaissance, selon les perturbations induites par ces pressions sur l'hydromorphologie. Une notation de l'intensité et de l'étendue des perturbations induites par chacune des pressions listée est réalisée à dire d'expert, et assortie d'une note de fiabilité qui reflète si ce dire d'expert est consolidé par des données existantes. Ces notations sont ensuite agrégées selon une grille de classement. Celle-ci combine les notes d'étendue et d'intensité des perturbations induites par les pressions, ce qui permet d'identifier si la masse d'eau considérée est en très bon état hydromorphologique (état totalement ou presque totalement non perturbé) ou non.

Cette méthode, appliquée en métropole et dans les DOM pour le premier plan de gestion, a permis d'identifier les pressions présentes dans chaque masse d'eau et de les hiérarchiser, à dire d'expert, suivant les perturbations hydromorphologiques qu'elles induisent. Les résultats obtenus en métropole, pour les masses d'eau côtières (MEC), indiquent que plus de 60 % des pressions ayant déclassé le très bon état hydromorphologique concernent les aménagements anthropiques permanents (aménagement du trait de côte, ports, routes, ouvrages de protection, terres gagnées sur la mer...).

Cette méthode présente un inconvénient majeur : elle ne répond pas à la demande de la DCE qui spécifie que l'état hydromorphologique doit être évalué via une surveillance, basée sur le calcul d'indicateurs. De plus, l'utilisation quasi-exclusive du dire d'expert est problématique.

Pour le deuxième plan de gestion, le BRGM a donc été chargé par l'ONEMA de mettre en place une méthode de surveillance pour les masses d'eau côtières (MEC), répondant aux demandes de la DCE et permettant de s'affranchir au maximum du dire d'expert. Un travail de réflexion et de recherche d'indicateurs ou de métriques a donc été mené et cinq métriques de pressions ont été retenus (Brivois et Vinchon, 2013) à savoir :

- M1 (Pertes d'habitats) : la surface des espaces marins perdus (aménagements)/surface de la masse d'eau ;
- M2 (Modification des échanges sédimentaires à la côte) : le pourcentage de longueur de linéaire côtier de chaque masse d'eau où la sédimentation est modifiée (érosion, accrétion) par la présence d'aménagements ou d'interventions anthropiques (rechargement, exploitation, etc.) ;

- M3 (Modification des courants et des vagues) : le pourcentage de surface de chaque masse d'eau pour laquelle l'hydrodynamique (courants, vagues) est modifiée.
- M4 (Perturbation des fonds) : la surface au fond où sa nature et/ou sa bathymétrie sont modifiées par l'exploitation des ressources marines (extraction de granulats, dragage/clapage, conchyliculture, pêche) par rapport à la surface de la masse d'eau ;
- M5 (Modification des apports des bassins versants) : les modifications des débits liquide et solide à l'exutoire des tributaires en eau douce des masses d'eau côtières sont évaluées via les probabilités d'altérations des paramètres DCE des cours d'eau (« continuité sédimentaire » et « régime hydrologique-quantité ») calculées dans SYRAH\_CE (Valette et al., 2012).

Dans ce contexte de mise en place de la surveillance hydromorphologique, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie a proposé au BRGM, en 2013, de financer un projet de test et de développement sur les méthodes d'évaluation des métriques précédemment citées (métriques M2 et M3 sur les zones d'influence des ouvrages notamment).

## 1.2. PROBLEMATIQUE

Les résultats du classement de l'état hydromorphologique du premier plan de gestion, à dire d'expert, montrent que l'artificialisation (présence d'aménagements anthropiques construits en dur et permanents) des côtes a été identifiée comme la source principale de déclassement des MEC (masse d'eau côtières). C'est pourquoi les travaux actuels, menés par le BRGM, cherchent en priorité à quantifier l'artificialisation des côtes de chaque masse d'eau et la présence d'ouvrages qui fixent ou perturbe le fonctionnement du littoral.

Plusieurs approches peuvent être proposées pour quantifier la présence d'ouvrages et leurs impacts dans les masses d'eau côtières :

- Compter les ouvrages présents par types et leur longueur cumulée dans chaque masse d'eau. Cela est fait dans certains départements français, à l'échelle du département.
- Sommer les longueurs de tous les ouvrages (longitudinaux et transversaux) et comparer cette longueur à celle du trait de côte de la masse d'eau concernée. Le problème de cette approche est qu'elle ne distingue pas les secteurs où les deux types d'ouvrages sont présents, ou absents, simultanément et peut amener à des taux supérieurs à 100%.
- Evaluer un taux d'artificialisation de la côte, comme l'a fait MEDAM ([www.medam.org](http://www.medam.org)). Dans ce cas, la longueur cumulée des ouvrages longitudinaux est sommée aux largeurs cumulées des ouvrages transversaux (lorsque ces deux types d'ouvrages ne sont pas présents ensemble ; on prendra la longueur des ouvrages longitudinaux seuls sinon) et le tout est divisé par la longueur de côte considérée. Ce taux d'artificialisation obtenu représente donc le pourcentage de longueur de côte « construit » ou artificiel dans le sens où les matériaux présents ne sont pas naturels à cet endroit (matériaux bétonnés, enrochements, bois,...). Il ne tient pas compte des modifications ou de « l'artificialisation » des échanges sédimentaires à la côte induit par ces ouvrages (accroissement de l'érosion, de l'accrétion, fixation du trait de côte...).
- Evaluer la surface modifiée par l'action anthropique en comparant les traits de côte anciens, figurés sur les cartes anciennes, avec les traits de côte actuels (au niveau des zones de terres artificiellement gagnées sur la mer). Cette dernière approche a été retenue pour établir la métrique M1 qui traite des espaces marins perdus.
- Considérer l'emprise des modifications induites par l'artificialisation sur les flux sédimentaires. Il s'agit de comparer les zones sous influence d'aménagements artificiels à la longueur totale de la côte de la masse d'eau côtière. Cette approche, utilisée par les

anglais d'une façon simplifiée (Freeman et al., 2005), fournit une information globale sur le pourcentage de longueur de côte où des modifications hydromorphologiques sont présentes (et sur le pourcentage de côte où les échanges sédimentaires sont « naturels »).

Cette approche, qui prend en compte la notion de zone d'influence des aménagements, a été retenue pour développer les métriques 2 et 3 de la DCE.

Les premières approches citées, visant à recenser et à cartographier les ouvrages et l'artificialisation apparaissent toutefois comme des étapes préalables et indispensables au travail de détermination des zones d'influence des ouvrages littoraux et marins.

### **1.3. OBJECTIF DU PROJET**

Ce projet vise à développer et à tester une méthode d'évaluation des zones d'influence, relatives aux métriques 2 et 3, de certains types d'aménagements côtiers sur le littoral Normand.

Cette méthode d'évaluation des zones d'influence à l'échelle de quelques aménagements sera ensuite appliquée à une échelle plus large, pour quelques masses d'eau côtières, afin d'en déterminer la métrique 2.

L'approche suivie se décline en quatre tâches :

- 1. Inventaire des sites potentiels ;
- 2. Inventaire et recueil des données et études existantes, choix des sites ;
- 3. Evaluation des impacts hydro-morpho-sédimentaires des ouvrages sur les sites sélectionnés ;
- 4. Analyse des résultats et estimation, dans la mesure du possible, des métriques 2 et 3 de la surveillance hydromorphologique DCE pour quelques masses d'eau du bassin Seine-Normandie.

Dans le chapitre 2, le choix des sites et les données recueillies seront détaillés. Les bases méthodologiques sont ensuite présentées dans le chapitre 3, puis des tests visant à déterminer les zones d'influences des ouvrages sur les sites sélectionnés sont réalisés dans la 4<sup>ème</sup> partie. Dans la 5<sup>ème</sup> partie, les impacts d'un épi seront étudiés via des simulations numériques sur un site théorique. Le chapitre 6 conclura et présentera les perspectives de ces travaux.



## 2. Choix des sites d'étude et données disponibles

Cette étape, d'identification des sites d'études potentiels, des données et des études existantes, ne peut se faire de façon efficace sans le concours des experts et acteurs locaux. La réunion de lancement du projet fut l'occasion de réunir un certain nombre d'experts dans ce but.

### 2.1. INVENTAIRES DES SITES D'ETUDES POTENTIELS

La réunion de lancement du projet, qui s'est déroulée le 4 juillet 2014 à Honfleur (dans les locaux de l'Agence de l'Eau), a permis de réunir des représentants de divers organismes : Stéphanie Pédron (AESN SLM), Julien De Bortoli (AESN SLM), Manuel Sarraza (AESN DTRBN), Stéphane Costa (ROLNP et Univ. Caen), Patrice Meurdra (DDTM14), Loïc Le Louargant (CG76), Didier Pennequin (BRGM HNO), Franck Desmazes et Olivier Brivois (BRGM Orléans).

Ont également été invités, mais n'ont pu être présents : Eric Pain (DDTM50), Benoit Vittecoq (BRGM BNO), Nathalie Pfeiffer (ROLNP), Arnaud Thulie (Conservatoire du littoral).

Lors de cette réunion, après la présentation du matin orientée vers l'hydromorphologie et les besoins de la DCE, l'après-midi a été consacré à l'inventaire des sites d'étude potentiels.

Lors du classement de l'état hydromorphologique des masses d'eau côtières (MEC) de Seine-Normandie, réalisé à dire d'expert pour le premier plan de gestion, un certain nombre de MEC ont été « déclassées » du très bon état hydromorphologique par la présence d'artificialisation et/ou d'ouvrages de défenses transversaux. Comme point de départ à la discussion, ces masses d'eau (FRHC03, FRHC09, FRHC12, FRHC15 et FRHC16) et les ouvrages présents ont donc été proposés comme pouvant permettre d'identifier des sites d'études potentiels pour ce projet. D'autres propositions de sites d'étude faites par l'AESN ont également servi de base de discussions : Régneville, secteur au sud de St Pair sur Mer, Villerville, secteur d'Utah Beach, secteur de Brévands (Baie des Veys), digue d'Antifer, aménagements portuaires (Fécamp, Dieppe, Le Tréport) ou aménagements EDF (Penly ou Paluel) et l'estuaire de la Saane.

Certains des sites proposés par l'AESN sont dans des masses d'eau de transition –MET– (FRHT06, FRHT03) qui ne sont normalement pas concernées par la surveillance hydromorphologique des MEC. Néanmoins, certains de ces sites pourront être considérés dans le projet, au même titre que les sites des MEC, s'ils permettent une avancée sur l'évaluation de l'impact hydromorphologique des aménagements présents.

Le Tableau 1 présente les 18 sites proposés, la masse d'eau DCE correspondante à ces sites et les enjeux identifiés par le groupe de travail (la dernière colonne précise les sites pré-identifiés par l'AESN). A noter que le choix de ces sites a aussi été guidé par l'existence de données ou d'études dont les experts locaux avaient connaissances.

Masse d'Eau	Site	Enjeux	Pré-sélection AESN
FRHC18 Pays de Caux Nord (dept. 76)	Estuaire de la Saane	Epis et ré-estuarisation	oui
	Port de Dieppe	Transit sédimentaire stoppé. Possibilité d'étudier un de ces sites et de transposer les résultats aux autres	oui
	Centrale de Penly		oui
	Criel s/ Mer		
FRHC17 Pays de Caux Sud (dept. 76)	Centrale de Paluel		oui
FRHC16 Le Havre Antifer (dept. 76)	Digue d'Antifer	Transit sédimentaire stoppé	oui
FRHC12 Côte de Nacre Ouest (dept. 14)	Asnelles et Est-Asnelles	Nombreux ouvrages (épis, digues)	
FRHC10 Baie des Veys (dept. 14 et 50)	Cricqueville en Bessin	Confortement de falaise	
	Utah Beach	Erosion aggravée par enrochements et accès à la mer	oui
FRHC09 Anse de St-Vaast-la-Hougue (dept. 50)	Port de St-Vaast et linéaire côtier de la MEC	Forte artificialisation (port et murs). MEC déclassée par dire d'expert → à vérifier	
FRHC03 Ouest Cotentin (dept. 50)	Régneville s/Mer, Hauteville s/Mer	Présence de défenses linéaires, forte érosion	oui
	Barneville-Carteret	Aménagements récents, érosion/accrétion	
FRHC02 Baie du Mont-St-Michel : centre baie (dept. 50)	Sud de St Pair s/Mer (Jullouville-Kairon Plage)	Erosion de la plage devant les enrochements	oui
FRHT06 Baie des Veys, fond de baie estuarien (dept. 14 et 50)	Grancamp	Nombreux ouvrages (épis, digues, cale)	
	Brévands	polders	oui
FRHT05 Baie du Mont-St-Michel, fond de baie estuarien (dept. 50)	Sélune	Effacement du barrage	
FRHT04 Estuaire de l'Orne (dept. 14)	Ouistreham	Projet d'extension terminal ferry	
FRHT03 Estuaire de Seine Aval (dept. 14)	Villerville	Présence de digues et enrochements + projet de confortement de digue	oui

Tableau 1 : Sites d'études potentiels identifiés lors de la réunion de lancement du projet.

## 2.2. DONNEES DISPONIBLES IDENTIFIEES

Pour l'ensemble de ces 18 sites, nous avons systématiquement cherché à identifier et/ou collecter les données et études existantes. Pour cela, nous avons pris contact avec les différents organismes impliqués :

- Les services déconcentrés de l'état au niveau départemental (DDTM de la Manche, du Calvados et de la Seine-Maritime) et régional (DREAL de Haute et Basse Normandie) ;
- Le ROLNP (Réseau d'observatoire du Littoral Normand et Picard) ;
- Des universitaires (S. Costa et O. Maquaire) ;
- Le syndicat mixte du Port de Dieppe.

Différentes études ont été collectées :

- Des études d'impacts (EI) :
  - EI relative à l'allongement de la jetée ouest du port de Dieppe ;
  - EI de la centrale de Penly (1979) consultée à la DML de Dieppe ;
  - EI du projet d'extension du terminal ferry d'Ouistreham (SOGREAH, 2010) ;
  - EI de la cale de Grancamp (Anteagroup, 2013).
- Des études locales relatives aux aménagements : à Criel s/Mer (données consultées aux Archives Départementales de Rouen), à Asnelles (Diagnostic et analyse de l'efficacité des épis transversaux (ISL, 2014), plans des défenses contre la mer).
- Des données du projet LiCCo « Littoraux et Changements Côtiers » (programme Interreg IVA France-Angleterre) :
  - Les planches présentant les principaux résultats du projet sur les 5 sites d'études (Havre de Sienne, Baie des Veys, Estuaire de l'Orne, Vallée de la Saône, Val de Saire), téléchargeables en ligne (<http://www.licco.eu/?lang=fr>);
  - Les levés Lidar et traits de côtes historiques des sites Havre de Sienne et Estuaire de l'Orne.
- Des études et publications issues de projet de recherche et d'étude partenariale :
  - GRESARC (université de Caen Basse-Normandie), 2002. Suivi de l'évolution des côtes du département du Calvados, novembre 1995 – février 2002, Analyses. Etude financée par le Conseil Général du Calvados ;
  - GRESARC, 1997. Etude des risques liés à l'érosion et à la submersion du littoral du Calvados. Etude financée par le Conseil Général du Calvados ;
  - Les travaux de Stéphane Costa (université de Caen Basse-Normandie) sur différents sites en Seine-Maritime.
- L'étude de Augris et al. (2004) sur l'évolution morpho-sédimentaire du domaine littoral et marin de la Seine-Maritime.
- Les atlas POLMAR départementaux.
- Les traits de côtes OLIBAN « Observatoire du Littoral de Basse-Normandie » (CREC-UCBN, données téléchargeables en lignes : <http://crec.unicaen.fr/mapcrec/Map/?Select=1>).
- Le suivi de l'évolution des plages et du trait de côte de la Manche (CREC-UCBN : [http://crec.unicaen.fr/suivi50/sl50\\_pres.php?css=1](http://crec.unicaen.fr/suivi50/sl50_pres.php?css=1)).
- Les données Lidar terrestre de l'IGN sur tous les sites.

A noter que les bases de données départementales SIG sur les ouvrages littoraux avaient déjà été collectées par le BRGM, dans le cadre de la mise en place de la surveillance hydromorphologique (projet financé par l'ONEMA), auprès des DDTM Manche, Calvados et Seine-Maritime.

### 2.3. SITES SELECTIONNES

Le dimensionnement du projet permet d'étudier 4 à 5 secteurs d'étude parmi les 18 sites initialement identifiés par le groupe de travail.

Le choix de ces sites a été guidé par différents éléments :

- La nécessité de considérer différents types d'aménagements (longitudinaux, transversaux) et différents types de côte (sableuse, à falaise) présents en Normandie.
- La configuration du site d'étude. Pour étudier la zone d'influence d'un aménagement, il est nécessaire que des zones non artificialisées soient présentes autour de celui-ci. On cherchera donc des sites d'étude présentant successivement des zones avec aménagements et sans.
- L'existence de données pertinentes vis-à-vis de notre problématique (relatives aux ouvrages par exemple).

Mais, dans le but de proposer une ou des méthodes d'évaluation des zones d'influence des ouvrages applicables, si possible, à n'importe quel site au niveau national, il est aussi important de travailler sur des sites pour lesquels les seules données disponibles sont à minima les données existantes à l'échelle nationale (ortho-photos, données Lidar terrestre IGN, par exemple).

Ces différentes considérations nous ont amenés à choisir les 4 sites suivants :

- Un secteur très artificialisé situé entre Arromanches-les-Bains et Ouistreham (Calvados) ;
- La plage sableuse peu artificialisée d'Utah Beach (Manche est) ;
- Un secteur de falaises influencées par des ouvrages à Criel s/ Mer (Seine Maritime) ;
- Une embouchure, le Havre de Sienne (Manche ouest).

La situation géographique et l'emprise de ces différents sites est présentée sur la figure suivante.

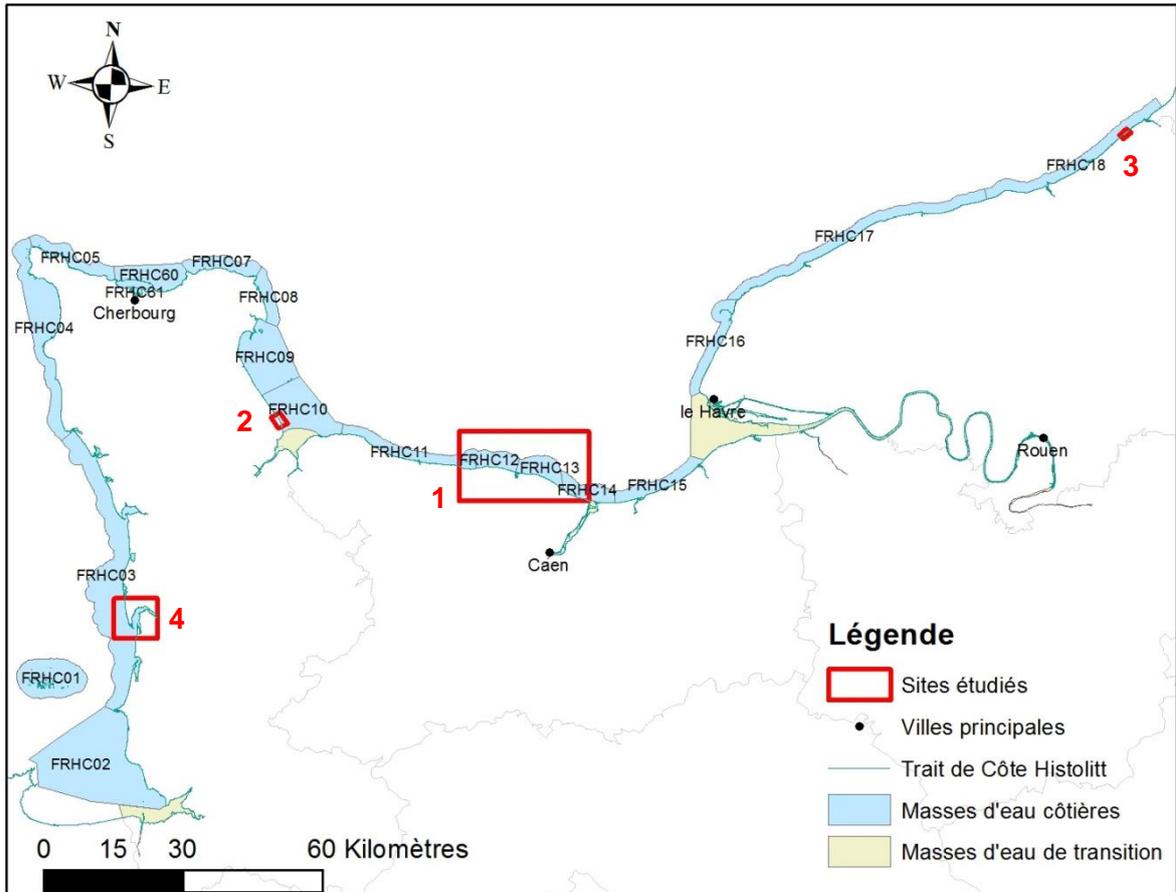


Figure 1 : Situation géographique et emprise des sites d'étude sélectionnés.



## 3. Méthodologie

### 3.1. IMPACTS DES AMENAGEMENTS ET DEFINITION DE LEUR ZONE D'INFLUENCE

L'installation d'une structure artificielle en domaine côtier va avoir, sur le site où elle est implantée, des effets, sur le milieu naturel et sur son évolution.

Ces effets seront de natures et d'intensités différentes, suivant le type d'aménagement, ses caractéristiques physiques (géométriques, matériaux,...) et les conditions hydro-morpho-dynamiques locales.

Ces effets pourront aussi fortement varier dans le temps, à partir de la date d'installation de la structure et/ou annuellement si les conditions hydrodynamiques présentent des variations saisonnières importantes (changement de sens de la dérive littorale entre les conditions de houle d'été et d'hiver par exemple).

Ainsi, par exemple, Alleman (2013) a montré, pour deux ports méditerranéens présentant d'importantes jetées transversales à la côte, que l'engraissement en l'amont-transit a été relativement fort sur une courte période après la construction de l'ouvrage (< 10 ans) et s'est stabilisé ensuite ; alors que l'érosion en aval-transit a continué à se développer sur une vingtaine d'années.

L'aspect temporel est donc très important lorsqu'on s'intéresse aux perturbations induites par des aménagements côtiers. Suite à une construction récente d'aménagement, certains effets peuvent rester invisibles à court terme et n'être visibles qu'à moyen ou long terme. La date de construction d'un aménagement et sa durée de vie sont donc des éléments importants pour évaluer ses impacts.

Dans cette étude, nous considérons que la zone d'influence d'un aménagement correspond à la zone géographique où l'aménagement a un effet hydro-morpho-sédimentologique.

Cette notion de zone d'influence des aménagements est décrite ci-après en détaillant les impacts hydro-morpho-sédimentaires attendus pour les 2 principaux types d'aménagements rencontrés sur le littoral de Seine-Normandie : les ouvrages longitudinaux de haut de plage (perré, mur de soutènement,...) et les ouvrages transversaux (épi, jetée portuaire,...).

Nous ne parlerons pas ici des ouvrages longitudinaux de bas de plage et petits fonds, aussi dénommés brise-lames, car ce type d'ouvrage est relativement peu présent sur les côtes normandes.

#### 3.1.1. Les aménagements longitudinaux de haut de plage

##### ***Généralités et impacts observés/attendus***

Ce type d'ouvrage est disposé, en ligne, parallèlement à la côte sur la limite haute de l'estran et généralement enfoui sur une grande partie de sa hauteur. Lorsqu'il est placé contre le pied de dune, il la protège des actions de la mer, en s'opposant aux attaques frontales des vagues et des courants. Il fixe le trait de côte.

Ces ouvrages peuvent aussi être de simples murs séparant la plage et la ville sans changement de topographie. Si les niveaux entre la plage et l'arrière-plage sont différents, on parle alors de perré.

Ces ouvrages peuvent être constitués de différents matériaux : en maçonnerie, en bétons, en enrochements (naturels ou blocs artificiels), voire en gabions, en rideaux de palplanches en bois ou en géotextiles...

De façon générale, les ouvrages longitudinaux, qui présentent une paroi quasi verticale ou très fortement inclinée, ont tendance à augmenter la réflexion de la houle. En se réfléchissant la houle crée un clapotis qui augmente le niveau d'agitation et l'intensité des courants qui circulent au pied de la zone artificialisée, accentuant ainsi le phénomène d'érosion (affouillement au pied de l'ouvrage).

Pour les plages sableuses, ce type d'ouvrage a pour conséquence d'entraîner une érosion, un abaissement du profil de plage et une diminution de sa largeur. Ces phénomènes sont provoqués par les effets de réflexion des vagues et de clapots à leur pied (B, Paskoff, 1993). Dans certaines situations, ce type d'ouvrage peut aussi aggraver les tendances naturelles de recul du trait de côte dans les zones adjacentes non protégées. Pour une côte présentant une dérive littorale nette et relativement importante, l'érosion naturelle à l'amont de l'ouvrage continuera sans réduction, tandis qu'à l'aval le recul du trait de côte pourra être accentué par la présence de l'aménagement (Figure 2A), entraînant une configuration de la côte dissymétrique de part et d'autre de celui-ci.

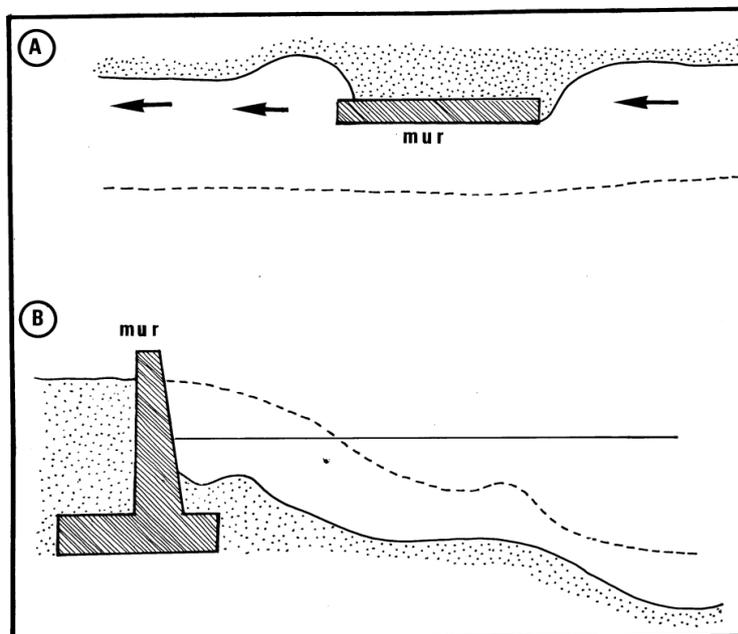


Figure 2 : Effets d'un mur de protection sur une plage (les flèches symbolisent la dérive littorale et le trait en pointillé la position du trait de côte avant installation de l'ouvrage) (Paskoff, 1993).

## ***Zone d'influence des aménagements longitudinaux de haut de plage***

Ce type d'ouvrage induit différentes modifications hydro-morpho-sédimentologiques sur et autour de la zone où il est implanté. Ces modifications seront différenciées en impacts directs et impacts indirects, la zone d'influence de l'ouvrage étant la zone pour laquelle l'ensemble de ces impacts se produisent.

### Impacts directs :

On entend par impact direct les modifications de topographie et de nature de substrat induites par l'ouvrage lui-même, sur la zone où il est implanté (recouvrement/étouffement du substrat naturel par des matériaux non présents initialement).

### Impacts indirects sur l'hydrodynamique et les caractéristiques morpho-sédimentaires :

Ces impacts directs vont à leur tour induire des effets sur l'hydrodynamique locale de la zone. La présence d'une paroi verticale ou oblique en matériau dur va avoir tendance, comme nous l'avons vu précédemment, à accroître la réflexion des houles et l'intensité des courants devant l'ouvrage.

Ces modifications hydrodynamiques vont alors modifier le transport sédimentaire et l'évolution morphodynamique de la zone autour de l'aménagement. L'érosion va alors s'accroître devant l'ouvrage, entraînant un abaissement de l'estran, ainsi qu'à ses extrémités (interface dur-mou), par diffraction des houles notamment. Ces modifications morphodynamiques vont bien sûr interagir avec l'hydrodynamique et vice-versa.

L'ensemble de ces modifications (hydrodynamiques, morphodynamiques et morphologiques), induites par la présence de l'aménagements autour de celui-ci, est dénommé impacts indirects.

Ainsi, les zones d'influence de ces aménagements sont à considérer dans l'évaluation des métriques 2 et 3 :

- La métrique 2 est la longueur de côte où la sédimentation est modifiée par la présence d'aménagements par rapport à la longueur totale de linéaire côtier de chaque masse d'eau. La zone d'influence de l'aménagement longitudinal pour cette métrique correspond à la longueur de l'ouvrage le long de la côte (impact direct) à laquelle on ajoute, l'impact indirect, les longueurs des zones adjacentes pour lesquelles l'érosion est accrue ou diminuée (Figure 3).

Cette métrique peut s'exprimer sous la forme :

$$M2 = \frac{\sum_{\text{aménagements}}(\text{Longueur}(\text{Impacts Directs}) + \text{Longueur}(\text{Impacts Indirects}))}{\text{Longueur Trait de Côte de la MEC}}$$

- La métrique 3 est la surface pour laquelle l'hydrodynamique est modifiée par la présence d'ouvrage par rapport à la surface de la masse d'eau. La zone d'influence de l'aménagement longitudinal pour cette métrique correspond à l'emprise surfacique au sol de l'aménagement (impact direct) à laquelle on ajoute la zone devant l'ouvrage où la propagation des vagues et les courants est modifiée, incluant les zones de modifications morphologiques de part et d'autre de l'ouvrage (impact indirect).

De même que précédemment, cette métrique peut s'écrire :

$$M3 = \frac{\sum_{\text{aménagements}} (\text{Surface}(\text{Impacts Directs}) + \text{Surface}(\text{Impacts Indirects}))}{\text{Surface de la MEC}}$$

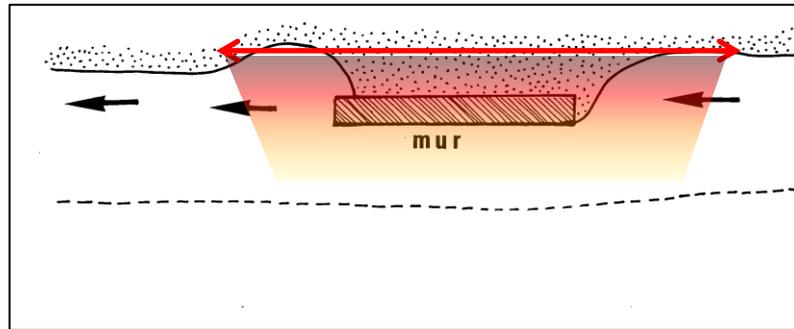


Figure 3 : Représentation des zones d'influence relatives à la métrique 2 (flèche rouge) et à la métrique 3 (rectangle coloré).

Remarque importante : dans le cas où les impacts indirects de différents aménagements se chevaucheraient spatialement, il conviendra de ne considérer qu'une fois la zone impactée dans l'évaluation des métriques.

### 3.1.2. Les ouvrages transversaux

#### Généralités et impacts attendus

Les ouvrages transversaux peuvent avoir plusieurs fonctions initiales. Il peut s'agir d'un ouvrage de défense contre l'érosion, un épi, mais aussi d'un aménagement portuaire tel qu'une jetée, voire d'une cale (pour accéder à la mer) ou d'aménagements hydrauliques, tels que des exutoires (s'ils ne sont pas totalement enfouis). Dans le cas d'ouvrage de protection du trait de côte, ils ont pour but d'arrêter, au moins partiellement, le transport sédimentaire et sont généralement mis en œuvre lorsque la dérive littorale est responsable d'un transport sédimentaire parallèlement à la côte.

Il existe de nombreux types d'épis, qui se distinguent, soit d'après leurs caractéristiques fonctionnelles (épis courts, épis longs, épis perméables...), soit d'après leur matériaux (enrochements, maçonnerie et béton, béton armé, palplanches métalliques, bois, pieux, géotextiles,...) ou encore leur forme (droit, en L, en T). Il semble cependant que l'enrochement soit la structure la plus répandue pour les épis construits récemment.

Les épis ont pour but de réduire, voire d'interrompre, le transit littoral. Leur présence, en bloquant le transit sédimentaire, provoque donc une zone d'accrétion en amont dérive et à l'inverse, provoque une zone d'érosion en aval dérive par déficit sédimentaire (voir Figure 4).

L'utilisation de plusieurs épis successifs permet de cloisonner le littoral en évitant le départ des sédiments en aval dérive. Dans le cas d'une direction de transit dominant, la ligne de rivage qui s'établit à l'amont de l'épi est oblique par rapport au trait de côte initial. Lorsqu'il n'y a pas de sens de transit prédominant, la ligne de rivage tend à se disposer en un arc de cercle symétrique. L'installation d'un épi isolé sur un site déplace souvent vers l'aval dérive les problèmes d'érosion, on a donc souvent recours à plusieurs épis installés en batterie. Ces batteries d'épis peuvent permettre de ralentir le recul du trait de côte dans la zone aménagée.

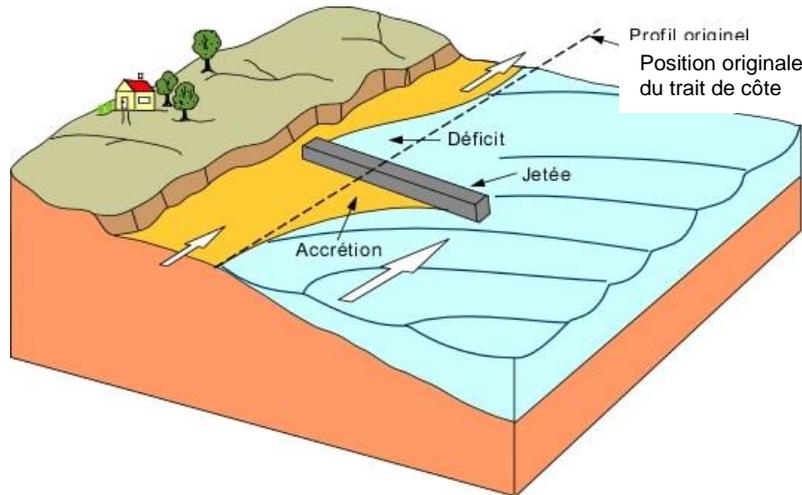


Figure 4: Evolution du trait de côte suite à l'installation d'une jetée (la flèche blanche en mer représente la dérive littorale) (source : P.-A. Bourque sur <http://www2.ggl.ulaval.ca>)

Les épis modifient aussi les courants cross-shore (perpendiculairement à la côte). En effet, l'eau qui est apportée à la côte par les vagues, est piégée dans les alvéoles créées par les épis. Elle ne peut alors retourner au large qu'en créant des cellules de circulation et des courants dits sagittaux (Figure 5). Ces cellules de circulation et courants sagittaux peuvent transporter du sable du haut de plage vers le large et avoir un effet érosif.

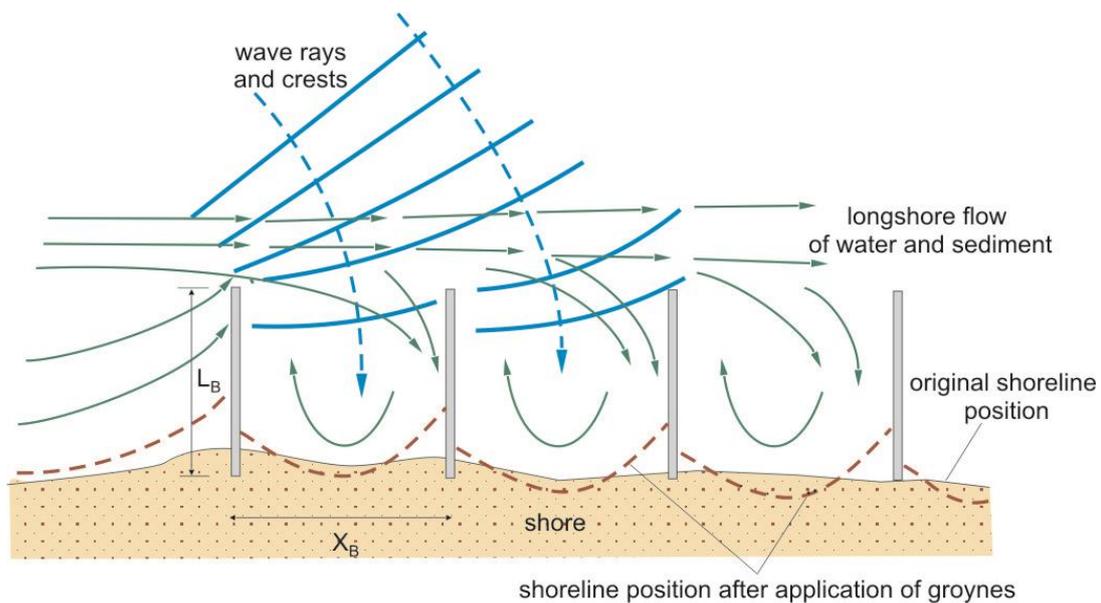


Figure 5 : Exemple d'interactions entre des épis, les vagues (lignes de crête en bleu), les courants (lignes vertes) et le trait de côte (source : P. Zbigniew sur [www.coastalwiki.org](http://www.coastalwiki.org)).

## **Zone d'influence des aménagements transversaux**

Comme précédemment, nous distinguerons au sein de la zone d'influence les impacts directs et les impacts indirects.

### Impacts directs :

On entend par impact direct les modifications de topographie et de nature de substrat induites par l'ouvrage lui-même, sur la zone où il est implanté (recouvrement/étouffement du substrat naturel par des matériaux non présents initialement). Suivant les matériaux utilisés pour construire l'ouvrage, son emprise pourra être relativement importante (plusieurs dizaines de mètres carrés, voire plus, pour une jetée, un épi en enrochement, ...) à faible ( $< 10 \text{ m}^2$ ), dans le cas d'épis en palplanche (en bois ou en métal) par exemple.

### Impacts indirects sur l'hydrodynamique et la morphodynamique :

Alors que les impacts directs d'un tel ouvrage peuvent être réduits, les impacts indirects, par contre, peuvent être beaucoup plus étendus.

Lorsque les houles arrivent à la côte avec un angle d'incidence, leur déferlement crée un courant parallèle à la côte, la dérive littorale. L'installation d'un aménagement transversal va modifier la propagation des vagues et créer une zone d'ombre pour laquelle les houles seront très réduites en aval de l'ouvrage. Dans le même temps, au droit de l'obstacle, la dérive littorale va être interrompue le long de la côte et détournée plus au large. Le transit sédimentaire induit par la dérive littorale va donc être fortement modifié autour de l'ouvrage ; les sédiments vont être bloqués à l'amont dérive, provoquant une zone d'accrétion, et inversement un déficit sédimentaire va apparaître en aval dérive, accroissant l'érosion de la zone. En rétroaction, ces modifications topo-bathymétriques autour de l'aménagement vont bien sûr interagir avec l'hydrodynamique.

Ces modifications sédimentaires vont être plus ou moins étendues suivant la disponibilité sédimentaire (la quantité de sédiment transitant réellement), la direction privilégiée de la dérive littorale et les caractéristiques de l'aménagement. Dans le temps, ces ouvrages ne figent pas le trait de côte ; en effet, sur certains sites le sens de la dérive littorale s'inverse suivant les saisons (direction de provenance des houles différente entre l'été et l'hiver), inversant ainsi les zones en érosion et en accrétion. Dans ces cas, les modifications hydro-morpho-sédimentaires dues à l'ouvrage peuvent être différentes en termes d'emprise et d'intensité suivant le moment où elles sont observées. Dans d'autres cas, si le transit littoral est suffisant et toujours dans le même sens, on peut arriver à un état de saturation de l'ouvrage où la zone en accrétion a atteint l'extrémité de l'ouvrage en mer, permettant au transit sédimentaire de passer vers l'aval.

Ainsi, les zones d'influence de ce type d'aménagement sont à considérer dans l'évaluation des métriques 2 et 3 :

- La métrique 2 est la longueur de côte où la dynamique sédimentaire est modifiée par la présence d'ouvrages par rapport à la longueur totale de linéaire côtier de chaque masse d'eau. La zone d'influence de l'aménagement transversal pour cette métrique 2 correspond à la largeur de l'ouvrage le long de la côte (impact direct) à laquelle on ajoute les longueurs des zones amont dérive où une accumulation de sédiment se produit ainsi qu'aval dérive où l'érosion est accentuée par rapport à la dynamique

naturelle du site (impact indirect). Une représentation de cette longueur est dessinée sur la Figure 6.

Cette métrique peut s'exprimer sous la forme :

$$M2 = \frac{\sum_{\text{aménagements}} (\text{Longueur}(\text{Impacts Directs}) + \text{Longueur}(\text{Impacts Indirects}))}{\text{Longueur Trait de Côte de la MEC}}$$

- La métrique 3 est la surface pour laquelle l'hydrodynamique est modifiée par la présence d'ouvrage par rapport à la surface de la masse d'eau. La zone d'influence de l'aménagement transversale pour cette métrique correspond à l'emprise surfacique au sol de l'aménagement (impact direct) à laquelle on ajoute les zones de part et d'autres de l'ouvrage où la propagation des vagues et les courants sont modifiés (impacts indirects) et donc les processus sédimentaires.

