



HAL
open science

Analyse morphodynamique des rechargements sédimentaires sur le littoral du nord de la France : le cas de la façade portuaire de Dunkerque

Alexandra Spodar

► **To cite this version:**

Alexandra Spodar. Analyse morphodynamique des rechargements sédimentaires sur le littoral du nord de la France : le cas de la façade portuaire de Dunkerque. Géomorphologie. Université du Littoral Côte d'Opale, 2018. Français. NNT : 2018DUNK0475 . tel-02182029

HAL Id: tel-02182029

<https://theses.hal.science/tel-02182029>

Submitted on 12 Jul 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UMR CNRS 8187 LOG
Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences
Équipe 4 — Dynamique côtière Actuelle et Récente

Analyse morphodynamique de rechargements sédimentaires sur le littoral du nord de la France : le cas de la façade portuaire de Dunkerque

Thèse de Doctorat

GEPO (Géosciences, Écologie, Paléontologie, Océanographie)
Spécialité Morphodynamique littorale
École doctorale SMRE
(Sciences de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement)

Présentée par
Alexandra SPODAR

DRONE LITTORAL

Soutenance le 26 janvier 2018

Membres du jury :

RUZ Marie-Hélène, Professeur, Université du Littoral Côte d'Opale, directrice de thèse
HÉQUETTE Arnaud, Professeur, Université du Littoral Côte d'Opale, co-directeur de thèse
ANTHONY Edward, Professeur, Université d'Aix-Marseille, Rapporteur
CERTAIN Raphaël, Maître de conférences, HDR, Université de Perpignan, Rapporteur
GRÉGOIRE Pascal, Ingénieur Docteur, Grand Port Maritime de Dunkerque, Examineur
TRENTESAUX Alain, Professeur, Université de Lille, Examineur

Membres invités :

BRASSART Grégory, Adjoint au chef de service Risques – Responsable de la mission sécurité défense, DREAL Hauts-de-France
FORAIN Nicolas, Responsable bureau d'études d'aménagement, Grand Port Maritime de Dunkerque

Remerciements

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers l'ensemble des organismes qui ont contribué à ce que cette étude soit réalisée, que ce soit d'un point de vue financier ou technique : la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement des Hauts-de-France (DREAL Hauts-de-France), le Grand Port Maritime de Dunkerque (GPMD), l'Université du Littoral Côte d'Opale (ULCO), le Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) ainsi que l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) pour avoir mis en relation tous ces acteurs, ce travail bénéficiant en effet d'une convention Cifre.

Mes premiers remerciements s'adressent à Marie-Hélène Ruz, ma directrice de thèse, ainsi qu'à Arnaud Héquette, mon co-directeur de thèse, pour m'avoir fait confiance et m'avoir permis de mener à bien cette étude, pour leurs critiques constructives et leurs remarques pertinentes.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble des membres du jury :

- à Edward Anthony, Professeur à l'Université de Provence Aix-Marseille I, ainsi qu'à Raphaël Certain, Maître de conférences à l'Université de Perpignan, pour avoir accepté ce rôle de rapporteur
- à Pascal Grégoire, Directeur du département Management de l'Environnement du GPMD, pour avoir accepté d'être mon encadrant scientifique au sein de l'entreprise
- à Alain Trentesaux, Professeur à l'Université de Lille pour avoir accepté d'examiner ce travail

Je souhaite remercier également Grégory Brassart, adjoint au chef de service Risques et responsable de la mission sécurité défense au sein de la DREAL des Hauts-de-France pour l'intérêt qu'il a porté à cette étude. Enfin je tiens à remercier Nicolas Forain, responsable du bureau d'études d'aménagement du département Développement et Programmation au sein du GPMD pour son regard avisé sur cette étude ainsi que ses conseils et remarques au cours de ces trois ans.

Je ne peux me passer d'une mention toute particulière à l'ensemble de l'équipe Développement et Programmation du GPMD. Evoluer au cours de ces trois ans en votre compagnie fut un réel bonheur.

Un immense merci aux collègues et amis du LOG qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail, Vincent Sipka, Denis Marin, Adrien Cartier, Amar Zemmour et Olivier Cohen.

Je tiens également à remercier mes proches, mes parents, mon frère Yohan, mon parrain Stéphane ainsi que mes grands-parents pour leur soutien et leur intérêt pour mon travail bien que parfois un peu abstrait j'imagine ... Un grand merci à mes amies Emeline et Céline qui ont suivi chaque étape de ces trois longues années.

Et enfin, merci à toi Adrien, pour ton soutien, tes conseils, ta patience, tes encouragements dans les moments difficiles, ta présence, bref je m'arrête là... toute une thèse de 300 pages ne serait de toutes façons pas suffisante pour exprimer ce que je ressens pour toi.

Abréviations

BMME : Basse Mer de Morte-Eau

BMVE : Basse Mer de Vive-Eau

NM : Niveau Moyen

PBMA : Plus Basse Marée Astronomique

PHMA : Plus Haute Marée Astronomique

PMME : Pleine Mer de Morte-Eau

PMVE : Pleine Mer de Vive-Eau

Mm³ : Million de mètre cube

CM : Côte Marine

IGN : Institut Géographique National

NGF : Nivellement Général Français

GPMD : Grand Port Maritime de Dunkerque

UG : Unité de Gestion

Sommaire

Introduction générale	1
Partie I. Les rechargements sédimentaires	5
Chapitre I. Etat des connaissances sur les rechargements sédimentaires	7
1. Les rechargements sédimentaires : définition et objectifs.....	7
2. Conditions d'efficacité	13
3. Performance d'un rechargement	19
4. Impacts sur les écosystèmes.....	23
5. Les coûts d'un rechargement sédimentaire.....	26
Chapitre II. Aperçu de la pratique des rechargements sédimentaires dans le monde ..	27
1. Tour du monde des pratiques	27
2. Les Etats-Unis : précurseurs en termes de rechargements sédimentaires.....	29
3. Les rechargements en Europe	31
Chapitre III. Les rechargements sédimentaires en France	43
1. Méthodologie.....	43
2. Etats des lieux des rechargements sédimentaires en France.....	47
3. Synthèse des rechargements sédimentaires en France	61
Partie II. Les rechargements sédimentaires sur la façade maritime du Grand Port Maritime de Dunkerque	67
Chapitre IV. Présentation et caractérisation du littoral dunkerquois et des sites d'études	69
1. Caractéristiques générales du littoral de la Côte d'Opale	69
2. Caractéristiques météorologiques, hydrodynamiques et contexte sédimentaire	71
3. Présentation du Grand Port Maritime de Dunkerque	77
Chapitre V. Approche méthodologique : acquisition et traitement	89
1. Données morphologiques de la plage et de l'avant-plage	89
2. Données hydrodynamiques et météorologiques	97
3. Données granulométriques de surface	104
4. Transport sédimentaire au niveau du fond marin	106
Chapitre VI. Analyse d'un rechargement de plage : le site de la digue des Alliés	109
1. Du dimensionnement du rechargement à sa mise en œuvre.....	109
2. Analyse des conditions météo-marines au large et à la côte entre mars 2014 et mai 2017	119
3. Caractéristique hydrodynamique du site après rechargement	133
4. Evolution de la partie supra et intertidale du site.....	142
5. Analyse des variations morphologiques et volumétriques subtidales.....	178
6. Lien entre les variations volumétriques et les puissances de vagues	185
7. Synthèse de l'évolution morpho-sédimentologique	190
Chapitre VII. Analyse de l'évolution d'un rechargement subtidal	197
1. Du projet à la mise en œuvre du rechargement.....	197

2.	Analyse des conditions météo-marines	200
3.	Caractéristiques hydrodynamiques du site après rechargement	210
4.	Analyse de l'évolution des petits-fonds et du bas de plage.....	221
5.	Impacts des puissances de houles sur le bas de plage et les faibles profondeurs de l'avant-plage.....	232
6.	Analyse de l'évolution morphologique de l'estran	236
7.	Caractéristiques générales de la granulométrie de surface de l'estran.....	245
8.	Synthèse de l'évolution du rechargement subtidal	253
Chapitre VIII. Synthèse et perspectives		259
9.	Bilan et comparaison de l'efficacité des deux rechargements	259
10.	Recommandations de gestions	280
Conclusion générale		295
Bibliographie		299
Liste des figures et tableaux		321
Annexes		337

Introduction générale

Les questions de la défense et de l'adaptation face aux aléas côtiers sont très anciennes le long de la côte basse méridionale de la mer du Nord, avec des mentions d'adaptions des peuples aux cycles des marées dès le I^{er} siècle par la construction de buttes artificielles de terre, appelés *terpen* (van Veen, 1962). Puis les premières constructions de digues au Moyen-Âge marquent le début d'une lutte contre les assauts de la mer qui est toujours d'actualité (Charlier & De Meyer, 1995; TeBrake, 2002; Charlier *et al.*, 2005). En effet, ces côtes basses régulièrement inondées par la mer ont été au fil des siècles progressivement asséchées afin de gagner de nouveaux territoires. De nos jours, seuls des cordons dunaires et des digues séparent la mer du Nord de ces territoires poldérisés et fortement urbanisés situés sous le niveau des plus hautes mers. Le littoral méridional de la mer du Nord est de ce fait particulièrement vulnérable aux aléas côtiers que sont le recul du trait de côte et la submersion marine. Au cours du XX^e et au début du XXI^e siècle, des événements tempétueux particulièrement marquants comme la tempête de 1953 appelée « *the Great Surge* » ou encore plus récemment la tempête Xaver de décembre 2013 sont les témoins de la vulnérabilité du littoral dans les années passées et à l'heure actuelle (Lamb & Frydendahl, 1991; McRobie *et al.*, 2005; Spencer *et al.*, 2015). Les conséquences du changement climatique laissent donc présager un accroissement majeur de la vulnérabilité de ces côtes basses sableuses face aux aléas côtiers (Nicholls *et al.*, 2011; IPCC, 2013). En effet, l'élévation du niveau marin qui va accompagner les changements climatiques risque d'augmenter la fréquence des niveaux d'eau extrêmes et donc des risques de submersion (Haigh *et al.*, 2011), mais également la fréquence des phénomènes d'érosion le long des côtes (Yin, 2005). Dans ce contexte, la nécessité d'accroître les protections du littoral et de développer des stratégies d'adaptation vont devenir des enjeux de plus en plus importants.

Pour cela, plusieurs moyens de protections ou d'adaptions peuvent être mis en œuvre en prenant en considération différents paramètres comme la configuration et la situation géographique des sites à protéger ou bien leurs enjeux, qu'ils soient humains, économiques, liés à la préservation du patrimoine ou de la biodiversité. Une gestion active basée sur la lutte contre les aléas représente l'une des solutions envisageables, correspondant aux techniques dites dures ou lourdes comme celles utilisées historiquement (Kamphuis, 2010). Ces techniques lourdes englobant les digues, perrés, brise-lames, épis, peuvent induire des effets négatifs sur les plages adjacentes car ils présentent l'inconvénient de fixer une portion du littoral (Sánchez-Badorrey *et al.*, 2008; Guimarães *et al.*, 2016). A l'opposé de cette technique de protection qui entrave l'évolution de la dynamique naturelle du littoral, certaines stratégies d'adaptation visent plutôt à composer avec la nature en des approches écosystémiques de la protection des côtes (Temmerman *et al.*, 2013). L'utilisation de méthodes dites douces ou souples, ont pris de l'ampleur depuis le milieu du XX^e siècle. Cette approche s'inscrit dans une volonté de travailler avec la nature et d'essayer de maintenir ou recréer un équilibre sédimentaire. A l'échelle européenne, de grands projets tels EuroSION (Salman *et al.*, 2004) encouragent d'ailleurs dans la mesure du possible les Etats à privilégier ces méthodes qui intègre la dynamique naturelle du littoral et le maintien de la mobilité du trait de côte. Ces méthodes se déclinent sous tout un panel de procédés comme le système de drainage de plage, la gestion souple des dunes, le by-passing mais également les rechargements sédimentaires. Cette dernière technique, d'abord très utilisée outre-Atlantique (Finkl, 1996; Finkl & Walker, 2005; Campbell & Benedet, 2006)

s'est beaucoup développée en Europe dans la deuxième moitié du XX^{ième} siècle (Hamm *et al.*, 2002; Hanson *et al.*, 2002). Les objectifs de cette technique peuvent être variés et toucher à différents domaines comme l'amélioration de l'attractivité touristique d'une plage par exemple, mais c'est principalement dans le cadre de la protection du littoral que cette méthode est mise en œuvre. L'objectif d'un rechargement sédimentaire étant de ne pas entraver la dynamique naturelle d'un secteur, une érosion plus ou moins importante du stock de sable rechargé accompagne son évolution morphologique (Dean, 2002). La question qui se pose alors est la durée pendant laquelle l'opération va rester la plus efficace possible. Certains rechargements sédimentaires peuvent effectivement avoir une durée de vie très limitée (Leonard *et al.*, 1990a; Seymour *et al.*, 2005).