De même que précédemment, cette métrique peut s'écrire :

$$M3 = \frac{\sum_{\text{aménagements}} (\text{Surface}(\text{Impacts Directs}) + \text{Surface}(\text{Impacts Indirects}))}{\text{Surface de la MEC}}$$

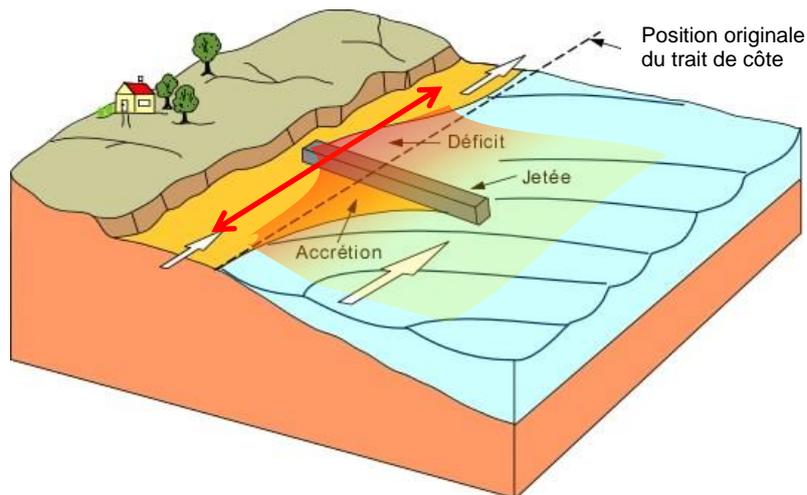


Figure 6: Représentation des zones d'influence relative à la métrique 2 (flèche rouge) et à la métrique 3 (zone colorée dégradée) (source du dessin : P.-A. Bourque sur <http://www2.ggl.ulaval.ca>)

A noter que les modifications hydro-morpho-sédimentaires induites par les aménagements côtiers peuvent présenter de fortes variabilités, spatiales (suivant le lieu considéré et les conditions hydrodynamiques locales par exemple), temporelles (à partir de l'installation de l'ouvrage jusqu'à atteindre un état d'équilibre ou non), saisonnières (changement de provenance de la houle saisonnière entraînant un changement de direction de la dérive littorale) voire pendant un cycle de marée (ouvrage plus ou moins immergé).

### 3.1.3. Autres aménagements anthropiques

#### Aménagements présents sur la bande côtière

Les deux types d'aménagements présentés précédemment sont les principaux types d'ouvrages de défense présents sur les côtes normandes. D'autres types d'aménagements, avec d'autres fonctions, sont également présents sur ces côtes et peuvent aussi modifier les échanges sédimentaires à la côte et/ou les conditions hydrodynamiques. Dans le cadre de ce projet et afin de s'intéresser à l'artificialisation au sens large, tous les types d'aménagements anthropiques (de défense ou non) ont été considérés.

Ainsi, les escaliers, les cales, les exutoires et les bâtiments présents à la côte ont été pris en compte et identifiés comme des aménagements longitudinaux ou transversaux suivant leur orientation à la côte.

#### Aménagements présents sur la zone intertidale ou plus au large

La métrique 2 vise à évaluer la longueur de côte des masses d'eau pour laquelle les échanges sédimentaires sont modifiés par la présence d'aménagements anthropiques. A proprement parler, on s'intéresse donc aux aménagements présents « à la côte », *i.e.* sur le trait de côte ou proches de la côte, qui vont perturber l'évolution sédimentaire naturelle de cet interface terre-mer. Néanmoins fixer une limite géographique entre les aménagements à considérer dans la métrique, car présents à la côte, et ceux plus au large, pouvant indirectement perturber l'évolution de la côte, est extrêmement difficile sans étude spécifique. Dans MEDAM, par exemple, lorsqu'un brise-lame est présent, sa longueur est projetée sur le trait de côte et le segment obtenu est considéré comme artificialisé.

Ainsi, lors des premières analyses effectuées sur les sites d'étude, nous avons été confrontés à la présence d'autres types d'aménagements anthropiques, présents non pas à la côte mais en zone intertidale ou subtidale. Il s'agit notamment de zones conchylicoles (considérées, via leurs surfaces, dans les métriques 4 et 4 bis, perturbations du fond) et du port artificiel d'Arromanches-les-Bains (à considérer dans la métrique 3, modifications des courants et des vagues). Ces aménagements anthropiques, au sein de la masse d'eau, induisent des modifications hydromorphologiques où ils sont plantés, qui peuvent suivant les conditions particulières du site se répercuter ou non à la côte.

Dans le cadre de ce projet de développements méthodologiques, outre l'évaluation des zones d'influence des aménagements côtiers (relatives à la métrique 2), il nous a semblé intéressant, en accord avec l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, d'aller plus loin, en modifiant la métrique 2 afin de tenir compte de tous les aménagements anthropiques présents dans la masse d'eau (à la côte et au large). La méthode suivie pour la prise en compte de ces aménagements au large est présentée dans la suite. Il est important de rappeler ici que pour la surveillance hydromorphologique des masses d'eau côtières DCE, seuls les aménagements présents à proximité de la côte seront considérés dans la métrique 2.

### **3.2. LES METHODES D'EVALUATION DE LA ZONE D'INFLUENCE A L'EHELLE D'UN AMENAGEMENT**

Comme nous l'avons dit précédemment, nous considérons ici la zone d'influence d'un aménagement comme la zone où les impacts hydro-morpho-sédimentaires directs et indirects sont présents.

#### **3.2.1. Zone d'impacts directs**

Cette zone correspond à l'emprise de l'aménagement, au sol s'il est à terre, ou au fond s'il est en mer ; d'éventuelles fondations, enterrées, ne font pas partie de cette zone d'impacts directs, puisqu'elles ne modifient pas directement la surface, la topographie et/ou la nature du substrat.

Cette emprise peut être déterminée de différentes manières, plus ou moins précises :

- Mesurée directement sur le terrain (GPS, décamètre éventuellement...).
- A partir des plans de construction de l'aménagement. Différentes sources peuvent permettre de consulter ces plans : la commune où l'aménagement est installé, les services déconcentrés de l'état responsables de la gestion du territoire (DDTM, DREAL), l'étude d'impact de l'aménagement
- A partir d'informations géographiques telles les bases de données départementales ou régionales sur les aménagements côtiers. Ces données géographiques représentent la plupart du temps les aménagements sous forme de ligne (poly-ligne), ne fournissant que leur longueur (l'emprise des aménagements côtiers est une information très rarement présente dans ces données et même dans leur table attributaire). Néanmoins à partir de la longueur, du type de l'ouvrage, de son emplacement et éventuellement de ses matériaux constitutifs, des hypothèses peuvent être faite sur sa largeur et donc sur son emprise.
- A partir d'ortho-photos récentes (ortho-littorales v2 par exemple), sur lesquelles la plupart des aménagements sont relativement visibles. Par contre déterminer précisément les dimensions à partir de données de télédétection peut s'avérer compliqué si les aménagements sont partiellement immergés, ensablés, détruits ou cachés par la végétation. Des hypothèses sur la forme de l'aménagement peuvent alors être nécessaires pour évaluer son emprise au sol.

Remarque : la métrique 1 (perte d'habitat marin) a pour but de cartographier et d'évaluer les surfaces gagnées sur la mer par les aménagements (impacts directs), dont la surface est supérieure à 100 m<sup>2</sup> et qui ont transformé un habitat marin en un habitat terrestre.

#### **3.2.2. Zone d'impacts indirects**

Alors que la zone d'impacts directs d'un aménagement est relativement facile à évaluer, la zone d'impacts indirects, même si elle a une réalité physique, est quant à elle plus difficilement identifiable.

Dans l'idéal, pour évaluer les impacts indirects (hydrodynamiques et morphologiques) induits par un aménagement, il est nécessaire de connaître les conditions (ou le fonctionnement) hydrodynamiques et morphologiques du site antérieur à l'aménagement, ou d'un secteur

proche, de même caractéristiques et vierge de toute influence d'aménagement. La connaissance de cet état initial permet, par comparaison avec les conditions de « l'état aménagé », de mettre en évidence les modifications induites par l'aménagement.

Nous proposons, dans la suite et de façon générale, différentes méthodes permettant d'évaluer les conditions hydrodynamiques et morphologiques d'un site (aménagé ou non). Pour faire ceci, deux principales méthodes existent : les campagnes de mesures et la modélisation.

### ***Campagnes de mesures***

Le but de ces campagnes de mesures est donc de caractériser les conditions régnant sur un site afin d'en comprendre le fonctionnement et l'évolution dans le temps. Pour plus de clarté, nous différencierons dans ce paragraphe les aspects hydrodynamiques et morphologiques.

#### Conditions hydrodynamiques :

Les conditions hydrodynamiques sont caractérisées par l'agitation et le courant.

Les mesures d'agitation sont effectuées par des houlographes qui fournissent des informations sur la hauteur, période et éventuellement la direction des vagues. Ces mesures sont réalisées à point fixe.

Les mesures de courants sont établies grâce à des courantomètres qui mesurent la vitesse et la direction du courant ponctuellement, ou sur un profil vertical. Certains courantomètres peuvent être embarqués et déplacés pour établir des profils verticaux sur des radiales.

Le principal problème des mesures provient du fait qu'elles sont obtenues pour la configuration particulière du moment de la mesure (telles vagues au large, tel niveau marin, telle topographie du site). Ainsi, pour observer un large éventail de situations, des mesures sur une longue période sont préférables, mais induisent une logistique lourde.

Les données collectées sont fiables, si les instruments sont mis en œuvre dans les règles de l'art. Elles permettent de quantifier précisément les phénomènes observés pendant la campagne de mesure.

#### Conditions morphologiques :

Pour mesurer les taux d'évolution morfo-sédimentaires de la côte et leurs variations spatiales dans la zone où l'ouvrage sera ou est installé, un suivi relativement fin (en espace et en temps) de la topographie de cette zone est nécessaire. Ce suivi peut être réalisé via des relevés au GPS de profil topographique dans la zone où l'ouvrage est présent, ou via des levés Lidar (surfaciques).

D'autres données peuvent renseigner sur l'évolution morfo-sédimentaire d'un site : les suivis de position du trait de côte. Ces données, bien qu'assez réductrices en termes d'informations, intègrent l'ensemble des processus sédimentaires responsable de l'évolution de la position du trait de côte. Suivre la position du trait de côte dans le temps peut donc permettre, en partie, d'évaluer l'évolution morfo-sédimentaire du site.

## **Modélisation numérique**

Une grande diversité d'outils existe pour reproduire numériquement les phénomènes hydrodynamiques en domaine littoral et maritime. Il convient ici d'utiliser uniquement des modèles capables de prendre en considération les ouvrages de défense et les aménagements du trait de côte. Nous ne rentrons pas ici dans les détails des différents modèles existants, une partie est dédiée à cette question au début du chapitre 5.

L'avantage principal des outils de modélisation est qu'ils permettent la simulation de l'ensemble des conditions hydrodynamiques rencontrées sur un site pour différentes configurations, avec et sans aménagement par exemple. Ils permettent donc d'évaluer les modifications hydrodynamiques engendrées par un ouvrage. Ils nécessitent par contre de nombreuses données (topo-bathymétriques, de forçage au large,...) ainsi que des mesures de terrains pour valider leurs résultats.

Au niveau morphodynamique, là encore de nombreux modèles existent (voir chapitre 5). De tels outils semblent une alternative intéressante à la mesure, pour évaluer la longueur de côte sous influence d'un ouvrage. Néanmoins, comme nous l'avons souligné précédemment, l'aspect temporel, c.à.d. la succession des événements passés depuis la mise en place de l'ouvrage, joue un rôle très important sur les impacts induits par l'ouvrage et sur la configuration présente du site. Ainsi, reproduire la configuration présente d'un site donné par modélisation nécessite soit d'acquérir de nombreuses données terrains (topo-bathymétriques notamment, mais aussi courantologiques...), soit de reproduire par modélisation toute la durée de vie de l'ouvrage, ce qui nécessite là encore de longues chroniques de données météo-marines. Pour résumer, l'utilisation de modèles morphodynamiques peut apporter des éléments intéressants, néanmoins ces modèles présentent encore des limites au niveau quantitatif et dans la faculté à reproduire de longues périodes temporelles pour des conditions hydrodynamiques fortement variables.

Dans l'idéal, l'évaluation des impacts morpho-sédimentaires d'un aménagement est possible en couplant les approches de suivi terrain et de modélisation.

Dans le cas où ces informations sur l'évolution morpho-sédimentaire n'existent pas ou sont indisponibles, les données utilisables à l'échelle nationale, seront les données Lidar de l'IGN et du SHOM (LITTO3D) et les ortho-littorales (v1 et v2). A partir de ces données, on cherchera donc à déterminer :

- Pour un aménagement transversal, la longueur en amont et en aval dérive où l'accrétion et l'érosion sont « accrues » par sa présence. Sur ortho-photos, la zone en accrétion peut être relativement bien visible, la zone en érosion est, par contre, souvent plus difficilement identifiable, notamment sa limite aval. Les données Lidar, par l'information surfacique très fine qu'elles fournissent sur l'altitude, peuvent permettre, suivant les cas, d'améliorer l'évaluation de ces longueurs.
- Pour un aménagement longitudinal, la longueur de part et d'autre de l'ouvrage où l'érosion est accrue (décrochage de la côte à l'interface entre l'ouvrage et le substrat naturel). Là encore cette zone peut être relativement bien visible sur ortho-photos ainsi que sur les données Lidar.

Nous discuterons de l'utilisation de telles données pour répondre à notre problématique dans la partie 4, relatives aux sites d'étude. De plus, lorsque nous évaluerons les zones d'influence des aménagements, nous donnerons une note de fiabilité à nos évaluations, fonction des données utilisées et de l'observabilité des impacts attendus.

### **3.3. DE LA ZONE D'INFLUENCE D'UN AMENAGEMENT A L'EVALUATION DES METRIQUES**

Nous avons discuté, dans le paragraphe précédent, des méthodes utilisables pour déterminer, à l'échelle d'un aménagement, ses zones d'influences sur l'hydrodynamique et sur les échanges sédimentaires à la côte. Nous discutons ici de la méthode suivie pour passer d'une évaluation locale des zones d'influences à l'évaluation des métriques 2 et 3.

Les métriques 2 et 3 sont définies à l'échelle de la masse d'eau (masse d'eau côtière de la DCE). Leur évaluation doit donc tenir compte de toutes les constructions anthropiques induisant, dans la masse d'eau, des impacts morphologiques et hydrodynamiques.

Ces évaluations peuvent alors faire apparaître plusieurs difficultés :

- Le fait que plusieurs ouvrages soient présents sur une même zone (présence conjointe d'épis et de protection longitudinal par exemple). Dans de tels cas, les zones d'influence de chaque ouvrage peuvent interagir et se superposer partiellement ou totalement. Lors du calcul des métriques, il ne s'agira donc pas de simplement sommer la longueur de côte et la surface sous influence de chaque aménagement mais de considérer la configuration particulière du site afin de considérer la longueur et la surface d'influence global de ce groupe d'ouvrage.
- Le fait de devoir tenir compte des zones d'influence d'ouvrages présents dans les masses d'eau adjacentes, si ceux-ci induisent des impacts dans la masse d'eau considérée.

Ces deux éléments impliquent donc d'étudier précisément et de façon particulière chaque ouvrage ou groupe d'ouvrages dans chaque masse d'eau mais aussi dans les masses d'eau adjacentes.

Nous décrivons dans la suite la méthode que nous allons suivre sur les sites d'études sélectionnés.

#### **3.3.1. Métrique 2**

##### ***Impacts directs***

Sur nos sites tests, la première étape de notre travail va consister à évaluer la longueur de trait de côte de la masse d'eau, ou d'une partie de la masse d'eau, sous impact direct d'aménagements.

Pour ce faire, les longueurs des aménagements longitudinaux étant connues via les bases de données ouvrages récupérées auprès des DDTM, nous créerons des polygones autour de ces aménagements, de même longueur que ceux-ci, qui engloberont le trait de côte Histolitt (notre trait de côte de référence, légendé « TCH » sur les deux figures suivantes) ainsi que d'éventuels aménagements (transversaux ou autres) présents devant eux, voir Figure 7. Cette méthode permet d'identifier les tronçons de côte sous impacts directs des aménagements longitudinaux et évite ainsi de comptabiliser les impacts, directs et indirects, des autres aménagements éventuellement présents sur ces tronçons.

Pour les ouvrages transversaux, nous procéderons de même, en créant un polygone autour de ceux-ci englobant le trait de côte Histolitt. Mais les largeurs de ces ouvrages étant rarement connues, il s'agit de ne pas trop majorer leur largeur effective. Pour ce faire, nous zoomerons sur chacun de ces ouvrages afin de coller le plus possible à leur largeur, voir Figure 8.

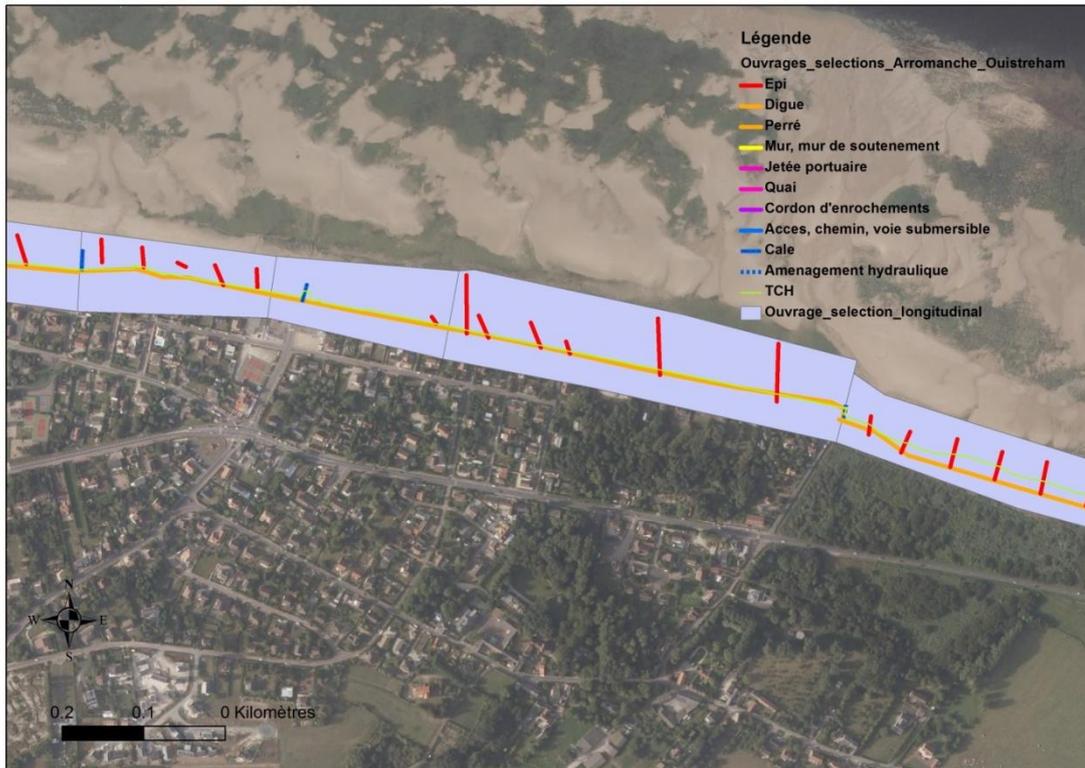


Figure 7 : Exemple de digitalisation autour des ouvrages longitudinaux (surfaces mauves) à Mont Fleury (au Nord de Ver s/ Mer). Source des données ouvrages : DDTM14.



Figure 8 : Exemple de digitalisation autour des ouvrages transversaux (surfaces mauves) devant Courseulles-sur-Mer (Source des données ouvrages : DDTM14).

L'intersection entre les polygones d'impacts directs ainsi créés et le trait de côte Histolitt nous fournira la longueur de trait de côte, de la zone considérée ou de la masse d'eau, sous impacts directs.

### ***Impacts indirects***

Une fois les tronçons de côte soumis à ces impacts directs identifiés, nous chercherons, dans les zones adjacentes (hors impacts directs) à évaluer les longueurs de côte sous impacts indirects. Nous utiliserons pour cela les données disponibles comme présentées dans le paragraphe 3.2.2.

Pour ces zones d'impacts indirects, et comme les zones d'impacts directs, nous créerons un polygone les délimitant et englobant le trait de côte afin d'évaluer, par intersection avec le trait de côte Histolitt, la longueur de côte sous impacts indirects. Pour chacune de ces zones, une caractérisation de la qualité de l'évaluation sera donnée (bonne, moyenne ou mauvaise).

### ***Cas particulier des aménagements au large : métrique 2bis***

Comme souligné dans la partie 3.1.3, nous avons cherché dans le cadre de ce projet à développer une métrique permettant de traduire la présence de tous les aménagements anthropiques au sein d'une masse d'eau.

Pour ce faire, le plus simple consiste à projeter, perpendiculairement à la côte, la longueur des aménagements au large, sur le trait de côte. En ajoutant les longueurs obtenues de cette façon à la métrique 2 (qui ne concerne que les zones d'influences des aménagements présents à la côte), on obtient une nouvelle métrique (M2bis) qui traduit en fait **la présence d'artificialisation au droit du trait de côte de l'ensemble de la masse d'eau**.

Ainsi, lors de l'étude des sites (partie 4), les 2 longueurs, relatives respectivement à la métrique 2 (longueur de côte sous influence d'aménagements) et à la métrique (M2bis) traduisant la présence d'artificialisation dans toute la masse d'eau au droit du trait de côte, seront évaluées.

### **3.3.2. Métrique 3**

#### ***Impacts directs***

Comme nous l'avons dit précédemment, les surfaces des aménagements ne sont pas données dans les bases de données linéaires relatives aux ouvrages. Leur évaluation est donc relativement difficile, même à partir des ortho-littorales. Nous n'évaluerons donc pas, sur nos sites tests, les impacts directs relatifs à la métrique 3.

#### ***Impacts indirects***

De même que pour les impacts directs, les impacts indirects sur l'hydrodynamique seront très difficilement quantifiables. Aussi, à part si une étude d'impact ou une étude dédiée à cette problématique existe, cette évaluation ne sera pas faite sur les sites d'études, mais sur un site idéalisé par modélisation numérique (cf. Chapitre 5).

## 4. Premières évaluations des impacts hydro-morpho-sédimentaires des ouvrages sur les sites sélectionnés

### 4.1. D'ARROMANCHES A OUISTREHAM

#### 4.1.1. Contexte

Ce secteur, caractéristique de la côte sableuse du Calvados, est constitué de longues plages avec de nombreux ouvrages transversaux et un trait de côte très artificialisé (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**Figure 9). L'emprise choisie pour ce site d'étude est relativement importante, de l'ordre de 30 km de côte et s'étend sur plusieurs masses d'eau (FRHC12, FRHC13 et FRHC14).

Les données utilisées pour caractérisées le site d'étude sont :

- Les résultats de l'étude relative au diagnostic et à l'analyse des épis transversaux (ISL, 2014) sur les communes de Saint-Côme-de-Fresné à Bernières-sur-Mer.
- Des données sur les aménagements côtiers à Asnelles (plans, profils,...) fournies par la DDTM.
- Les traits côte historiques OLIBAN, d'Asnelles à Courseulles-sur-Mer.
- Les rapports du GRESARC de 1997 et 2002 sur l'évolution des côtes du Calvados.
- Les données Lidar topographique de l'IGN.

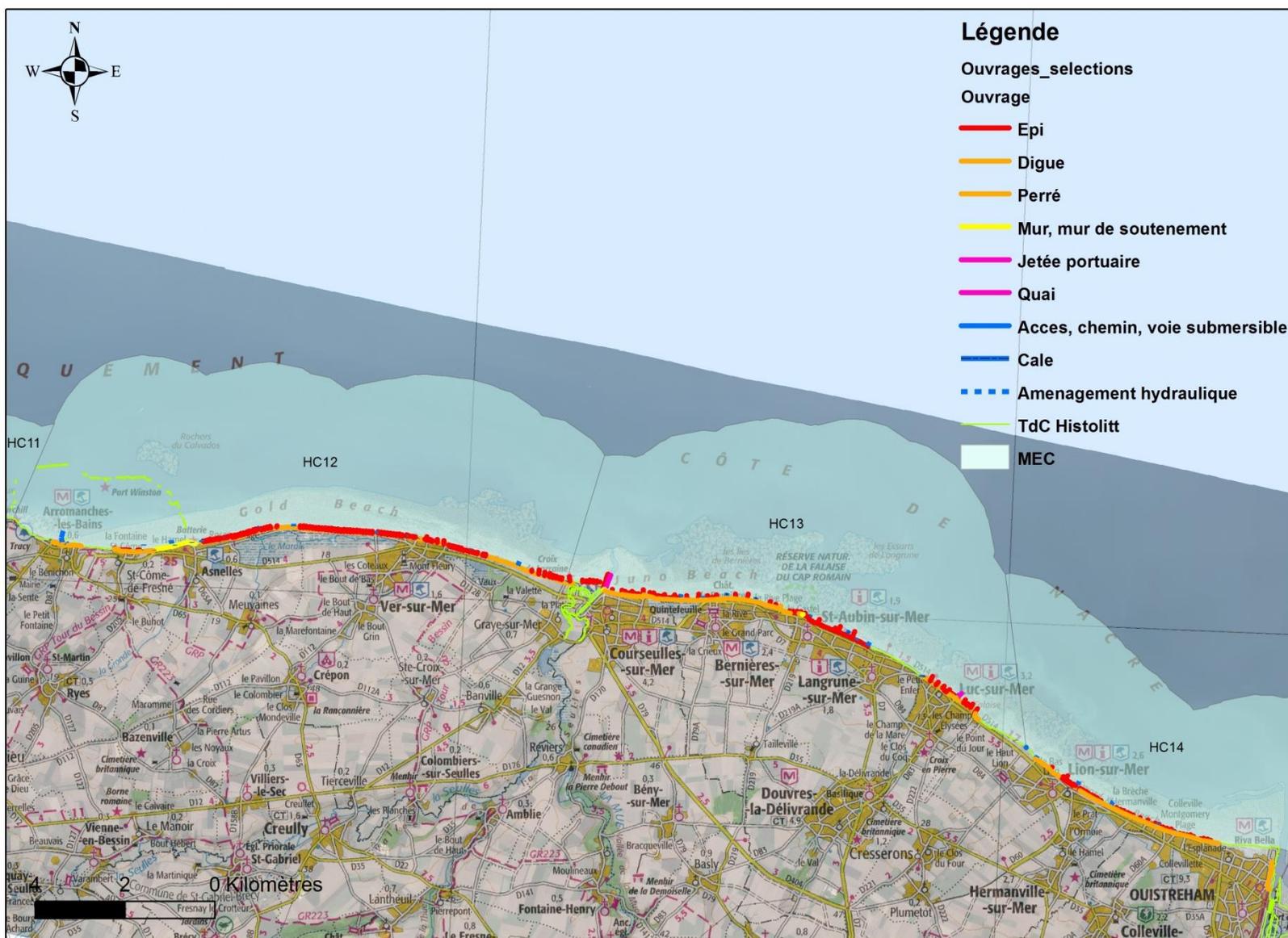


Figure 9 : Carte de situation du site d'étude entre Arromanches et Ouistreham.

Entre St-Côme-de-Fresné et l'estuaire de l'Orne, le tracé de la côte forme un large bombement convexe. Plusieurs types de côtes sont présents sur ce site (GRESARC, 1997) :

- Entre St-Côme et Saint-Aubin-sur-Mer s'étale une côte sableuse formée d'une mince frange dunaire qui repose sur un cordon de galet.
- De St-Aubin à Lion-sur-Mer, plusieurs secteurs peu étendus de falaises meubles sont présents (Figure 10). Ils atteignent quelques centaines de mètres de longueur à St-Aubin et à Langrune et deux kilomètres entre Luc-sur-Mer et Lion-sur-Mer. Ces falaises basses peuvent atteindre une dizaine de mètres de hauteur.
- De Lion-sur-Mer à Ouistreham, le littoral est sableux.
- A noter aussi, la présence de platiers rocheux à Gold Beach et entre Courseulles et Lion-sur-Mer (voir Figure 10).

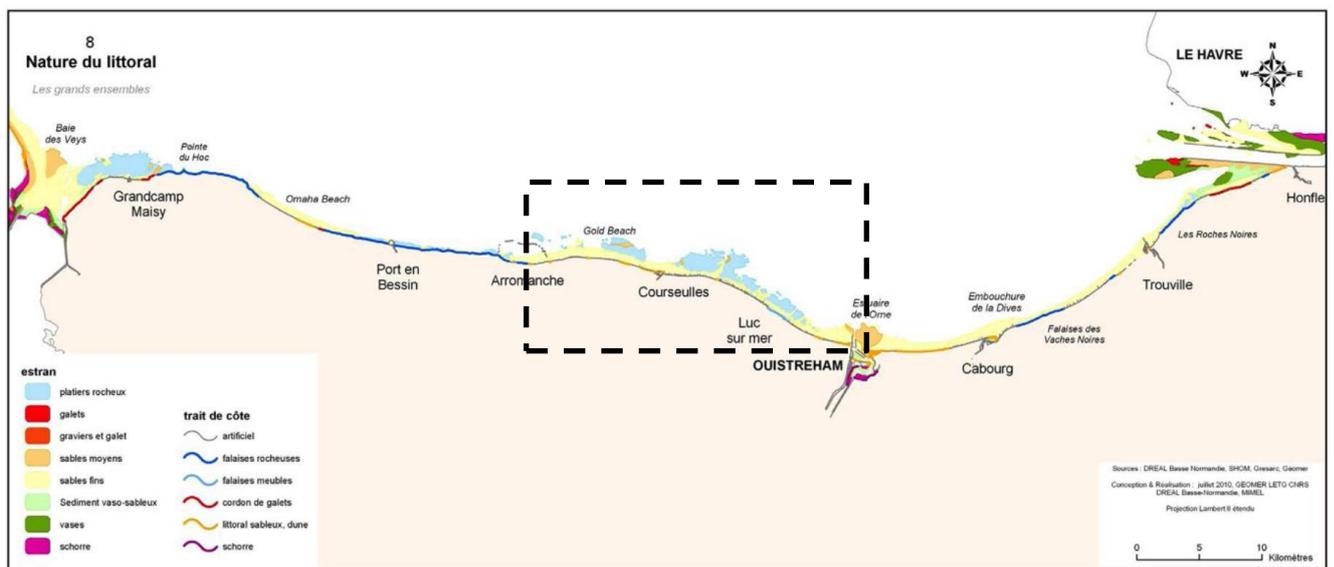


Figure 10 : Grands ensembles morphologiques des côtes du Calvados (source : Atlas de sensibilité du littoral aux pollutions marines, 2010). Le site d'étude est délimité par un rectangle en pointillé.

**Sur l'ensemble du site d'étude, la dérive littorale est dirigée Ouest-Est (L.N.H.L.C.H.F., 1986).**

Ces côtes, historiquement en érosion (GRESARC, 1997 et 2002) ont connu l'installation de nombreux ouvrages. A partir de la base de données ROULI (Recensement des Ouvrages du Littoral) fournie par la DDTM du Calvados, un recensement et une classification des ouvrages présents sur le site d'étude a été effectué (Tableau 2).

Par rapport aux données initiales, 4 aménagements catégorisés comme « inconnus » ont été modifiés en « digue » (1 aménagement) et en mur (3 aménagements) à partir d'images ortho-littorales et Google-Street-View et deux ouvrages de type « cordons d'enrochements » ont été modifiés en « digue » et « épi ». En visualisant les données polygones géo-référencées de ces différents aménagements, nous précisons dans la dernière colonne du tableau (orientation à la côte) si les aménagements considérés sont longitudinaux (L) ou transversaux (T).

Type d'aménagement	Nombre	Longueur cumulée (en m)	Orientation à la côte
Accès, chemin, voie submersible	2	33	L
Aménagement hydraulique	31	2223	T
Bâtiment, blockhaus, fortification	5	274	T (3) et L (2)
Cale	53	1240	T (50) et L (3)
Digue	49	21910	L
Epi	212	13686	T
Escalier	2	46	L
Inconnu	3	33	T (2) et L (1)
Jetée portuaire	2	506	T
Mur, mur de soutènement	5	1060	L
Perré	1	71	L
Poteaux + cordage	1	50	T
Terrasse	1	83	T
<b>Total général</b>	<b>368</b>	<b>41213</b>	<b>T (303) et L (65)</b>

Tableau 2 : Type, nombre et longueur cumulée des aménagements présents sur le site d'étude. (Source : DDTM 14) ; T : ouvrage transversal, L : ouvrage longitudinal.

D'après le Tableau 2, on peut déjà faire une première évaluation globale sur les aménagements présents : **il y a environ 24.5 km d'aménagements longitudinaux et 16.7 km d'aménagements transversaux**. Cette évaluation globale peut déjà être comparée à la longueur de côte de la zone.

Comme déjà évoqué dans la partie 3.3, le trait de côte de référence pour cette étude est le trait de côte Histolitt (version 2, SHOM). Le problème est que les limites à terre des masses d'eau (la ligne de base) ne sont pas définies avec le trait de côte Histolitt. Les masses d'eau sont définies à une échelle moins fine que le trait de côte Histolitt (au 1/50 000<sup>ème</sup> alors que le trait de côte Histolitt au 1/15 000<sup>ème</sup>) et leurs limites à terre peuvent être sur, devant ou derrière ce trait de côte suivant les cas. D'autres différences existent notamment au niveau de certains ports, pour lesquels les limites amont de la masse d'eau sont en aval du trait de côte Histolitt (un tel exemple est présenté sur la Figure 11 pour le port de Courseulles/Mer). De plus, le port artificiel d'Arromanches-les-Bains, représenté par Histolitt n'est pas représenté dans les masses d'eau FRHC11 et FRHC12.

Aussi pour évaluer la longueur de côte de la zone à partir du trait de côte Histolitt, tout en respectant au maximum les définitions géographiques des masses d'eau, notre unité spatiale d'analyse, il est nécessaire de supprimer certaines parties du trait de côte Histolitt, afin de ne pas augmenter artificiellement la longueur de côte des masses d'eau.

Pour ce faire, la longueur de côte de la zone a été calculée à partir du trait de côte Histolitt auquel nous avons soustrait la longueur du port artificiel d'Arromanches-les-Bains ainsi que le fond du port de Courseulles/Mer pour respecter l'emprise et la définition géographiques de la masse d'eau FRHC13.



Figure 11 : Visualisation de la masse d'eau HC13 (surface bleu clair transparent) et du trait de côte Histolitt\_v2 (trait vert) au niveau du port de Courseulles-sur-Mer (fond de carte ortho-littorale\_v2 IGN).

**La longueur du trait de côte de la zone vaut alors 31 500 m ; sans le port artificiel d'Arromanches (6840 m) et sans la partie amont de l'intérieur du port de Courseulles (2 860 m totalement artificialisé).**

A noter aussi la présence de parcs à huitre d'une longueur Est-Ouest de l'ordre de 2700 m sur l'estran à l'Est d'Asnelles/Mer.

#### 4.1.2. Evaluation des zones d'impacts

##### **Impacts directs**

Nous cherchons ici à évaluer les longueurs d'impacts directs relatives à la métrique 2. Comme précisé dans la partie 3, il s'agit pour les aménagements longitudinaux de leur longueur le long de la côte et pour les aménagements transversaux de leur largeur le long de la côte.

Lors de cette étape du travail, quelques incohérences ou manques ont été trouvées dans la base de données ROULI. Il s'agit notamment de l'absence d'ouvrages sur la commune de Langrune/Mer (un mur de haut de plage ou un perré, des enrochements en bas de perré, 2 épis ou exutoires et une cale sont en effet visibles sur les ortho-photos mais sont absents de la base de données). Des doutes sur la typologie ou la position de certains aménagements sont aussi

apparus. Mais n'ayant pas la possibilité de vérifier sur le terrain l'exactitude des données, nous n'avons pas fait de modification dans la base de données.

### **Aménagements longitudinaux**

La longueur de trait de côte Histolitt relative aux impacts directs des aménagements longitudinaux représente 22 417 m (48 digues, 4 murs, 1 perré). Devant ces aménagements, en mer, on trouve environ : 180 épis, 48 cales, 24 exutoires et 1 jetée portuaire.

La longueur de côte, directement occupée par des aménagements longitudinaux représente donc **71.17 %** de la longueur totale de côte de notre site.

### **Aménagements transversaux**

Les aménagements transversaux considérés ici sont : 29 épis (dont 13 en bois), 1 jetée, 3 cales et 3 exutoires. Les largeurs des cales sont fournies dans la base de données de la DDTM (5 m chacune) ainsi que les 3 exutoires (2.5 m, 4.3 m et 1 m). Pour les épis, nous avons mesuré leur largeur sur les ortho-littorales, mais cette mesure est imprécise.

Ainsi la largeur totale des aménagements transversaux représente environ entre 80 et 110 m. Si l'on ajoute cette longueur (100 m) à la longueur des aménagements longitudinaux, on obtient une longueur de côte construite de **71.48 %** (dont 0.3 % par les aménagements transversaux).

### **Port artificiel d'Arromanches-les-Bains et zones conchylicoles**

Datant de la seconde guerre mondiale et constitué de plusieurs dizaines de structures en béton, le port artificiel d'Arromanches-les-Bains est principalement situé en zone subtidale et n'est donc pas considéré pour l'évaluation de la métrique 2.

Il est, par contre, pris en compte dans la métrique 2bis (voir paragraphe 3.3.1).

Pour ce faire, et comme pour les autres aménagements, nous avons projeté les différentes structures du port à la côte, perpendiculairement à celle-ci (Figure 12). Les longueurs de côte obtenues, 1205 m de longueur de trait de côte Histolitt, correspondent aux longueurs de côte au droit desquelles des structures artificielles sont présentes, au sein de la masse d'eau.

**Ainsi, alors que la longueur de côte construite correspond à 71.5 % du trait de côte (longueur d'impact direct relatif à la métrique 2), ce taux passe à 75.3 % si l'on s'intéresse à la longueur d'artificialisation au droit du trait de côte.**

En appliquant la même méthode pour les zones conchylicoles à l'est d'Asnelles (projection des concessions perpendiculairement au trait de côte), on obtient une longueur de côte d'environ 2700 m, qui est déjà artificialisée par la présence à la côte d'ouvrages longitudinaux (et donc prise en compte pour la longueur de côte d'impact direct). Cette longueur ne sera donc pas considérée dans la métrique 2bis.



Figure 12 : Visualisation du port artificiel d'Arromanches-les-Bains et de la projection de celui-ci sur le trait de côte Histolitt (en vert).

### Impacts indirects

Suite à l'identification et à la digitalisation des longueurs de trait de côte sous impacts directs d'aménagements anthropiques, nous nous intéressons aux secteurs de côte adjacents (sans impact direct) afin d'identifier l'éventuelle présence d'impacts indirects induit par ces aménagements.

Sur notre site, ces zones sont relativement restreintes en nombre et en emprise. On dénombre en effet 9 zones littorales sans aménagements :

- (1) Une zone d'environ 250 m de long sur la commune de Tracy-sur-Mer, à l'Ouest de la ville d'Arromanches-les-Bains ;
- (2) Quelques petites zones à l'Est d'Arromanches (entre les zones sous impacts directs des structures du port artificiel) ;
- (3) Une zone d'environ 150 m devant Asnelles ;
- (4) Une zone d'une longueur d'environ 2300 m à l'Ouest immédiat du port de Courseulles-sur-Mer ;
- (5) Une zone de 500 m de long environ à l'Ouest de Bernières-sur-Mer ;
- (6) Trois petites zones de longueur cumulée d'environ 400 m entre Bernières-sur-Mer et St-Aubin-sur-Mer ;
- (7) Une zone de 1500 m à l'Ouest de Lion-sur-Mer ;
- (8) Une zone d'une longueur de 600 m sur la commune de Colleville-Montgomery ;
- (9) Une zone de longueur de 1400 m à l'Ouest du terminal ferry d'Ouistreham.

(1) à Tracy-sur-Mer

Cette zone, représentée sur la Figure 13, se situe devant « la Brèche », à l'Ouest de l'aménagement, oblique à la côte, qui sert de parking et de cale. Vu le sens de la dérive littorale, Ouest-Est, l'impact indirect de la cale sur la morphologie pourrait provoquer une zone d'accrétion sédimentaire à l'amont dérive (à l'Ouest de l'ouvrage). A partir des ortho-littorales et des données Lidar, nous n'avons pas pu mettre en évidence l'existence d'une telle zone d'accrétion. De même en aval dérive, la côte est protégée par un aménagement longitudinal (en jaune sur la Figure 13), empêchant une érosion potentielle due à la cale.



Figure 13 : Vue de l'Ortho-littorale v2 à Tracy-sur-Mer (Source IGN). Trait jaune : ouvrage longitudinale ; trait rouge : trait de côte histolitt ; traits bleus continus : cales ; trait bleu pointillé : exutoire (source DDTM14).

Pour cette zone et avec les éléments dont nous disposons, nous n'avons pas détecté d'impact indirect sur la morphologie dû aux aménagements présents.

(2) à l'Est d'Arromanches-les-Bains

Nous nous intéressons ici, aux zones situées entre les zones d'impacts directs du port artificiel projetées à la côte (à droite sur la Figure 12). A partir des données dont nous disposons, il n'est pas possible ici de mettre en évidence l'existence d'impacts indirects sur la morphologie induit par le port artificiel.

### (3) Devant Asnelles

Cette zone se situe à l'Ouest de « Roseau plage » (en pointillée sur la Figure 14), entre un mur de soutènement (représenté en jaune) et une digue en enrochement (représenté en orange).

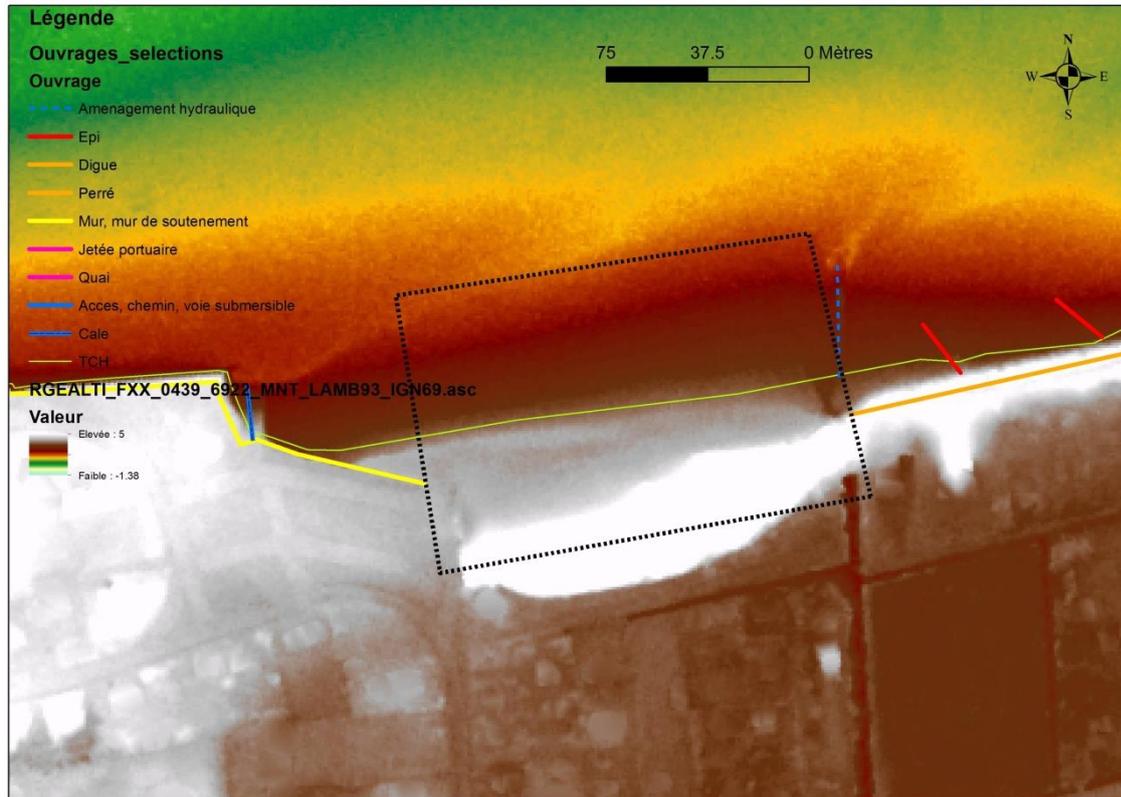


Figure 14 : Visualisation des données LiDAR devant Asnelles (Source : RGE Alti, IGN) et des ouvrages présents (DDTM 14).

Devant Asnelles, l'évolution du trait de côte a été digitalisé à partir d'ortho-photos anciennes (traits de côte OLIBAN, entre 1947 et 2005, avec différentes années intermédiaires suivant les sites). Ainsi la position du trait de côte de la zone avance en effet localement entre 1947 et 1955, recule ensuite globalement entre 1955 et 1980, puis ré-avance jusqu'en 2005, pour atteindre une position proche de l'actuelle. A partir de ces données, il semble que le mur de soutènement (ou un aménagement similaire) était déjà présent en 1947 alors que la digue en enrochement fut certainement construite autour de 1964.

Sur ce site, évaluer les impacts indirects des aménagements présents sur la morphologie n'est pas possible à partir des données OLIBAN. En effet, le recul puis l'avancé de la position du trait de côte est difficilement explicable par la présence seule des aménagements et soulignent plutôt une intervention anthropique d'une autre nature (rechargement,... ?). Il serait alors nécessaire de connaître précisément les dates et la nature des travaux ayant pu avoir lieu sur ce site.

Par contre, en se basant sur la limite de la végétation et sur la position de la dune (Figure 14 et Figure 15) des impacts indirects ont été identifiés. Il s'agit du retrait, de la végétation et de la dune, à l'Est immédiat du mur de soutènement, qui tend à diminuer ensuite. Ce décrochage, en aval de l'aménagement, présent dès l'année 1947 (soit postérieur à la construction de l'ouvrage longitudinal), semble être une conséquence de l'aménagement ; la qualité de cette évaluation est considérée comme mauvaise. L'autre secteur identifié se situe à l'amont de la digue en

enrochement, on aperçoit en effet sur les ortho-photos un léger décrochement de la côte et la présence de quelques blocs, certainement disposés là pour limiter l'érosion. Pour ce deuxième secteur, la qualité de l'évaluation est également considérée comme mauvaise.

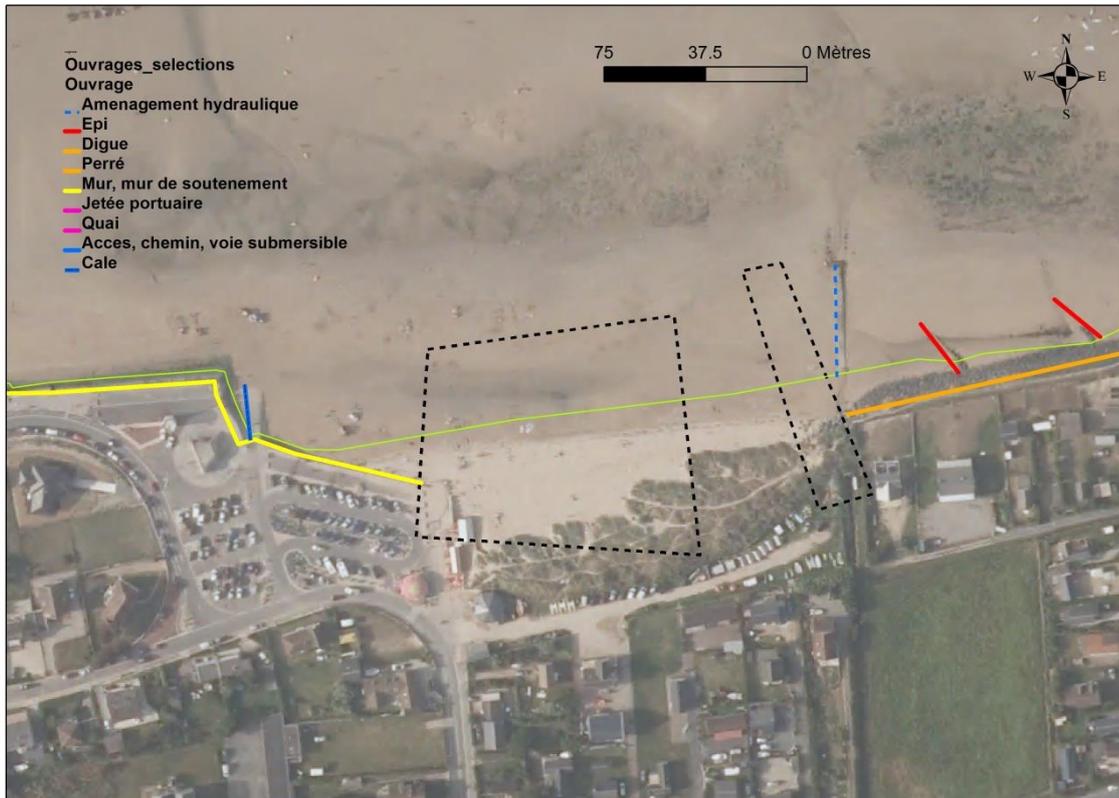


Figure 15 : Ortho-littorale v2 devant Asnelles (source IGN) et ouvrages présents (source DDTM 14). Les zones identifiées d'impact indirect sont représentées en pointillés.

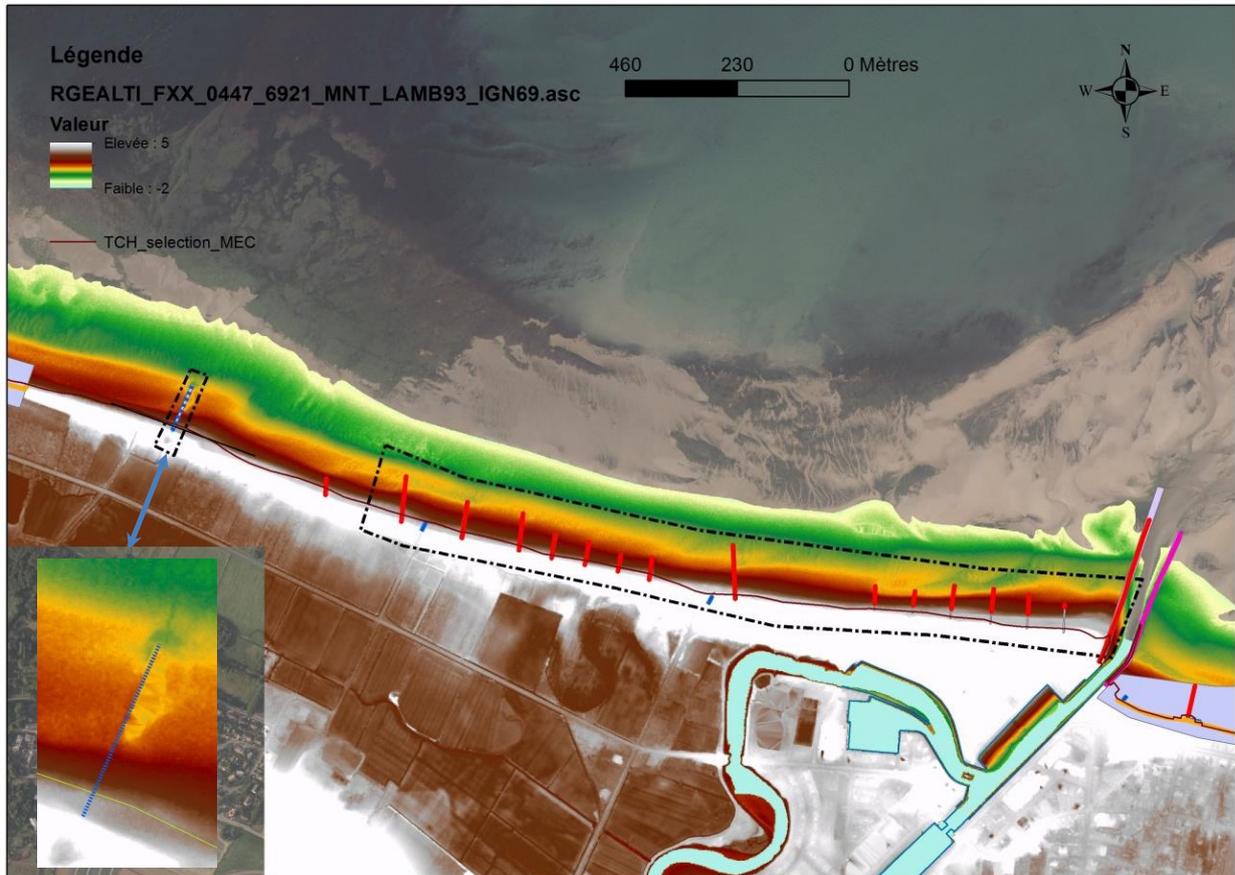
#### (4) à l'Ouest immédiat de Courseulles-sur-Mer

Sur cette zone relativement étendue, deux secteurs, représentés en pointillé, ont été identifiés comme subissant des impacts indirects d'aménagements (Figure 16).

Le premier secteur, le plus à l'Ouest sur la Figure 16, se situe autour d'un émissaire. On voit en effet très nettement sur les données Lidar un affouillement dû à la présence de celui-ci. La fiabilité de l'évaluation est donc considérée comme bonne.

Pour le deuxième secteur, nous avons utilisé l'étude d'ISL Ingénierie relative à l'efficacité des épis (ISL Ingénierie, 2014). Sur la quinzaine d'épis présents, environ la moitié (les plus à l'Ouest du secteur) ont été évalués, par ISL Ingénierie (2014) comme moyennement à fortement efficaces (l'efficacité d'un épi est évalué en mesurant la différence de niveau de sable de part et d'autre de l'épi). Cela est d'ailleurs bien visible sur les données Lidar car on y observe des différences de niveau topographique de part et d'autre des épis à l'Ouest. Les autres épis, à l'Est du secteur, sont faiblement efficaces. En effet seul l'épi principal (à l'Ouest immédiat de l'embouchure de la Seulles) provoque une accumulation sédimentaire en amont dérive, sur environ 500 m. Les effets éventuels des petits épis localisés en amont dérive de cet épi ne montre pas d'impacts sur la morphologie. De plus, les traits de côte historiques OLIBAN

dans cette zone montrent une avancé de celui-ci depuis 1964, année pour laquelle un épi à l'embouchure est déjà présent (photos historiques sur Géoportail). Aussi l'ensemble de ce secteur a été considéré comme subissant des impacts indirects morphologiques avec une qualité d'évaluation considérée comme bonne.



(5) à l'Ouest de Bernières-sur-Mer (entre Courseulles/Mer et Bernières/Mer)

Cette zone d'une longueur de 500 m se situe entre deux digues ; deux épis y sont présents (Figure 17).

Des données OLIBAN existent sur cette zone, mais ne sachant pas la date de construction des aménagements, il est difficile d'évaluer leurs impacts à la côte avec ces données.

L'utilisation des données Lidar (Figure 17) permet par contre de voir très nettement les modifications morphologiques induites par les épis. Pour cela, un profil topographique perpendiculaire aux épis a été extrait sur la Figure 18 (sa position est montrée en trait noir continu sur la Figure 17). Sur cette figure, on voit très nettement une accumulation sédimentaire en amont dérive des épis et un déficit à l'aval. Ainsi l'ensemble de cette zone a été considéré sous impacts indirects morphologiques et la qualité de cette évaluation est considérée comme bonne.

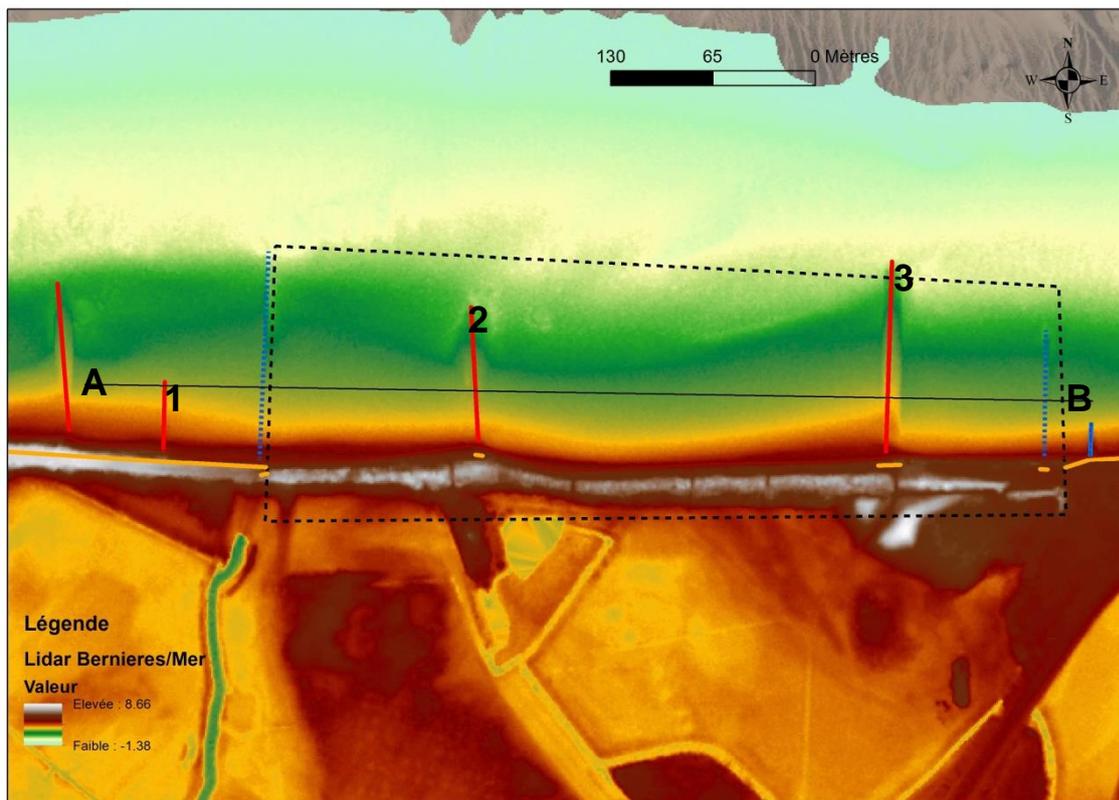


Figure 17 : Visualisation des données LiDAR entre Courseulles/Mer et Bernières/Mer (données RGE Alti de l'IGN). Localisation du profil topographique extrait entre A et B.

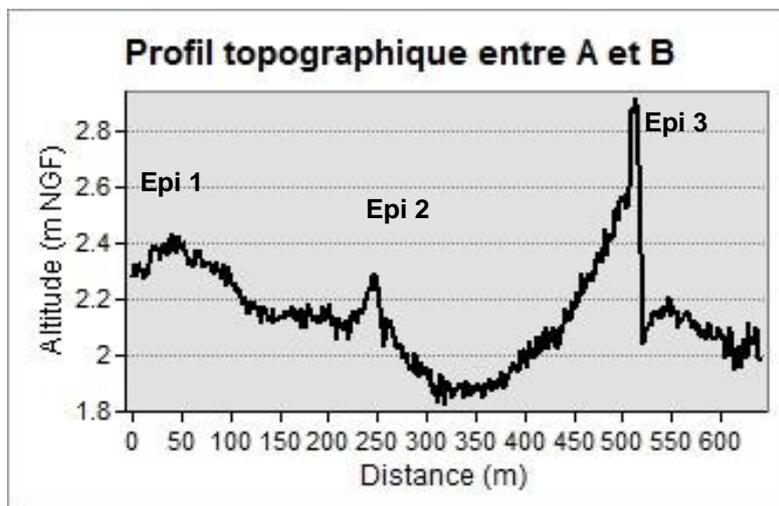


Figure 18 : Profil topographique de la coupe AB extrait à partir des données LiDAR IGN.

(6) Entre Bernières-sur-Mer et St-Aubin-sur-Mer (falaise du Cap Romain)

Trois zones différentes apparaissent ici( voir Figure 19), situées, d'Ouest en Est, entre une digue en enrochement et un perré, zone A, un perré et un mur de soutènement, zone B, et deux murs de soutènement, zone C.

Pour la zone A, malgré la présence de 3 épis, aucune modification morphologique indirecte n'est visible sur l'ortho-photos ou le LiDAR (Figure 20).

La zone B présente un retrait de la côte bien marqué qui semble dû à la présence du perré et du mur ; la qualité d'évaluation correspondante est considérée comme mauvaise.

Pour la dernière zone autour de l'épi, zone C, une accumulation en amont et un déficit en aval dérive est bien visible sur les données Lidar (Figure 20). Cette zone a donc été considérée sous impacts directs avec une qualité d'évaluation bonne.

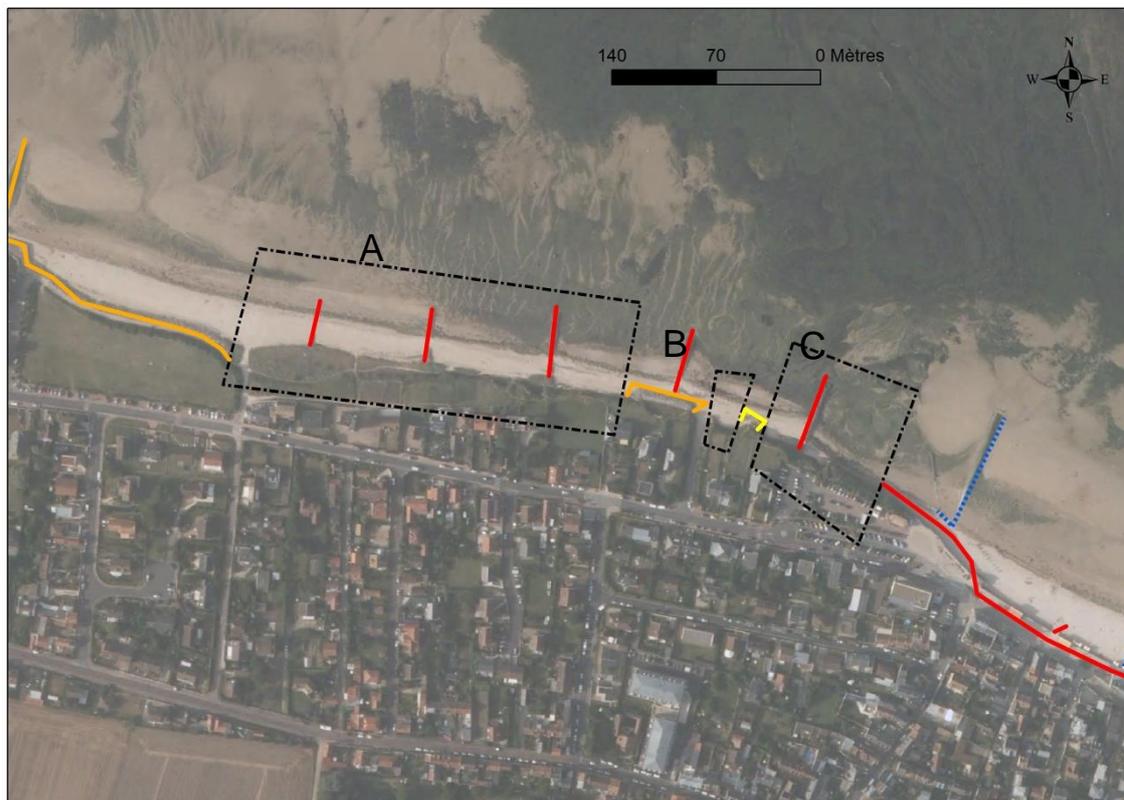


Figure 19 : Visualisation de l'Ortho-littorale v2 au niveau de la falaise du Cap Romain (entre Bernières/Mer et St-Aubin/Mer), source : IGN. La légende des aménagements est donnée sur la Figure 15.

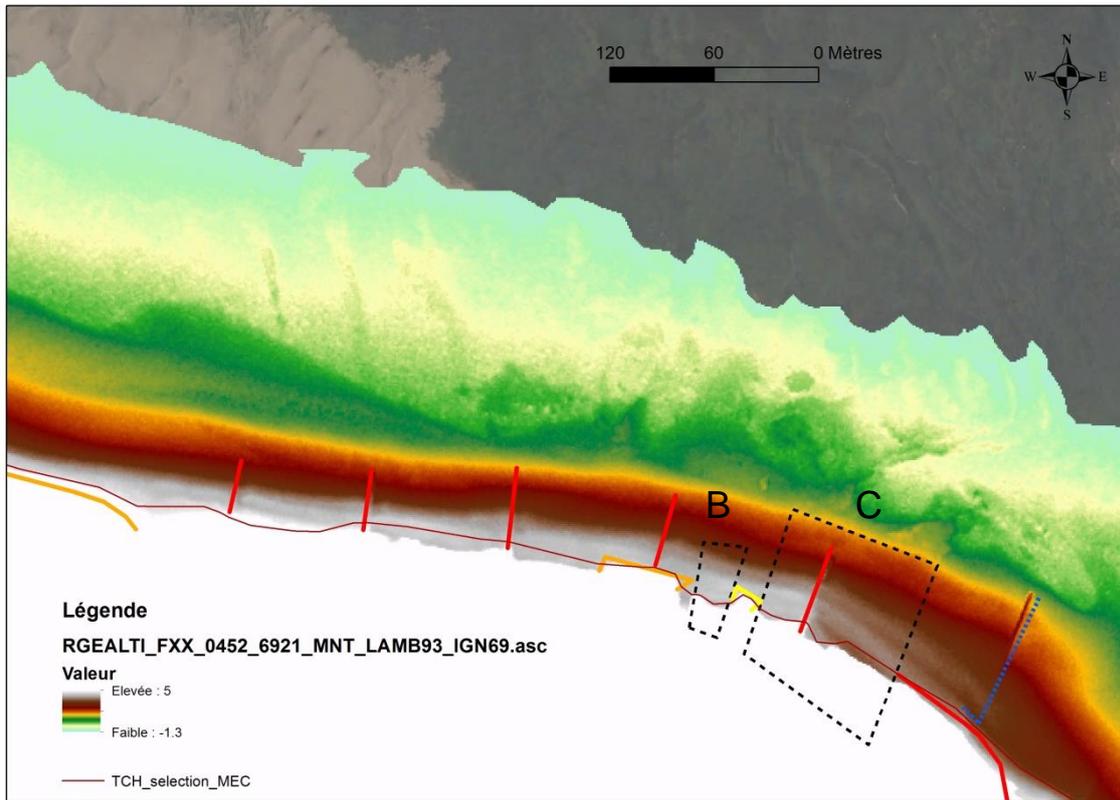


Figure 20 : Visualisation des données LiDAR (RGE Alti, IGN) au niveau de la falaise du Cap Romain. La différence de niveau topographique est bien visible de part et d'autre de l'épi de la zone C.

#### (7) à l'Ouest de Lion-sur-Mer

Cette zone, située entre Luc-sur-Mer et Lion-sur-Mer, s'étend sur 1500 m (Figure 21) ; elle est délimitée de part et d'autre par deux digues, en enrochements à l'Ouest et en maçonnerie et tout venant à l'Est (représentés en orange sur la figure).

Deux secteurs avec des impacts indirects ont été identifiés, en bordures Ouest et Est de la zone ; ils sont représentés en pointillé sur la Figure 21.

A l'Est de Luc-sur-Mer, au Sud-Est des 4 épis (représentés en rouge sur la figure), on voit très nettement une forme d'encoche dans le trait de côte. Cette forme est typique d'une érosion accrue à l'aval des épis, on peut d'ailleurs voir le creusement de cette zone s'accroître sur les ortho-photos historiques de Géoportail (par rapport à 1972 par exemple, on observe un recul de la côte de 10 à 20 m). La digue présente dans cet arrondi a d'ailleurs été construite après les épis, pour limiter l'érosion dans cette zone.

Cette forme indique donc un déficit local en sédiment, ce qui peut être expliqué par le piégeage de sédiments relativement important, en amont dérive, entre les épis à l'Est de Luc-sur-Mer.

Le secteur en aval dérive immédiat de ces aménagements est donc en déficit sédimentaire (impacts indirects des épis et de la digue). La question que l'on se pose alors est de savoir sur quelle longueur de côte cet impact est présent. Sur l'ortho-littorale (Figure 21), on voit apparaître au niveau du lieudit « la Baie » quelques placages sableux. Nous avons donc considéré le secteur allant de l'extrémité de la digue jusqu'aux placages sableux comme

subissant des impacts indirects des aménagements en amont (voir figure suivante), avec une qualité d'évaluation moyenne.

Un autre secteur apparaît indirectement impacté, au niveau de la cale du camping des Roches. La cale agit en effet comme un épi et provoque en amont dérive une accumulation sédimentaire (voir figure suivante). La qualité de l'évaluation est considérée ici comme bonne.



Figure 21 : Ortho-littorale v2 (IGN) de la zone de la Baie, entre Luc/Mer et Lion/Mer. Les zones d'impacts indirects sont représentées en pointillé.

#### (8) Devant Colleville-Montgomery Plage

La zone qui nous intéresse ici se situe devant le parking de bord de mer de Colleville-Montgomery Plage, Figure 22, elle s'étend sur environ 800 m et présente 7 épis (en rouge sur la figure), plusieurs cales (en bleu sur la figure) et un exutoire (pointillé bleu). De part et d'autre de cette zone, s'étend un mur de haut de plage (trait orange sur la figure), protégeant une route piétonne et une piste cyclable.

A partir des données Lidar (Figure 22), nous présentons le profil topographique transverse aux épis (Figure 23), représentés en trait noir sur la Figure 22 dont les extrémités sont annotés A et B. Pour faciliter la lecture du profil, un astérisque a été ajouté sur les deux figures suivantes afin de repérer la position d'un épi.

Sur ce profil, d'Ouest en Est, on voit très bien l'effet du premier épi (vers  $x = 50$  m) qui provoque un pic dans la topographie. En continuant vers l'Est,  $x = 100$  m et  $x = 150$  m, on voit encore deux pics, dus à deux épis non présents dans la base de données ouvrages mais visibles sur le LiDAR et l'ortho-littorales. Les épis suivants, espacés d'environ 100 m, sont également bien

visibles sur le profil. Ainsi pour cette zone, l'influence des épis sur la topographie de l'estran est bien marquée. L'ensemble de la zone en pointillé sur la figure suivante est donc considérée sous impacts indirects des épis, avec une fiabilité d'évaluation notée 1.

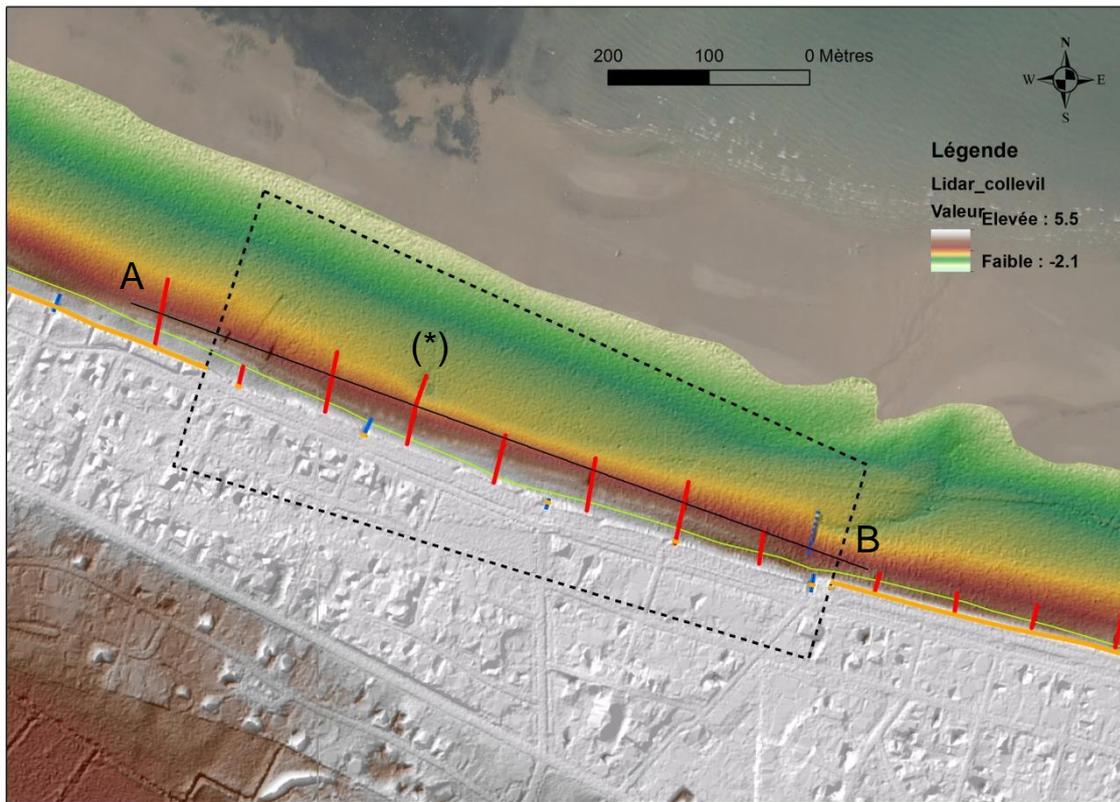


Figure 22 : Visualisation des données LiDAR (RGE Alti de l'IGN) et des aménagements présents dans la zone du parking de bord de mer de Colleville-Montgomery Plage.

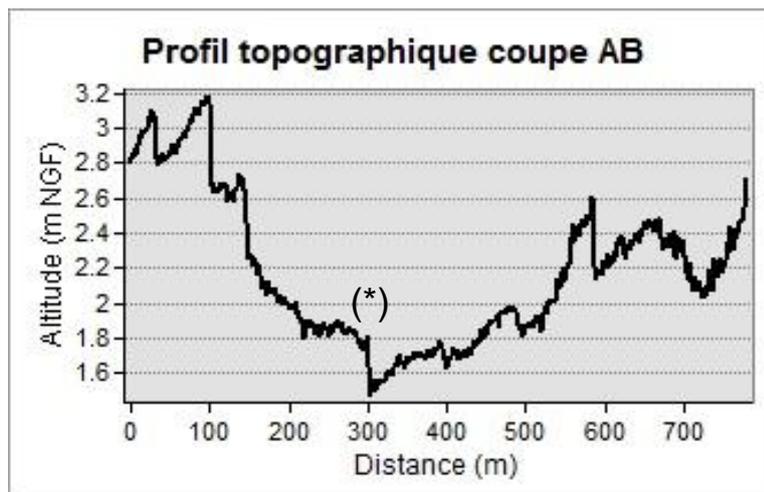


Figure 23 : Profil topographique extrait des données LiDAR correspondant à la coupe AB de la figure précédente.

(9) à l'Ouest du terminal ferry d'Ouistreham

Cette zone d'une longueur de 1400 m ne présente aucun aménagement, (Figure 24) elle est délimitée à l'Ouest par un mur de haut de plage (trait orange sur la figure) et à l'Est par le terminal ferry de Ouistreham non représenté par le trait de côte Histolitt (en mauve) car trop récent.

Le terminal ferry d'Ouistreham est un aménagement transversal très important, il est par contre assez difficile, à partir de la configuration actuelle de la côte seulement, d'en déduire son impact, notamment indirect.

Les travaux effectués dans le cadre du projet LiCCo par le Conservatoire du Littoral, notamment sur la collecte de photos anciennes ortho-rectifiées, permettent de retracer l'évolution historique de la plage de de 1947 à 2012, Figure 25, issue de ce projet. Cette figure montre clairement l'accroissement de la plage induit par les divers aménagements effectués depuis 1947. L'ensemble de la zone est sous impacts indirects des aménagements transversaux installés au niveau de l'embouchure de l'Orne. La qualité de l'évaluation a été considérée comme bonne.

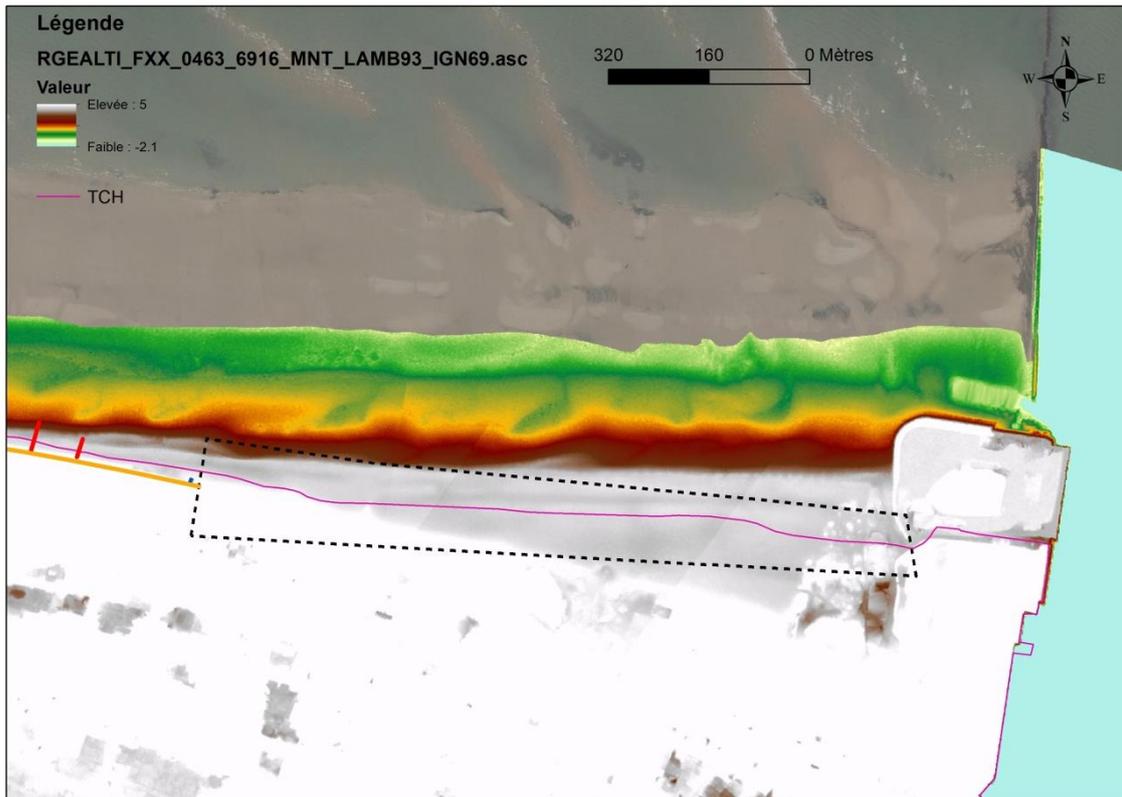


Figure 24 : Visualisation des données LiDAR (RGE Alti, IGN) à Ouistreham au niveau du terminal ferry.



Figure 25 : Evolution historique de la plage à l'Ouest de l'estuaire de l'Orne de 1947 à 2012 (Source : LiCCo), la plage est représentée en rouge.

### Synthèse sur l'évaluation des impacts indirects

Pour l'ensemble du secteur d'Arromanches-les-Bains à l'estuaire de l'Orne, la longueur de côte affectée par des impacts indirects induits par les aménagements représente au total 4906 m, que l'on peut différencier suivant la qualité de l'évaluation comme :

- 4155 m, avec une qualité d'évaluation considérée comme bonne ;
- 615 m, avec une qualité considérée comme moyenne ;
- 136 m, avec une qualité considérée comme mauvaise.

Cette longueur totale représente environ 15.6 % de la longueur du trait de côte Histolitt de la zone d'étude.

**Ainsi, la longueur de côte sous influence d'aménagement (impacts directs et indirects), relative à la métrique 2, représente 87.1 % de la longueur de côte de la zone d'étude.** Cette valeur est très supérieure à celle évaluée lors du classement de l'état hydromorphologique du premier plan de gestion DCE (Brivois et Vinchon, 2011) avec **EUROSION** (EC, 2004) qui donne un taux d'artificialisation de **62 %** seulement (Trait de côte EUROSION du site : 30562 m, longueur d'ouvrages cumulée : 18959 m, soit 62 %).

### Evaluation de la métrique 2 à l'échelle de la masse d'eau

A partir des évaluations des longueurs de côte de notre zone d'étude soumises à des impacts directs et indirects induits par les aménagements présents, nous avons évalué la métrique M2

pour les masses d'eau concernées. Les résultats, par masse d'eau, sont donnés dans le tableau suivant et comparés aux taux d'artificialisation, obtenus avec les données EUROSION (EC, 2004) lors du classement de l'état hydromorphologique du premier plan de gestion (Brivois et Vinchon, 2011).

Masse d'eau	Métrique 2			Taux artificialisation EUROSION
	Impacts directs	Impacts Indirects	Total	
<b>FRHC 12</b> <b>Côte de Nacre Ouest</b> Longueur trait de côte Histolitt : 13 213 m	<b>75.1 %</b> (11 123 m)	<b>6.5 %</b> (860 m)	<b>81.6 %</b>	<b>38 %</b>
<b>FRHC 13</b> <b>Côte de Nacre Est</b> Longueur trait de côte Histolitt : 14 838 m	<b>77 %</b> (11 424 m)	<b>14.5 %</b> (2 147 m)	<b>91.5 %</b>	<b>76 %</b>
<b>FRHC 14 jusqu'à l'embouchure de l'Orne</b> Longueur trait de côte Histolitt : 6 290 m	66.5 % (4 186 m)	30.2 % (1 901 m)	96.7 %	95,2 %
<b>FRHC 14</b> <b>Baie de Caen</b> Longueur trait de côte Histolitt : 9°788 m	<b>43.8 %</b> (4 284 m)	<b>19.4%</b> (1 901 m)	<b>63.2 %</b>	<b>62 %</b>

Tableau 3 : Résultats de la métrique 2 et comparaison avec les taux d'artificialisation calculé avec EUROSION pour les 3 masses d'eau de la zone d'étude.

Les résultats du Tableau 3 permettent, tout d'abord, de souligner que les impacts indirects sont non négligeables à l'échelle des masses d'eau et peuvent même être relativement importants (de 6 à 20 % de la longueur du trait de côte pour les 3 masses d'eau côtières étudiées).

La comparaison des taux d'impacts directs avec les taux d'artificialisation EuroSION est également intéressante. Alors qu'à l'échelle de la façade Manche Atlantique, les taux EuroSION calculés par masse d'eau sous-estiment globalement la présence des aménagements anthropiques (comparés aux taux d'impacts directs, voir Brivois 2016 à paraître), les résultats obtenus pour les 3 masses d'eau normandes ci-dessus ne confirment pas cette tendance. En effet, les résultats obtenus avec EuroSION sont bons pour la masse d'eau FRHC13, alors qu'ils sous-estiment, respectivement surestiment, la présence des aménagements anthropiques pour la masse d'eau FRHC12, respectivement FRHC14.

Ces différences ont plusieurs origines :

- La typologie des aménagements considérés dans EuroSION. Seuls les ouvrages de défense longitudinaux, de taille relativement importante, sont reportés dans EuroSION. Ainsi, dans certaines masses d'eau, la totalité des ouvrages présents n'est pas correctement prise en compte par EuroSION (masse d'eau FRHC12 par exemple).
- Des erreurs dans les données EuroSION. En effet, pour la masse d'eau FRHC14, des segments de côtes sont considérés comme artificialisés par EuroSION alors qu'il s'agit en fait d'un système dunaire naturel.

Remarque : dans le Tableau 3, les impacts directs et indirects dans la partie Est de la masse d'eau FRHC14, hors de notre site d'étude (à l'Est de l'estuaire de l'Orne), ont été évalués de façon assez sommaire afin de calculer la métrique 2 à l'échelle de cette masse d'eau. Une étude plus approfondie pourrait donner des résultats légèrement différents, notamment pour les impacts indirects.