Le Grand Port Maritime de Dunkerque (GPMD) localisé dans le nord de la France sur la côte méridionale de la mer du Nord applique depuis quelques années une approche de valorisation des sables de dragage par rechargements sédimentaires. En effet dans ce complexe portuaire qui s'étend sur 17 km de côte, l'entretien des infrastructures portuaires par dragage est essentiel afin de maintenir des tirants d'eau à une certaine profondeur et ainsi garantir l'accueil et la navigation des navires. Dans ces stocks de sédiments dragués une part de sable sain est libérée et la question de leur valorisation se pose alors. A cette ressource disponible liée aux activités de dragage se combine un besoin de protection du littoral le long de la façade portuaire ou dans les secteurs adjacents se caractérisant par un déficit sédimentaire, d'où la création d'une filière de valorisation par rechargements sédimentaires. C'est pourquoi des opérations de rechargements sédimentaires ont été mises en œuvre le long de secteurs en érosion de la façade portuaire. On retrouve des formes similaires de réutilisation des sables de dragage dans d'autres pays comme aux Etats-Unis (Campbell & Benedet, 2006), au Japon (Shibutani *et al.*, 2013) ou encore au Portugal (Silveira *et al.*, 2013) pour ne citer que ces quelques exemples. Chaque année des stocks importants de sédiments sont libérés dans le cadre de l'entretien des infrastructures portuaires du port de Dunkerque, mais ces volumes de sables risquent de s'accroître dans un futur proche compte tenu des travaux d'agrandissement d'une partie du port avec le projet CAP2020, correspondant au creusement d'un nouveau bassin afin d'accroître les capacités d'accueil du GPMD (GPMD, 2017).

Problématique et contexte scientifique

Depuis la mise en œuvre de rechargements sédimentaires massifs sur la façade portuaire de Dunkerque depuis les années 2010, la nécessité de la compréhension de leur évolution dans un environnement totalement artificialisé s'est manifestée. Ces travaux de recherche appliquée s'inscrivent donc dans la volonté du GPMD de comprendre les modifications morphologiques qui caractérisent ces rechargements sédimentaires au cours des premières années qui suivent leur mise en œuvre. Bien que le sable provienne des infrastructures portuaires, ces opérations sont coûteuses en raison de toutes les études préalables qui les encadrent, ou encore des équipements qu'il faut mobiliser ou louer pour procéder aux travaux (dragage, conduites de refoulement etc). De plus la réinjection d'un stock sableux dans une cellule littorale nécessite un suivi morphosédimentaire afin d'évaluer son impact sur les secteurs adjacents.

Dans le but d'approfondir les connaissances concernant les transferts sédimentaires post-rechargement dans un environnement macrotidal artificialisé, **l'objectif de la thèse est d'analyser l'évolution de différents types de rechargements sédimentaires issus de sable de dragage à**

des fins de protections d'ouvrages portuaires. Plusieurs questions seront alors abordées comme celles de la quantification des pertes de sable issue de la zone rechargée, l'identification des secteurs les plus soumis à l'érosion et ceux en accrétion ou encore des éventuels remaniements du stock sableux rechargé.

L'originalité de l'étude repose sur **la comparaison de deux types de rechargements massifs** séparés de seulement 17 km. Le premier a été réalisé de janvier 2012 à mars 2013 sur la partie subtidale, mais également intertidale, de l'avant-port Ouest de Dunkerque afin de protéger la digue du Ruytingen (Cartier, 2014). En plus de protéger le port Ouest, cet ouvrage protège depuis 2016 un terminal méthanier qui a été implanté à proximité. Pour le second rechargement, une plateforme supratidale a été créée face à la digue des Alliés. Cette opération s'inscrit d'ailleurs dans le cadre d'un Plan de Submersion Rapide compte tenu de l'intérêt stratégique de la digue des Alliés pour protéger les populations de plusieurs quartiers de Dunkerque des submersions marines (Cartier *et al.*, 2014). Les résultats qui découleront de ces travaux permettront donc éventuellement de mettre en évidence l'opération la plus adaptée aux conditions météo-marines locales.

La question des impacts des rechargements sur les secteurs adjacents sera également abordée grâce à l'analyse de l'évolution des deux rechargements sédimentaires. Celui à l'avant-port Ouest est localisé en amont d'une zone caractérisée par une biodiversité à préserver (sternes naines, salicornes) et en amont de la façade portuaire, tandis que le second rechargement est localisé en amont d'une station balnéaire.

L'intérêt de cette étude repose également sur les propositions de gestions qui vont en découler afin, dans un premier temps, d'entretenir les rechargements sédimentaires déjà existants ainsi que de livrer des indications pour les futurs rechargements sur la façade portuaire selon les spécificités d'évolutions des deux opérations de réensablement.

Organisation du manuscrit

Afin de répondre à ces problématiques, l'étude va s'articuler en deux parties constituées de huit chapitres :

La **Partie I** constitue un état des connaissances relatives aux rechargements sédimentaires que ce soit concernant les caractéristiques, spécificités et objectifs de cette méthode douce et aborde la question des rechargements sédimentaires dans le monde, en Europe puis en France.

Le **Chapitre I** concerne l'état des connaissances sur cette méthode douce en examinant les différents types de rechargements sédimentaires mis en œuvre dans la zone côtière. La question de la performance d'une opération en lien avec les conditions d'efficacité sera également abordée.

Le **Chapitre II** s'attache à faire un état des lieux des rechargements sédimentaires dans le monde et particulièrement en Europe afin de mettre en évidence où cette technique est la plus utilisée en évoquant les spécificités par pays.