### **Evaluation de la Métrique 2 bis**

Si l'on considère en plus les aménagements anthropiques au large (métrique M2bis), soit le port artificiel d'Arromanches dans la masse d'eau FRHC 12, la valeur de la métrique 2bis (métrique 2 à laquelle on ajoute la longueur de la projection du port perpendiculairement à la côte) est de 90.7 %. Cela signifie que 90.7 % du trait de côte présente à son droit des aménagements ou des zones artificialisées (perturbées par des aménagements). La mise en parallèle des valeurs des métriques 2 et 2bis pour la masse d'eau FRHC 12 permet d'en déduire la présence d'aménagements au large sur environ 10% de la longueur du trait de côte.

La métrique 3 n'a pas pu être évaluée sur ce site, par manque de données pertinentes.

## 4.2. UTAH BEACH

### 4.2.1. Contexte

Ce site est caractéristique de la côte est du Cotentin, marqué par une longue plage sableuse rectiligne (Figure 26, Figure 27). Ce secteur a été choisi pour plusieurs raisons :

- le trait de côte est relativement peu artificialisé.
- il ne présente que quelques ouvrages longitudinaux en enrochements et des accès à la mer.
- on note la présence de conchyliculture sur la zone intertidale.

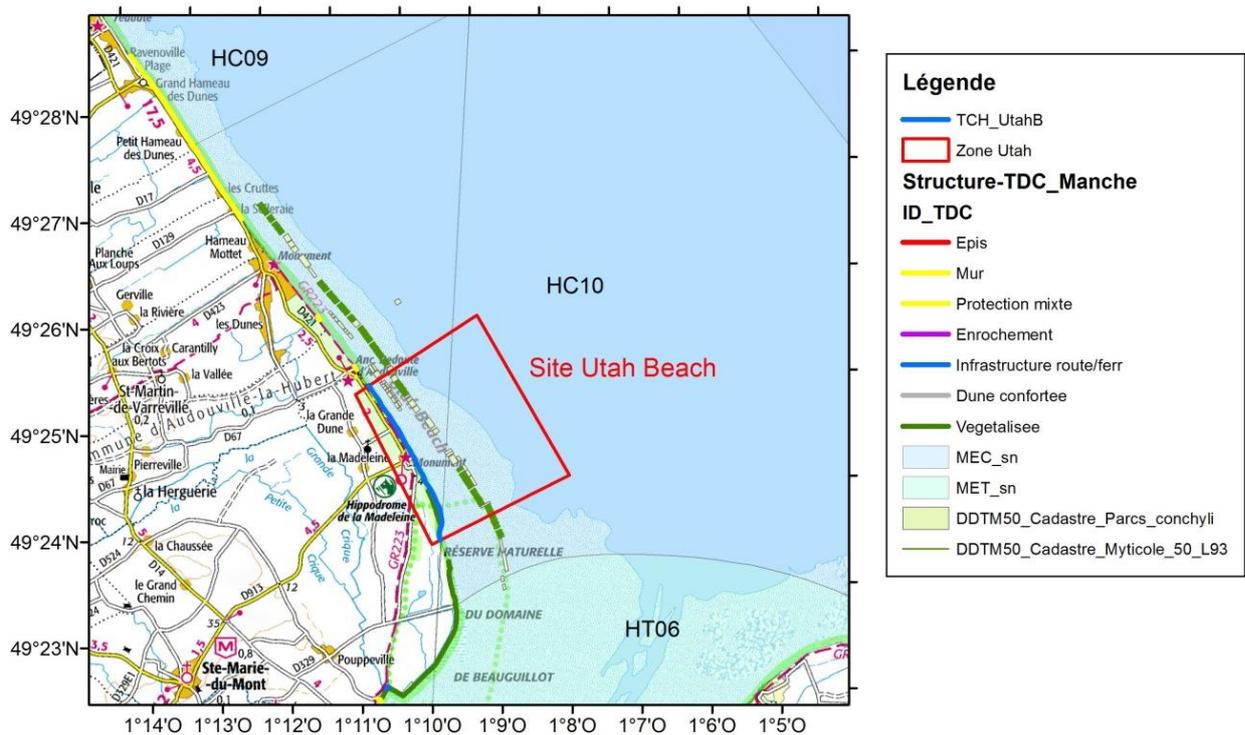


Figure 26 : Localisation du site d'étude Utah Beach au sein des masses d'eau DCE. Source : IGN.



Figure 27 : Zone d'étude Utah Beach. Source : IGN

La plage d'Utah Beach se situe au sein de la masse d'eau côtière (MEC) HC10. La zone étudiée se trouve sur la commune de Sainte-Marie-du-Mont. Elle s'étend sur 4,5km au Sud de la masse d'eau dont le linéaire de trait de côte est de 9,3 km. Lors du classement de l'état hydromorphologique du premier plan de gestion, cette masse d'eau a été évaluée en Très Bon Etat Hydromorphologique. D'après les experts, cette MEC n'est pas influencée de façon primordiale par une ou des pressions physiques.

L'inventaire des données a identifié plusieurs types d'informations disponibles sur cette zone :

- Les données du projet LICCO sur la Baie des Veys (graphiques d'évolution de la position du trait de côte),

- Les données de plusieurs stations du suivi de l'évolution des plages et du trait de côte de la Manche (CREC-UCBN) (points SE02-03-05),
- Les données Lidar topographique de l'IGN,
- La base de données géographiques « Structure du trait de côte 50 » de la DDTM50,
- La base de données géographiques « Accès DPM 50 » de la DDTM50,
- Les bases de données géographiques « Cadastre Mytilicole 50 » et « Cadastre Parcs conchylicoles 50 » de la DDTM50,
- La base de données maritime et littorale du SHOM (câbles et épaves).

D'après l'évolution des traits de côte réalisés dans le projet LICCO pour la période comprise entre 1947 et 2010, le nord de la zone d'étude apparaît en érosion, tandis que le sud, qui marque l'entrée vers la Baie de Veys, est en accrétion.

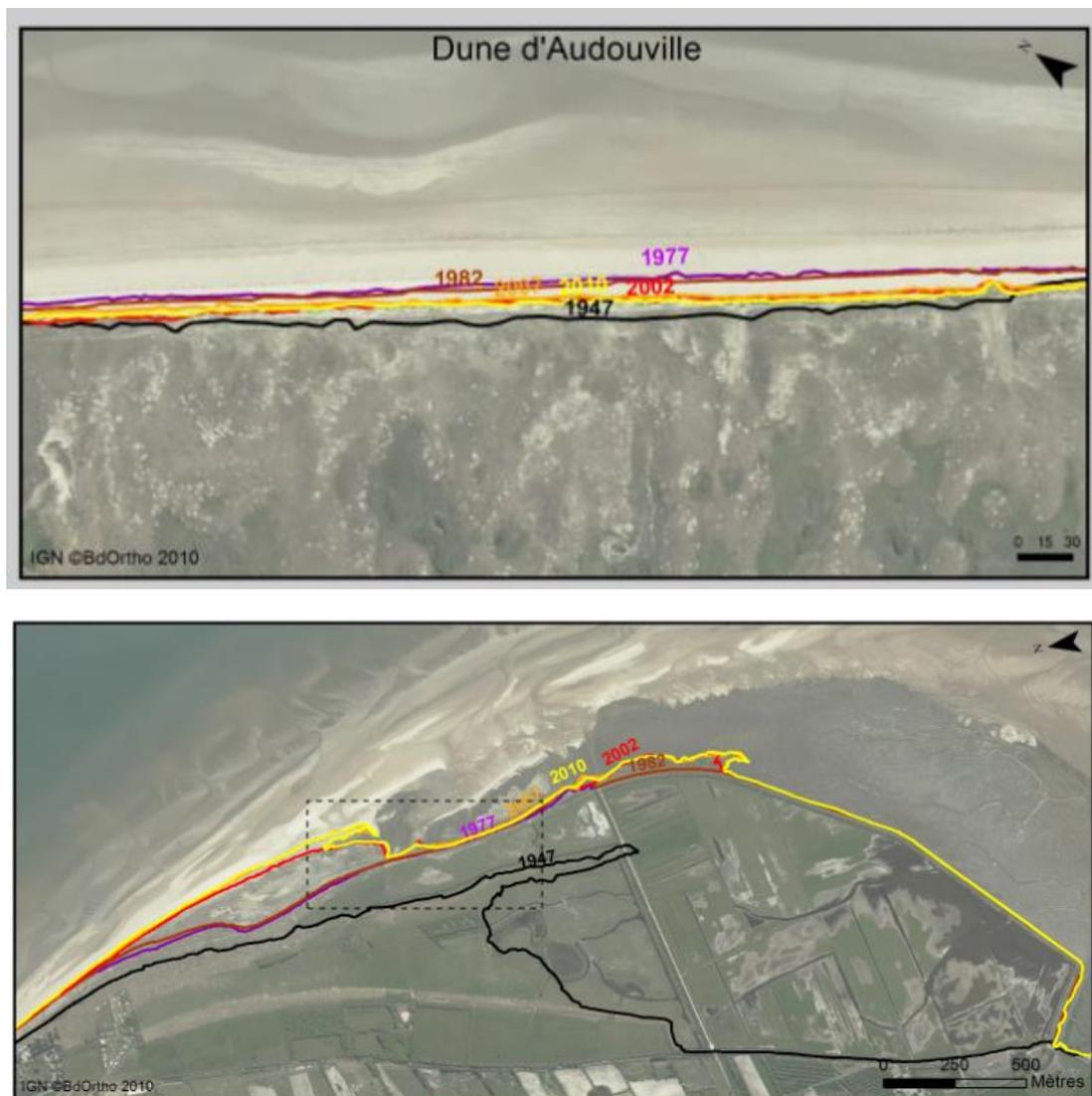


Figure 28 : Evolution du trait de côte à Utah Beach entre 1947 et 2010 (en haut au Nord, en bas au Sud).  
Source LiCCO.

Dans le secteur d'étude, le transport sédimentaire s'effectue du nord vers le sud (L.N.H.L.C.H.F., 1986).

Les suivis de l'université de Caen précisent ces tendances évolutives du secteur côtier d'Utah Beach pour 4 profils situés dans la zone d'étude (Figure 29). Le site internet de consultation ([http://crec.unicaen.fr/suivi50/sl50\\_pres.php?css=1](http://crec.unicaen.fr/suivi50/sl50_pres.php?css=1)) fournit une synthèse qui porte sur les 14 ans de suivi réalisé annuellement en octobre ou novembre.



Figure 29 : Sites suivis par l'université de Caen dans le cadre de OLIBAN. Source : [http://crec.unicaen.fr/suivi50/sl50\\_st.php?css=1#](http://crec.unicaen.fr/suivi50/sl50_st.php?css=1#)

Pour les profils SE2 et SE5, la tendance lors des observations était à la stabilité voir à la progradation du trait de côte, qui est marquée par la limite de végétation en pied de dune pour ce suivi. La Figure 30 montre cette tendance à l'échelle des 14 ans de suivi.

Pour le profil SE3 en revanche, la dune est marquée par une falaise d'érosion, un recul du trait de côte et l'érosion du haut de plage.

Pour les profils SE1 à SE3, il est mentionné une dynamique particulière lié à la migration de barres sableuses en bas de plage.

Le profil SE01 est marqué par une accrétion également constatée par les levés de trait de côte du projet LICCO.

Le site internet de visualisation des données ne permet malheureusement pas de visualiser l'ensemble des mesures qui permettraient de mieux comprendre la dynamique interannuelle des plages.

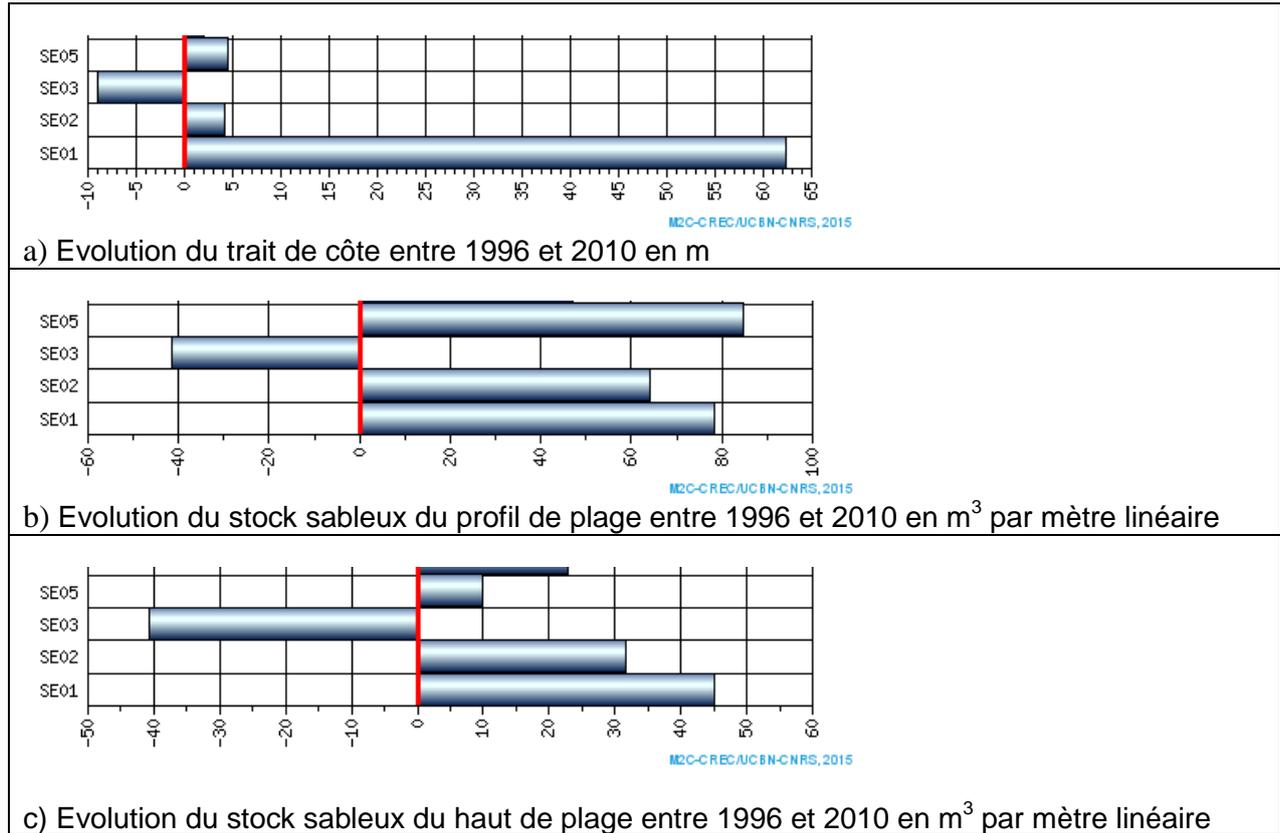


Figure 30 : Evolution géomorphologique des sites suivis par l'Observatoire du Littoral Bas-Normand (OLIBAN) au niveau de la plage d'Utah Beach.

#### 4.2.2. Evaluation des zones d'impacts

##### **Impacts directs**

Pour ce secteur d'étude, il n'y a pas eu de collecte de mesures et observations spécifiques sur le terrain, ni de récupération de plans de construction des aménagements. Nous avons utilisé les bases de données géographiques existantes et l'ortho-photographie de 2013 (ortho-littorale v2) pour repérer les zones artificialisées en connexion avec la masse d'eau côtière.

- Analyse des bases de données disponibles

Dans un premier temps, les bases de données traitant de l'artificialisation du milieu sont étudiées et comparées avec l'ortho-photographie dans le SIG ArcGis©. L'identifiant des structures et leur connexion avec la masse d'eau sont vérifiées.

- Analyse de la base DDTM 50 « Structure du trait de côte »

Sur le site d'étude, 6 ouvrages sont référencés dans cette base : 2 enrochements, 2 ouvrages mixtes, 1 dune confortée et 1 digue végétalisée.

La dune confortée avec des ganivelles (FID1261) peut difficilement être considérée comme une zone artificialisée modifiant le transport sédimentaire de la masse d'eau, car il s'agit d'une technique souple qui facilite le piégeage du transport éolien sur la dune au-delà du trait de côte.

De plus, lors de cette vérification avec les données de télédétection, la « digue végétalisée » (FID137 de la base) ne semblait pas avoir de connexion directe avec la masse d'eau côtière. Elle se situe dans le sud de la zone d'étude, dans le secteur identifié comme en accrétion. La partie la plus proche du trait de côte est située en arrière d'un cordon sableux plus haut que la Plus Haute Mer Astronomique locale (comprise entre 3.5 et 3.85m IGN69, Figure 31). Cette « digue », qui ne présente pas d'artificialisation visible par photo aérienne, n'est donc pas prise en compte pour les estimations de zone d'influence. Une vérification de terrain est cependant préconisée pour valider ce choix.

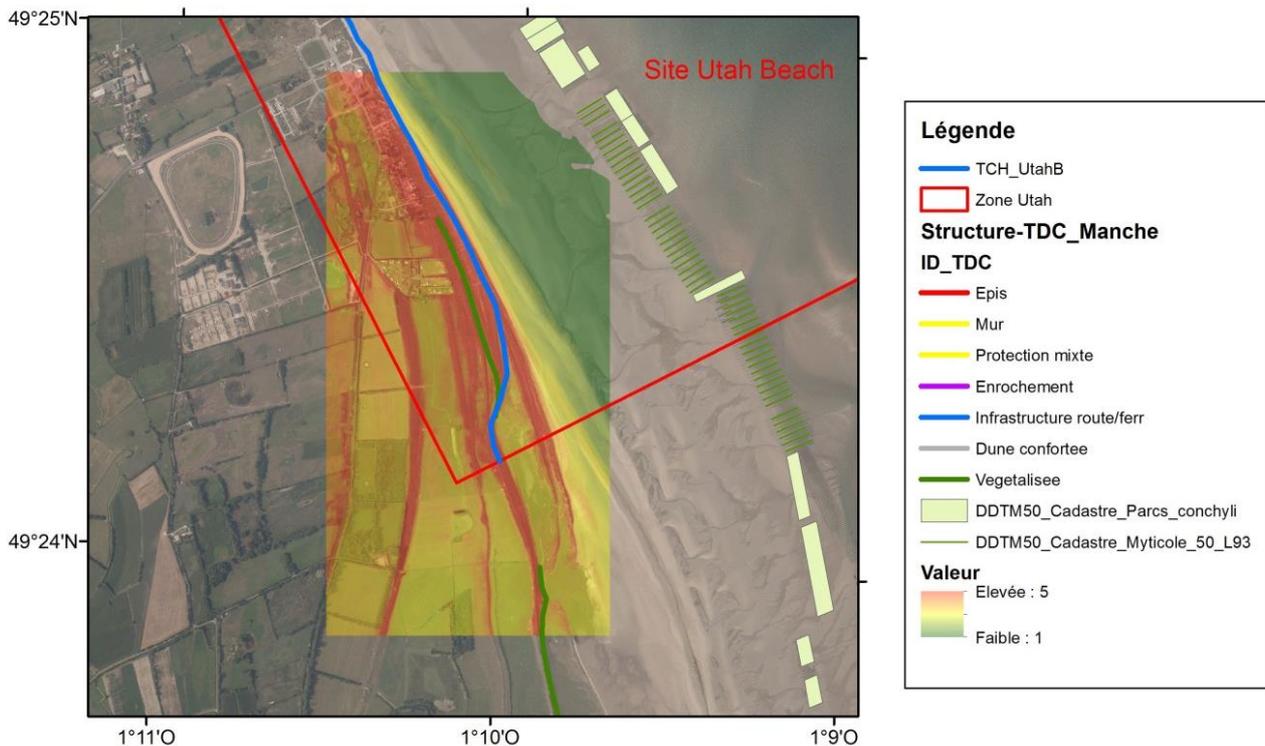


Figure 31 : Analyse de la base de données DDTM50 « Structure du trait de côte » au sud de la zone d'étude.

- Analyse des données de la base DDTM50 « accès au littoral »

Sur le site d'étude, cette base répertorie 11 accès au littoral. La consultation de la table attributaire de chaque point d'accès permet un lien vers une des photographies en ligne des accès. Ces photographies ont permis de vérifier l'éventuelle artificialisation des accès.

Sur les 11 accès, 4 ont été considérés comme artificialisés. De plus, entre les accès Acc\_10 et Acc\_11 (Figure 32), la base photographique montre la présence d'une palissade en bois en pied de dune qui n'est pas répertoriée dans la base DDTM 50 « Structure du trait de côte ». Cette palissade est également visible sur l'ortho-photographie. Comme indiqué précédemment au paragraphe 3.1.1, ce type d'artificialisation du pied de dune a un impact potentiel sur les échanges hydro-sédimentaires dune-plage qui peuvent intervenir en période de marée haute de vive-eau ou de surcote. Il peut donc être considéré dans l'évaluation des métriques de la DCE.

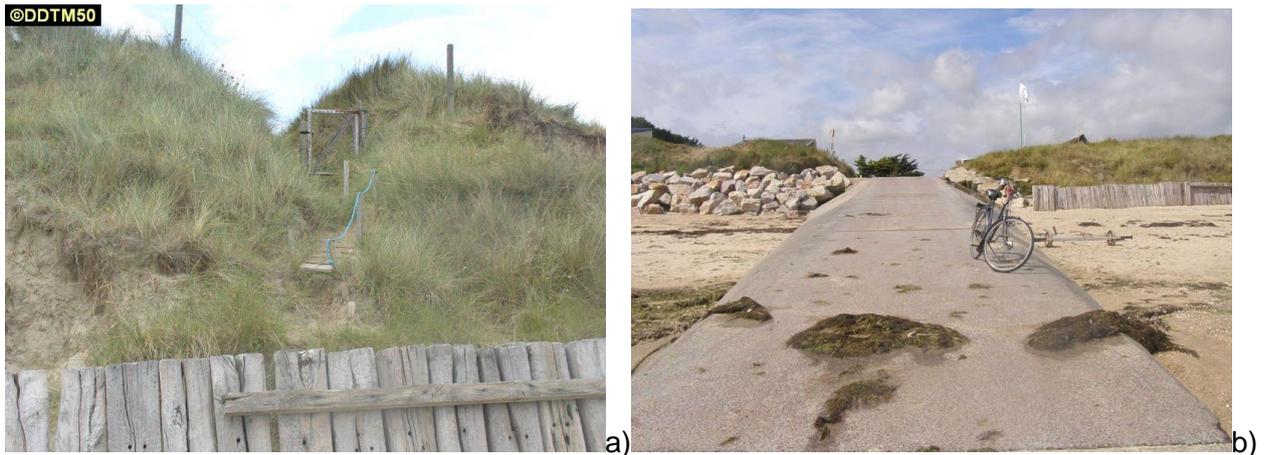


Figure 32 : Palissade en bois situé en pied de dune entre les accès 10 et 11 de la base DDTM50 « accès au littoral ». L'enrochement visible sur la photo b) est référencé dans la base DDTM50 « Structure du trait de côte ».

- Analyse des données des bases DDTM 50 « cadastre Mytilicole » et « cadastre Parcs Conchylicoles »

L'affichage de ces données fournies par la DDTM50 dans la zone d'étude montre une présence quasi-continue d'activité conchylicole tout au long du linéaire côtier. Ces implantations d'éléments artificiels (pieu, tables ostréicoles) en zone intertidale sont susceptibles de modifier le transport sédimentaire en zone littorale (Kervella, 2010) en modifiant les vagues dans la zone de déferlement et le courant de marée local (métrique 3). La production de particules fines et leur piégeage est également un élément possible de l'influence de la conchyliculture sur le transport sédimentaire dans les eaux côtières.

La phase de vérification de ces bases avec le SIG consiste à les superposer, dans la bonne projection cartographique, avec l'ortho-photographie littorale. De légères différences de positionnement sont observées ponctuellement dans la zone d'étude. Dans les tables attributaires, les éléments de cadastre ne sont pas nommés et il n'est pas indiqué si les zones cadastrées sont exploitées ou non.

- Bases de données du SHOM

La base « épave » recense une épave sur la zone intertidale de la zone d'étude. N'ayant pas été repérée sur l'ortho-littorale récente, elle n'a pas été prise en compte pour cette étude.

La carte marine 7422 indique l'existence de plusieurs bouées de signalisation maritime dans la zone d'étude. Pour ce test plus particulier des métriques 2 et 3, nous considérons que l'influence de ces mouillages sur le transport sédimentaire est négligeable. En revanche, il est envisageable de considérer ces mouillages dans l'évaluation de la métrique 4 (perturbation du fond).

- Evaluation de l'impact direct pour la métrique 2

Dans un second temps, l'impact direct des différents secteurs artificialisés est établi pour renseigner la métrique 2 visant à déterminer la longueur de côte influencée par l'artificialisation.

Ce travail de SIG consiste à reporter la longueur des zones artificialisées au droit du trait de côte officiel Histolitt. La Figure 33 montre les polygones construits pour reporter la largeur des ouvrages d'aménagement et de protection du littoral sur le trait de côte Histolitt. Les ouvrages et aménagements sélectionnés dans les bases DDTM 50 « Structure du trait de côte » et « accès au littoral » sont visibles sur cette figure. La palissade en bois situé entre l'accès 10 et l'accès 11 détectée sur la base de photographie de la DDTM50 (Figure 32) et sur l'ortho-photo est également prise en compte. Le trait de côte Histolitt est ensuite « découpé » à l'aide des polygones de report pour établir la longueur de trait de côte sous influence directe. Une longueur de 526 m est évaluée pour l'emprise directe de l'artificialisation de ces ouvrages pour la zone d'étude.

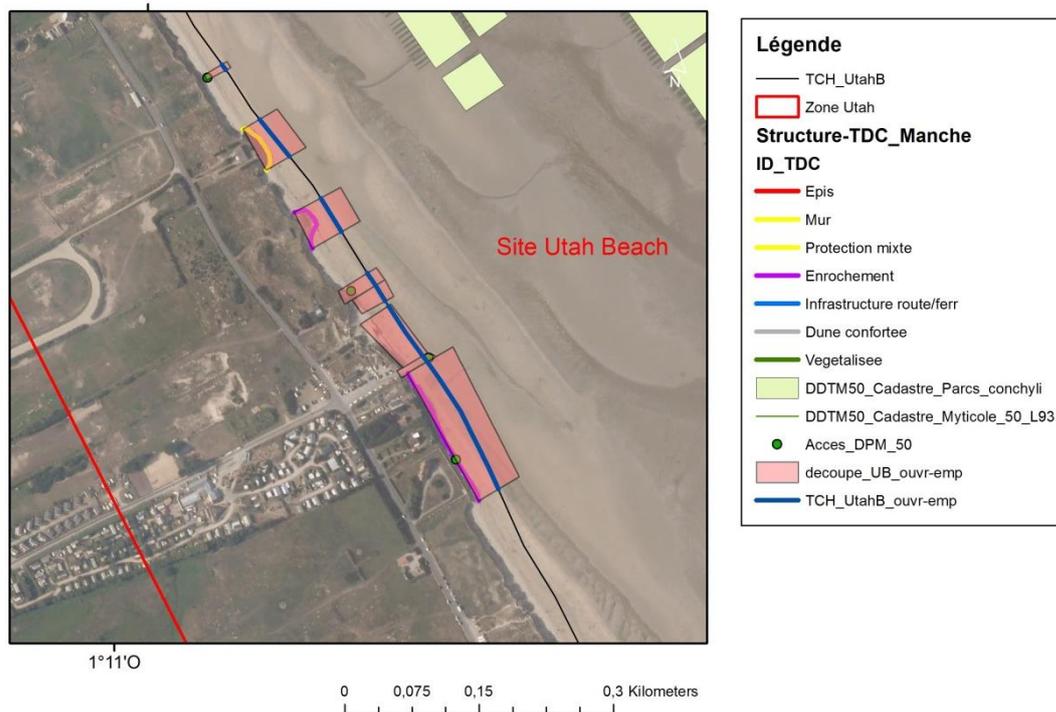


Figure 33 : Tracé des polygones permettant le report des secteurs de masse d'eau artificialisés par des ouvrages d'aménagements (protection, accès) sur le trait de côte Histolitt (en bleu) pour la zone d'étude Utah Beach.

- Evaluation de l'impact direct pour la métrique 3

Ce site est marqué par la présence d'ouvrages essentiellement longitudinaux, situés sur le trait de côte. Ces ouvrages n'ont donc pas d'emprise directe sur la masse d'eau. Seule la cale de la Madelaine, dénommée « Acc\_10 » dans la base Accès de la DDTM50 est un ouvrage transverse qui a une emprise sur la masse d'eau. L'emprise de cet aménagement dans la masse d'eau dépend alors fortement de la délimitation à terre de la masse d'eau choisie (limite de la masse d'eau telle qu'elle est définie ; trait de côte Histolitt ; indicateur de trait de côte observé sur l'ortho-littorale ou base DDTM « structure du trait de côte ») La surface de la cale est donc d'environ 270m<sup>2</sup> entre un indicateur de trait de côte issu de l'ortho-littorale et le bout de la cale observable sur cette ortho-littorale, mais il n'est que de 90m<sup>2</sup> si le trait de côte pris en compte est celui de la masse d'eau (Figure 34). Il diminue encore de 15m<sup>2</sup> si le trait de côte utilisé est Histolitt. L'erreur d'appréciation d'une surface avec ce type de photo aérienne est

d'au moins 10% et le contour précis pour délimiter l'impact direct mériterait l'utilisation de plans initiaux ou un levé de terrain.

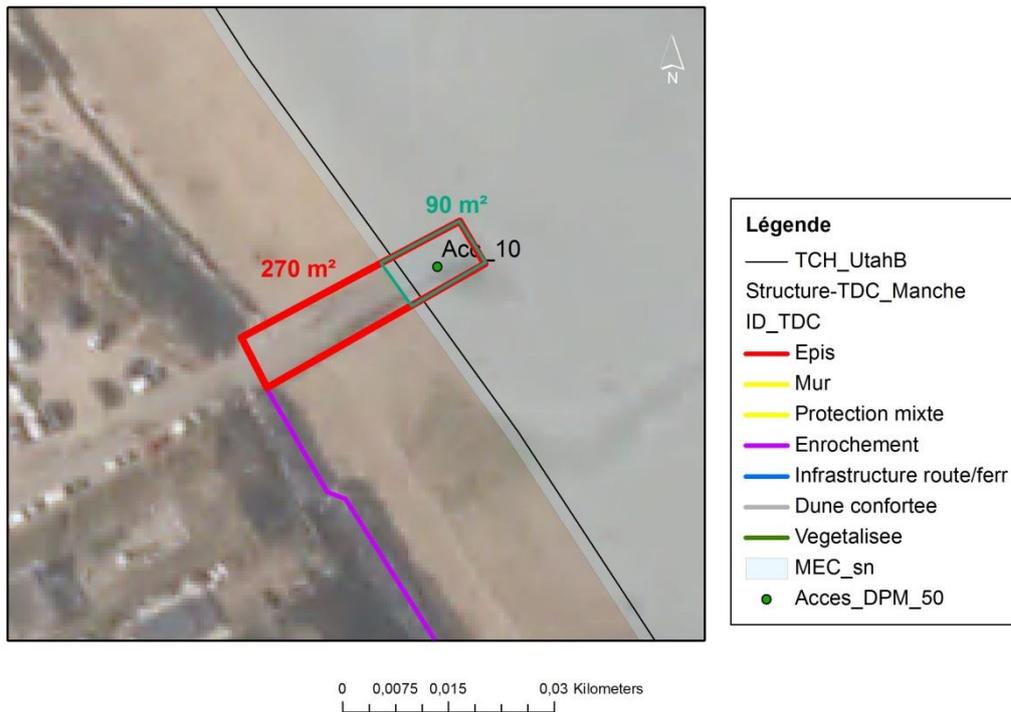


Figure 34 : Illustration du problème lié au choix du trait de côte pour l'évaluation de l'impact direct des ouvrages littoraux pour la métrique 3.

Pour établir l'impact direct, c'est-à-dire l'emprise des structures artificielles conchylicole installées dans zone d'étude, la base DDTM 50 « cadastre Parcs Conchylicoles » est formée de polygones qui permettent aisément le calcul de surface par le SIG. En revanche, la comparaison avec l'ortho-photographie littorale montre certaines différences dans le positionnement des parcelles dédiées à la conchyliculture (Figure 38). Une amélioration de certaines bases est donc utile pour établir la métrique d'emprise directe. Ces modifications des données issues des cadastres conchylicole n'ont pas été réalisées pour ce site. De plus, les données de la base DDTM 50 « cadastre Mytilicole » sont sous forme de polygones. Il conviendrait donc de reprendre ces données pour en faire des polygones permettant le calcul de surface.

### **Impacts indirects**

La zone d'influence indirecte d'un aménagement correspond à un secteur où le transport sédimentaire est modifié par l'artificialisation.

Pour le site d'Utah Beach, nous n'avons pas d'étude ou de mesures in situ décrivant les modifications liées à l'artificialisation. C'est pourquoi nous avons utilisé les données de télédétection Lidar et ortho-photo littorale disponibles pour observer des indices morphologiques et sédimentaires de ces impacts indirects.

- Zone d'impact indirect des ouvrages et aménagements littoraux

Dans le cas d'un ouvrage longitudinal fixant le trait côte, l'ortho-photographie permet de cartographier assez aisément une zone d'impact indirecte entre la limite de l'ouvrage et le secteur où le trait de côte non fixé évolue plus librement. Au niveau de cette jonction, le trait de côte n'est pas artificialisé, mais sa forme est clairement influencée par la présence de l'ouvrage. La zone d'impact indirecte est alors observable par un indice morphologique et peut être reportée sur le trait de côte officiel pour établir la métrique 2. La Figure 35 montre à l'extrémité sud-est de l'enrochement un décrochement arrondi très net entre le trait de côte fixé par les enrochements et le secteur non-artificialisé. La qualité de cette évaluation à minima peut être considérée comme moyenne, car elle ne permet pas de déterminer l'ensemble des effets de l'ouvrage sur le transport sédimentaire comme décrit dans le paragraphe 3.1.1.

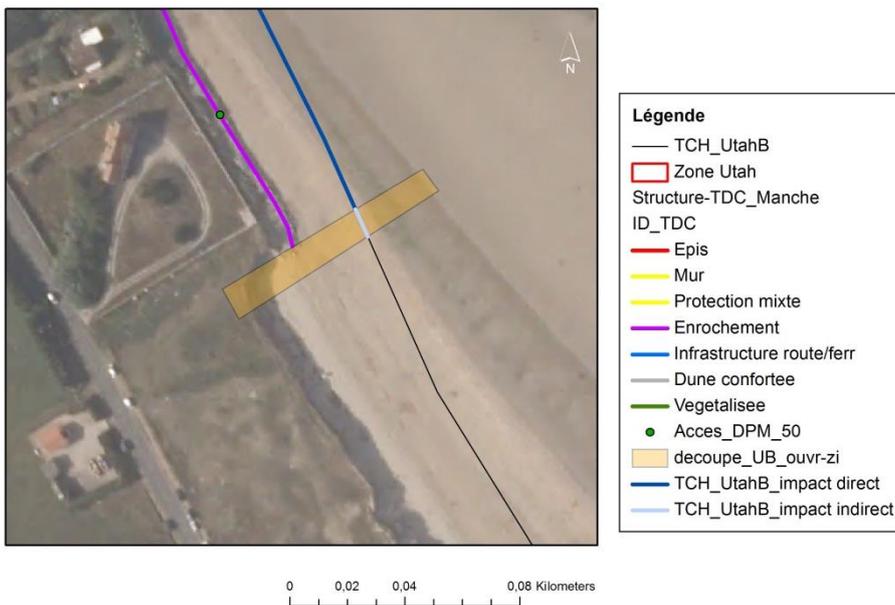


Figure 35 Tracé d'un polygone permettant le report sur le trait de côte Histolitt d'un secteur d'impact indirect d'un enrochement. Source : Ortholittorale v2.

Une autre configuration rencontrée sur le site d'étude d'Utah Beach concerne un segment où les ouvrages longitudinaux de fixation du trait de côte alternent avec des zones sans ouvrage (Figure 36). Entre les ouvrages, le trait de côte caractérisé (limite de végétation dunaire ou limite de falaise) apparaît en retrait, irrégulier et ondulant. Pour cette étude, nous faisons l'hypothèse que ce trait de côte sableux irrégulier est sous l'influence indirecte des ouvrages longitudinaux adjacents. La qualité de cette évaluation est moyenne à mauvaise, car l'analyse d'une ortho-photographie unique ne permet pas de quantifier précisément les limites d'influence d'une succession d'ouvrage sur le trait de côte.

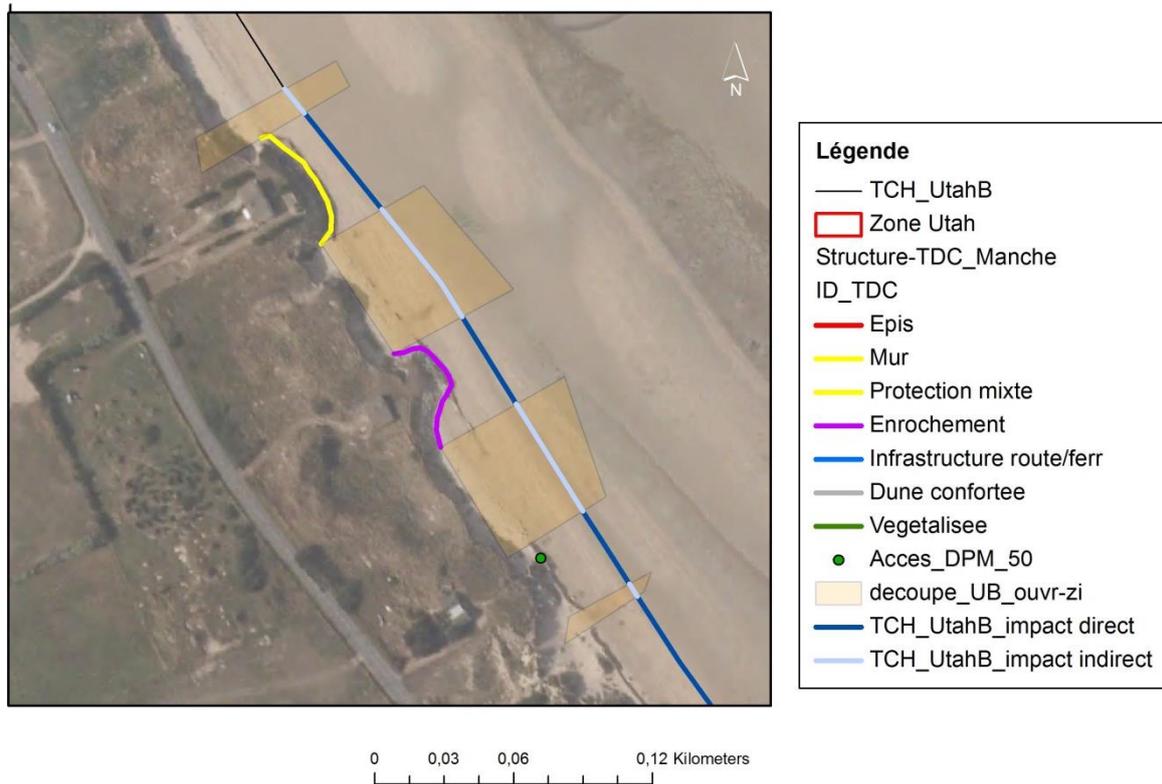


Figure 36 : Tracé de polygones permettant le report sur le trait de côte Histolitt des secteurs d'impact indirect d'un ouvrages de protection du trait de côte. Source : Ortholittorale v2.

De part et d'autre de la cale de la Madeleine (Acc\_10), la zone est sous l'influence directe d'ouvrages longitudinaux (palissade en bois et enrochement, Figure 33 et Figure 37). La détermination d'une zone d'influence indirecte de cette cale pour l'évaluation de la métrique 2 n'est donc pas nécessaire. L'utilisation des données Lidar pour réaliser des coupes topographiques transverses à l'ouvrage permettent cependant de visualiser des différences d'altitude de part et d'autre de la cale. Ces différences peuvent aider à l'évaluation des zones d'impacts indirects d'un ouvrage transverse.