Le **Chapitre III** est consacré à la présentation d'un inventaire des rechargements sédimentaires en France.

La **Partie II** est consacrée à l'analyse des rechargements sédimentaires réalisés sur la façade portuaire de Dunkerque et synthétisera les résultats des mesures effectuées sur le terrain afin d'aboutir à des conclusions spécifiques à l'environnement portuaire de Dunkerque.

Le **Chapitre IV** présentera les deux sites de suivis (avant les opérations de rechargements sédimentaires) en les replaçant dans leur contexte local - une façade portuaire et très urbanisée - mais également dans un contexte régional plus large avec les spécificités météorologiques, hydrodynamiques et sédimentologiques qui y sont associées.

Le **Chapitre V** synthétisera l'ensemble des données disponibles pour mener à bien cette étude et détaillera les méthodes d'acquisition et les techniques de traitements et d'analyses.

Le **Chapitre VI** s'attachera à analyser l'évolution morphologique et sédimentologique du rechargement de plage face à la digue des Alliés à Malo-les-Bains.

Le **Chapitre VII** aura les mêmes objectifs pour le rechargement intertidal et subtidal face à la digue du Ruytingen à l'avant-port Ouest.

Enfin dans le **Chapitre VIII**, une synthèse des résultats obtenus sera menée afin d'avoir une vision globale de l'évolution de deux rechargements sédimentaires et une comparaison de leur évolution sera effectuée. Ces conclusions permettront de préconiser des mesures de gestions adaptées.

Partie I. Les rechargements sédimentaires

Chapitre I. Etat des connaissances sur les rechargements sédimentaires

Cette première partie est une synthèse des connaissances sur les rechargements sédimentaires. Dans le premier chapitre nous reviendrons sur la définition de cette technique et nous aborderons les conditions d'efficacité préconisées pour la mise en œuvre d'un rechargement sédimentaire tout en abordant les questions de la performance d'une opération ou encore de l'impact sur les écosystèmes. Dans un deuxième chapitre nous présenterons une synthèse sur l'utilisation des rechargements sédimentaires dans le monde, puis dans le troisième chapitre nous ferons un état des lieux de cette technique en France.

1. Les rechargements sédimentaires : définition et objectifs

La terminologie concernant les rechargements sédimentaires est parfois floue et de nombreux objectifs peuvent également être associés à cette pratique. Nous envisagerons donc dans cette partie de définir précisément cette technique et d'en préciser les différentes finalités.

1.1. Terminologie et définition

Beaucoup de termes dans la littérature scientifique internationale sont utilisés pour désigner cette technique, comme *beach* (ou *shoreface* s'il s'agit de l'avant-côte) *nourishment*, *fill*, *replenishment*, *recharge*, *reconstruction* ou encore *feeding*. En français, beaucoup de termes existent également pour désigner cette méthode comme (ré)engraissement, réensablement s'il s'agit bien de sable rechargé ou encore alimentation ou reconstitution de plage, le plus courant étant le terme rechargement. A noter que pour désigner de manière générale cette méthode, il conviendra d'utiliser l'expression *rechargement sédimentaire* plutôt que celle de rechargement de plage, pourtant souvent utilisée et qui fait référence à une alimentation de l'estran, alors que le rechargement peut également concerner l'avant-côte.

Il existe beaucoup de définitions dans les nombreuses publications consacrées à cette méthode. Dans l'*Encyclopedia of Coastal Science*, le rechargement sédimentaire est défini comme « l'apport artificiel (mécanique) de sable le long d'une portion de côte en érosion, où se trouvait uniquement une plage restreinte auparavant, voire aucune plage » (Finkl & Walker, 2005).

Dans l'ouvrage de (2014) le rechargement est défini comme « un apport de sable ou galets, issus de sources terrestres, côtières ou marines, de manière mécanique ou hydraulique pour former une plage plus grande et plus large que celle érodée, l'objectif étant de restaurer et maintenir une plage qui protégera la côte de l'érosion des tempêtes et de prévenir l'inondation de l'arrière-pays tout en augmentant la zone récréative et l'habitat naturel. »

Ne figurant pas toujours clairement dans les définitions, trois éléments indispensables doivent néanmoins être pris en compte afin de considérer une opération de rechargement en tant que telle à savoir la notion (1) d'apport artificiel, (2) de l'origine exogène du sédiment ainsi que la notion (3) d'augmentation du bilan sédimentaire. Ces éléments permettent en effet de caractériser la méthode en plus de la distinguer d'autres procédés. Il existe en effet une confusion entre le rechargement

sédimentaire et d'autres techniques impliquant également des mouvements artificiels sédimentaires comme le remodelage d'estran et le *by-passing* notamment. C'est pourquoi une définition claire doit être établie afin d'éviter toute confusion.

Dans sa thèse traitant des rechargements sédimentaires en France, Pupier-Dauchez (2002) consacre une sous-partie à citer et comparer différentes définitions du rechargement en fonction de plusieurs domaines (géographie, services techniques de l'Etat, ingénierie). Elle définit finalement le rechargement sédimentaire comme étant un « *apport de sédiments provenant d'un autre secteur par différents moyens techniques et qui se solde par une augmentation du stock sédimentaire du versant littoral* ». Les trois éléments cités précédemment sont bel et bien présents dans cette dernière définition. La notion d'apport extérieur doit correspondre à un prélèvement de sédiment dans une cellule littorale différente de celle du secteur à recharger. La question de la définition de la cellule hydro-sédimentaire se pose alors. Elle peut être définie comme « *un compartiment du littoral qui peut être décrit et analysé de manière autonome sur le plan des transports sédimentaires* » (Ministère de l'écologie & du développement durable et de l'énergie, 2016). Ces systèmes peuvent être délimités par des frontières fixes comme les aménagements portuaires (jetée, avant-port etc.), les caps rocheux, ou des frontières plus floues comme la limite d'action des houles ou encore les dunes (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, 2010).