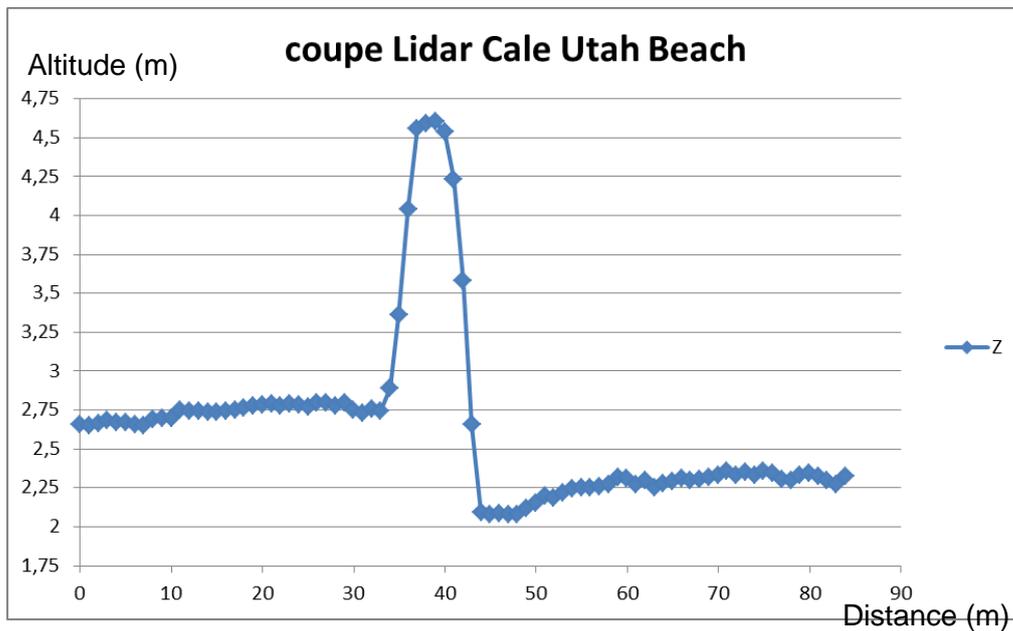
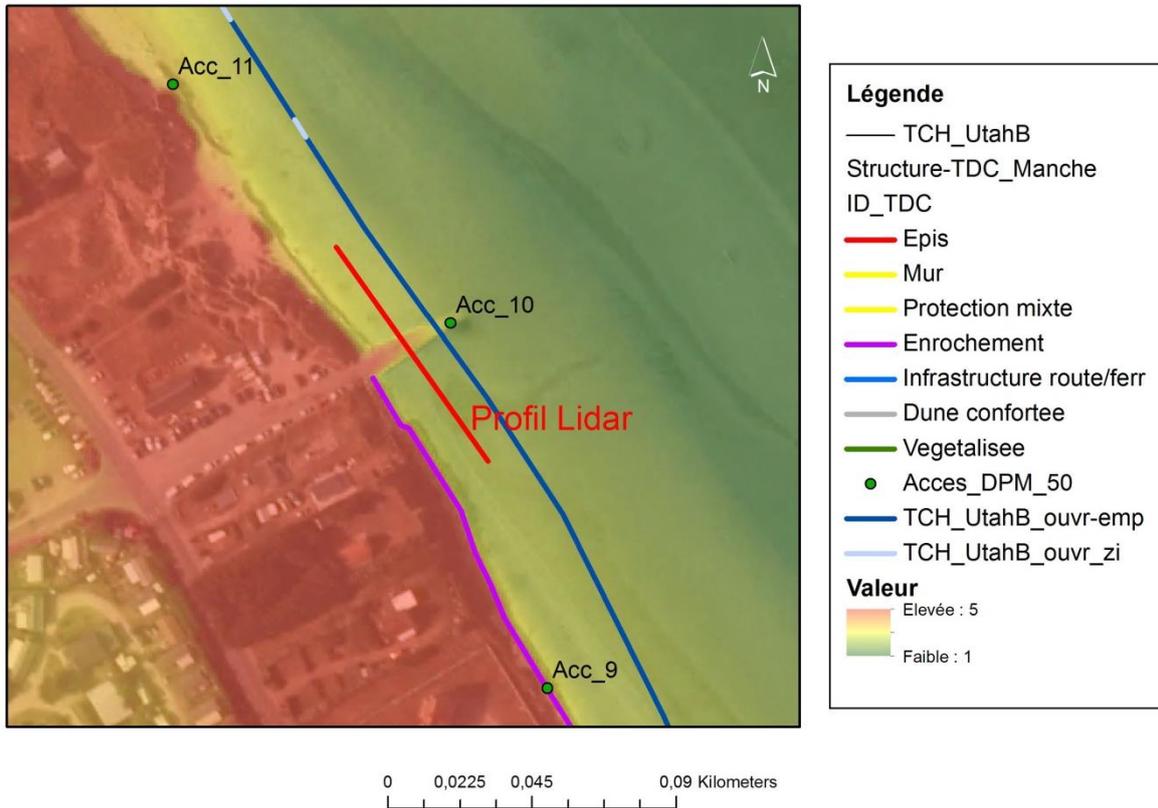


Figure 37 : Impact indirect d'une cale sur l'altimétrie de la plage. A) vue en carte b) coupe transverse de l'altitude. Source : Ortholittorale v2 et Lidar IGN.

Au final, l'impact indirect des ouvrages de la zone d'étude d'Utah Beach représentent 168 m reportés sur le trait de côte officiel.

## Evaluation relative à la métrique 2

Ce site d'étude ne couvre qu'une partie de côte de la masse d'eau FRHC10, l'évaluation de la métrique 2 (à l'échelle de la masse d'eau) n'est donc pas réalisable. A partir des longueurs des impacts directs et indirects des aménagements à la côte, il est possible d'évaluer la longueur d'influence relative à la métrique 2 pour cette zone. Ces résultats sont présentés dans le tableau suivant.

	Impacts directs		Impacts indirects		Zone d'influence	
	Longueur (m)	%	Longueur (m)	%	Longueur (m)	%
<b>TdC zone d'étude</b>					3 056	
<b>Aménagements</b>	526	17.2	168	5.5	694	22.7

Tableau 4 : Evaluation de la zone d'influence des aménagements relative à la métrique 2 pour la zone d'étude Utah Beach.

Ainsi, 22.7 % de la longueur de côte de la zone d'étude est sous influence d'aménagements, les impacts indirects représentant environ ¼ de cette longueur.

## Evaluation relative à la Métrique 2bis

Afin de tenir compte des aménagements conchylicoles présents au sein même de la masse d'eau (en zone intertidale), les longueurs des concessions sont reportées sur le trait de côte Histolitt (Figure 38). La longueur de côte correspondante est de 2384 m, ce qui représente 78% de la longueur du trait de côte de la zone (dont une partie est déjà sous influence des aménagements côtiers).

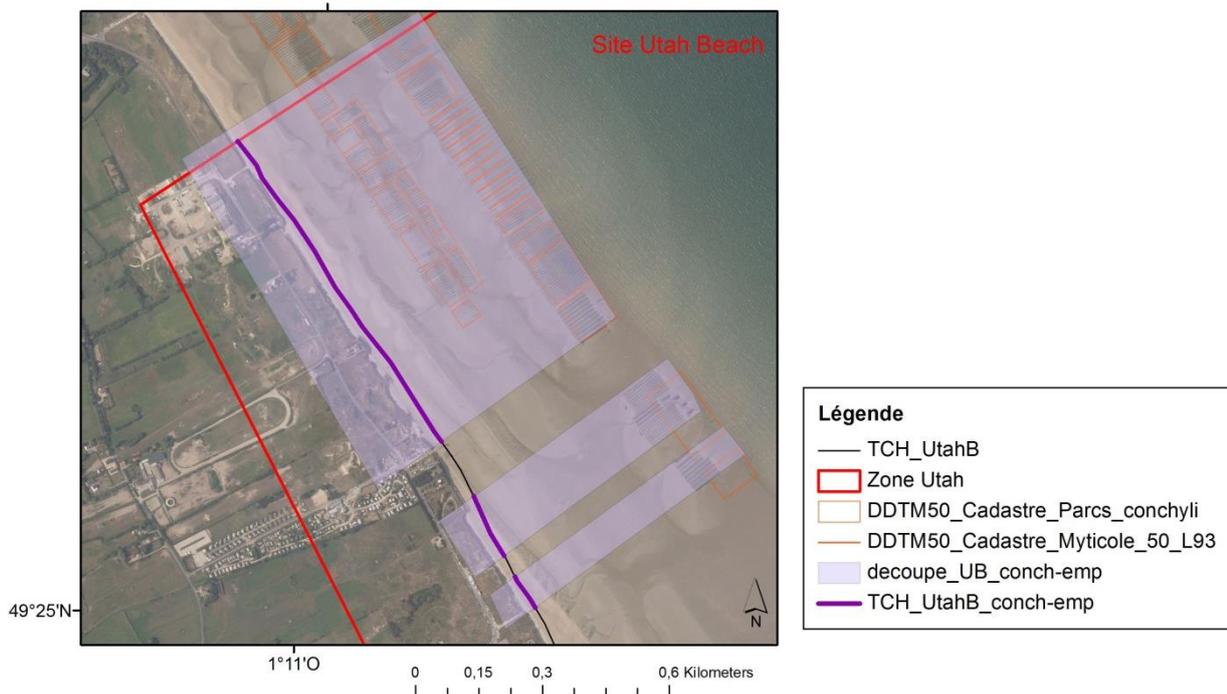


Figure 38 : Tracé des polygones permettant le report des secteurs de masse d'eau artificialisés par la conchyliculture sur le trait de côte Histolitt (en violet) pour la zone d'étude Utah Beach.

Si l'on calcule, à ce niveau, la longueur relative à la métrique 2bis (en supprimant les longueurs de côte déjà considérées relativement à la métrique 2), on obtient un taux d'artificialisation au droit du trait de côte de la zone de 88.8 %.

- Il est même possible d'aller encore plus loin pour la métrique 2bis, en considérant aussi les impacts indirects des concessions conchylicoles au sein de la masse d'eau. En effet, autour des secteurs de conchylicultures, l'ortho-photographie littorale montre la présence de dépôts qui semblent liés aux concessions. La Figure 39 illustre cette présence de petits bancs sableux situés en arrière des tables ostréicoles, dans un secteur protégé de l'érosion par les aménagements ostréicoles.
- Ainsi, ces zones pouvant être considérées comme artificialisées, car impactées par la présence de la conchyliculture, elles ont été projetées à la côte comme précédemment (voir figure suivante). Le taux d'artificialisation au droit du trait de côte de cette zone passe alors à 90.7%.

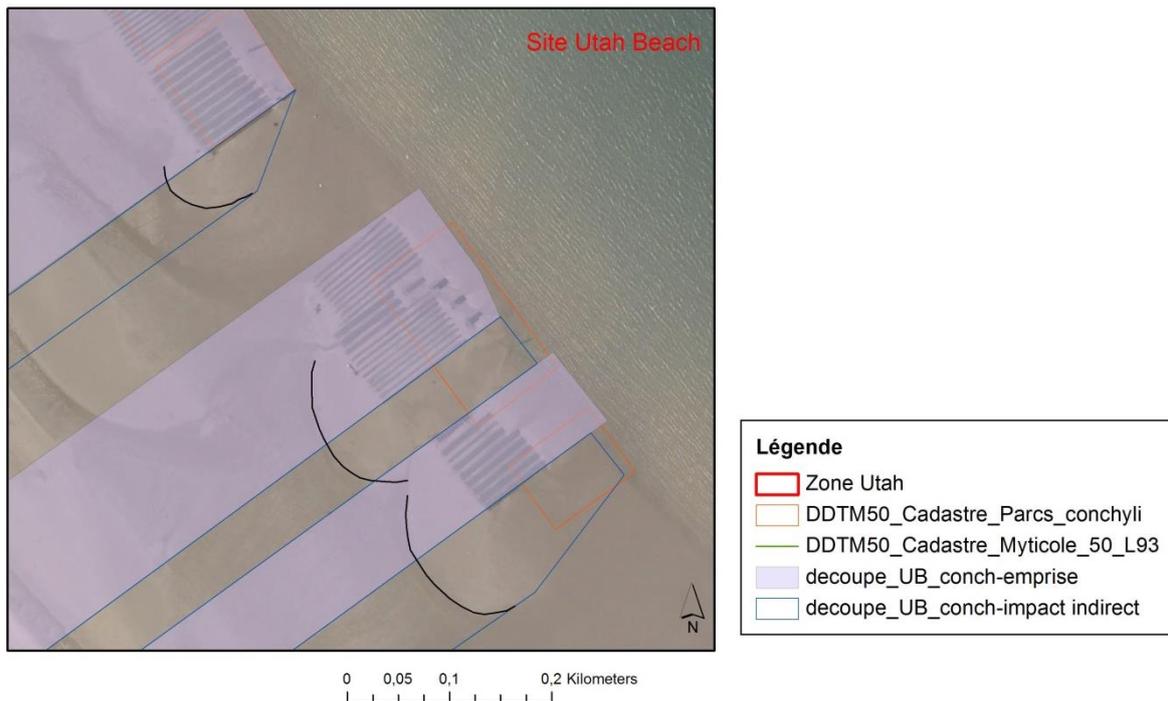


Figure 39 : Tracé des polygones permettant le report des secteurs de masse d'eau artificialisés par la conchyliculture sur le trait de côte Histolitt. En violet, les zones d'impact directe, les contours bleus correspondent au secteur d'impact indirect. Source : Ortholittorale v2.

Ainsi, sur ce site, qui à première vue semble relativement peu artificialisé, environ 23 % du trait de côte de la zone est influencé (artificialisé) par les aménagements côtiers (métrique 2). Par contre, si l'on prend en compte l'artificialisation au droit du trait de côte de la zone, le taux de longueur de côte sous influence passe à 90.7 %..

La métrique 3 n'a pas pu être évaluée sur ce site, par manque de données pertinentes.

### **4.3. SITES A FALAISE EN SEINE-NORMANDIE : CRIEL-SUR-MER**

#### **4.3.1. Contexte**

Les côtes de Haute-Normandie sont principalement constituées de falaises de craie du Crétacé Supérieur, riches en silex. Comme les côtes sableuses, ce type de côte présente différents types d'aménagement (ports, ouvrages de défenses,...). Ces aménagements peuvent avoir des effets sur la dynamique de recul des falaises, notamment via leur interaction avec les cordons de galets (ces galets de silex sont les produits résiduels de l'érosion des falaises de craie).

De la baie de Seine à la baie de Somme, de nombreux sites présentent des ouvrages transversaux tels que des épis ou des jetées. Dans le cadre de ce projet, il apparaît donc indispensable de s'intéresser à ce type de côte, caractéristique des côtes de Seine-Maritime, et à l'influence des aménagements transversaux sur celle-ci.

Du Cap d'Antifer à la Baie de Somme, la dérive littorale est orientée du Sud-Ouest vers le Nord-Est (Augris et al. 2004).

La dynamique des côtes à falaises est différente de celle des côtes sableuses (ou côtes d'accumulation) notamment par le fait qu'elles ne sont qu'en recul (pas d'avancée possible, contrairement aux côtes sableuses), que leur érosion n'est pas continue mais événementielle (chute de blocs ou de pans entiers de falaises) et que leur taux d'évolution (de recul) sont généralement faibles (recul moyen des falaises d'Antifer au Tréport de 0.24 cm/an entre 1966 et 2008, Letortu, 2013). Etudier cette évolution, et l'influence des aménagements sur celle-ci, nécessite donc des suivis sur des temps relativement longs (plusieurs décennies). Pour ce projet, nous nous sommes donc concentrés sur des sites ayant déjà fait l'objet d'étude couvrant des périodes relativement longues. Dans les travaux de thèse de Costa (1995) et plus récemment de Letortu (2013), l'impact d'ouvrages transversaux sur les vitesses de recul de falaise a été évalué. Nous avons donc choisi de considérer ici un des sites étudiés dans ces thèses : Criel-sur-Mer.

Pour ce site, nous avons choisi arbitrairement une zone étendue de 700 m de part et d'autre de la cale au Sud-Ouest et de l'épi au Nord-Est. La longueur du trait de côte Histolitt de la zone d'étude vaut 2 395 m.

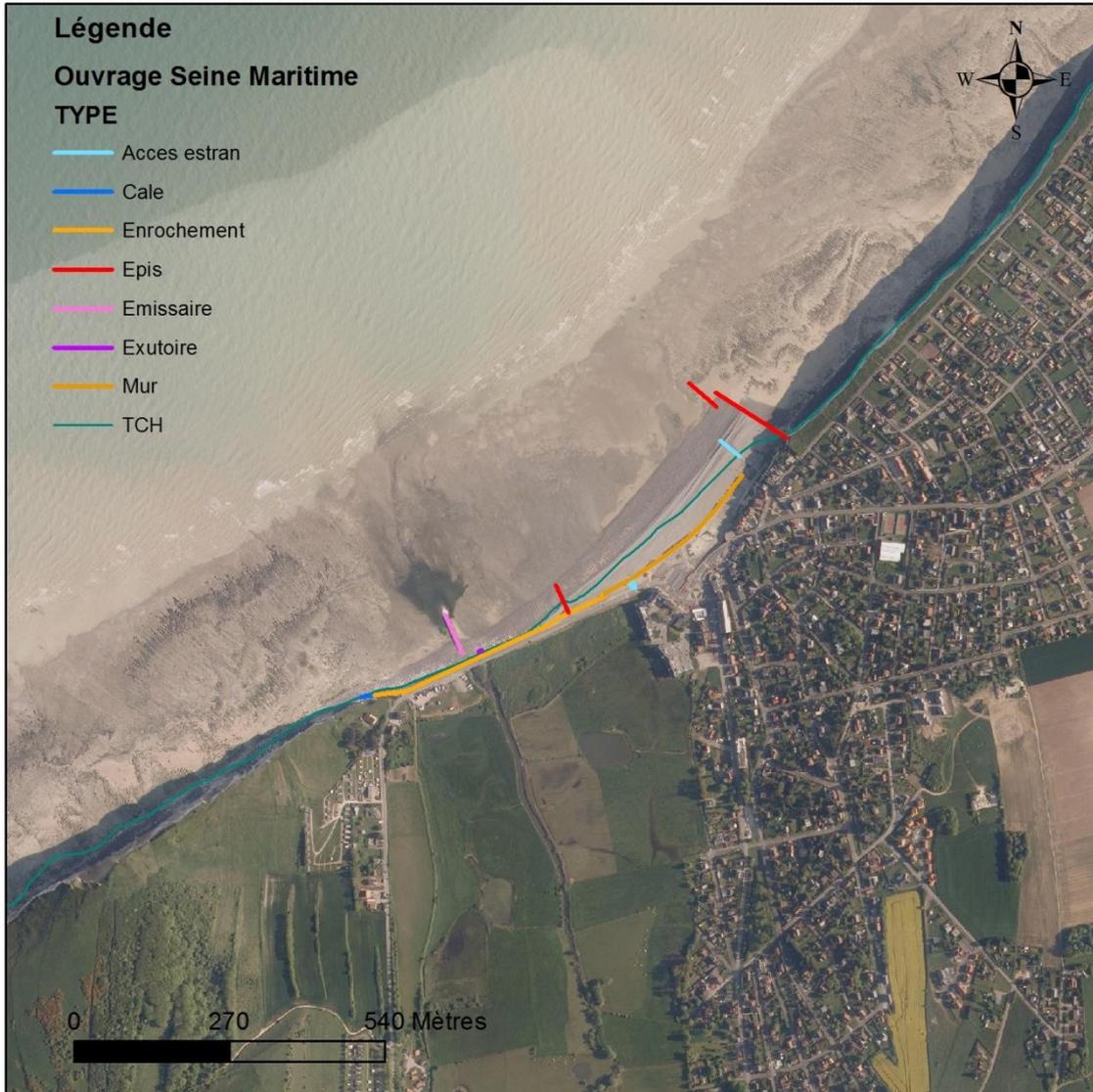


Figure 40 : Visualisation de la zone d'étude et des ouvrages présents (source DDTM76). Fond de carte ortho-littorale v2 (IGN).

#### 4.3.2. Evaluation des zones d'impacts

##### **Impacts directs**

A partir de la base de données ouvrages de la DDTM76, l'emprise des différents aménagements présents est évaluée.

Ainsi, plusieurs aménagements longitudinaux sont présents (voir figure 40) : un mur (en maçonnerie), une digue en enrochement ainsi qu'une cale à l'extrémité de la digue en enrochement. La longueur cumulée de ces 3 ouvrages représente une longueur de 785 m, soit 33% de la longueur de côte de la zone d'étude.

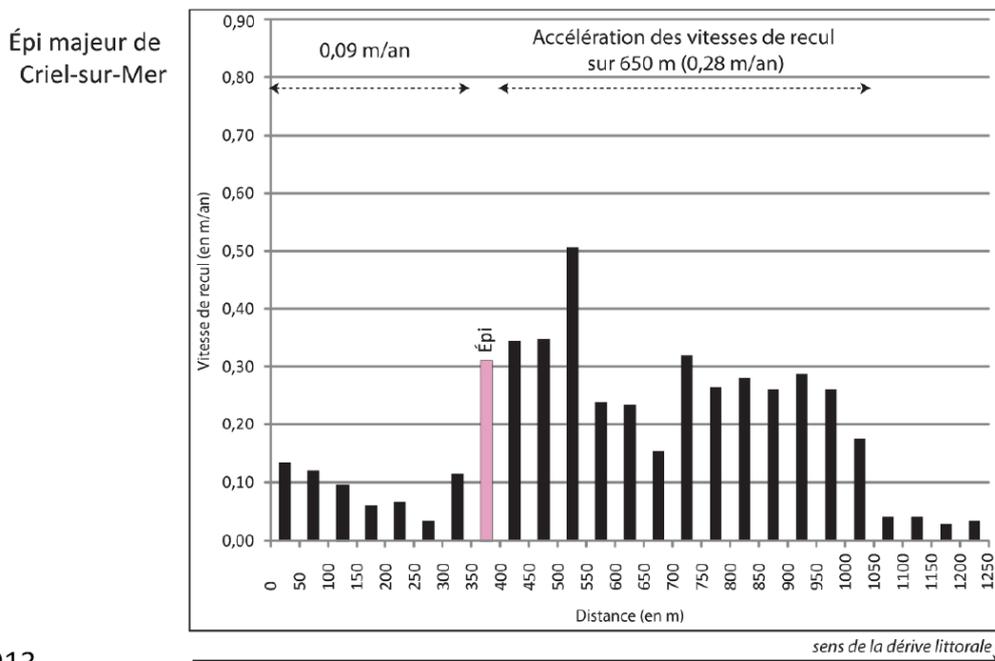
De plus, des aménagements transversaux sont présents au nord-est : 2 épis et un accès à l'estran de largeur cumulée d'environ 10 m (< 1% de la longueur de côte de la zone d'étude).

### Impacts indirects

Le seul impact indirect, induit par les aménagements présents, visible sur l'ortho-littoral et le Lidar, est l'accumulation de galet en amont dérive de l'épi principal. Ainsi une zone, d'environ 960 m de longueur, présente une forte zone d'accumulation de galets à l'ouest de l'épi principal. Cette longueur d'accumulation de galets représente environ 6.5 fois la longueur de l'épi.

Cette zone d'impact indirect située majoritairement devant les ouvrages longitudinaux n'est donc pas comptabilisé car déjà sous impacts directs. Par contre à l'amont immédiat de l'épi, au niveau de l'accès à estran, environ 90 m de linéaire côtier sans ouvrage sont considérés impactés indirectement par l'épi (soit 3.75 % de la longueur de côte de notre zone d'étude).

A l'aval dérive de l'épi, il n'est pas possible, à partir d'ortho-photo ou de données topographiques fines (LiDAR), d'évaluer la longueur aval sous influence de l'épi. Les travaux de thèse de Letortu (2013) proposent par contre une évaluation de cette longueur.



113

Figure 41 : Mesure des vitesses de recul des falaises autour de l'épi principal de Criel-sur-Mer par analyse diachronique d'ortho-photos datant de 1966, 1995 et 2008 (Source : Letortu, 2013).

Ainsi à partir de l'analyse diachronique d'ortho-photos datant de 1966, 1995 et 2008, Letortu (2013) a évalué les vitesses de recul de la falaise autour de l'épi de Criel-sur-Mer, voir Figure 41. Les résultats obtenus montrent une accélération de la vitesse de recul des falaises d'un facteur 4, en aval dérive de l'épi, sur environ 650 m (soit 27% de la longueur de côte de la zone). La longueur de côte sous influence de l'épi est donc de 960 m en amont et 650 m en aval, soit 1 610 m, ce qui représente presque 11 fois la longueur de l'épi.

Nous ne remettons pas, ici, en question ces résultats, mais un point important est à souligner : l'existence d'un épi, semblable à celui de Criel/Mer, à Mesnil Val Plage. Ainsi, la zone présentant des faibles vitesses de recul, à partir de 1 050 m sur la Figure 41, se trouve en fait dans la zone d'accumulation de galets de l'épi de Mesnil Val Plage ; la falaise est donc

protégée de l'érosion par ces galets (Figure 42). Cette configuration particulière amène donc des questions quant à la diminution des vitesses de recul et donc à la longueur d'influence aval de l'épi.

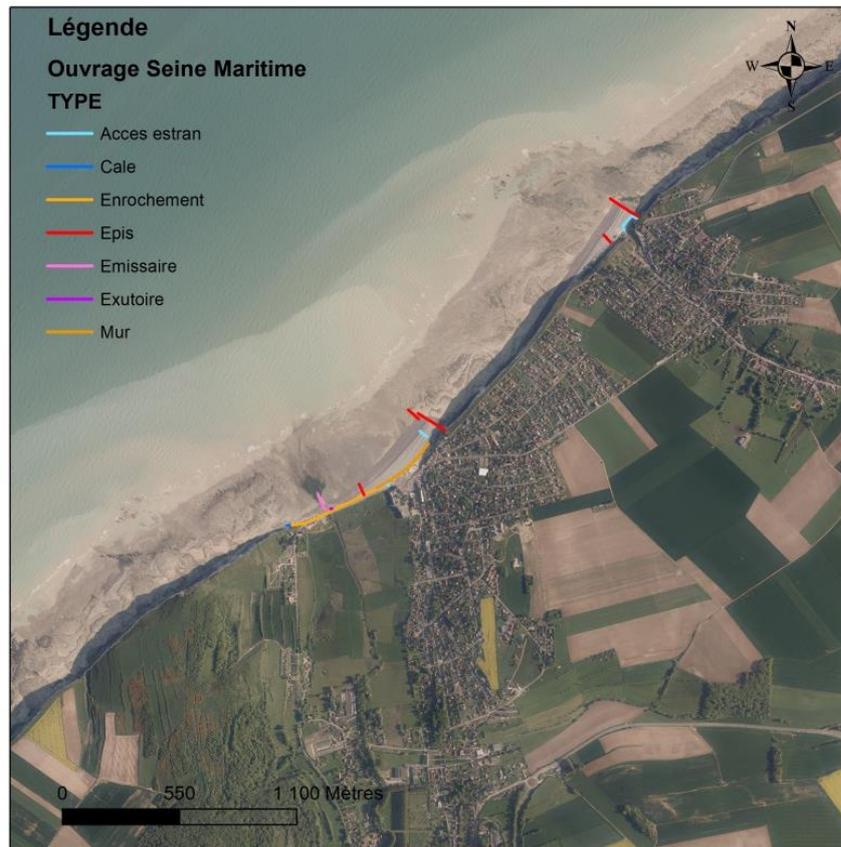


Figure 42 : Visualisation de l'orho-littorale v2 au niveau de Criel/Mer (au centre de l'image) et de Mesnil Val Plage (au nord-est de l'image).

Dans la littérature, on peut trouver d'autres études relatives à l'analyse du recul des falaises de la région. Ainsi, Dewez et al. (2013) ont suivi par scanner laser terrestre, de décembre 2005 à avril 2008, l'évolution de la falaise à l'est immédiat de l'épi de Mesnil Val Plage. Cette méthode de suivi permet une grande précision dans l'évaluation des volumes d'éboulements.

Les résultats, présentés sur la Figure 43, montrent 2 zones principales d'éboulement : une ayant connue plusieurs évènements, sur environ 300 m de longueur juste à l'aval de l'épi et une autre plus importante à 700 m en aval. Ces résultats pourraient indiquer que la zone d'influence aval de l'épi est d'environ 300 m. Néanmoins, quelques mois avant le début des levés, en juillet/aout 2005, un éboulement a eu lieu à environ 400 m en aval de l'épi. De plus, il est impossible de dire si l'éboulement à 700 m en aval de l'épi est lié à celui-ci.

Ce suivi, effectué sur une durée d'environ 2 ans et demie, apparait donc trop court pour en déduire une longueur d'influence de l'épi ; des données sur le long terme (plusieurs dizaines d'années) seraient nécessaires.

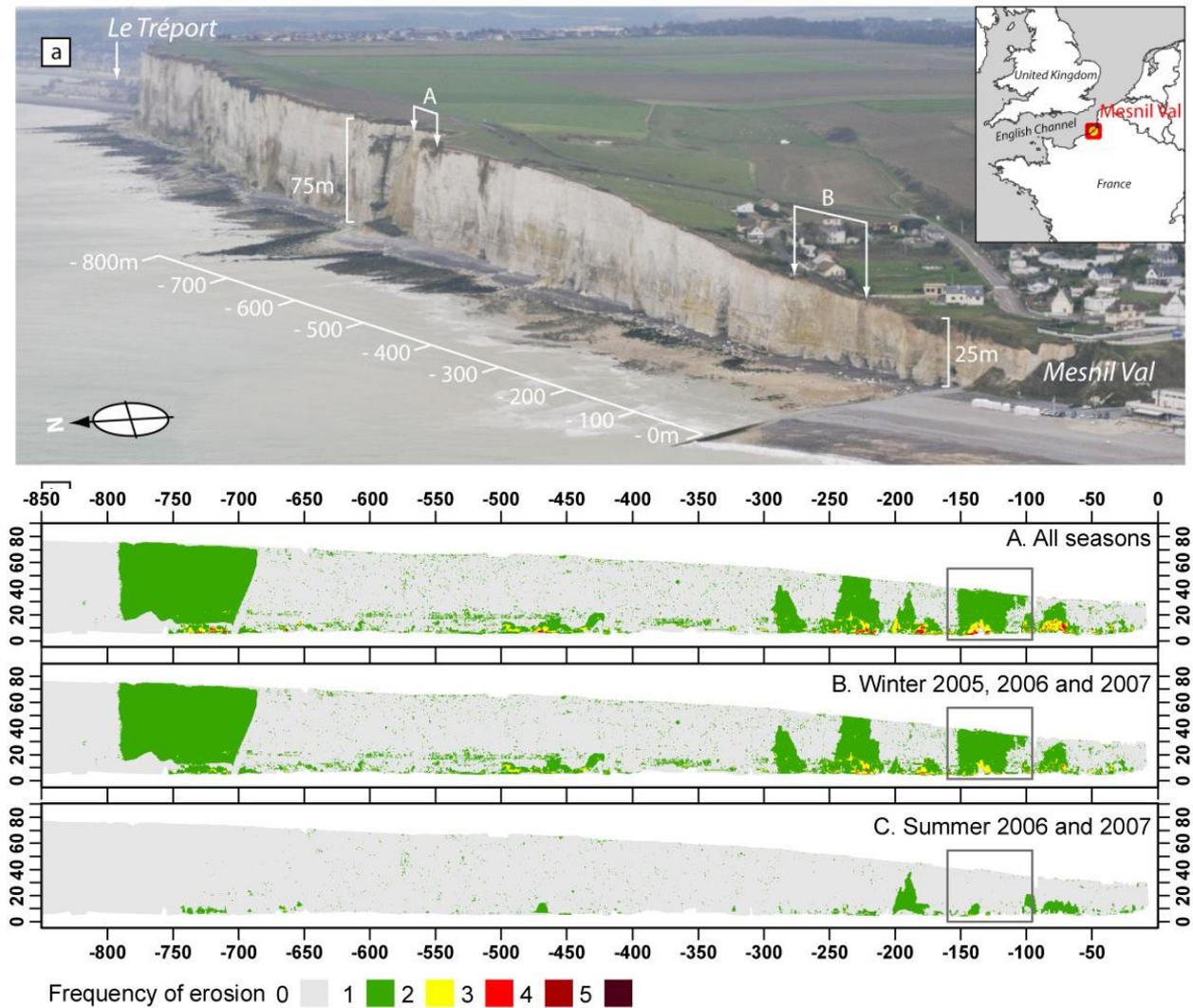


Figure 43 : (a) Vue aérienne de la falaise (T. Dewez 5 oct. 2010) précisant la position des deux plus gros éboulements A et B enregistrés entre décembre 2005 et avril 2008 par scanner laser terrestre. (b) Cartes des fréquences d'éboulement sur la falaise dans l'intervalle entre décembre 2005 et avril 2008.

### Evaluation relative à la métrique 2

Ce site d'étude ne couvre qu'une partie de côte de la masse d'eau FRHC18, l'évaluation de la métrique 2 (à l'échelle de la masse d'eau) n'est donc pas réalisable. A partir des évaluations des longueurs d'impacts directs et indirects, il est possible d'évaluer la longueur de côte sous influence des aménagements présents (Tableau 5).

	Impacts directs		Impacts indirects		Zone d'influence	
	Longueur (m)	%	Longueur (m)	%	Longueur (m)	%
<b>TdC zone d'étude</b>					2 395	
<b>Aménagements</b>	795	<b>33.2</b>	740	<b>30.9</b>		<b>64.1</b>

Tableau 5 : Evaluation de la zone d'influence des aménagements relative à la métrique 2 pour la zone d'étude à Criel/Mer.

## Evaluation relative à la Métrique 2bis

Ce site d'étude ne présentant aucun aménagement anthropique au large des côtes, la longueur relative à la métrique 2bis correspond alors à celle relative à la métrique 2.

La métrique 3 n'a pas pu être évaluée sur ce site, par manque de données pertinentes.

## 4.4. HAVRE DE SIENNE

### 4.4.1. Contexte

Dans la liste initiale de 18 sites identifiés au lancement de l'étude (Tableau 1), une dizaine environ se situe en contexte estuarien. Ces sites qui sont soumis à des forçages marins et fluviaux présentent une dynamique hydro-sédimentaire différentes, et potentiellement plus complexe que les masses d'eau côtières.

Nous avons choisi d'intégrer le site du Havre de Sienne comme exemple d'étude de ce type d'environnement (Figure 44). Le site englobe les communes comprises entre Agon-Coutainville au nord et Hauteville-sur-Mer au sud. Ce choix a été conforté par le fait que ce secteur estuarien est aussi un site d'étude du projet LICCO.

Ce site est caractéristique des embouchures fluviaux-tidales de la côte ouest du Cotentin. Le secteur de la flèche sableuse qui marque le nord du havre est caractérisé par une dynamique sédimentaire complexe (Robin et Levoy, 2007). Malgré un aspect relativement préservé, le secteur, situé au sein de la masse d'eau MEC HC03, est caractérisé par plusieurs secteurs artificialisés avec des épis transverses, des enrochements et de vastes secteurs d'ostréiculture qui prennent place sur de très larges estrans macrotidaux. Le site d'étude s'étend sur 10,8 km du nord au sud, mais le trait de côte suit l'estuaire sur plus de 5 km vers l'est. La longueur de trait de côte atteint 44,1 km.

Les données existantes et utilisées pour cette étude sont

- Etude LICCO et graphiques d'évolution de position du trait de côte.
- Les données de quelques stations du suivi de l'évolution des plages et du trait de côte de la Manche (CREC-UCBN).
- Les données Lidar topographique de l'IGN.

- La base de données géographiques « Structure du trait de côte 50 » de la DDTM50.
- La base de données géographiques « Accès DPM 50 » de la DDTM50.
- Les bases de données géographiques « Cadastre Mytilicole 50 » et « Cadastre Parcs conchylicoles 50 » de la DDTM50.
- La base de données maritime et littorale du SHOM (câbles et épaves).
- Orthophotographie 2013.

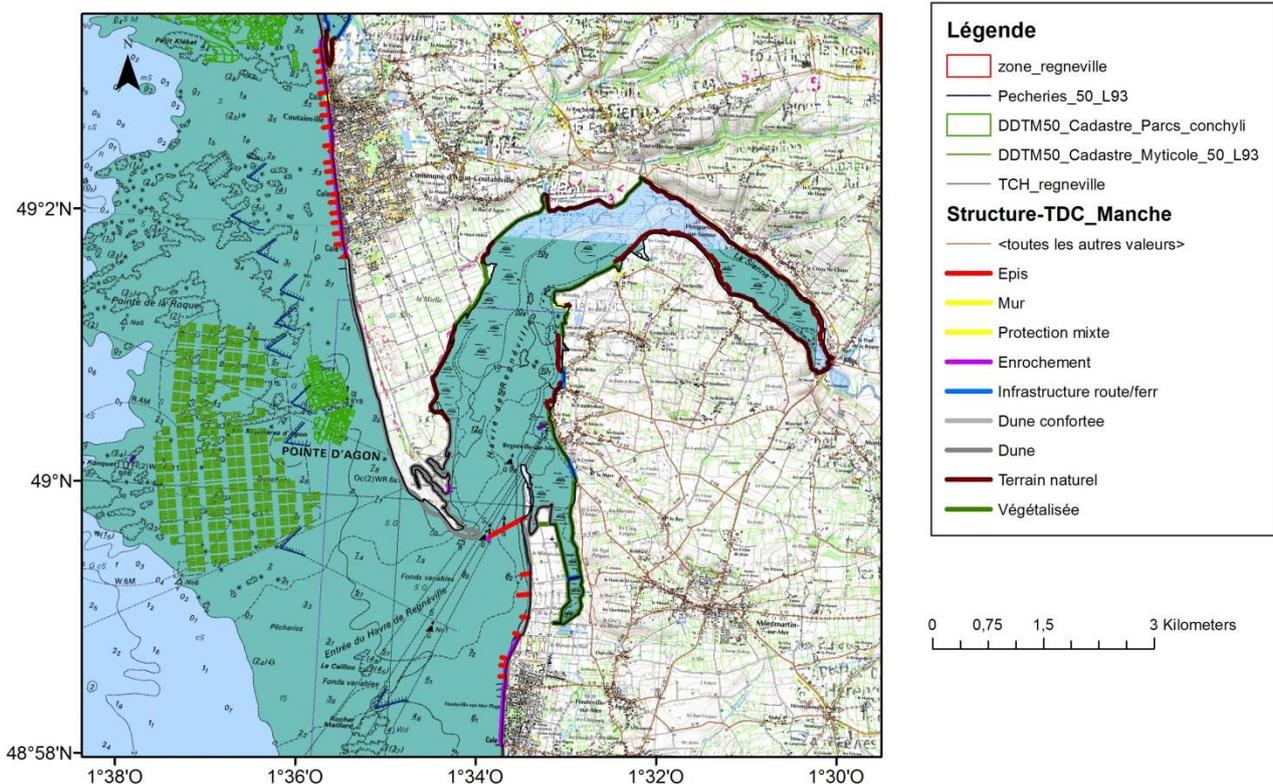


Figure 44 : Zone d'étude Havre de Siennes. Sources : IGN et DDTM50.

#### 4.4.2. Evaluation des zones d'impacts

##### Impacts directs

- Analyse des bases de données disponibles
- Base DDTM 50 « Structure du trait de côte »

Dans la zone d'étude, cette base recense divers ouvrages de protection, mais elle ne détaille pas l'ensemble des éléments artificialisés en connexion avec la masse d'eau. Ainsi, au nord de la zone, qui prend en compte une partie du Havre de Blainville, l'orthophotographie 2013 montre la présence d'une route et d'habitations qui ne sont pas pris en compte dans la base DDTM 50.

Au niveau de la pointe de la flèche sableuse d'Agon, cette base référence un ouvrage longitudinal en enrochement (FID 219), mais il manque une passerelle en bois perpendiculaire au trait de côte dans les bases disponibles (Figure 45). Il ne s'agit pas d'un ouvrage de défense contre l'érosion.



Figure 45 : Passerelle en bois située à la pointe d'Agon. Source Google Street view

A l'intérieur du Havre de Sienne, la base « structure du trait de côte » montre une alternance entre des terrains naturels et des digues végétalisées, probablement en terre ou en sable, qui protègent les terrains agricoles attenants.

Dans un secteur de côte classé comme « terrain naturel » (FID 252), il faut noter la présence d'une exploitation agricole située au niveau du trait de côte. On peut estimer que cette petite largeur de côte est artificialisée (Figure 46).

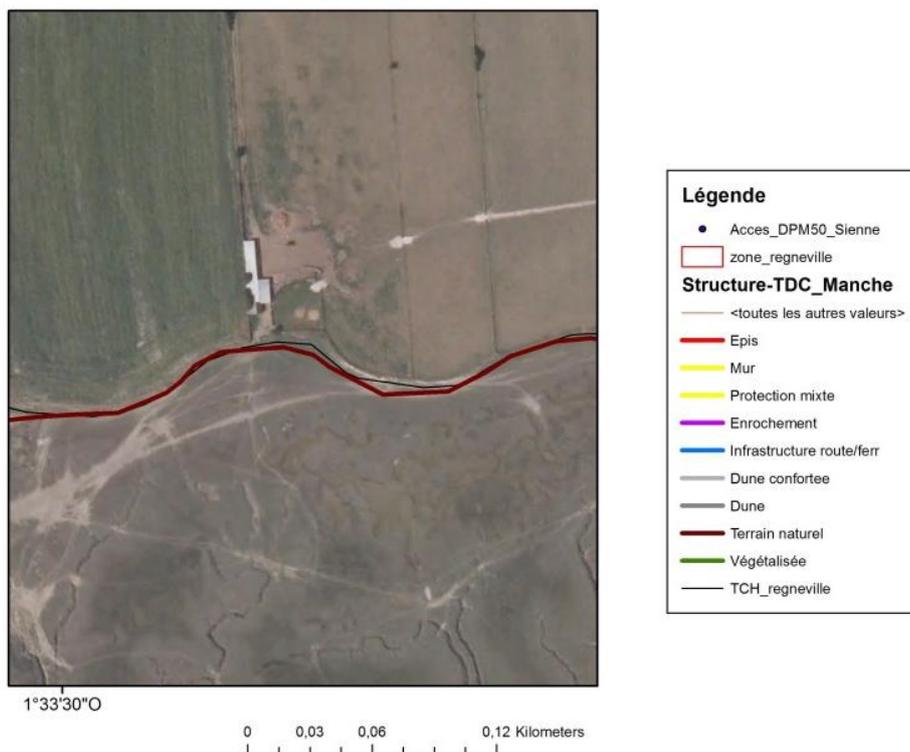


Figure 46 : Présence d'une exploitation agricole au niveau du trait de côte.

Plus à l'est, une route passe au niveau du talus naturel qui forme la berge nord-est de l'estuaire de la Sienne. En l'absence de vérification de terrain, cette route semble située bien dessus du niveau des hautes mers de vives-eaux, et donc sans effet pour l'hydromorphologie de la masse d'eau, en revanche, l'ortho-photographie montre la présence d'une habitation qui jouxte la masse d'eau et mérite à ce titre d'être considéré comme un secteur artificialisé (Figure 47).



Figure 47 : Complément de la base DDTM 50 « Structure du Trait de côte » par des secteurs artificialisés comme cette habitation jouxtant le trait de côte dans le Havre de Sienne.

De la même façon, au fond du havre de Sienne, à la limite orientale de la zone d'étude, un pont en ruine n'est pas pris en compte dans les bases utilisées (Figure 48), car ce n'est pas un ouvrage de protection sur le trait de côte. De plus, dans ce secteur qui apparaît comme « terrain naturel » dans la base (FID 248 et 249), plusieurs habitations sont situées à proximité immédiate de la ligne de côte. Ces éléments artificiels sont pris en compte dans la suite en compléments de la base DDTM pour l'évaluation de la métrique M2.



Figure 48 : Pont en ruine et secteur d'habitation au niveau du trait de côte. Source Google Street view.

Dans la partie sud du Havre de Sienne, la base de données DDTM50 « structure du trait de côte » indique la présence d'un vestige de mur (FID 242) au lieu-dit « Le Mondin » (commune de Regneville) dont la position diffère avec le trait de côte Histollit. Les données « orthophoto aérienne » ne permettent pas de vérifier la présence et la position de ce vestige de mur sur l'estran, dont la présence n'est pas remise en cause du fait de la date récente de visite par la DDTM (2011). Dans la même commune, entre les lieux-dits « La Miellette », « les Sablons » et « le Port » (Figure 49), la base fait apparaître une route-digue (FID 211), mais ne prend pas en compte un ensemble d'habitations et de route directement attenantes au trait de côte. Pour

l'évaluation de la métrique 2, ces éléments artificialisés en lien avec le trait de côte et la masses d'eau seront pris en compte.

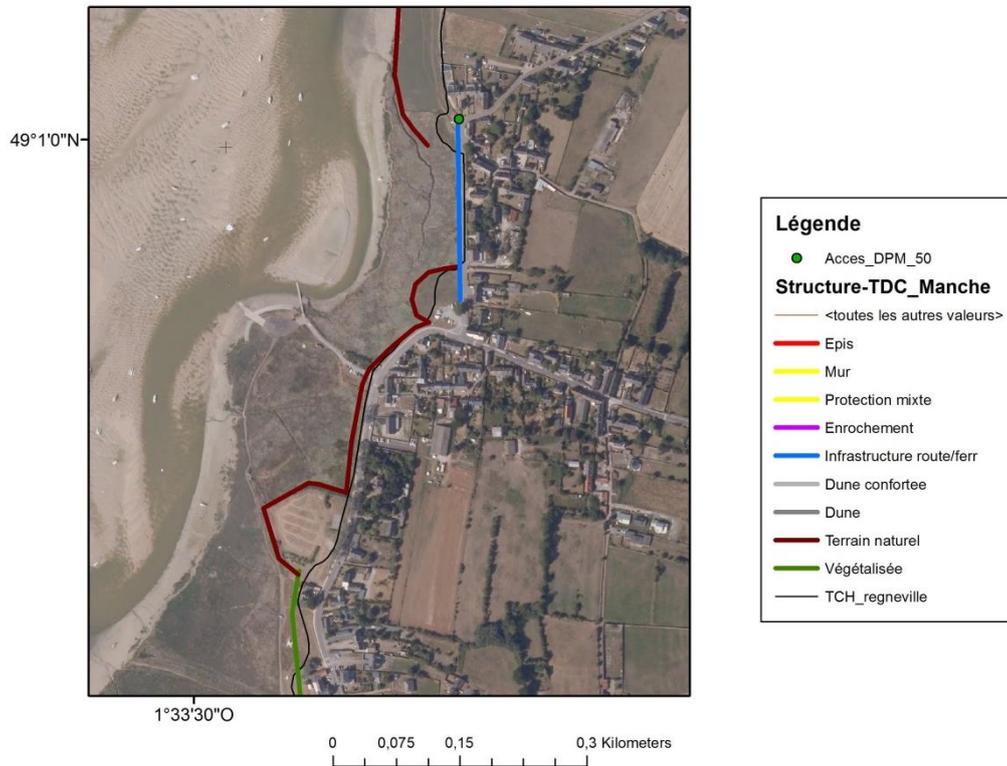


Figure 49 : Présence de zones artificialisées non cartographiées dans les bases DDTM50

Au niveau de la flèche sableuse située sur la côte sud de l'embouchure, une partie de la digue végétalisée (Figure 50, FID 202 de la base de données) n'est pas en connexion avec le trait de côte sur toute sa longueur. Juste au nord de cet angle, la base de données référence une dune dans un secteur de côte particulièrement rectiligne qui prend fin entre deux mares. Bien que cette portion de côte ne semble pas naturelle, nous ne pouvons pas en modifier sa désignation en l'absence de vérification de terrain. Dans ce même secteur (Figure 50), le trait de côte Histolitt fait apparaître une longue flèche sableuse qui n'est plus existante sur l'orthophotographie de 2013 et la base DDTM. Ces importantes modifications de la forme de la côte vont engendrer une erreur résiduelle dans le calcul des longueurs de la métrique M2.

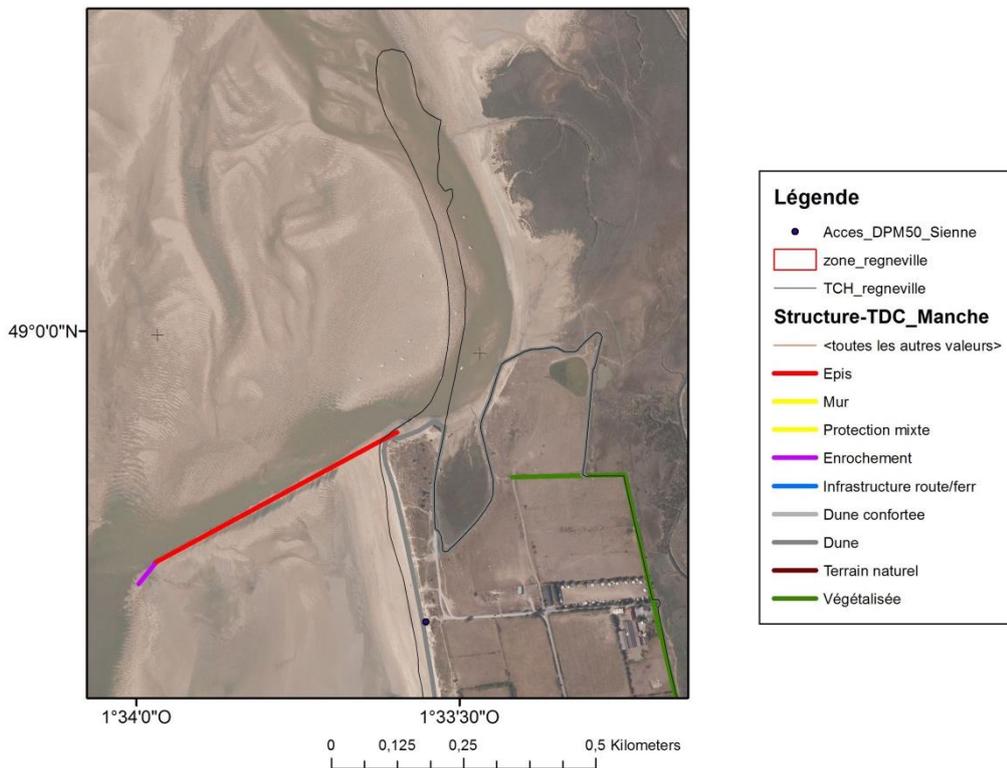


Figure 50 : Flèche sableuse de Hauteville au sud de l'embouchure du Havre de Sienna

Plus au sud, l'épi en enrochement (FID1459), visité en 2011, n'est pas visible sur l'orthophotographie de 2013. En l'absence de vérification de terrain prouvant la disparition de l'ouvrage, cette structure est prise en compte dans l'évaluation des impacts directs, à partir des informations de la base DDTM50.

- Base de données DDTM50 « accès au littoral »

Sur le site d'étude, cette base répertorie 81 accès au littoral. Dans la base de données, plusieurs liens vers les photographies visualisables en ligne ne semblent pas fonctionnels. Dans les secteurs « naturels », les photographies disponibles ont permis de vérifier la présence ponctuelle d'artificialisation pour les accès.

Sur les 81 accès, 36 ont été identifiés en dehors des zones artificialisées cartographiés par la base DDTM50 « Structure du trait de côte ». Sur ces 36 accès situés au niveau de dunes ou de terrains naturels, un seul accès est artificiel. Il s'agit d'une cale d'accès située dans le secteur dunaire naturel (Acc\_253) de la flèche sableuse d'Agon.

- Les bases de données DDTM 50 « cadastre Mytilicole », « cadastre Parcs Conchylicoles », « Pêcherie 50 » et « Gabion 50 ».

Ces bases de données fournies par la DDTM50 indiquent la présence d'activités conchylicoles au nord de la zone d'étude et au droit de la flèche sableuse d'Agon. Il faut noter également la présence de nombreuses structures artificielles permettant la pêche sur l'estran. Ces

implantations d'éléments artificiels en zone intertidale sont des perturbations (métrique 4) susceptibles de modifier le transport sédimentaire en zone littorale (métrique 2, Kervella, 2010).

La phase de vérification de ces bases avec le SIG consiste à les superposer, dans la bonne projection cartographique, avec l'ortho-photographie littorale et les carte Scan Littoral Shom-IGN. Des différences de positionnement sont observées dans la zone d'étude entre les différentes données. La cartographie des zones d'influence étant réalisée sur la base des ortho-photographies récentes.

Au nord de la zone d'étude, les parcelles conchylicoles référencées par les FID 780 à 786 ne semblent pas caractérisées par une artificialisation visible sur la photographie aérienne. Sur la base de cette imagerie aérienne récente, ces parcelles ne seront pas intégrées dans la détermination des métriques.

Au nord de la structure de pêche en ruine n°48 (la plus méridionale de la base pour la zone d'étude), les ortho-photographies permettent de détecter d'autres structures de pêcherie non référencées dans la base, qui sont prises en compte dans la cartographie de l'artificialisation.

Tout au sud de la zone d'étude, la base DDTM recense une série de parcelles (FID94 à 103) qui ne concordent pas avec l'artificialisation observée sur l'ortho-photographie et ne seront donc pas prise en compte pour l'évaluation de la métrique.

Il faut noter également la présence dans la base DDTM d'un gabion, trou d'eau utilisé pour la chasse, à l'intérieur du havre de Sienne. Ce type de creusement en zone intertidale modifie l'environnement et impacte le transport sédimentaire. Cette activité est plus proche d'une perturbation de l'estran de type « dragage » que d'une perturbation induite par l'artificialisation de la masse d'eau.

- Les bases de données du SHOM

Les données du SHOM qui ont été prises en compte concernent : les câbles, épaves, ainsi que la carte marine locale. Ces bases ne recense ni épave, ni câble dans la zone d'étude.

La carte marine indique l'existence de plusieurs bouées de signalisation maritime. Pour l'évaluation des métriques 2 et 3, nous considérons que l'influence de ces mouillages de signalisation sur le transport sédimentaire est négligeable. En revanche, il est envisageable de considérer ces mouillages dans l'évaluation de la métrique 4 (perturbation du fond). De même, l'ortho-photographie montre la présence de nombreux bateaux au mouillage dans le Havre de Sienne. L'équipement de ces mouillages et leur pérennité à l'année serait à étudier dans le cadre de l'évaluation de la métrique 4.

A noter également, la présence d'une tourelle maçonnée mentionnée sur la carte marine au niveau de la zone rocheuse le Ronquet, à 3.5 km au large de la pointe d'Agon. Cette tourelle visible sur l'ortho-photographie ne présente pas une emprise suffisante pour être prise en compte dans l'évaluation des impacts directs des ouvrages.

- Evaluation de l'impact direct pour la métrique 2

La Figure 51 illustre le report des zones d'ouvrages de protection, portuaire ou d'accès à la côte sur le trait de côte Histolitt. Au total, 17,8 km de trait de côte sont concernés, soit 40,4% du linéaire étudié.

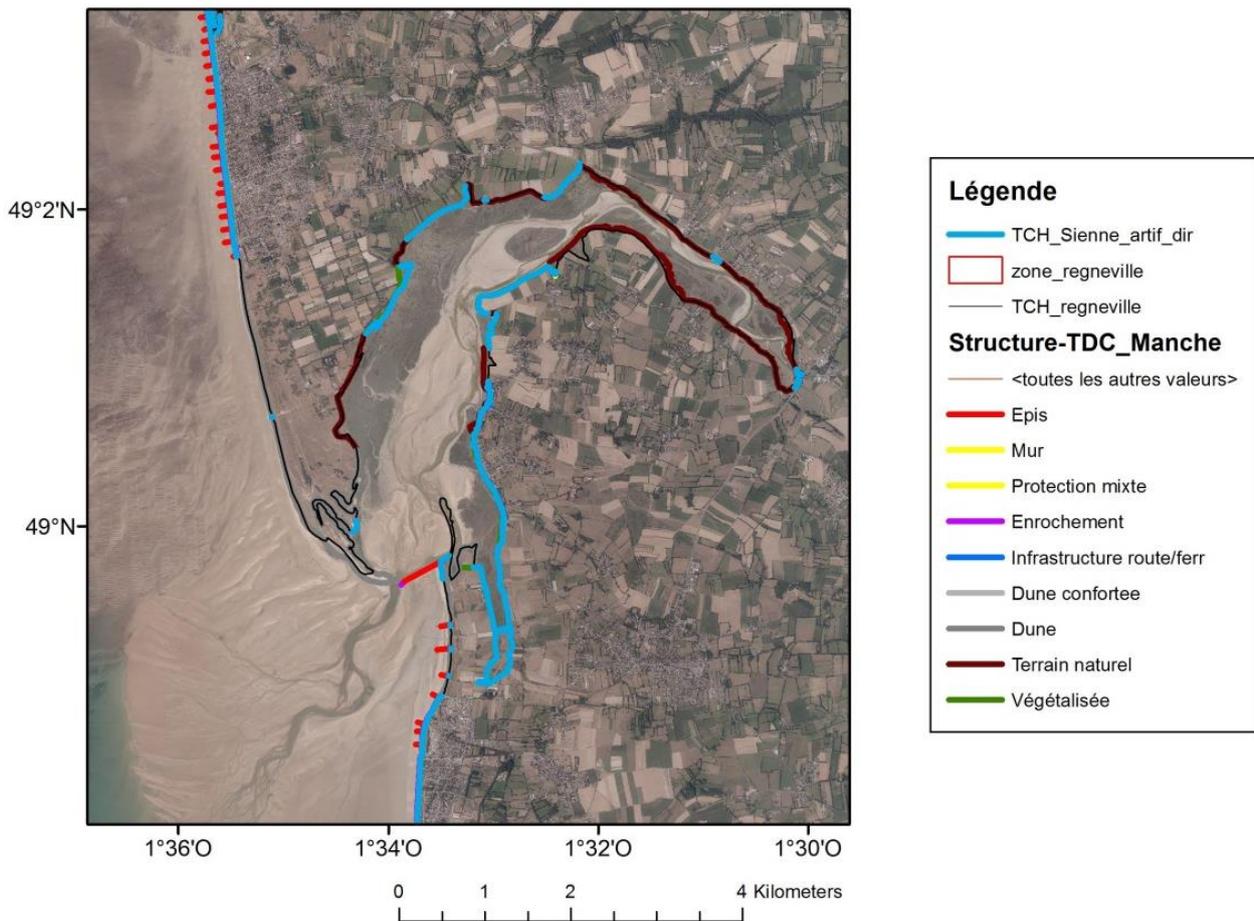


Figure 51 : Report des zones de la masse d'eau artificialisée par des ouvrages d'aménagements (protection, portuaire, accès) sur le trait de côte Histolitt (en bleu) pour la zone d'étude Havre de Sienne.

### Impacts indirects

Outre les approches présentées précédemment basées sur l'analyse diachronique de l'évolution du trait de côte, l'observation d'indicateur visuel sur l'ortho-photo littorale ou les données Lidar, plusieurs pistes de travail peuvent être envisagées dans ce secteur. Au sud, l'effet de la digue submersible de Montmartin et la détermination de sa zone d'influence est à étudié car potentiellement fortement impactante. Ainsi, selon le rapport PPRL local (DHI and Geos-AEL, 2014), cette digue basse, dont la cote d'arasement est proche de 9 mètres, bloque les courants de flot et de jusant de la Sienne, contraignant celle-ci à décrire un dernier méandre qui engendre l'érosion de sa rive concave.

Au nord, le fonctionnement de la flèche sableuse a été étudié par Robin et Levoy (2007) et Montreuil et al. (2014) qui montrent une relation entre le fonctionnement de la flèche sableuse d'Agon, de l'embouchure et la migration de barres sableuses du nord au sud sur l'estran. En revanche, l'effet des structures artificielles sur la dynamique de ces structures sédimentaires n'est pas abordé.

Les longueurs d'impacts indirects à la côte des aménagements présents sur ce site ne pourront donc pas être évaluées, en particulier au niveau du Havre pour lequel la dynamique sédimentaire est relativement complexe.

### **Evaluation relative à la métrique 2**

Sur ce site d'étude, d'emprise très inférieure à celle de la masse d'eau FRHC03, seules les longueurs de côte soumises aux impacts directs des aménagements ont été évaluées. Les résultats correspondants sont donnés dans le Tableau 6.

	Impacts directs		Impacts indirects		Zone d'influence	
	Longueur (m)	%	Longueur (m)	%	Longueur (m)	%
<b>TdC zone d'étude</b>					44 100	
<b>Aménagements</b>	17 800	<b>40.4</b>	ND	<b>ND</b>		<b>ND</b>

Tableau 6 : Evaluation de la zone d'impacts directs des aménagements relative à la métrique 2 pour la zone d'étude au Havre de Sienne (ND : non déterminé).

### **Evaluation relative à la Métrique 2bis**

Sur ce site, sont présents de nombreux aménagements anthropiques au sein même de la masse d'eau : il s'agit d'installations conchylicoles et de pêcheries.

La Figure 52 illustre le report de ces zones artificialisées (par la conchyliculture et les pêcheries) sur le trait de côte Histolitt. Au total, 6,1km de trait de côte sont concernés, soit 13,8% du linéaire étudié.

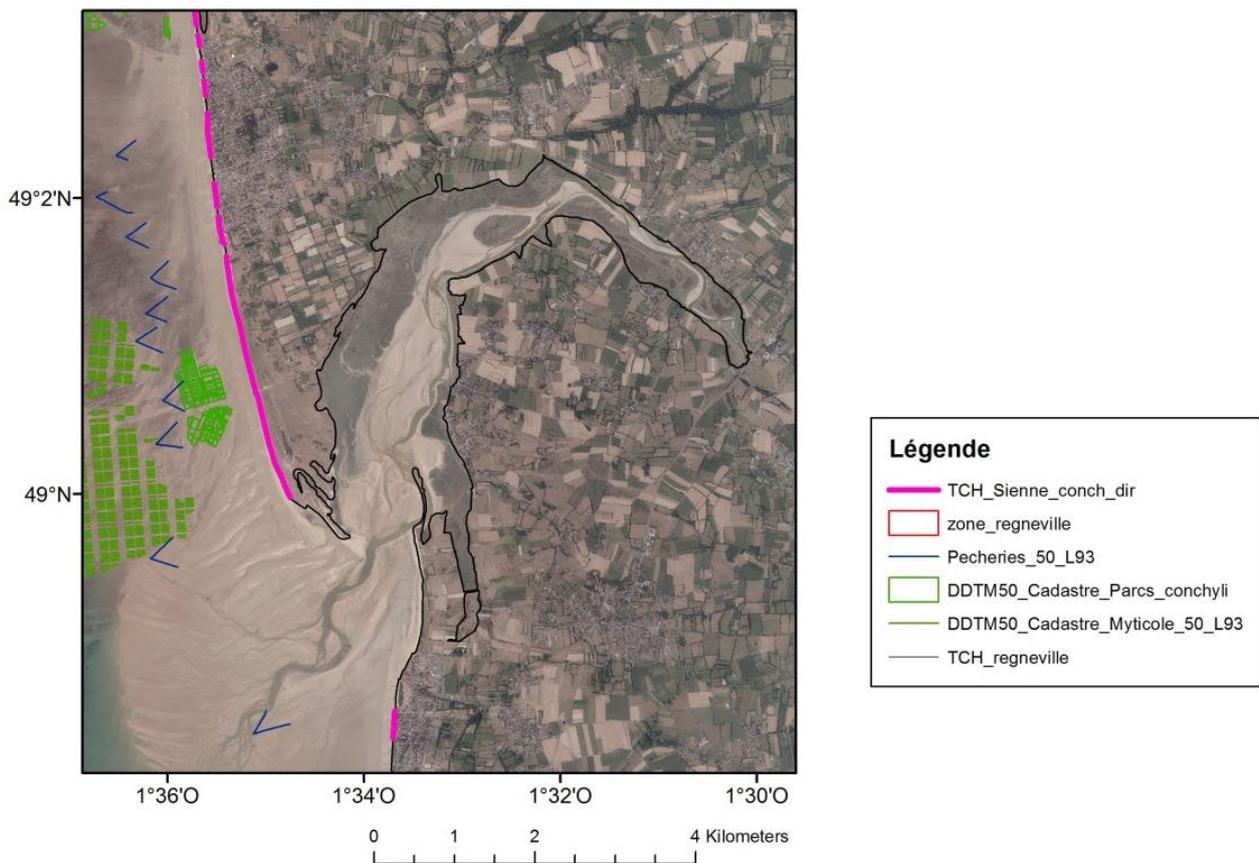


Figure 52 : Report des zones de la masse d'eau artificialisée par la conchyliculture et les pêcheries sur le trait de côte Histolitt (en rose) pour la zone d'étude Havre de Sienna.

Au final (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**Figure 53), le taux d'artificialisation au droit du trait de côte de la zone concerne environ 49 % de la longueur de côte considérée. Ce taux peut paraître faible à la vue de la Figure 53, il s'explique en fait par l'existence de nombreux méandres sur le trait de côte Histolitt, qui accroît fortement la longueur de côte de la zone.

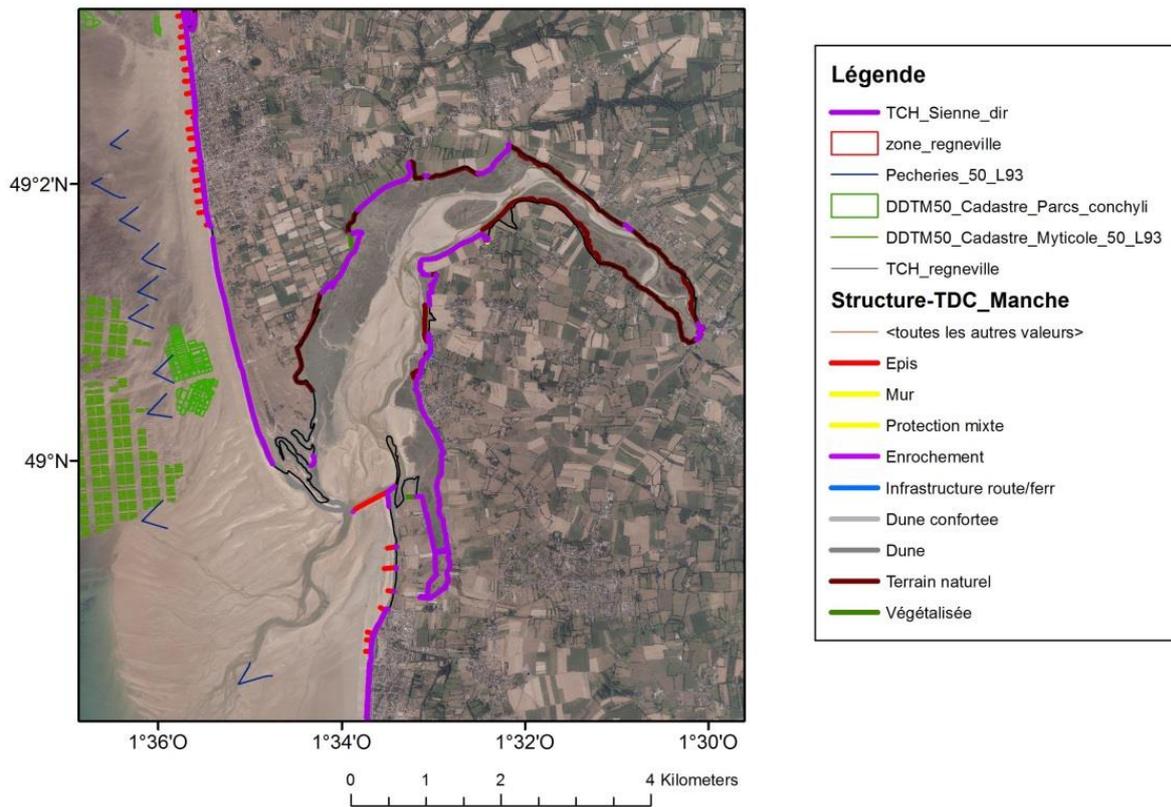


Figure 53 : Report des zones de la masse d'eau artificialisée sur le trait de côte Histolitt (en violet) pour la zone d'étude Havre de Sienna.

La métrique 3 n'a pas pu être évaluée sur ce site, par manque de données pertinentes.

#### 4.5. DISCUSSION ET CONCLUSION

Cette partie propose une conclusion sur les travaux entrepris sur les sites d'étude.

Ainsi sur les 4 sites d'étude sélectionnés, d'emprise géographique et de contextes différents, nous nous sommes principalement focalisés sur l'évaluation des longueurs de côte sous influence d'aménagements anthropiques, relatives à la métrique 2. Pour ce faire différentes étapes ont été suivies :

- L'impact direct (l'emprise) des aménagements a été évalué à partir des bases de données départementales sur les aménagements côtiers.

Cette première étape nécessite de vérifier et éventuellement compléter les bases de données existantes. Ces vérifications ont été faites à partir d'ortho-photos (ortho-littorales\_v2) et de photos disponibles par exemples sur GoogleStreetView. L'emprise des aménagements longitudinaux à la côte est accessible via les bases de données ouvrages, cette information est par contre généralement absente pour les aménagements

transversaux. Néanmoins sur les sites d'étude, les ouvrages transversaux représentent une faible part de la longueur de ces impacts.

- Une fois ces longueurs de côte, sous impacts directs, identifiées, nous avons cherché à évaluer les longueurs de côte sous impacts indirects d'aménagements. Pour rappel, les impacts indirects, relatifs à la métrique 2, sont les modifications morphologiques à la côte induites par l'aménagement. Suivant les sites étudiés, ces évaluations ont été plus ou moins réalisables. Sur les côtes sableuses ou à falaises meubles, relativement rectilignes, il a été globalement possible, à partir des ortho-photos et des données LIDAR, d'identifier les zones sous impacts indirects d'aménagements. En contexte sableux estuarien, cette évaluation n'a pas été possible du fait de la relative complexité de la dynamique hydro-morpho-sédimentaire de tels sites. Pour les côtes à falaises dures, les impacts indirects ne peuvent être évalués que si des études menées sur le long terme et dédiées à cette problématique, existent.

Ces travaux ont aussi permis de mettre en lumière certaines difficultés dans la mise en œuvre de l'évaluation des métriques 2 et 3 de la surveillance hydromorphologique. Ces différents points sont présentés dans la suite.

### **Limites géographiques des masses d'eau de la DCE :**

Comme nous l'avons vu sur certains sites d'étude, les limites des masses d'eau à terre (définies au 1/ 50 000<sup>ème</sup>) ne correspondent pas au trait de côte Histolitt (défini au 1/15 000<sup>ème</sup>). Suivant les cas, la limite de la masse d'eau peut se situer en deçà ou au-delà du trait de côte. De même les aménagements côtiers peuvent se situer sur le trait de côte ou d'un côté de celui-ci. Ces éléments posent la question quant aux aménagements à considérer comme étant dans les masses d'eau et donc à prendre en compte pour l'évaluation des métriques.

Dans ce travail, pour déterminer si un aménagement devait être pris en compte relativement à la métrique 2, nous n'avons pas considéré les limites des masses d'eau à terre au sens strict, mais plutôt la limite haute que peut atteindre la mer, correspondant par exemple à des niveaux de marée de vive-eau ou aux plus hautes mer astronomiques. Ainsi les ouvrages de défense, situés en arrière du trait de côte Histolitt (à terre), mais pouvant être en contact avec la mer, ont été pris en compte dans cette étude car ils peuvent modifier l'hydromorphologie de la masse d'eau.

Des questions restent encore ouvertes, notamment vis-à-vis d'aménagements à terre (routes littorales par exemple), non en contact direct avec la mer mais pouvant avoir des impacts sur l'arrière plage ou l'arrière-dune par exemple.

### **Bases de données ouvrages existantes**

- Ces bases concernent souvent les ouvrages de défense contre la mer, les autres types d'aménagements anthropiques, à considérer pour évaluer correctement l'artificialisation des côtes, peuvent en être absents. D'autres bases, ponctuelles, existent parfois pour les accès à la mer dans le cadre des plans POLMAR par exemple. Une unification et uniformisation de ces différentes bases de données est nécessaire pour les approches DCE.
- Dans certaines bases, des dunes naturelles peuvent être considérées comme des ouvrages de protection (digues) au vu de leur rôle de protection contre les submersions.

A l'inverse des digues peuvent être qualifiées de « végétalisées ». La différenciation de la part naturelle ou anthropique de ces différents éléments est problématique si le matériau constituant n'est pas précisé dans la base.

- Ces bases présentent des manques et des erreurs qu'il est nécessaire de combler (absence d'ouvrage sur la commune de Langrune sur Mer par exemple). Lorsque des doutes existent sur un ouvrage, il est souvent relativement difficile d'y répondre seulement par analyse des ortho-photos. Des validations terrain sont nécessaires pour la production de base DCE fiables.

### **Types d'aménagements à considérer dans l'évaluation de la métrique 2 :**

- Dans l'idéal tous les aménagements anthropiques présents en zone côtière et pouvant induire des impacts hydro-morpho-sédimentaires dans la masse d'eau sont à considérer : les ouvrages de défense, les aménagements hydrauliques (qui peuvent agir comme des épis), les accès à la mer (cale, escalier....). Les aménagements plus petits, du type mur ou muret (protection individuelle par exemple), sont souvent absents des bases de données, il faut néanmoins les considérer car ils représentent une barrière physique entre terre et mer.
- La question que nous nous sommes posée concerne les aménagements en mer, en zone intertidale (concessions conchylicoles) voire subtidale (port artificiel d'Arromanches-les-Bains par exemple) : faut-il les considérer et si oui de quelle manière ? Nous avons fait le choix ici, de les considérer dans une nouvelle métrique (2bis) en projetant leur longueur perpendiculairement à la côte. Cette nouvelle métrique, testée ici sur quelques sites, vise à décrire la présence d'artificialisation dans toute la masse d'eau ramenée à sa côte (présence d'artificialisation dans un profil perpendiculairement à la côte).

### **Suivis existants et études d'impacts :**

- Les suivis existants (évolution de la position du trait de côte, suivis topographiques) apportent des informations intéressantes mais ils permettent rarement d'évaluer l'impact indirect des aménagements. Ce n'est pas forcément leur but premier et les échelles spatiales de levés peuvent être insuffisantes par rapport à l'emprise supposée des impacts des aménagements.

Quelques études d'impact ont été collectées. Les plus anciennes ne permettent pas d'évaluer les modifications hydrodynamiques induites (pas ou peu de résultats de modélisation, ce n'est pas leur but). Les plus récentes, comme l'extension du terminal ferry d'Ouistreham par exemple, permettent d'évaluer les modifications hydrodynamiques induites par le dernier aménagement réalisé, dans le cadre d'une situation déjà fortement modifiée par les actions anthropiques antérieures. L'information sur les modifications induites par l'ensemble des aménagements présents n'est donc pas disponible de façon exhaustive dans ce type de document.



## 5. Etude théorique des impacts hydrodynamiques d'un épi

Sur les sites d'étude, il n'a pas été possible de quantifier des modifications hydrodynamiques dus à la présence d'aménagements transversaux ou longitudinaux (absence d'étude hydrodynamique, ortho-littorales prises à marée basse).

Par leur orientation (perpendiculaire à la côte), les épis impactent fortement la dérive littorale et donc les processus long-shore. Nous avons donc tenté d'évaluer les modifications hydrodynamiques induites par un épi en utilisant la modélisation numérique.

### 5.1. CHOIX DU MODELE

Dans cette partie, nous présentons de façon synthétique les différents types de modèles existants et leurs capacités à représenter correctement les phénomènes physiques, notamment les vagues et les courants.

Il existe globalement 3 grandes familles de modèles, suivant les phénomènes physiques modélisés et les variables calculées :

- les modèles hydrodynamiques à surface libre ;
- les modèles de propagation de vagues ;
- les modèles morphodynamiques ;

certains codes existants pouvant coupler ces différentes approches.

Pour prédire l'hydrodynamique et les vagues au voisinage d'aménagements côtiers, plusieurs types de modèles existent en 1 dimension (1D), 2 dimensions (2D) ou 3 dimensions (3D).

#### 5.1.1. Modèles hydrodynamiques à surface libre

Les modèles hydrodynamiques résolvent numériquement les équations du mouvement et de continuité pour prédire les variations du niveau d'eau (marée, surcote atmosphérique) et les courants induit par les vents et éventuellement par les vagues, s'ils sont couplés à un modèle de propagation de vagues. De nombreux modèles de ce type sont 2DH, c'est-à-dire qu'ils calculent les vitesses moyennes des courants intégrées sur la verticale. L'utilisation de modèle 3D est de plus en plus courante, mais reste relativement coûteuse en temps de calcul et complexe à réaliser dans le cas d'un couplage avec un modèle de propagation de vagues. On peut citer par exemple : Delft3D (Lesser et al 2004), ROMS (Shchepetkin and Williams, 2009), MIKE 21 (Warren and Bach, 1992, DHI), MARS (Lazure et Dumas, 2008), TELEMAC (Hervouet, 2007), ADCIRC (Luettich and Westerink, 2004), FVCOM (Chen et al, 2006)...

#### 5.1.2. Modèles de propagation de vagues

Ces modèles, selon leur complexité, permettent de calculer les propagations de la houle depuis les eaux profondes jusqu'aux zones de surf (zones de déferlement des vagues), incluant le déferlement. Ils calculent la hauteur de houle, sa direction et sa période au cours de son cheminement du large vers la côte.

Ils appartiennent soit à la famille des modèles spectraux à phase moyennée (propagation des caractéristiques globales des vagues) soit à la famille des modèles à résolution de phase (propagation des vagues individuelles) ou vagues à vagues.

Les modèles spectraux sont basés sur la résolution de l'équation de conservation de l'énergie. Ce type de modèle ne résout pas les processus de diffraction mais des approximations y ont été parfois introduites pour y pallier. Parmi eux, on peut citer : SWAN (Booij et al 1999), MIKE 21 SW (DHI, 2007), WW3 (Tolman, 2008, Ardhuin et al. 2010, Tolman et al, 2013)

Les modèles à résolution de phase (dits « modèles vagues à vagues ») résolvent les équations de la conservation de la quantité de mouvement et de la masse. Ils traitent la réflexion et la diffraction des vagues de manière plus précise que les modèles spectraux, ce qui est nécessaire au voisinage des structures côtières et dans les bassins portuaires. Ces modèles sont basés sur différentes formulations (Boussinesq, approche non hydrostatique) qui reproduisent plus ou moins bien les processus en jeu en zone littorale, notamment près de la zone de déferlement. Les modèles à résolution de phase de type Boussinesq les plus connus sont MIKE 21 BW (DHI) et FUNWAVE (Wei & Kirby 1995). Quant aux modèles à résolution de phase avec une approche non-hydrostatique, on peut citer SWASH (Zijlema et al., 2011) et XBEACH-G (McCall et al., 2014).

### 5.1.3. Modèles morphodynamiques

Si l'on s'intéresse aux évolutions morphologiques de la zone côtière, deux types de modèles peuvent être utilisés :

- les modèles d'évolution du trait de côte ;
- les modèles morphodynamiques forcés ou couplés avec l'hydrodynamique et les champs de vagues prédits à partir des modèles décrits précédemment.

Les modèles d'évolution du trait de côte simulent l'évolution d'une ligne bathymétrique (généralement la limite terre-mer correspondant au niveau moyen). Ces modèles sont relativement efficaces pour les prédictions à long-terme des évolutions du trait de côte avec prise en compte de structures côtières. Généralement développés en 1D, ils peuvent simuler la réponse de la plage à l'introduction de différentes structures côtières, mais ne donne pas accès aux valeurs des courants et vagues autour de ces structures. Par exemple, les modèles BEACHPLAN (HR Wallingford, Ozasa et Brampton, 1980), UNIBEST (Deltares, Stive et al. 1984), LITPACK (DHI 2007) et GENESIS (Gravens et al, 1991) permettent de simuler les variations à long-terme moyennes du trait de côte induites par les modifications spatio-temporelles des paramètres de vagues et du transport de sédiment longshore. Le modèle SBEACH permet quant à lui de se placer en cross shore.

Les modèles morphodynamiques forcés ou couplés avec les modèles d'hydrodynamique et de vagues sont basés sur des équations de transport sédimentaires et d'évolution du fond. Ces modèles, généralement utilisés en 2D, sont les plus complets. Ils permettent de calculer, sur l'ensemble du domaine de calcul considéré, les flux sédimentaires et l'évolution des fonds au cours du temps (érosion ou dépôt) et les variations induites sur les courants et les vagues par ces variations de topo-bathymétrie. On peut citer comme exemple CSTM (Warner et al, 2008), Delft 3D, MIKE 3, XBEACH ((eXtreme Beach behavior, Roelvink et al. 2009)...

### Quels sont nos besoins en termes de modèles :

Le choix du modèle dépend évidemment de la problématique étudiée et du niveau de description recherché sur les différents phénomènes physiques mis en jeu.

Nous cherchons ici à évaluer la surface pour laquelle les vagues et courants sont modifiés par des aménagements transversaux à la côte. Cette évaluation nécessite donc de calculer la propagation des vagues ainsi que les courants induits, spatialement autour de l'ouvrage ; à minima il faut donc utiliser un modèle 2DH, couplant la propagation des vagues à l'hydrodynamique. De nombreux modèles ou couplages de modèles permettent de tels calculs, notamment le modèle SWASH (Zijlema et al., 2011), qui par le couplage d'un modèle à résolution de phase utilisant une approche non hydrostatique à un modèle hydrodynamique semble l'un des meilleurs outils opérationnels actuels pour l'étude des champs de courants et de vagues en zone proche côtière.

L'utilisation de SWASH permettrait donc d'évaluer les modifications hydrodynamiques induites par un aménagement transversal (Villani et al., 2012). Mais vu les difficultés rencontrées à déterminer la longueur de côte ou les échanges sédimentaires sont modifiés par certains ouvrages transversaux présents sur les sites d'études, il nous a semblé pertinent d'intégrer l'aspect morphodynamique à notre approche par modélisation numérique. Etudier ces modifications morphodynamiques peut en effet nous apporter des éléments sur la zone d'influence d'un ouvrage sur la côte ainsi que montrer, ou non, la capacité d'un modèle numérique à reproduire les zones d'érosion et d'accrétion observées sur le terrain.

Là encore, de nombreux modèles ou couplages de modèles permettent de traiter les aspects vagues, courants et évolution morphodynamiques. Néanmoins un modèle relativement récent est de plus en plus utilisé, notamment pour évaluer l'impact d'aménagement : XBEACH (Roelvink et al. 2009).

Il est à noter que le modèle XBEACH est composé d'un module de vagues de type spectral et par conséquent ne résout pas directement la réflexion et la diffraction des vagues au voisinage d'un ouvrage côtier mais utilise des formules paramétriques. Il peut toutefois donner une idée de l'influence de la présence d'ouvrage sur l'érosion ou l'accrétion à la côte pendant des conditions de tempête (voir Abanades et al. 2014).

Contrairement aux autres modèles morphodynamiques, XBEACH utilise un module à résolution de phases pour résoudre les ondes infra-gravitaires. Il permet donc de modéliser le comportement hydro-sédimentaire de l'environnement au voisinage d'une structure pour des échelles de temps très courtes (Van Thiel de Vries, 2009 et Van Geer et al, 2012). Ainsi, plusieurs auteurs se sont récemment intéressés à la modélisation des effets morphologiques liés à la présence d'ouvrages de type épis ou mur de protection longitudinal sur des échelles de temps allant de la tempête à l'année avec XBEACH.

Nederhoff (2014) a étudié les réponses morphologiques cross-shore et longshore du littoral au voisinage d'ouvrages longitudinaux suite au passage d'une tempête pour des configurations schématiques et réelles. Il a montré que le modèle XBEACH reproduisait correctement les effets morphologiques induits par la présence d'ouvrages grâce à des comparaisons avec des données terrains ou issues d'expérience en laboratoire. Il est à noter que dans le cadre de son étude, il a introduit une longueur d'influence proche de celle relative à la métrique 2. Par ailleurs, Gruwez et al (2014) a montré la capacité du modèle XBEACH à reproduire qualitativement les évolutions morphologiques 2D d'un système d'épis situés au Ghana sur la côte Ouest de l'Afrique, sur une année.

Dans chacune de ces études, un effort de calibration a été mené sur certains paramètres clés : la rugosité de la zone, la pente critique pour les mailles mouillées intervenant dans l'algorithme d'avalanche utilisé dans XBEACH et les paramètres de calibration pour les écoulements moyens induits par l'asymétrie des vagues.

En conclusion, pour ce qui est de l'hydrodynamique et des vagues, SWASH est le modèle adapté à notre problématique et concernant la morphologie, XBEACH est le modèle qui répond le mieux à nos besoins.

Ce modèle permet de traiter des phénomènes côtiers pour des zones dont l'extension maximale est de quelques kilomètres, avec une résolution minimale de l'ordre du mètre.