Cette notion d'apport de sédiment en provenance d'une zone extérieure est primordiale étant donné la confusion qui est parfois faite entre le rechargement sédimentaire et le procédé de remodelage d'estran, appelé également reprofilage, remaniement ou encore transfert de proximité. Or, le remaniement correspond à une redistribution du sable déjà présent sur la plage qu'il convient simplement de mieux répartir pour différentes raisons qui peuvent aller de la protection d'ouvrage en hiver en remontant du sable en haut de profil, du remodelage de plage après une tempête ou de la réduction de la pente de l'estran lors de la période touristique. Après un remaniement, le bilan sédimentaire reste le même, aucun surplus de sable n'est mis en évidence contrairement au rechargement sédimentaire. Pupier-Dauchez (2002) précise de plus que d'un point de vue juridique les deux opérations ne sont pas soumises à la même réglementation. Le remodelage est considéré comme travaux d'entretien de la plage. La confusion entre les deux pratiques est d'autant plus compliquée que certains scientifiques choisissent de ne pas les différencier (Miossec, 1993).

Outre la confusion entre rechargement sédimentaire et remodelage, en France, le système de *by-passing* est parfois assimilé au rechargement sédimentaire bien que ces deux méthodes peuvent être différenciées. L'objectif de la technique du *by-passing* est de rétablir un transit littoral entravé voire supprimé par la présence d'obstacles naturels (caps, débouché de cours d'eau) ou le plus souvent anthropiques de type portuaire (avant-port, jetées etc.). La présence d'un tel blocage du transport sédimentaire entraîne un engraissement en amont de l'obstacle et un important déficit sédimentaire en aval. Pour rétablir ce transit, le transfert de sédiment peut être effectué par des moyens hydrauliques ou mécaniques. Le concept de cette méthode est donc de rétablir un transit sédimentaire naturel à l'origine, puis interrompu. En France, cette technique est parfois considérée comme méthode opératoire pour la réalisation d'un rechargement sédimentaire (Pupier-Dauchez, 2002). Néanmoins si on se réfère encore une fois au guide de la gestion nationale du trait de côte (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, 2010), rechargement sédimentaire et *by-passing* sont considérés comme deux techniques différentes. Dans d'autres pays comme les Etats-Unis, le *by-passing* est considéré comme un mode de rechargement au même titre que le *rainbowing* qui consiste à décharger le sédiment par projection en l'air à l'aide d'une drague par exemple (Dean, 2002 ; Bird et Lewis, 2014).

Dans ce mémoire, **le rechargement sédimentaire est donc défini comme un apport artificiel de sédiment exogène afin d'augmenter le volume sédimentaire d'une portion du littoral.**

1.2. Des objectifs variés mais complémentaires

Le rechargement sédimentaire est utilisé dans beaucoup de régions du monde étant donné les nombreux avantages et bénéfices qu'il est possible d'en tirer. Les objectifs de cette pratique peuvent être nombreux et se cumuler en fonction des enjeux du site en question (Hamm *et al.*, 2002; Finkl & Walker, 2005; Bird & Lewis, 2014). A noter que certains pays ont des objectifs bien précis en fonction des spécificités et caractéristiques de leur littoral.

La protection côtière représente l'objectif le plus courant des rechargements sédimentaires dans le monde. Cela peut se traduire de plusieurs manières comme l'augmentation du stock sédimentaire et/ou l'avancée du trait de côte afin de stabiliser la plage et créer une zone tampon servant à amortir l'énergie des vagues. L'objectif est donc de donner (ou redonner) à la plage un volume de sable suffisant afin de lui restituer ses caractéristiques et fonctions originelles de zone d'atténuation et de dissipation de l'énergie de la houle. Cet apport de sable peut avoir comme finalité d'assurer un niveau de sécurité optimale et éviter les submersions marines et inondations des zones basses rétro-littorales, ce qui est le cas des polders comme en Flandre maritime par exemple (Charlier *et al.*, 2005), ou encore la création d'une zone tampon et d'un stock de sable «sacrifiable» (Coburn, 2012) afin d'amortir l'impact des tempêtes et ouragans et ainsi limiter le recul du rivage comme c'est le cas dans certains états des Etats-Unis (Benedet *et al.*, 2005). Cette fonction de rempart anti-tempêtes est fréquemment utilisée. Le rechargement sédimentaire peut également venir protéger des ouvrages de protection côtière. Un apport localisé sur la plage peut également alimenter les dunes grâce aux envols éoliens (Arens *et al.*, 2013) et ainsi renforcer le système naturel de protection côtière dans son ensemble. Toujours en lien avec la protection côtière, les rechargements sédimentaires présentent aussi l'avantage d'être viables face au changement climatique et notamment l'élévation du niveau de la mer (Dean & Houston, 2016). Un dimensionnement approprié peut en effet permettre de s'adapter face à cette élévation.

Les rechargements sédimentaires peuvent également être mis en œuvre à des fins touristiques. Ce procédé peut en effet venir augmenter la largeur de la plage sèche afin d'accroître l'espace balnéaire et récréatif. Cet objectif est prépondérant dans certains pays dont l'économie est tournée vers le tourisme comme en Espagne (Hanson *et al.*, 2002) où l'espace balnéaire représente un enjeu primordial lors des périodes estivales.

Les rechargements sédimentaires peuvent présenter de nombreux points positifs quant aux problématiques environnementales. En plus d'accompagner les processus naturels, cette méthode est considérée comme ayant assez peu d'impacts sur les écosystèmes à moyen terme (Miller *et al.*, 2002) et elle a de plus une bonne intégration paysagère. Cette méthode dynamique peut alimenter en sable les plages en aval du secteur rechargé, du fait de la redistribution du sable par la dérive littorale (Lin *et al.*, 1996). La préservation ou la restauration d'écosystèmes côtiers peut également représenter l'un des objectifs d'une telle opération (Temmerman *et al.*, 2013).

Le rechargement sédimentaire est également une méthode qui peut s'intégrer dans la filière de valorisation des sables de dragage. L'entretien des chenaux de navigation d'accès aux ports peut fournir des sédiments utilisables pour les rechargements des plages ou avant-plages situées à proximité.

1.3. Catégories de rechargements

L'expression « rechargement de plage » couramment utilisé en France pour n'importe quelle opération ne représente pourtant au sens strict qu'un seul type de rechargement. L'utilisation abusive de l'expression rechargement de plage pour n'importe quel type d'opération entraîne des confusions dans la distinction des différentes localisations possibles. Les rechargements sédimentaires peuvent en effet être catégorisés en fonction de leur positionnement le long du versant littoral, c'est-à-dire en haut de plage uniquement, sur toute la zone intertidale ou encore sur l'avant-plage. L'emplacement de ces apports sableux dépend principalement de l'objectif du rechargement, mais peut aussi dépendre des contraintes du site. A noter que ces catégories peuvent varier en nombre et en nom en fonction des auteurs et des études.