Le modèle peut être utilisé en 1D, c'est-à-dire selon un profil cross-shore, perpendiculaire au trait de côte. Mais il est surtout conçu pour reproduire les phénomènes en mode 2DH (prise en compte de processus parallèles à la côte et des processus verticaux intégrés sur la verticale). Il résout les équations de propagation des vagues, de Saint Venant instationnaire, de transport et de conservation du sédiment (évolution du fond).

Sa particularité réside entre autres dans l'amélioration de la modélisation du jet de rive qui prend en compte les effets des ondes infra-gravitaires. La circulation littorale dans la frange côtière est calculée par le modèle ce qui permet d'évaluer le transport sédimentaire et les évolutions morphologiques : érosion, ensablement, submersion de dunes ou de récifs.

Pour ce qui est de l'évolution de la morphologie, le phénomène d'avalanche des grains de sable est pris en compte au cours des épisodes d'érosion. De plus, XBeach permet de traiter différentes classes sédimentaires et de définir des zones non érodables, ce qui permet de définir des ouvrages côtiers.

Les modélisations réalisées dans le cadre de cette étude utilisent la version la plus récente d'Xbeach (**XBeach\_v1.21.3657\_Groundhog\_Day**) distribuée en février 2014. Cette version a été mise en œuvre sur le calculateur du BRGM en mode parallèle de façon à optimiser les temps de calcul.

## **5.2. CONFIGURATION RETENUE, ANALYSE DES PREMIERS RESULTATS ET DEFINITIONS DES ZONES D'INFLUENCES**

### **5.2.1. Description de la configuration et des conditions marines**

#### **Topo-bathymétrie**

Ce travail étant une première étape de réflexion, nous avons pris le parti de travailler avec des configurations idéalisées, c'est-à-dire s'appuyant sur des topographies/bathymétries schématiques, uniformes le long de la côte et utilisant des forçages hydrodynamiques stationnaires (vagues et niveau marin constants).

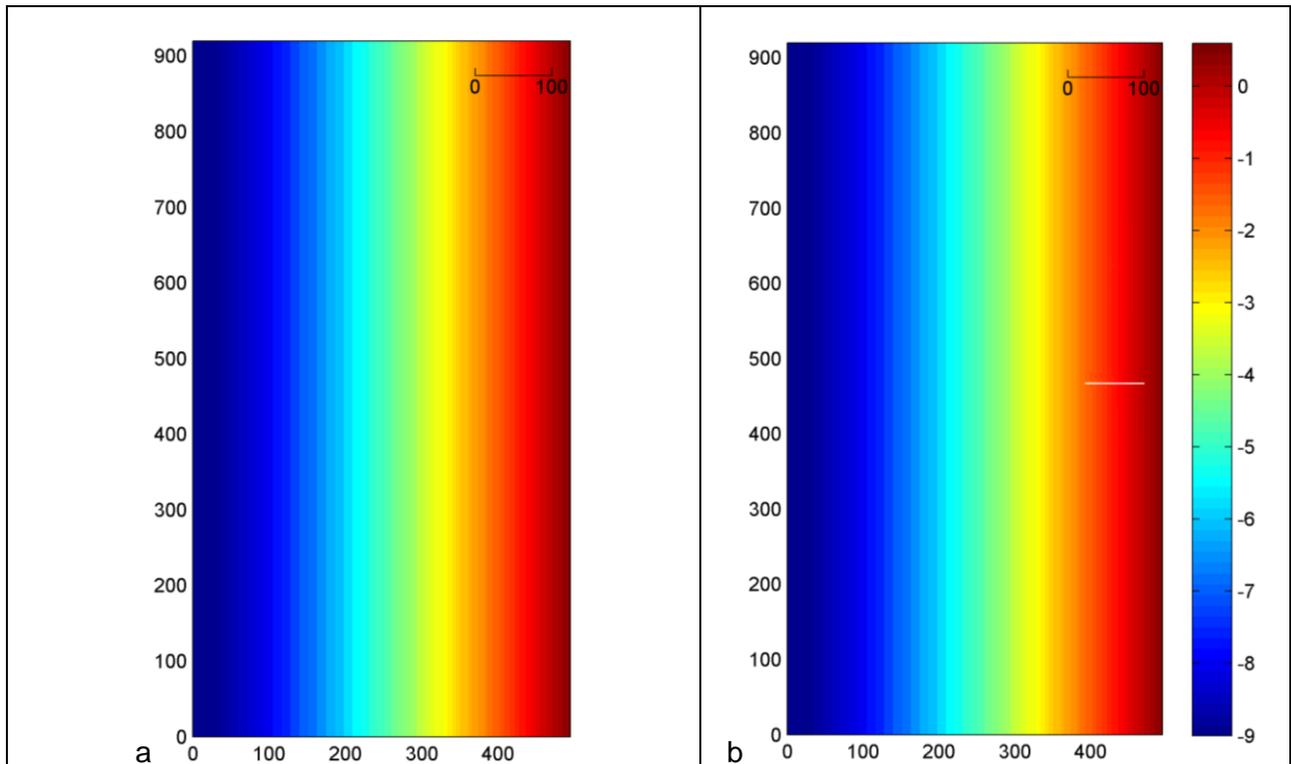
Il aurait été possible de modéliser une configuration réelle, mais cela nécessite de nombreuses données de topographies/bathymétries à haute résolution de la zone et d'observations de conditions hydrodynamiques et de vagues qu'il était difficile à acquérir dans le cadre de ce projet. De plus, la grande taille des zones d'estran des sites d'étude aurait imposé des grilles de modélisation très étendues et donc coûteuses en temps de calcul. Ce travail de modélisation apparaît donc comme une approche préalable à des travaux plus approfondis pour estimer les métriques de pressions sur des cas réels.

La configuration topo-bathymétrique considérée est présentée sur la Figure 54 (l'échelle de couleur représente la cote du fond), avec (a) et sans épi (b), ainsi que son profil (c). La pente moyenne de la plage est de l'ordre de 2 %, ce qui est une pente faible mais représentative des plages du Calvados.

La topo-bathymétrie choisie avec épi n'est pas tout à fait réaliste. En effet, comme dit plus haut, la présence d'un épi impose dans la plupart des cas une accumulation de sédiment en amont dérive et une zone déficitaire en aval. Notre configuration, uniforme de part et d'autre de l'épi, représente donc la configuration du littoral juste après implantation de celui-ci. Cette situation, vierge de tout impact morphologique dû à l'épi, permet de tester les capacités du modèle à reproduire l'évolution morphologique attendue.

La topo/bathymétrie de la configuration de référence sans épi est présentée sur la Figure 54 (a et c). Ses dimensions sont 495m X 920m et sa profondeur et hauteur maximales sont respectivement -9m et 1m. Les résolutions spatiales long-shore et cross-shore ne sont pas régulières, le maillage a été raffiné près de la côte et autour de la zone où est placé l'épi.

La configuration de référence avec un épi contient une zone non-érodable au centre (voir figure 5b). Cette zone est surélevée de 1m par rapport à la configuration de référence sans épi et mesure 78 m de long. Cette longueur de l'épi a été choisie, après avoir effectué quelques tests, afin de capter la dérive littorale sur toute sa largeur ; pour cela on a prolongé l'épi jusqu'à la zone vers le large où les vagues commencent à déferler.



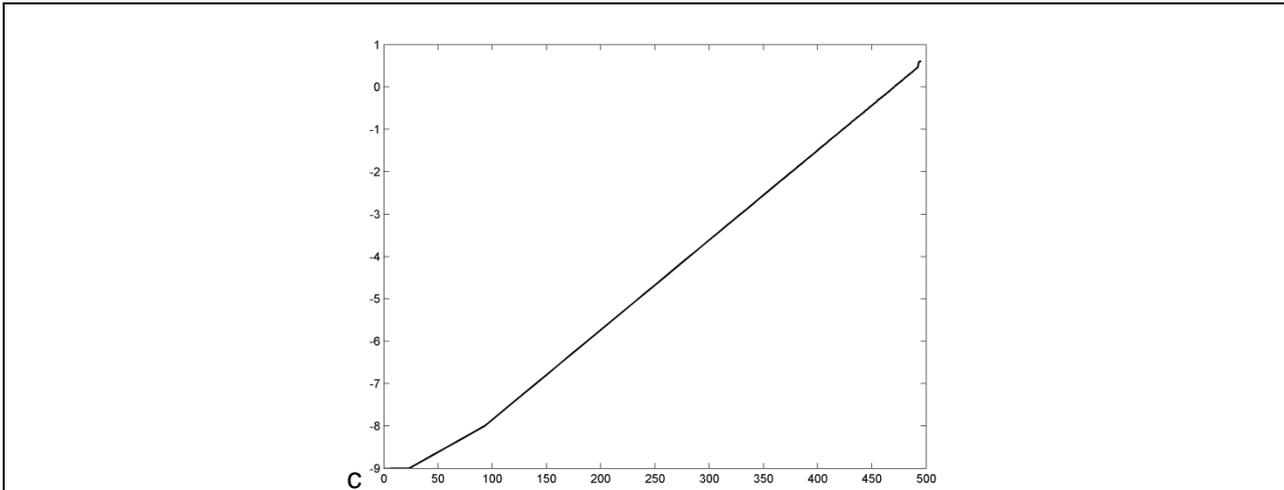


Figure 54 : *Topo-bathymétries initiales uniformes le long de la côte pour les configurations initiales (a) sans et (b) avec épi et (c) profil initial transversal associé.*

## Conditions marines

Mis à part en Méditerranée, où le marnage est très faible, sur les autres façades métropolitaines et en particulier sur les côtes de Normandie, le marnage est relativement important (de 5 à 12 m, L.N.H.L.C.H.F. (1986)). Ainsi, à part quelques ouvrages portuaires constamment immergés, la plupart des ouvrages transversaux et, encore davantage, des ouvrages longitudinaux sont constamment émergés et totalement ou partiellement immergés, au gré des marées.

L'impact hydrodynamique et l'efficacité d'un épi va énormément varier suivant le niveau marin. A marée basse, totalement émergé, l'épi n'a absolument aucun effet sur la dynamique sédimentaire naturelle ; ses effets sont par contre maxima à marée haute lorsqu'il s'oppose totalement à la dérive sédimentaire (s'il a été correctement dimensionné !). De plus, les marées et leurs courants sont responsables de transferts sédimentaires cross-shore (et long shore) qui rendent la dynamique sédimentaire relativement complexe.

Aussi afin de simplifier le cas d'étude, un niveau marin constant, correspondant à une pleine mer (cote NM : 0 m, cote crête de l'épi 1 m) a été imposé.

Concernant les vagues, des conditions proches de celles observées sur les côtes du Calvados (en termes de hauteur et de période) ont été choisies : des vagues de faible hauteur ( $H_s$  de 1 m), relativement courte (période de 5 s), arrivant avec une forte incidence ( $70^\circ$  avec l'épi,  $20^\circ$  avec la plage) afin d'avoir une dérive littorale relativement importante.

De plus, en ce qui concerne les flux sédimentaires, des conditions périodiques ont été imposées en haut et bas du domaine de calcul afin que les quantités de sédiments extraites du domaine de calcul vers le haut soient réintroduites en bas de celui-ci. Cela permet d'avoir un apport sédimentaire aux frontières plus réaliste.

Le modèle XBEACH nous permet d'obtenir les champs de courants (direction et intensité de leur vitesse), de vagues (hauteur) et les évolutions morphologiques de la topo/bathymétrie au cours du temps.

Pour évaluer les impacts induits par l'épi, nous allons donc comparer les résultats de deux simulations numériques, avec et sans épi, effectuées pour les mêmes conditions (niveau marin, vagues et temps de calcul).

## 5.2.2. Résultats préliminaires

Nous présentons sur la figure suivante, Figure 55, les résultats, sans (première colonne) et avec épi (deuxième colonne), du champ de courants induit par les vagues (direction et vitesse, première ligne), du champ de vagues (hauteur RMS des vagues, deuxième ligne) et de la topo-bathymétrie obtenue après une durée simulée de 7h (troisième ligne), temps relativement court du fait du caractère préliminaire de cette étude et d'apparition d'instabilités numériques.

Concernant les résultats des champs de courants (première ligne de la Figure 55), pour la configuration sans épi, on voit très bien la dérive littorale, orientée vers le haut. Son profil horizontal de vitesse présente une forme caractéristique parabolique et s'étend sur une centaine de mètres de largeur. Pour la configuration avec épi, la présence de celui-ci détourne, en amont immédiat de l'ouvrage, la dérive en direction du large. En aval immédiat de l'ouvrage, la dérive n'est plus présente, car elle passe plus au large avec une diminution de son intensité ; elle recolle à la plage environ 150 m derrière l'ouvrage pour retrouver un profil de vitesse non perturbé.

Au niveau du champ de vagues, la configuration sans épi ne montre rien de particulier. La hauteur des vagues diminue en s'approchant de la côte. La présence de l'épi entraîne une légère augmentation de la hauteur des vagues en amont de l'extrémité de l'épi et une diminution dans la même zone en aval. On voit aussi apparaître une zone d'ombre (hauteur de vague nulle) en aval immédiat de l'épi.

L'évolution de la topo-bathymétrie, sans épi, est pratiquement nulle. Par contre, comme attendu, la présence de l'épi provoque une accumulation sédimentaire en amont dérive et au niveau de l'extrémité de l'épi et une érosion relativement importante en aval immédiat de celui-ci. Cette zone déficitaire se prolonge sur environ 150 à 200 m.

Ces résultats sont très encourageants, ils démontrent notamment la capacité du modèle utilisé (XBEACH) à reproduire qualitativement la dynamique sédimentaire autour d'un ouvrage transversal.

Sur la Figure 55, on identifie donc clairement les impacts sur l'hydrodynamique et la morphodynamique dus à l'épi. La question qui se pose alors concerne l'évaluation et la quantification de ces impacts.

Le plus simple pour comparer les résultats sans et avec épi consisterait à faire la différence surfacique des différentes variables obtenues. C'est en effet ce que nous ferons pour comparer les deux topo-bathymétries obtenues à la fin de la simulation. Pour les vagues et les courants, faire la différence entre les deux situations n'étant pas très parlant (car fortement dépendant des conditions marines considérées), nous avons préféré calculer la différence relative des résultats sans et avec épi. Cette différence relative permet ainsi d'accéder aux pourcentages d'augmentation ou de diminution des vitesses de courants et hauteurs de vagues, ce qui est beaucoup plus pertinent en termes de comparaison.

Nous présentons, sur la Figure 56, les différences relatives entre les cartes de courants et de hauteurs moyennes quadratiques des vagues sans et avec épi, ainsi que la différence absolue entre les 2 topo-bathymétries obtenues.

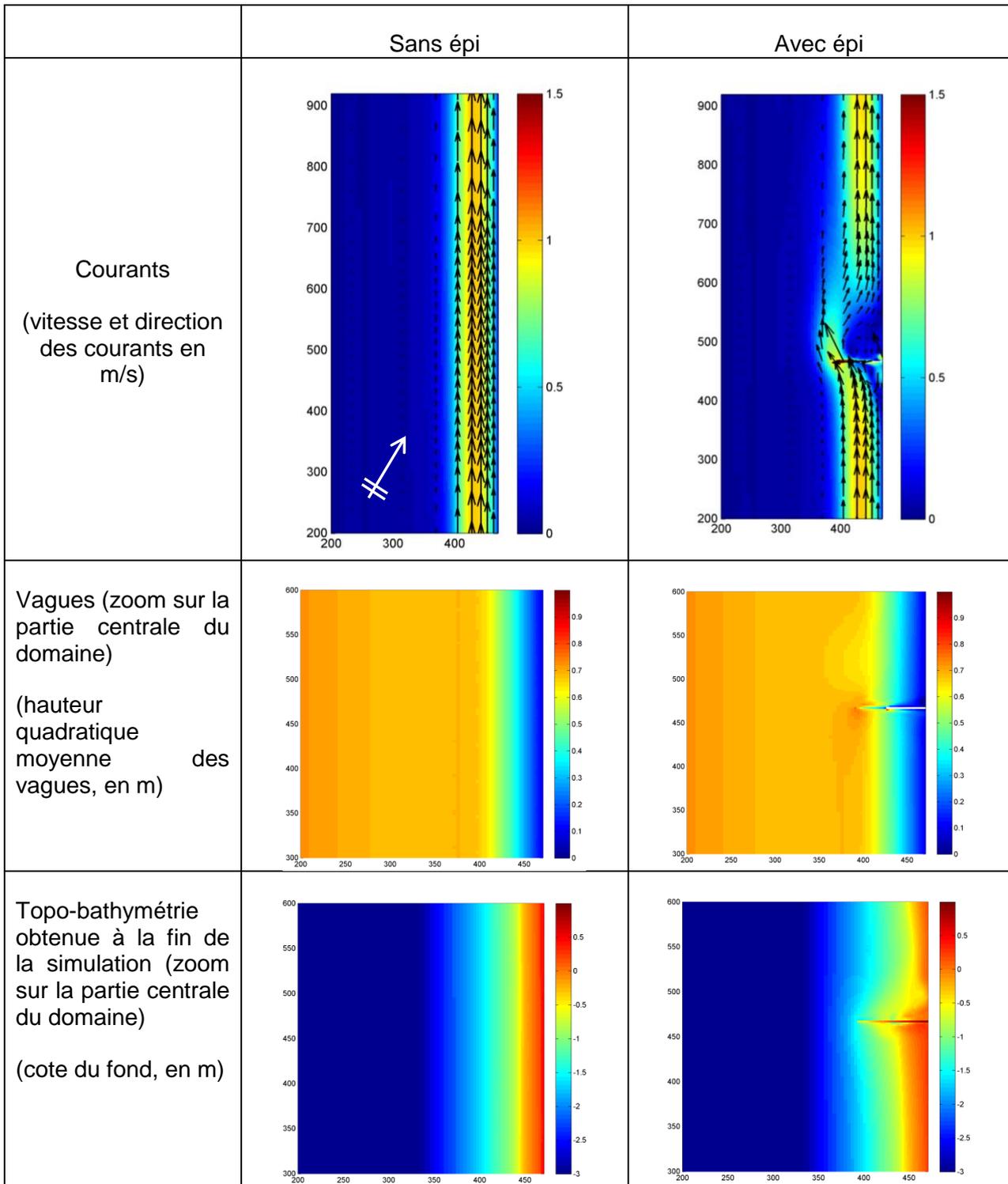


Figure 55 : Résultats obtenus sans (colonne 1) et avec un épi de 78 m (colonne 2) après 7h simulées ; 1ere ligne : champs de courants, 2ème ligne : hauteurs de vagues, 3ème ligne : topo-bathymétrie finale, pour les conditions de forçage de références (voir paragraphe précédent).

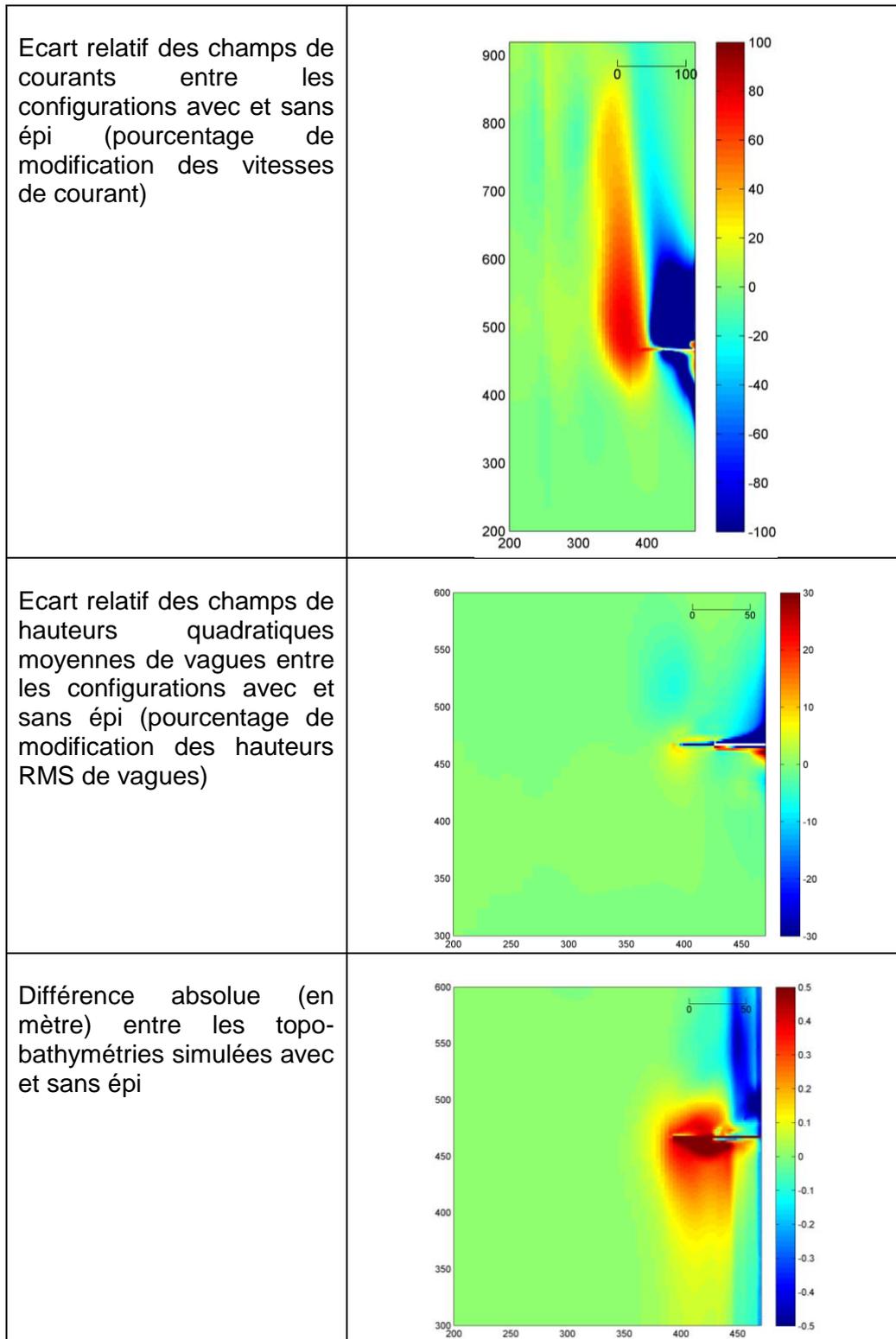


Figure 56 : Comparaison des premiers résultats avec et sans épi.

Lors du calcul des écarts relatifs des courants, des valeurs très importantes (très supérieures/inférieures à +/- 100%) ont été obtenues très localement. Cela peut arriver à un endroit où une vitesse, très faible ou nulle dans le cas sans épi devient non nulle ou importante dans le cas avec épi. Afin de rendre les résultats plus lisibles, les valeurs d'écarts relatifs supérieurs à 100 % et inférieurs à -100 % ont été fixés aux valeurs de 100% ou de -100%.

La représentation des résultats de la Figure 56 est très intéressante, elle permet, en effet, une très bonne visualisation des impacts induits par l'épi.

Par rapport aux modifications des courants, on voit très bien une zone de forte diminution (-80 %) en amont de l'épi sur une centaine de mètres environ le long de la côte et à l'aval sur une zone de longueur de l'ordre de 150 à 200 m. En allant vers l'aval de l'épi, la diminution des vitesses s'estompe (de -60 à -40 %) pour devenir très faible (de l'ordre de -10 % ou moins) jusqu'à la limite nord du domaine de calcul. Une zone d'augmentation forte des vitesses (> 60 %) commence à une cinquantaine de mètres en amont de l'épi et se termine environ 200 m à l'aval. Cette augmentation des vitesses, moindre (de 60 à 30%) s'étend encore sur une zone de 200 m de long à l'aval.

Comparés à ceux des courants, les écarts relatifs des hauteurs de vagues sont bien moindres en termes de valeurs (entre plus ou moins 30 %), et beaucoup plus localisés. L'épi génère une augmentation des hauteurs de vagues en amont immédiat de celui-ci (les vagues vont en effet buter contre l'épi et en particulier à son extrémité à terre) et une diminution à l'aval, créant ainsi une zone d'ombre d'une centaine de mètres de longueur. On aperçoit aussi une légère augmentation des vagues à l'extrémité en mer de l'épi et une légère diminution à la même distance de la côte en aval.

La différence absolue (en mètres) entre les deux topo-bathymétries calculées confirme nettement les phénomènes d'accrétion sédimentaire à l'amont et autour de l'extrémité en mer de l'épi et d'érosion à l'aval. Il est d'ailleurs intéressant de remarquer que l'accrétion prend plutôt place en avant plage alors que l'érosion se situe plus en retrait sur la plage. Remarquons aussi que les valeurs calculées, en termes de modifications morphologiques, semblent très élevées par rapport à la durée simulée.

### **5.2.3. Proposition de zones d'influence**

Les résultats obtenus précédemment, l'ont été pour une durée simulée de 7h. Une durée simulée inférieure ou supérieure donnerait des résultats différents.

Par exemple, pour une durée supérieure, les phénomènes d'érosion et d'accrétion continueront, induisant des modifications morphologiques plus importantes. Ces modifications de topo-bathymétrie, par rétroaction, modifieront le parcours de la dérive littorale et la propagation des vagues. L'emprise et l'intensité des modifications hydrodynamiques et morphologiques dues à l'épi (Figure 55) seront donc différentes et pourraient même se stabiliser après un temps simulé suffisamment long.

Ainsi, dans la suite, et pour tous les résultats présentés, nous avons fait le choix de considérer une durée simulée de 7h.

## Zone d'impacts indirects sur l'hydrodynamique

Après avoir mis en avant les impacts hydromorphodynamiques et morphodynamiques induit par un épi, revenons à la question qui nous intéresse, à savoir, l'évaluation de la zone où les vagues et courants sont modifiés par l'ouvrage.

L'analyse des résultats préliminaires permet une première conclusion : dans la situation modélisée, l'emprise de la zone de modifications des courants dus à l'épi est largement supérieure à celle des vagues et cette dernière est incluse dans la première. Sur la Figure 56, la surface où les courants sont modifiés est entre 50 et 100 fois celle où les vagues sont modifiées.

Dans la situation considérée, la zone d'impacts indirects sur l'hydrodynamique sera donc évaluée comme la zone de modifications des courants.

Comme nous l'avons vu sur la Figure 56, l'écart relatif des champs de courants, sans et avec épi, présente une grande gamme de variation sur une vaste zone. En vue de pouvoir observer ou mesurer de tels écarts et de limiter l'effet d'instabilités numériques sur les résultats, il peut s'avérer nécessaire de proposer une valeur seuil à partir de laquelle on considère les modifications comme mesurables, significatives et physiques (et non dues à des instabilités numériques).

Pour ce faire, on mesure la surface délimitée par un contour correspondant à une valeur d'écart relatif fixé (surface pour laquelle les écarts relatifs sont supérieur 5 % et inférieur à -5 % ; de même avec |10| % ; ...). Ces surfaces ne sont pas exprimées en mètre carré (m<sup>2</sup>) mais sont rapportées à la surface du carré dont l'arête vaut la longueur de l'épi (résultats adimensionnels, pour relier les valeurs de ces surfaces à la longueur de l'épi qui est souvent la seule information géométrique accessible).

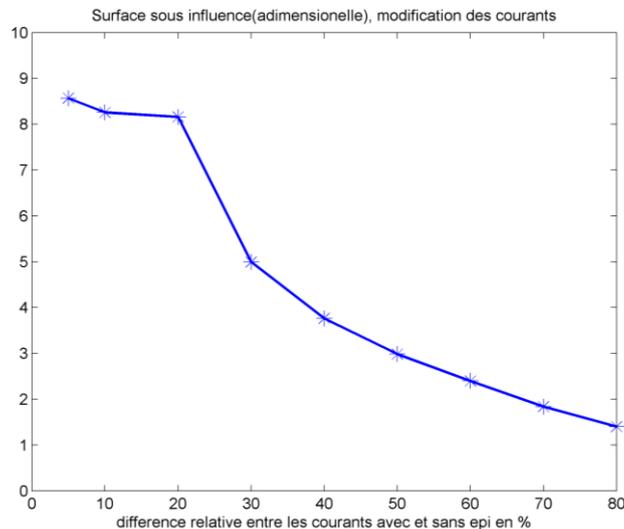


Figure 57 : Surface de modifications des courants, adimensionnée par la longueur de l'épi au carré, fonction de l'écart relatif des courants entre les configurations avec et sans épi.

Sur la Figure 57, on voit que les surfaces pour lesquelles les écarts relatifs des vitesses sont supérieurs à 5 %, 10 % et 20 % ont à peu près la même valeur. Cela signifie que les surfaces pour lesquelles les écarts relatifs sont inférieurs à 20 % sont relativement petites. Ne s'intéresser aux écarts relatifs des vitesses à partir de 20 % paraîtrait donc logique, puisque les écarts inférieurs sont peu présents en termes de surfaces.

## Zone d'impacts indirects sur le transport sédimentaire à la côte

Même si cela n'était pas notre but premier, nous nous sommes aussi intéressés aux modifications de morphologie, en liens avec la métrique 2 « modifications des échanges sédimentaires à la côte ».

La comparaison directe des topo-bathymétries avec et sans épi fait apparaître une gamme assez large de valeurs (Figure 56 en bas), de l'ordre du centimètre à plusieurs décimètres. Comme précédemment, nous nous sommes posé la question de définir un seuil à partir duquel ces écarts sont significatifs et mesurables et doivent être considérés. Pour ce faire, le plus simple aurait été de proposer un seuil en hauteur (par exemple 5, 10 cm de différence entre les deux configurations). Mais vu que les hauteurs obtenues par le modèle sont quantitativement peu fiables (conditions marines constantes, modèle non calibré...), nous avons plutôt cherché à identifier les zones à la côte où de forts changements de vitesse de courant existent entre les deux configurations. Ces zones correspondent ici à la zone de forte réduction des vitesses des courants autour de l'épi le long de la côte (Figure 56, première ligne). En effet, même si le lien entre les changements de vitesse de courants et le transport sédimentaire n'est pas linéaire, des changements importants dans les vitesses auront des répercussions sur les flux sédimentaires.

Pour ce faire, comme précédemment pour les impacts indirects sur l'hydrodynamique, nous avons évalué la longueur pour laquelle l'écart relatif des courants dépasse à la côte une certaine valeur. La longueur correspondante, adimensionnée par la longueur de l'épi, est présentée sur la Figure 58.

Sur cette figure, la courbe présente globalement deux plateaux. Le premier plateau ( $x < 20\%$ ) indique, comme précédemment, que la longueur à la côte des modifications de courants  $< 20\%$  est relativement faible. Le deuxième plateau ( $x > 30\%$ ) indique quant à lui que la longueur à la côte des modifications de courant est pratiquement constante de 30 à 80 % d'écart relatif. Ainsi les écarts relatifs inférieurs à 80 % sont très peu présents, en termes de longueur à la côte. La longueur de la zone à la côte pour laquelle les écarts relatifs sont les plus importants représente donc environ 4 fois la longueur de l'épi.

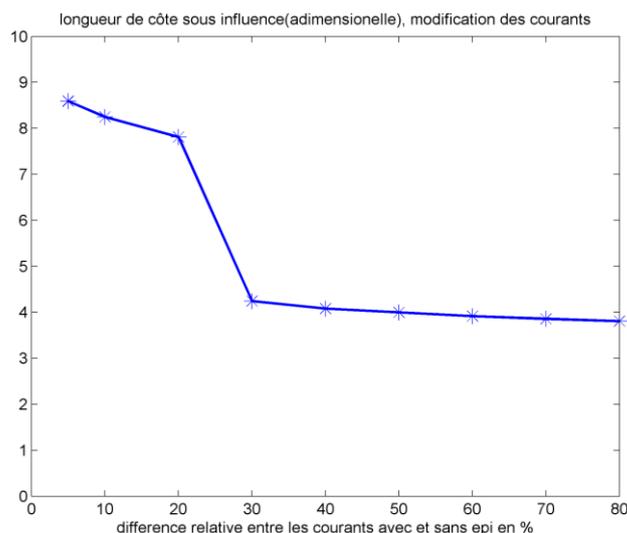


Figure 58 : Longueur de modifications des courants à la côte, adimensionnée par la longueur de l'épi, en fonction de l'écart relatif des courants entre les configurations avec et sans épi.

Suite à l'analyse des deux figures précédentes (Figure 57 et Figure 58) et afin de simplifier le traitement des résultats, une valeur seuil unique de 30 % d'écart relatif entre les vitesses de courants avec et sans épi a été choisie.

Ainsi nous définissons (voir

Figure 59) comme  $A$  la surface pour laquelle les vagues et courants sont modifiés par la présence de l'épi (relative à la métrique 3) et comme  $L$  la longueur de côte où les échanges sédimentaires sont modifiés par l'épi (relative à la métrique 2). En toute rigueur, la longueur  $L$  ne correspond pas réellement à la longueur de côte où les échanges sédimentaires sont modifiés car la simulation numérique effectuée n'est pas réaliste (forçages hydrodynamiques constants, temps simulé relativement court). Il s'agit ici simplement d'une première approche qui nous permettra dans la suite de voir l'évolution de cette longueur en fonction des paramètres d'entrée des simulations. On peut néanmoins remarquer sur la Figure 56 que les différences de topo-bathymétrie les plus importantes ( $|\Delta z| > 0.2$  m) apparaissent entre 350 et 600 m ce qui correspond à la longueur de la zone délimitée par des écarts relatifs supérieurs à 30 %.

Ainsi dans le cas considéré précédemment, la surface  $A$  où les courants (et vagues) sont modifiés vaut environ 30 000 m<sup>2</sup> soit 5 fois la longueur au carré de l'épi et la longueur de côte  $L$  où les échanges sédimentaires sont modifiés vaut 330 m environ soit 4.2 fois la longueur de l'épi. Pour rappel, la longueur de l'épi vaut 78 m.

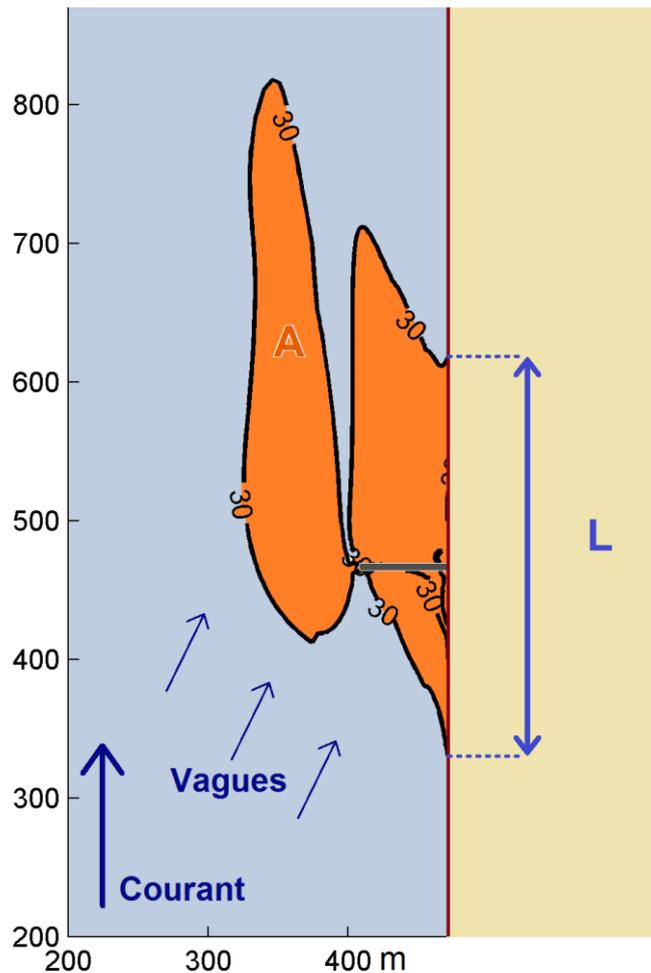


Figure 59 : Schéma explicatif de la définition de la surface où les courants sont modifiés (A) et de la longueur (L) où les échanges sédimentaires sont modifiés par la présence de l'épi.

### 5.3. COMMENT VARIE L'EMPRISE DE LA ZONE D'INFLUENCE

L'étape précédente a permis de définir la surface A où les courants et vagues sont modifiés ainsi que la longueur de côte L où les échanges sédimentaires sont modifiés par la présence d'un épi. Nous étudions dans cette partie les variations de A et L en fonction des caractéristiques des vagues, de la longueur et largeur de l'épi et du nombre d'épis.

Pour les résultats suivants, l'aire A sera toujours présentée adimensionnée (divisée par le carré de la longueur de l'épi) ainsi que L (divisée par la longueur de l'épi).

#### 5.3.1. Influence des vagues

##### *Hauteur des vagues*

Pour rappel, les résultats présentés dans les parties précédentes ont été obtenus pour des vagues au large de hauteur 1 m, de période 5 s et provenant du Sud avec un angle de 70° par rapport à la normale à la plage.

Nous cherchons ici à étudier l'effet de la hauteur des vagues sur A et L. Pour cela, deux hauteurs de vagues supplémentaires ont été simulées : H = 0.5 m et H = 1.5 m. Pour chaque hauteur de vagues, les configurations avec et sans épi ont été simulées et comparées afin d'évaluer A et L. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 60.

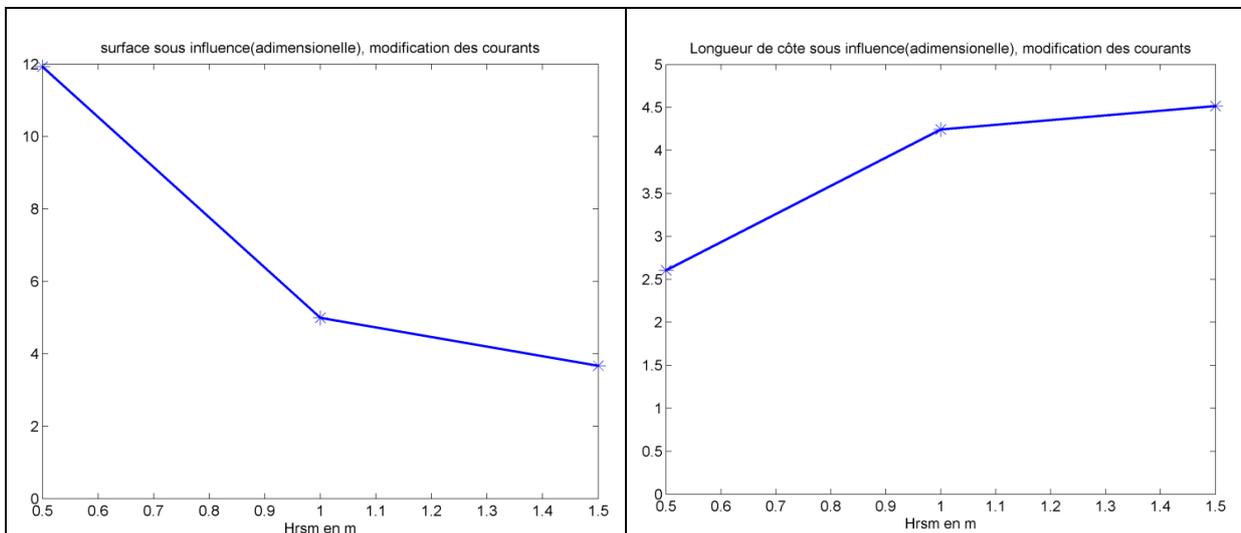


Figure 60 : Variation de A (à gauche) et de L (à droite) en fonction de la hauteur des vagues.

Alors que A diminue en fonction de la hauteur des vagues (fortement de H= 0.5 m à H = 1 m, puis plus légèrement jusqu'à H = 1.5 m), L montre un comportement inverse.

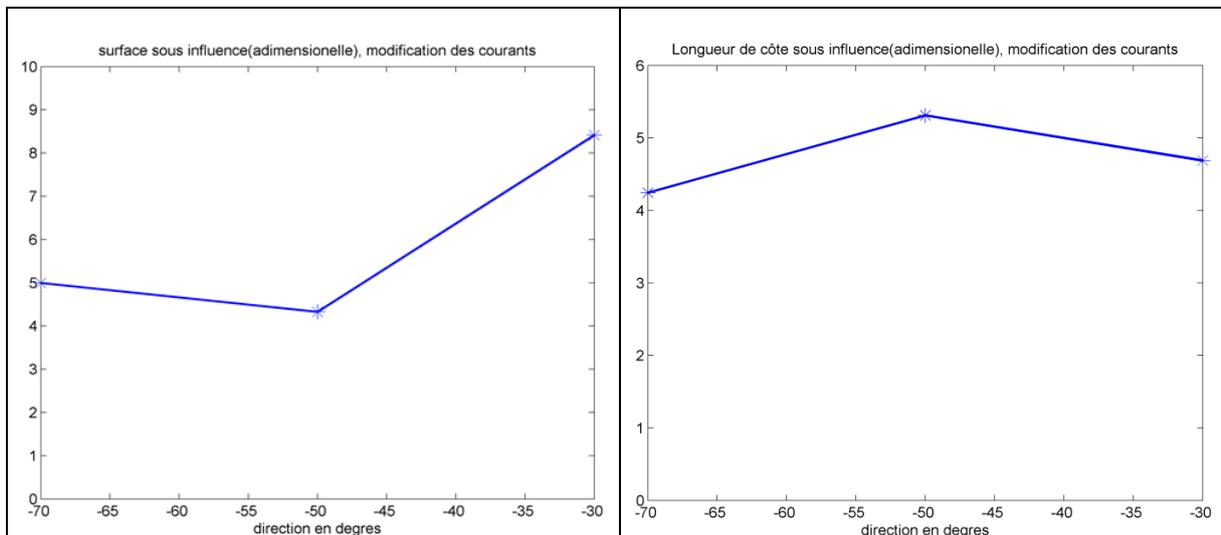
La diminution de A avec la hauteur des vagues est relativement simple à comprendre. En effet, plus les vagues sont hautes, plus elles ont tendance à déferler et à créer ainsi une dérive littorale loin de la côte. L'épi, de longueur finie, ne capte donc qu'une partie de la dérive littorale

engendrée par les vagues plus importantes, les modifications des courants sont donc moins importantes en termes de surface. Inversement, pour des petites vagues qui déferlent très près de la côte, l'épi capte la totalité de la dérive littorale, engendrant des modifications de courants plus importantes en surface.

Inversement, plus les vagues sont hautes et plus elles engendrent près de la côte des courants importants en termes de vitesse. L'impact de l'épi sur ces courants à la côte (diminution en aval et en amont de l'épi) sera d'autant plus important que les courants sont importants, expliquant ainsi l'augmentation de L avec la hauteur des vagues.

### **Direction des vagues**

Nous étudions ici la variation de A et L en fonction de l'angle d'incidence des vagues par rapport à la normale à la plage. L'angle d'incidence de notre cas de référence étant relativement important (70°), deux incidences supplémentaires inférieures ont été testées (50° et 30°, en provenance du Sud, par rapport à la normale à la plage). Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 61.



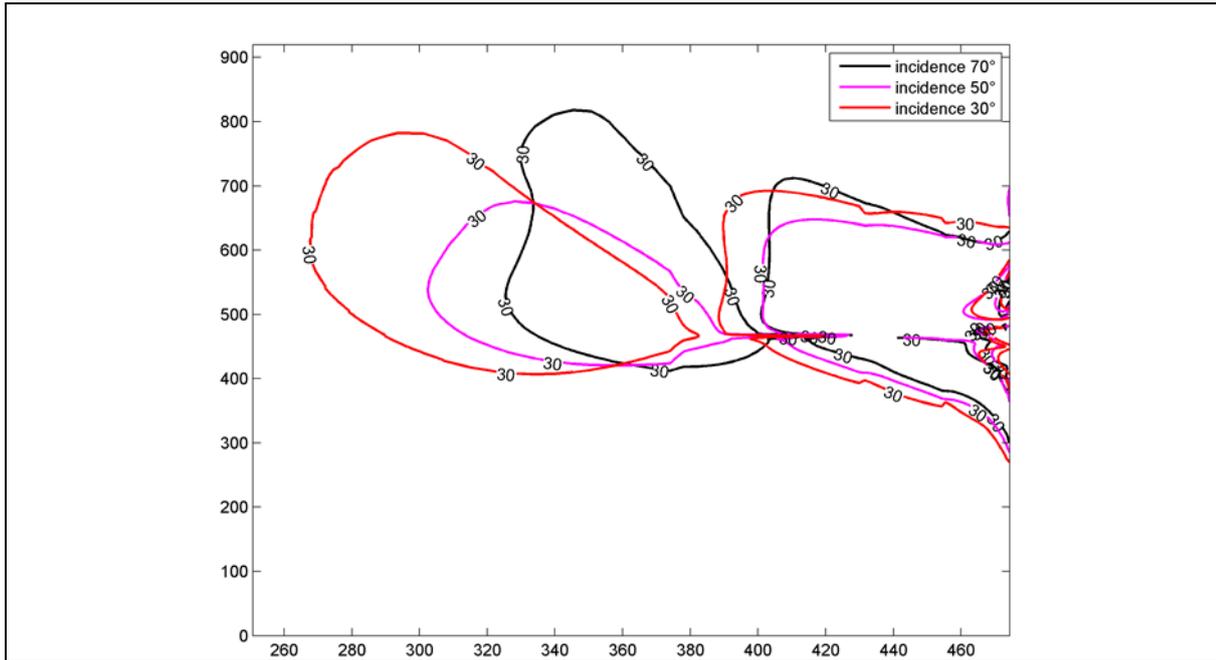


Figure 61 : Variation de A (en haut à gauche) et L (en bas à droite) en fonction de l'angle d'incidence des vagues. En bas, contour des surfaces d'écart relatifs supérieurs à 30 % pour les 3 incidences des vagues correspondantes.

Comme précédemment pour la hauteur des vagues, A et L montrent des comportements inverses. Alors que A présente une forme convexe en fonction de l'incidence des houles, avec un minimum à 50°, L est concave avec un maximum à cette même valeur. Il n'est pas facile d'expliquer ces comportements non-linéaires en fonction de l'incidence (voir pour cela la Figure 61 du bas). Une piste pourrait être trouvée dans la formule empirique du CERC (USCorps of Engineers) qui exprime le transport long-shore dû à la dérive littorale comme proportionnel à  $\sin(2 \cdot \alpha)$  ou  $\alpha$  est l'incidence de la houle.

### 5.3.2. Dimension de l'épi

#### Longueur de l'épi

Il est clair que plus la longueur de l'épi est importante et plus les effets de celui sur l'hydrodynamique seront importants. Cela se vérifie très bien sur la Figure 62, où nous avons tracé A en m<sup>2</sup> (à gauche) et L en m (à droite) en fonction de la longueur de l'épi

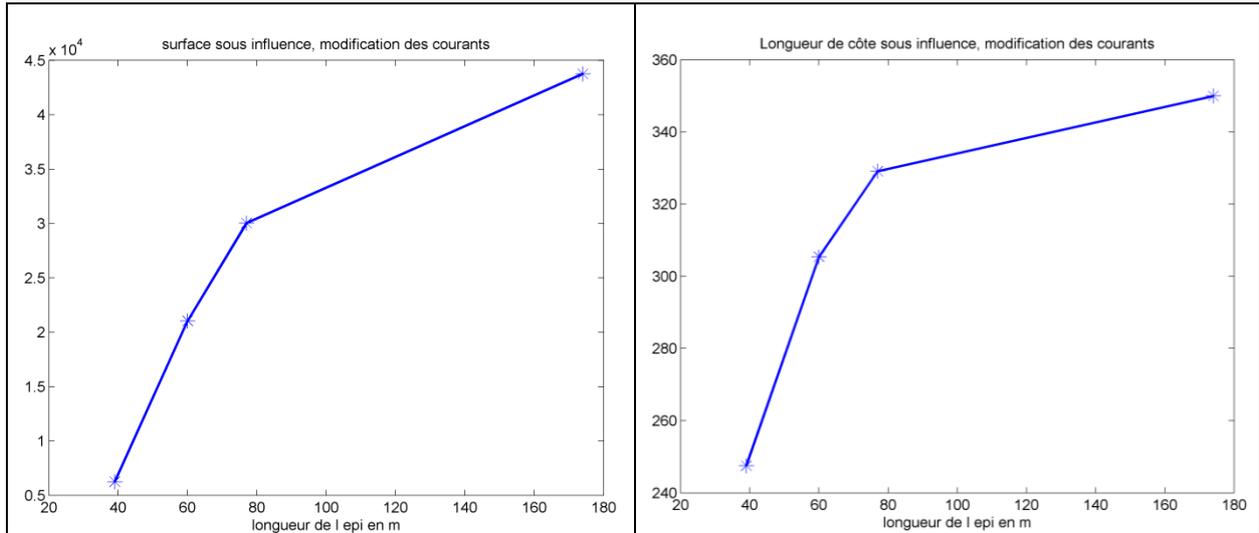


Figure 62 : Surface en m<sup>2</sup> (à gauche) et longueur à la côte en m (à droite) pour lesquelles les courants sont modifiés de plus de 30% par la présence de l'épi.

Si par contre, on adimensionne cette surface, respectivement cette longueur, par la longueur de l'épi au carré, respectivement par la longueur de l'épi, les résultats sont tout autre (Figure 63).

En effet,  $A$  croît d'abord entre une longueur d'épi comprise entre 38 m et 60 m puis décroît fortement.  $L$  décroît strictement avec la longueur de l'épi. Cela signifie donc que proportionnellement à sa taille un épi plus long engendre des modifications hydrodynamiques plus faibles en termes d'emprises surfacique et linéaire.

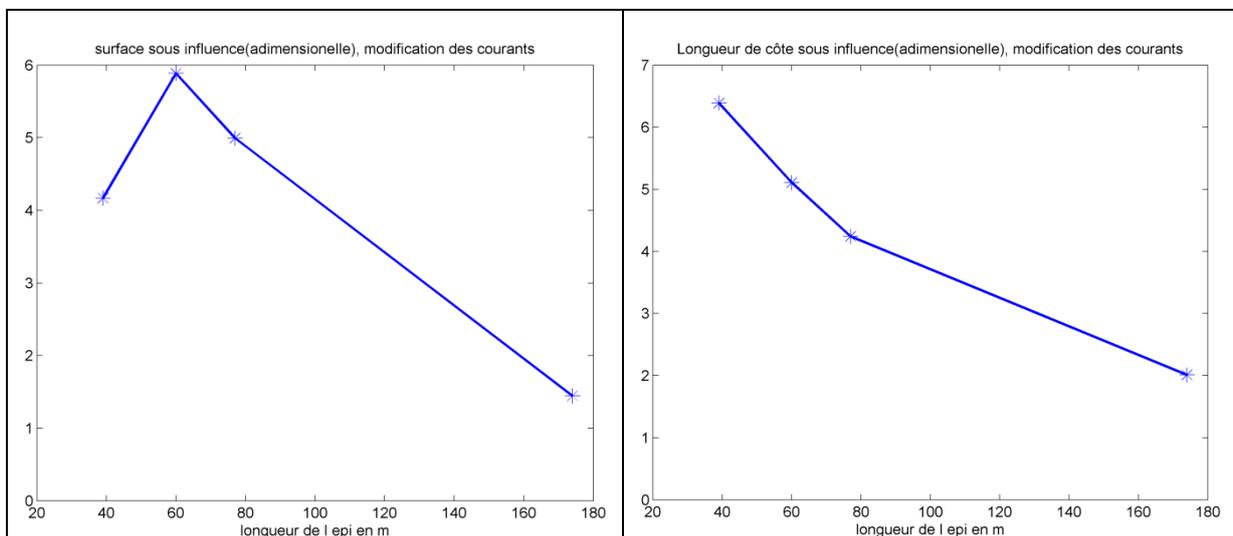


Figure 63 : Variation de  $A$  (à gauche) et  $L$  (à droite) en fonction de la longueur de l'épi.

### Largeur de l'épi

L'influence de la largeur de l'épi a également été testée sur les valeurs de  $A$  et  $L$ , en multipliant par deux sa largeur (2 m au lieu de 1 m). Les résultats obtenus montrent que pour un épi deux fois plus large,  $A$  et  $L$  sont multipliés par environ 1.5.

### 5.3.3. Nombre d'épis

Souvent les épis ne sont installés seul mais en batterie. Afin de tester une configuration plus réaliste et d'évaluer les effets cumulés de plusieurs épis, une simulation avec 3 épis a été effectuée.

Un paramètre important quand on s'intéresse à plusieurs épis est le rapport entre leur longueur et l'espacement entre eux. Dans la littérature, on peut trouver des préconisations concernant les longueurs et distances entre les épis (documents de l'US Army Corps of Engineers par exemple) suivant le type de littoral et le climat de houle. Dans l'exemple que nous avons choisi, les 3 épis mesurent 78 mètres de long chacun, 1 mètre de large, et sont espacés de 100 m. Ce rapport de 1.3 entre l'espacement des épis et leur longueur est de l'ordre de grandeur des rapports couramment utilisés en ingénierie côtière (Migniot, 1990).

Nous présentons sur la Figure 64 les champs de courants et la topo-bathymétrie obtenus pour la configuration avec 3 épis après 7h simulées, pour les mêmes conditions hydrodynamiques que précédemment ( $H = 1$  m,  $T = 5$  s, incidence de  $70^\circ$  par rapport à la normale à la plage). Sur cette figure (à gauche) on voit très nettement le détournement de la dérive littorale vers le large par les épis ainsi que les cellules de circulation entre les épis qui engendrent des courants sagittaux. La topo-bathymétrie obtenue après 7h simulées (à droite) semble qualitativement réaliste (accumulation de sédiments en amont de chaque épi et érosion en aval).

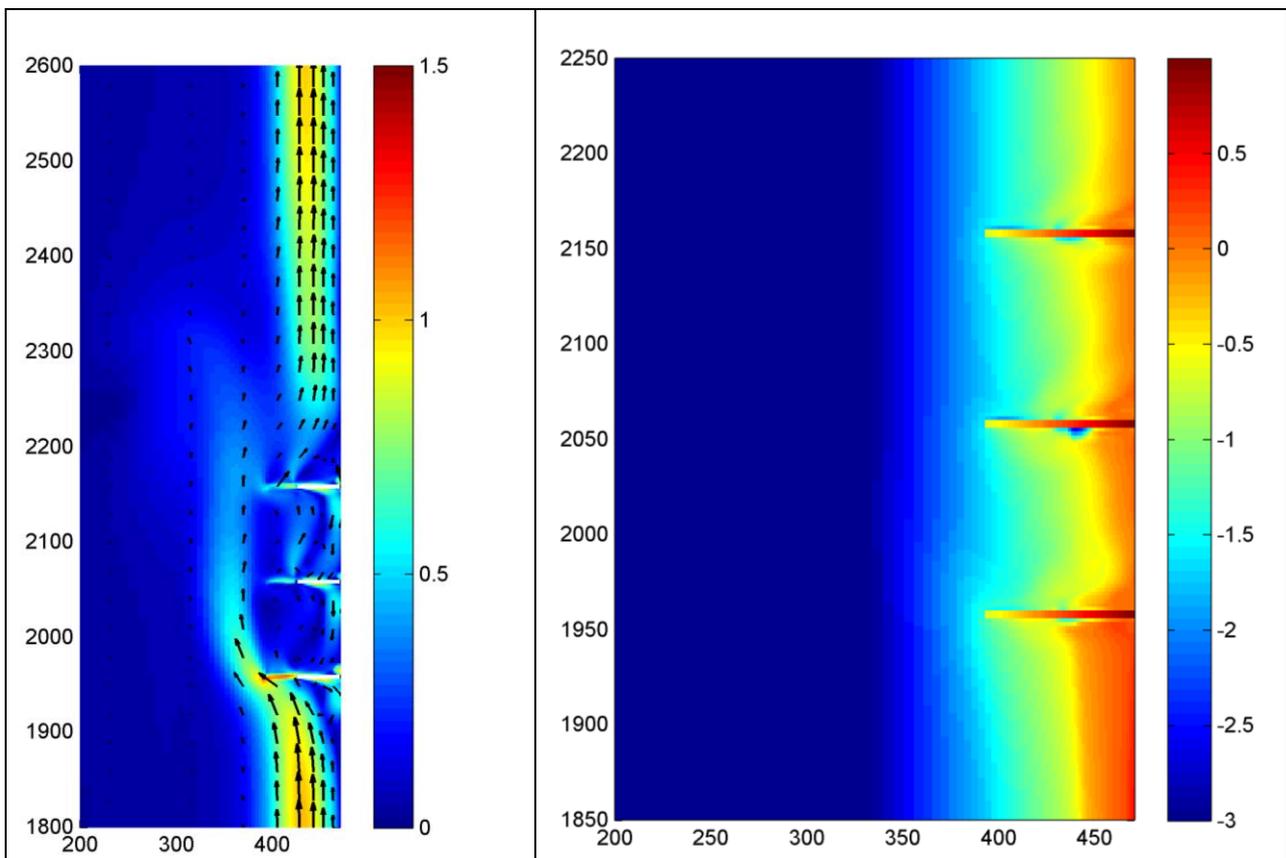


Figure 64 : Champs de courants (en m/s, à gauche) et topobathymétrie obtenue (cote en m, à droite) après 7 h simulée pour 3 épis.

Comme pour le cas avec un épi, nous présentons sur la Figure 65 les écarts relatifs en % des vitesses de courant avec et sans les 3 épis. Cette figure montre une forte réduction de la dérive littorale à la côte (en amont du premier épi, entre chaque épi et sur une distance relativement importante à l'aval) et son détournement vers le large qui provoque une forte accélération des courants au niveau des épis et à l'aval. Une petite zone de réduction des vitesses apparaît également au large, mais à cet endroit les vitesses sont très faibles (sans et avec épis) ; cette réduction n'est donc pas significative mais seulement due au fait que l'on calcule des écarts relatifs entre les deux situations.

Comparé au cas avec un épi, Figure 56, l'emprise surfacique des modifications des courants apparaît largement supérieure, la longueur de côte sous influence, en amont du premier épi et en aval du dernier, est quant à elle relativement semblable.

Ainsi, si l'on fixe le même seuil d'écart relatif entre les courants avec les 3 épis et sans, la surface où les courants sont modifiés de plus de 30% correspond à environ 30 fois la longueur d'un épi au carré. Par rapport à la situation où un seul épi est présent, cette surface est donc multipliée par 7. Concernant la longueur de côte sous influence, elle est égale dans ce cas à environ 7.5 fois la longueur d'un épi ; cela correspond pratiquement à la longueur de côte sous influence pour un seul épi ajoutée à la distance inter-épis.

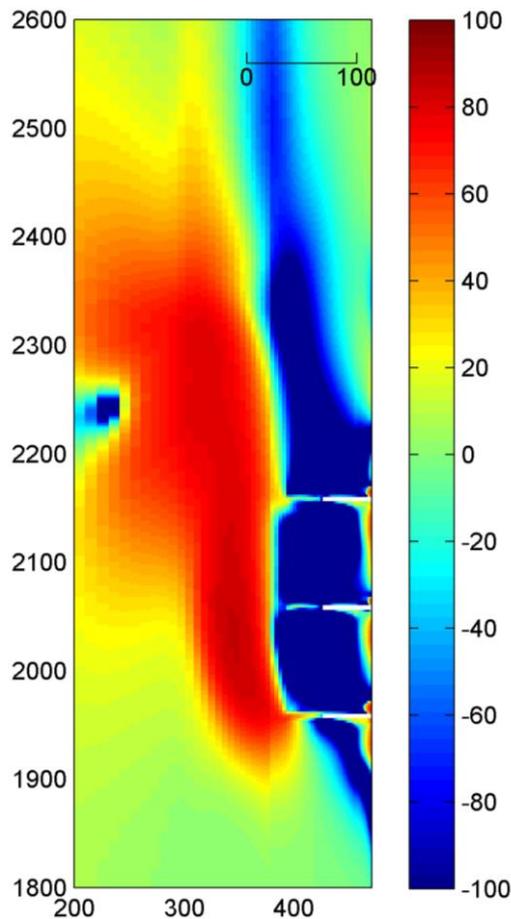


Figure 65 : Ecart relatif en % des vitesses de courant entre la configuration avec et sans les 3 épis.

## 5.4. CONCLUSION

Après une rapide revue bibliographique des modèles existants, notre choix s'est porté sur le modèle X-Beach (Roelvink et al. 2009), qui permet la modélisation de différents processus, aussi bien hydrodynamiques (propagation des vagues, des ondes infra-gravitaires et des courants induits) que morphodynamiques (érosion, dépôt sédimentaire). Ce modèle est de plus en plus utilisé pour étudier les impacts d'aménagements côtiers (voir Nederhoff, 2014 par exemple).

Une configuration simple et idéalisée a été définie pour tester les capacités du modèle. Il s'agit d'une plage à faible pente, de profil uniforme le long de la côte et soumise à des forçages hydrodynamiques constants (vagues et niveau marin constants au cours de la simulation) pouvant correspondre à une plage normande de la Baie de Seine.

A partir de cette configuration, des simulations, sans et avec épi, ont été réalisées et comparées entre elles.

Les résultats obtenus montrent la capacité d'XBeach à reproduire qualitativement des phénomènes hydro-morpho-sédimentaires aux abords d'aménagements côtiers. Pour l'hydrodynamique, les modifications des hauteurs de vagues et des vitesses des courants induites par la présence d'un épi (métrique 3) ont ainsi pu être évaluées pour des conditions de forçage très simple. Pour la morphologie, le modèle estime des variations de transport sédimentaire qui se traduisent par des évolutions topo-bathymétriques relativement rapides.

Ces tests ont permis de montrer qu'un modèle numérique permettait d'évaluer l'emprise des modifications de paramètres hydro-sédimentaires qui ne sont pas quantifiables dans la nature sans campagne d'observation spécifique. Si les mesures sont indispensables pour connaître précisément l'environnement et adapter finement les modèles, des études de modélisation relativement simples peuvent permettre de progresser sur l'évaluation de la métrique 3 à l'échelle d'un ou plusieurs aménagements.

## 6. Conclusions et perspectives

Ce projet visait à développer et à tester, sur des sites littoraux normands, une ou des méthodes d'évaluation des métriques 2 et 3 de la surveillance hydromorphologique. Ces deux métriques, relatives aux aménagements anthropiques littoraux, sont définies comme :

- M2 (Modification des échanges sédimentaires à la côte) : la longueur de linéaire côtier où la sédimentation est modifiée (érosion, accrétion) par la présence d'aménagements ou d'interventions anthropiques (rechargement, exploitation, etc.) par rapport à la longueur totale de linéaire côtier de chaque masse d'eau ;
- M3 (Modification des courants et des vagues) : la surface de la masse d'eau pour laquelle l'hydrodynamique (courants, vagues) est modifiée par des ouvrage par rapport à la surface totale de la masse d'eau.

Des échanges avec l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et divers représentants locaux (services de l'état, universitaire) ont permis d'identifier 18 sites d'étude potentiels, présentant différents types d'aménagements et de côtes. Pour l'ensemble de ces sites, un travail d'identification et de collecte des données existantes (et relatives à notre problématique) a été entrepris. Suite à l'analyse des données collectées, 4 sites d'études, diversifiés, ont été sélectionnés :

- Un secteur très artificialisé situé entre Arromanches-les-Bains et Ouistreham (Calvados) ;
- La plage sableuse peu artificialisée d'Utah Beach (Manche est) ;
- Un secteur de falaises autour de Criel s/ Mer (Seine Maritime) ;
- Une embouchure, le Havre de Sienne (Manche ouest).

Remarquons que les bases de données SIG départementales sur les ouvrages côtiers avaient déjà été collectées précédemment par le BRGM, dans le cadre de la mise en place de la surveillance hydromorphologique de la DCE.

En parallèle à la sélection des sites, une réflexion sur les méthodes d'évaluation des impacts hydro-morpho-sédimentaires, induits par les principaux types d'aménagements côtiers normands (longitudinaux de haut de plage et transversaux), a été effectuée.

La zone d'influence d'un aménagement (c'est-à-dire la zone d'emprise de ses impacts hydro-morpho-sédimentaires) a été définie comme la somme des impacts directs (modifications topobathymétriques et de nature des fonds dans l'emprise de l'aménagement) et des impacts indirects de celui-ci (modifications morphologiques, de la dynamique sédimentaire et de l'hydrodynamique autour de l'aménagement).

Pour évaluer ces différents types d'impacts, plusieurs méthodes ont été proposées :

- Pour les impacts directs : l'utilisation des bases de données SIG sur les ouvrages, des plans de construction de l'aménagement, de la télédétection (ortho-photos, Lidar) et par des mesures sur le terrain.
- Pour les impacts indirects sur la morphologie et l'hydrodynamique : des campagnes de mesures, l'utilisation de modèles numériques et la télédétection.

Ces méthodes, suivant les données disponibles, ont ensuite été testées sur les sites d'études normands, afin d'évaluer la longueur de côte sous influence des aménagements présents, relative à la métrique 2.

L'évaluation des impacts directs à la côte (emprise des aménagements sur la côte) a été réalisée, à l'aide d'outils SIG, à partir des bases de données ouvrages départementales et des ortho-littorales\_v2 (IGN). La longueur des aménagements est accessible par les bases de données ouvrages ; l'information sur leur largeur en est par contre généralement absente mais peut être grossièrement estimée via les ortho-photos ou les données Lidar.

Avant de faire cette évaluation, une phase d'analyse rigoureuse des données SIG utilisées (bases de données sur les ouvrages, masses d'eau, trait de côte officiel, éventuellement cadastres conchylicoles) est nécessaire afin de déterminer quels aménagements considérer. En effet, plusieurs difficultés peuvent apparaître :

- Les bases de données sur les ouvrages peuvent présenter de multiples types d'erreurs (absence/oubli d'aménagement ; erreur sur la nature, les dimensions, l'emplacement...) qu'il faut identifier et corriger pour ne pas sous ou surestimer les résultats.
- Dans ces bases, les attributs liés à certains ouvrages peuvent être trompeurs quant à leur nature, naturelle ou anthropique.
- Les données SIG (masses d'eau, trait de côte Histolitt, bases de données ouvrages) étant définies à des échelles spatiales différentes, elles présentent des écarts plus ou moins importants entre leur position géographique à la côte. Cela est très problématique, notamment pour le choix des aménagements à considérer dans les masses d'eau. Afin de pallier à cette difficulté, les aménagements ont été sélectionnés sur la base de leur position physique par rapport à la côte et aux niveaux de la mer (jouent-ils un rôle sur le fonctionnement hydromorphologique de la masse d'eau ?), plutôt que par rapport aux limites géographiques strictes des masses d'eau.

La question de prendre en compte un aménagement à terre (en deçà du trait de côte) peut donc se poser, s'il modifie les échanges sédimentaires à la côte. Il en est de même pour certains aménagements plus au large, situés en zone intertidale voire sub-tidale, tels que des installations conchylicoles ou différentes constructions anthropiques. Ces aménagements, s'ils sont « suffisamment loin » de la côte et n'engendrent pas de modifications morphologiques notables sur celle-ci, ne sont pas considérés dans la métrique 2. Dans le cadre de ce projet, nous avons proposé une nouvelle métrique (la métrique 2 bis) qui tient compte de tous les aménagements anthropiques situés au sein de la masse d'eau. Pour ce faire, la longueur des aménagements au large a été projetée, perpendiculairement à la côte, sur le trait de côte. En ajoutant les longueurs obtenues de cette façon à la métrique 2 (qui ne concerne que les zones d'influences des aménagements présents à la côte), on obtient une nouvelle métrique (M2bis) qui traduit en fait la présence d'artificialisation au droit du trait de côte (de l'ensemble de la masse d'eau).

Généralement, suite à l'identification et l'évaluation des longueurs de côte sous impacts directs, les zones de côte adjacentes, non ou peu artificialisées, ont été étudiées afin d'y mettre à jour d'éventuels impacts indirects dus aux aménagements sur les segments voisins.

Suivant les sites étudiés, ces évaluations ont été plus ou moins réalisables. Sur les côtes sableuses ou à falaises meubles, relativement rectilignes, il a été possible, à partir des ortho-photos et des données LIDAR, d'identifier les zones sous impacts indirects d'aménagements. En contexte sableux estuarien, cette évaluation n'a pas été possible du fait de la complexité de la dynamique hydro-morpho-sédimentaire de tels sites. Pour les côtes à falaises dures, les impacts indirects peuvent être évalués si des études menées sur le long terme et dédiées à cette problématique, existent. Elles sont encore assez rares et très locales.

L'évaluation complète des longueurs sous impacts directs et indirects des aménagements présents entre Arromanches les Bains et Ouistreham a permis d'évaluer la métrique 2 (M2) pour les 3 masses d'eau côtières de la zone (FRHC12, FRHC13 et FRHC14).

Il n'a pas été possible, sur les sites d'étude, de travailler à l'évaluation de la métrique 3 (modifications des vagues et courants induites par les aménagements), principalement par manque de données sur les conditions hydrodynamiques et leurs éventuelles modifications par les aménagements anthropiques. Notre choix s'est alors porté sur l'utilisation d'un modèle numérique, XBeach (Roelvink et al. 2009), pour simuler une configuration simple et idéalisée (profil de plage uniforme, forçages hydrodynamiques constants), avec présence d'un ou plusieurs épis. La comparaison des résultats, obtenus pour les mêmes conditions sans et avec épi, permet alors de évaluer les modifications des vagues, des courants et de la morphologie de la plage induites par l'ouvrage.

Ces premiers résultats ont permis de montrer qu'un modèle numérique permettait d'évaluer l'emprise des modifications de paramètres hydro-sédimentaires qui ne sont pas observables sans campagne d'observation spécifique. Si des mesures de terrain sont indispensables pour connaître précisément l'environnement et adapter finement les modèles, des études de modélisation relativement simples permettent de progresser sur l'évaluation de la métrique 3 à l'échelle d'un ou plusieurs aménagements.

Finalement, les tests méthodologiques entrepris dans cette étude, quant à l'évaluation des métriques 2 et 3 de la surveillance hydromorphologique des masses d'eau côtières, permettent de mettre en exergue plusieurs points :

- Il est aujourd'hui possible d'évaluer les longueurs de côte sous influence d'aménagements (métrique 2) pour des situations particulières et relativement simples (côte sableuse, voire à falaise meuble, relativement rectilignes ; conditions hydrodynamiques peu complexes...) à partir de données disponibles à l'échelle nationale (ortho-littorale\_v2 ; données Lidar IGN). Dans les autres situations (contexte hydrodynamique plus complexe, côte à falaise dure...) des études ou suivis spécifiques sont nécessaires.
- Les modifications des courants et des vagues induites par les aménagements (métrique 3) peuvent être évaluées par des outils de modélisation numérique. L'application de telles méthodes, à un site réel, nécessite par contre de nombreuses données (topo-bathymétrie fine, conditions hydrodynamiques, dimensions de l'aménagement,...) qui rendent difficile, aujourd'hui, la généralisation de cette méthode à l'ensemble des aménagements présents sur nos côtes.
- L'évaluation des métriques 2 et 3 à l'échelle nationale semble donc difficile dans l'état actuel des connaissances. Des efforts de recherche sur des sites réels aménagés doivent donc être encore entrepris à des échelles locales, afin d'améliorer la compréhension et la quantification des impacts hydro-morpho-sédimentaires des aménagements littoraux. A ce titre, le développement récent des techniques de levés aériens photogrammétriques (levés par drone par exemple), permet, pour des coûts assez faibles, l'acquisition de données topo-bathymétriques très fines sur des emprises de plusieurs dizaines hectares. L'étude d'un ou plusieurs sites réels, par modélisation numérique, conjointement à des levés topo-bathymétriques réguliers, permettrait ainsi d'améliorer notablement notre compréhension des phénomènes mis en jeu.

Aussi même si l'évaluation des impacts indirects des aménagements littoraux nécessite encore d'importants efforts de recherche, la priorité actuelle doit être l'évaluation de leur impact direct, à savoir leur emprise au sol. Il en effet indispensable que les dimensions des ouvrages soient présentes dans les bases de données SIG dédiées. Une uniformisation à l'échelle nationale, de ces bases de données ouvrages départementales est également indispensable (même typologie et niveau d'information), notamment pour faciliter la mise en œuvre nationale des directives cadres européennes telles que la DCE ou la DCSMM.



## 7. Bibliographie

- Abanades, J., D. Greaves et G. Iglesias. 2014. Wave farm impact on the beach profile: A case study, *Coastal Engineering*, 86, 36-44.
- Alleman N. (2013). Morphodynamique à l'échelle régionale d'une avant-côte microtidale à barres sédimentaire : Le cas du Languedoc-Roussillon à l'aire de la technologie LIDAR. Thèse. CERFREM UMR5110. Université de Perpignan via Domitia. 253p.
- Anteagroup (2013). Création d'une cale d'accès à la mer et des ouvrages de défense contre la mer associés à Grandcamp Maisy (14). Etude d'impact sur l'environnement. Juillet 2013, A 67267/A.
- Ardhuin F., E. Rogers, A.V. Babanin, J. Filipot, R. Magne, A. Roland, A. van der Westhuysen, P. Queffeulou, J. Lefevre, L. Aouf et F. Collard. 2010. Semi empirical dissipation source functions for ocean waves. Part I: definition, calibration, and validation. *J Phys Oceanogr* 40:1917–1941.
- Augris C., Clabaut P., Coasta S., Gourmelon F., Latteux B., 2004. Evolution morphosédimentaire du domaine littoral et marin de la Seine-Maritime. Ifremer, Conseil général de la Seine-Maritime, EDF. Ed. Ifremer, Bilans et Prospectives, 159 p.
- Booij, N., Ris, R. C. and Holthuijsen, L. H. 1999. A third-generation wave model for coastal regions, Part I: Model description and validation, *J. Geophys. Res.* Vol. 104, C4, pp.7649-7666.
- Brivois O. (2016) – Avancement 2015 de l'élaboration du programme de surveillance de la qualité hydromorphologique des masses d'eau côtières de la façade Manche Atlantique dans le cadre de la DCE. Rapport final. BRGM/RP-65759-FR. A paraître.
- Brivois O., Vinchon C., 2013 – Mise en place de la surveillance hydromorphologique de la DCE dans les masses d'eau côtières métropolitaines. Rapport final 2012. BRGM/RP-61799-FR, 41pp., 5 figures, 5 tableaux, 2 annexes.
- Chen, C, R. C. Beardsley et G. Cowles. 2006. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system. Special Issue entitled "Advances in Computational Oceanography". *Oceanography*. vol. 19, No. 1, 78-89.
- Dewez, T., Rohmer, J., Regard, V., and Cnudde, C., 2013. Probabilistic coastal cliff collapse hazard from repeated terrestrial laser surveys: case study from Mesnil Val (Normandy, northern France), *Journ. Coast. Res.*, Sp. Iss. 65, DOI:10.2112/SI65-119.
- DHI (2007). – Longshore current and littoral drift. LITDRIFT user guide.
- DHI (2007). – *MIKE 21 Spectral Wave Module*. Scientific Documentation.
- DHI and Geos-AEL (2014). Plan de prévention des risques littoraux sur neuf communes du département de la Manche, Rapport de phase 1 : Analyse préalable du fonctionnement du littoral, DDTM50. 134p.
- European Commission (2004) - EUROSION <http://www.euroSION.org/database/index.html>.

- Freeman, S., Hull, S., Whitehouse R. (2005). Development of Type-Specific Reference Conditions. Development of Hydromorphological Reference Conditions and Draft Classification Scheme for Transitional and Coastal Waters. Work Package 6b: Final Report. SNIFFER, Environment Agency, Reference number/code SC040037.
- Gravens, M. B., N. C. Kraus, et H. Hanson. 1991. GENESIS-Generalized model for simulating shoreline change. Vol. 2: Workbook and System User's Manual. Tech. Rep. CERC-89-19. Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Corps of Engineers. 343. pp.
- GRESARC, 2002. Suivi de l'évolution des côtes du département du Calvados, novembre 1995 - février 2002 – Analyses. Université de Caen Basse-Normandie. Etude financée par le Conseil Général du Calvados.
- GRESARC, 1997. Etude des risques liés à l'érosion et à la submersion du littoral du Calvados. Université de Caen Basse-Normandie. Etude financée par le Conseil Général du Calvados.
- Gruwez V., Verheyen B., Wauters P. et Bolle A, 2014. 2DH Morphodynamic Time-Dependant Hindcast Modelling of a Groyne System in Ghana, ICHE 2014, Hamburg.
- Hervouet, J.-M. 2007. Hydrodynamics of free surface flows modelling with the finite element method. Ed. Wiley.
- ISL Ingénierie, 2014. Protections maritimes du littoral de la Cdc Bessin Seulles et Mer, Diagnostic et analyse de l'efficacité des épis transversaux. Rapport n°RA14-113.
- Kervella Y., 2010. Impact des installations ostréicoles sur l'hydrodynamique et la dynamique sédimentaire. Thèse de Doctorat de l'Université de Caen.
- Lazure P. et Dumas F. 2008. An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances In Water Resources*, 31(2), 233-250.
- Lesser, G.R., Roelvink, J.A., van Kester, J.A.T.M., Stelling, G.S., 2004. Development and validation of a three dimensional morphological model. *Journal of Coastal Engineering*, 51, 883-915.
- Letortu P., 2013. Le recul des falaises crayeuses haut-normandes et les inondations par la mer en Manche centrale et orientale : de la quantification de l'aléa à la caractérisation des risques induits.. Thèse de doctorat de l'Université de Caen Basse-Normandie, 414 p.
- L.N.H.L.C.H.F. (1986). Catalogue sédimentaire des côtes françaises, Côtes de la Mer du Nord et de la Manche. Ed. Eyrolles.
- Luetich, R. A., et J. J. Westerink 2004., Formulation and numerical implementation of the 2D/3D ADCIRC finite element model version 44.
- McCall, R.T., Masselink, G., Poate, T., Roelvink, J.A., Almeida, L.P., Davidson, M., Russel, P.E., 2014. Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G, *Coastal Engineering*.
- Migniot, C. 1990. Manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire et l'érosion et sédimentation du littoral. ER PM – N°88.02 Cours enseigné à l'école national des travaux publics de l'état et à la faculté d'Orsay – Paris Sud.

Montreuil, A.-L., F. Levoy, Bretel, P. et Anthony, E. J. (2014). "Morphological diversity and complex sediment recirculation on the ebb delta of a macrotidal inlet (Normandy, France): A multiple LiDAR dataset approach." *Geomorphology* **219**(0): 114-125.

Nederhoff, C.M. 2014. Modeling the effect of hard structures on dune erosion and overwash. Master of Science Thesis, Delft University of Technology.

Ozasa, H. et Brampton A.H., 1980. Mathematical modelling of beaches backed by seawalls. *Coastal Engineering* 4: 47-63.

Paskoff R., (1993). Côtes en danger. Pratique de la Géographie, Edition Masson, 250 p.

Roelvink J., A. Reniers, A. Van Dongeren, J. Van Thiel de Vries, R. McCall, et J. Lescinski. 2009. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands, *Coastal Engineering*, 56, 1133- 1152.

Robin, N. and F. Levoy (2007). "Etapas et rythmes de formation d'une flèche sédimentaire à crochets multiples en environnement mégatidal." *Zeitschrift für Geomorphologie* **51**(3): 337-360.

Shchepetkin, A. F. and J. C. McWilliams, 2009. Computational kernel algorithms for fine-scale, multi-process, long-term oceanic simulations. In: Handbook of Numerical Analysis, Vol. XIV: Computational Methods for the Ocean and the Atmosphere, P. G. Ciarlet, editor, R. Temam & J. Tribbia, guest eds., Elsevier Science, pp. 121-183.

SOGREAH (2010). Extension du terminal ferry de Ouistreham, Etude d'impact au titre des articles L 122-1 et suivants du Code de l'Environnement, Mai 2010, N°4-62-0072, Ports Normands Associés.

Stive, M. J. F. et Battjes, J.A., 1984. A Model for Offshore Sediment Transport. In Houston.

Tolman H.L. 2008. A mosaic approach to wind wave modeling. *Ocean Model* 25:35–47.

Tolman H.L., M.L. Banner et J.M. Kaihatu. 2013. The NOPP operational wave model improvement project. *Ocean Model* 70(2–10):2013

Valette L., Piffady J., Chandesris A., Souchon Y., 2012. SYRAH-CE : description des données et modélisation du risque d'altération de l'hydromorphologie des cours d'eau pour l'Etat des lieux DCE. Rapport final, Irstea.

Van Geer, P., De Vries, B., Van Dongeren, A., et Van Thiel de Vries, J. S. M. 2012. Dune erosion near sea walls: model-data comparison. *Coastal Engineering*, pages 1–9.

Van Thiel de Vries, J. S. M. 2009. Dune erosion above revetments. ICCE 2012: Proceedings of the 33rd International Conference on Coastal Engineering, Santander, Spain, 1-6 July 2012, pages 1–13.

Villani, M., Bosboom, J., Zijlema, M., et Stive, M. 2012. Circulation patterns and shoreline response induced by submerged breakwaters. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(33), structures.25.

Warner, J.C., Sherwood, C.R., Signell, R.P., Harris, C., Arango, H.G. 2008. Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model. *Computers and Geosciences*, 34, 1284–1306.

Warren, I. R., Bach, H. K. 1992. MIKE 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and sea. *Environ. Software* 7: 229-240.

Wei, G. and Kirby, J. T., 1995, "A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 121, 251-261.

Zijlema, M., Stelling, G. and Smit, P. 2011 SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters, *Coast. Engng.*, **58**, 992-1012.

## Annexe 1

### Paramètres XBeach

Le travail sur des environnements littoraux simplifiés ne permet pas de calibrer finement XBEACH en ajustant les différents paramètres du modèle à un jeu de données et d'observations réelles. Ainsi pour les tests méthodologiques, le choix d'utiliser les mêmes réglages internes du modèle pour les différents profils de plages schématiques a été fait. En première approche, XBEACH est donc utilisé sans calibration, avec ses valeurs par défaut (Voir le tableau suivant récapitulatif).

Paramètres	valeurs
D50 – grain médian	0.3mm
smax – paramètre de Shields	-1
C- coefficient de Chézy	$55 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ .
morfac – accélération morphologique	1
form – formule de transport sédimentaire	2 (van Thiel et van Rijn)
nuhv – facteur pour la viscosité horizontale	1
facua – transport sédimentaire induit par l'asymétrie de vagues	0.1
dryslp – pente critique d'avalanche en domaine aérien	1
wetslp – pente critique d'avalanche en domaine immergé	0.3
eps – épaisseur de seuil entre mailles sèches et humides	0.005m
hmin – profondeur minimale pour le courant de retour	0.2m
dzmax – taux d'érosion max de la dune par le phénomène d'avalanche	0.05m
hswitch – profondeur seuil entre « dryslp » et « wetslp »	0.1m

$\gamma$ – paramètre de déferlement (formule de Roelvink)	0.55
n – puissance dans la formule de Roelvink	10

*Récapitulatif des principaux réglages du modèle XBEACH mis en œuvre pour les configurations schématiques*

- La taille moyenne des grains renseignée à partir du diamètre pour lequel 50% des grains en nombre sont plus petits (D50) est fixée à 0.3mm pour chaque cas. Le paramètre d'accélération morphologique (morfac) considéré est de 1, de façon à ce que l'évolution du fond soit calculée à chaque de pde tramps de calcul hydrodynamique.



**Centre scientifique et technique**  
**Direction Risques et Prévention**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34  
[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)