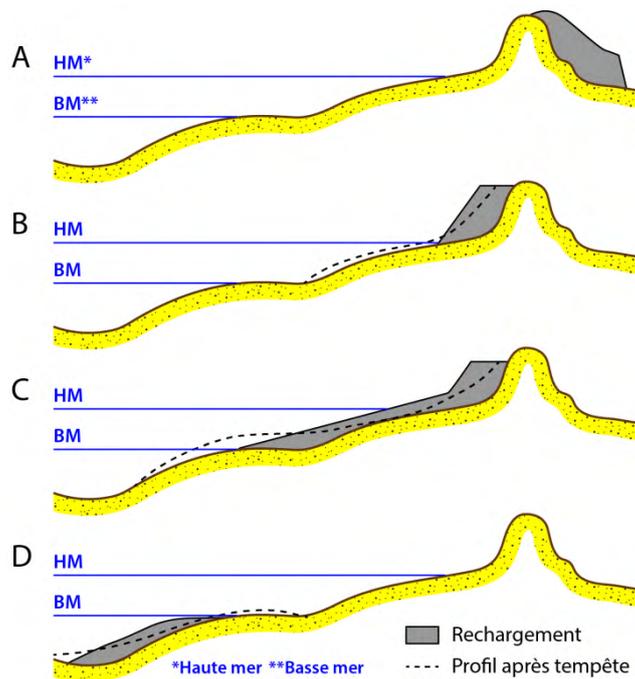


Figure I.1. Classification des rechargements selon leur position sur le profil de plage (d'après Van Rijn, 2010)

Un apport de sable peut être réalisé sur les cordons dunaires, afin de les restaurer ou de renforcer leur versant interne ou externe (Figure I.1. A-B). Les dunes étant un rempart naturel contre les submersions marines, leur stabilité est un enjeu majeur. La restauration de dunes s'accompagne souvent de mesures d'accompagnement comme la végétalisation, afin de stabiliser le nouvel apport de sable et réduire la déflation éolienne, ou encore par l'installation de ganivelles ou fascines. Cette opération de restauration de dunes est parfois considérée comme une méthode douce à part entière (MEDDTL, 2010).

Le rechargement de plage au sens strict (Figure I.1 C) peut s'étendre du haut de plage jusqu'à la limite des basses mers. Certaines classifications font référence également au rechargement de profils de plage, c'est-à-dire du haut de plage jusqu'à la partie immergée (Campbell & Benedet, 2006). C'est ce type de rechargement qui permet la création d'une zone tampon, l'avancée immédiate du trait de côte, ainsi que l'augmentation de l'espace récréatif (Finkl, 1996). Autre avantage du rechargement de plage, il est ainsi possible de protéger un ouvrage de défense type digue ou jetée par la création d'une zone tampon, qui met hors d'atteinte des vagues l'ouvrage en question lors de

hauts niveaux d'eau. Ce type de rechargement a la réputation d'être coûteux étant donné les travaux à mettre en œuvre pour amener le sable en haut de plage et remodeler un profil de plage (Van Rijn, 2010). Les conditions de marées pour le refoulement du sable en haut de plage peuvent représenter une contrainte supplémentaire. A noter qu'en fonction de l'ampleur des travaux, l'accès de la plage aux usagers peut être restreint voire interdit par mesure de sécurité. Les rechargements de plage sont souvent critiqués du fait de leur durée de vie restreinte comparé aux rechargements d'avant-plage (van der Spek & Elias, 2013).

Enfin, l'apport de sable peut également être effectué dans la partie subtidale du profil de plage (Figure I.1 D). Le rechargement d'avant-plage, ou rechargement subtidal, concerne la zone située sous le niveau de basse-mer et peut s'étendre jusqu'à la profondeur de fermeture. Au-delà de cette profondeur, le sédiment ne sera plus remis en mouvement et sera définitivement perdu. Placés dans les petits-fonds, les sédiments rechargés seront redistribués progressivement par les agents hydrodynamiques (Figure I.3) et pourront migrer vers le haut du profil et venir ainsi alimenter la plage.

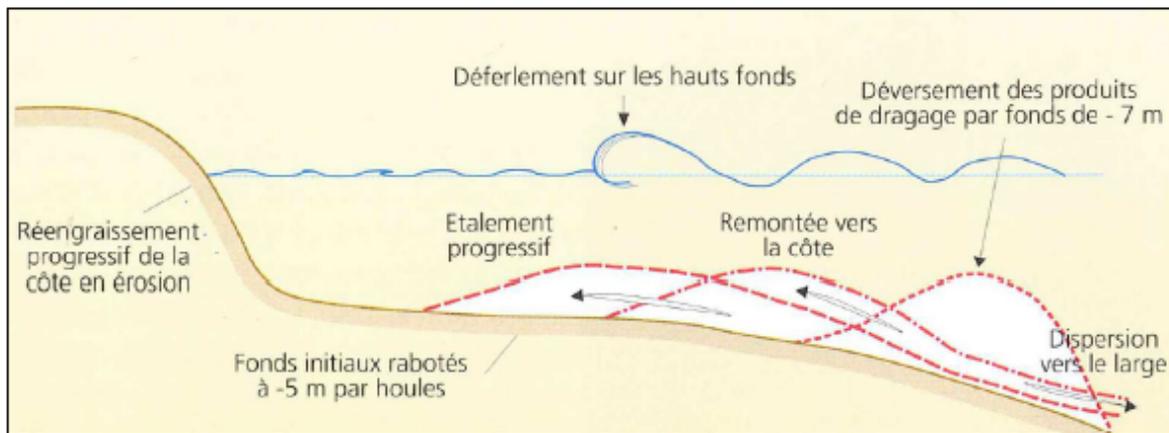


Figure I.2 Redistribution des sédiments par les agents hydrodynamiques après un rechargement subtidal (d'après Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, 1998)

La création d'une barre subtidale peut également être l'une des raisons du choix de cette méthode. En effet par la création de barre subtidale, cet apport de sable peut venir freiner l'énergie de la houle (Grunnet & Ruessink, 2005). Ce type de rechargement a l'avantage d'être moins coûteux que les rechargements de plage (Certain, 2005; van der Spek & Elias, 2013). La mise en œuvre d'un rechargement subtidal sous-entend donc une anticipation du problème d'érosion afin de laisser le temps nécessaire à l'apport sédimentaire d'être redistribué ou de dissiper l'énergie de la houle.

Dans les années 90, des expérimentations de rechargements sédimentaires d'avant-plage ont été menés dans trois pays bordant la Mer du Nord (l'Allemagne, les Pays-Bas et le Danemark) afin d'évaluer la performance et la faisabilité de ce type de rechargement. Ce projet dénommé Nourtec (*Innovative Nourishment TEchniques evaluation*) faisait partie du programme européen MAST-II (Niemeyer *et al.*, 1995). Des tests de rechargements d'avant-plage et des tests combinant rechargement de plage et d'avant-plage ont été effectués sur trois sites à savoir l'île de Terschelling aux Pays-Bas (Mulder *et al.*, 1994), l'île de Nordene en Allemagne (Bakker *et al.*, 1995) et à Torsminde Tange au Danemark (Lastrup *et al.*, 1996) afin de les comparer à la méthode de rechargement de plage conventionnelle.

Le choix de la localisation du rechargement est donc dicté en partie par les objectifs des opérations. Les avantages et inconvénients de ces deux méthodes sont synthétisés dans le Tableau I.1.

	Rechargement de plage	Rechargement d'avant-plage
Avantages		
Extension immédiate de la plage	x	
Arrêt ou ralentissement du recul du trait de côte	x	x
Création de barres longitudinales réduisant donc l'attaque de vagues		x
Atténuation des effets d'interruption du transport littoral	x	x
Rapprochement du profil d'équilibre de la plage	x	x
Caractère le plus naturel possible de la solution et maintien de la résilience naturelle côtière	x	x
Relativement économique à long terme	x	x
Diminution du risque de submersion par la création d'une zone tampon	x	
Réduction de l'attaque des vagues	x	x
Relativement économique		x
Ralentissement de l'érosion du trait de côte par la création d'une zone tampon dans les petits fonds		x
Inconvénients		
Persistance de l'érosion, le trait de côte reste mobile	x	x
Possibilité de destruction du rechargement de plage par transport des sédiments vers le large en cas d'événement de tempête	x	
Dispersion possible des sables rechargés sur l'avant-plage en cas d'événement de tempête		x
Extractions nécessaires de quantités importantes de sable au large	x	x
Impacts sur la flore et la faune	x	x

Tableau I.1 Avantages/Inconvénients des rechargements de plage et d'avant (MEDDTL, 2010)

De récentes études néerlandaises ont adapté leur classification du fait de nouvelles expérimentations. de Schipper (2014) fait référence à un autre type de rechargement : le méga-rechargement (ou *mega-nourishment*) (Figure I.3 C). Cette nouvelle catégorie, basée sur un critère de taille ne propose néanmoins pas de plancher volumétrique à atteindre. Le premier représentant des *mega-nourishment* est le *Sand Motor*, ou *Zand Motor*, avec ses 21,5 Mm³ (voir p.34).

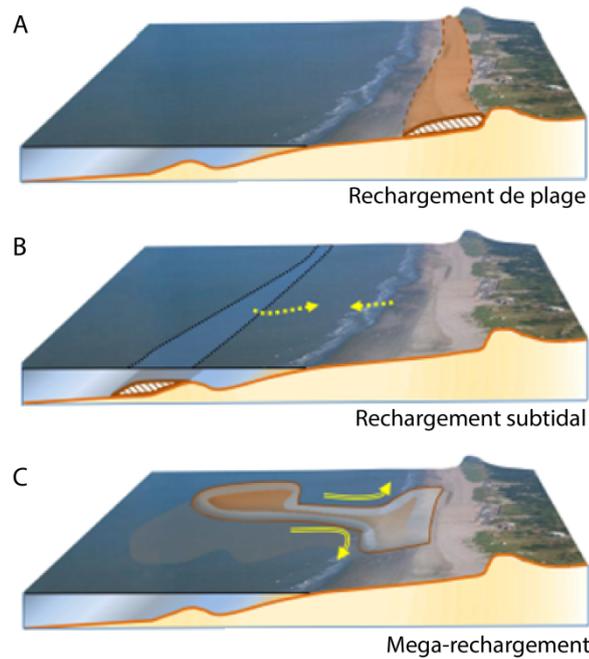


Figure I.3 Classification des rechargements (d'après de Schipper, 2014)

2. Conditions d'efficacité

Les abondantes recherches et retours d'expériences ont permis de dresser au fil des décennies des critères à prendre en compte afin d'assurer la bonne mise en œuvre et la performance des rechargements sédimentaires. Cette technique n'est pas une solution miracle et ne peut pas être réalisée sur n'importe quel site et avec n'importe quelle méthode. Afin d'assurer l'efficacité et le succès du dispositif, il est nécessaire de rassembler plusieurs conditions. Ces conditions s'inscrivent aussi dans une volonté d'optimisation des volumes à mettre en œuvre afin de limiter les dépenses inutiles tout en assurant un niveau de sécurité optimale. Les paramètres à prendre en compte pour le bon dimensionnement d'un projet varient en fonction des scientifiques, pays, théories, méthodes de calcul. Les conditions d'efficacité les plus communes seront présentées ici.

2.1. Bonne connaissance du milieu

Avant l'implantation d'un rechargement sédimentaire, ainsi qu'avant toute autre action sur le littoral de manière générale, une bonne connaissance du milieu s'impose afin de déterminer les caractéristiques du site et les possibilités et conditions de mise en œuvre. Ce diagnostic pour comprendre les processus hydrodynamiques du site passe par le recueil et l'analyse de tout un panel de paramètres afin de dresser l'historique du site et son fonctionnement actuel.

La compréhension du fonctionnement du site au sein de la cellule hydro-sédimentaire est un élément à diagnostiquer afin de mettre en évidence les éventuelles perturbations du fonctionnement morpho-sédimentaires du ou des secteurs en érosion. La configuration du site, en zone d'abri ou dans un secteur fortement exposé à la houle, est un paramètre important dans la conception du projet. Les volumes à mettre en œuvre ne seront alors pas les mêmes.

L'historique des aménagements réalisés, que ce soit des protections côtières ou des infrastructures portuaires par exemple, est nécessaire pour retracer l'évolution du site. Leurs éventuels impacts peuvent venir expliquer les problèmes du site.

Le rythme d'érosion du secteur ainsi que les conditions hydrodynamiques sont également des paramètres importants à prendre en compte et pourront par exemple être déterminés grâce à des études hydrodynamiques préliminaires. L'analyse des courants, du régime de houle et des niveaux d'eau apportera des informations sur le niveau d'énergie auquel est soumis le site. Ces éléments pourront dans un premier temps déterminer si un rechargement sédimentaire est une solution envisageable ou non adaptée au site et au régime de houles et courants. Si la mise en œuvre d'un rechargement est faisable, ces paramètres sont nécessaires pour le dimensionnement du projet, car il est essentiel de déterminer le volume adéquat à recharger sous peine de mettre en œuvre un volume insuffisant pouvant être dispersé rapidement par les agents hydrodynamiques.

Une bonne connaissance de la topographie du site est un élément primordial à prendre en compte. La forme et l'altitude de la plage permettront de déterminer les volumes de sable à apporter. Pour cela, un suivi topographique complet avant la réalisation des opérations de rechargements est nécessaire, avec dans l'idéal un suivi de la bathymétrie du secteur afin d'avoir une connaissance précise de la morphologie des petits-fonds et de suivre l'impact du rechargement dans la zone subtidale.

De manière générale, le *Coastal Engineering Manual* (U.S. Army Corps of Engineers, 2002) fait référence à 7 éléments à prendre en compte :

- La localisation du site au sein de la cellule littorale
- L'analyse des mouvements sédimentaires
- La topographie de la plage
- La caractérisation des sédiments présents
- Les conditions hydrodynamiques du site
- La présence d'infrastructure ou d'aménagements côtiers
- Les activités antérieures d'ingénieries

Cette liste de paramètres à prendre en compte permet donc de comprendre le fonctionnement du site et ainsi de choisir le type de rechargement optimal ainsi que la technique de mise en œuvre la plus adaptée.

2.2. Compatibilité granulométrique

L'un des éléments fondamentaux à prendre en compte lors de la conception d'un projet de rechargement sédimentaire est la comptabilité entre le sédiment de la zone d'emprunt et celui du site d'accueil. Par compatibilité, on entend souvent compatibilité granulométrique mais il est nécessaire de préciser que d'autres paramètres sont théoriquement également à prendre en compte afin de minimiser les impacts sur les organismes, comme la composition du sédiment ou sa couleur.

Le sédiment d'emprunt est considéré comme compatible si sa granulométrie est similaire à celui du sable de la plage d'accueil (Dean, 2002). Le sédiment apporté ne doit pas venir perturber l'équilibre et la dynamique du site en question afin d'assurer au mieux la stabilité et la longévité du rechargement. De manière générale, un sable plus fin que celui d'origine placé sur la plage en érosion contribuera à l'instabilité de la plage et sera emporté hors de la zone de rechargement car non adapté à l'énergie des agents hydrodynamiques. En revanche, avec un sédiment beaucoup trop grossier, la pente de plage sera beaucoup plus raide qu'à l'origine (Krumbein, 1957). Un grain de taille similaire voire légèrement plus grossier pour assurer un meilleur maintien du stock de sable rechargé est

donc préconisé (Dean, 2002). Des échantillons de sédiments doivent être prélevés des potentielles sources d'emprunt afin de déterminer leurs caractéristiques granulométriques. Les sources de sédiments peuvent être variables, terrestre (carrière), aquatique (rivières) ou maritime (sédiments de dragage, avant-plage, bancs subtidaux....).

Différentes techniques et méthodes ont été développées pour déterminer la taille du sable et le volume nécessaire pour stabiliser la plage à partir de la granulométrie du site d'accueil et du sable d'emprunt. Un paramètre est à la base des calculs pour déterminer le volume nécessaire à apporter, à savoir le *overfill factor* (ou *fill factor* dans certaines études). L'*overfill factor* est traduit par « coefficient d'excédent » dans la thèse de Pupier-Dauchez (2002). Il peut être défini comme le volume de sable d'emprunt nécessaire pour produire une unité stable de sable si on lui attribue les mêmes caractéristiques granulométriques que le sable du site d'accueil. Cela signifie que le volume de sable d'emprunt subira un remaniement et un tri dû aux agents hydrodynamiques et se rapprochera peu à peu de la granulométrie du sable de la plage d'accueil. Ce paramètre permet donc de déterminer le surplus de sable qui devra être prélevé du site d'emprunt et d'estimer la proportion de sable qui sera maintenu en place après les pertes qui suivent la mise en œuvre d'un rechargement.

Les travaux et méthodes de calculs se sont multipliés afin d'obtenir le meilleur coefficient d'excédent. Ces analyses sont basées sur différentes comparaisons granulométriques entre le sédiment de la plage et le sédiment prélevé des potentielles sources d'emprunt. Trois méthodes sont couramment utilisées, celles de Krumbein et James (1965), celle de Dean (1974) et enfin celle de James (1975). Dans cette dernière méthode, on considère qu'il se produit un vannage éolien avec un départ des particules fines jusqu'à ce que la distribution granulométrique du sédiment apporté soit la même que celui du sédiment du site d'accueil. C'est cette méthode qui est reprise dans l'édition de 1984 du *Shore Protection Manual* et désormais dans le *Coastal Engineering Manual* (U.S. Army Corps of Engineers, 2002). La méthode de Krumbein et James donne des coefficients d'excédents élevés et surestime donc les volumes à recharger nécessaires tandis qu'à l'inverse celle de Dean sous-estime les quantités nécessaires à cause d'un coefficient trop faible (Stauble, 2005).

2.3. Forme et pente du profil à recharger

La forme et la pente du profil rechargé, liées à la taille du sédiment qui joue encore une fois un rôle déterminant, est un autre paramètre à prendre en compte dans le dimensionnement d'un rechargement afin d'en assurer son efficacité. La forme et la pente du profil conditionne également le volume de sable nécessaire du rechargement Ce principe développé par Dean (1991) repose sur le concept de profil d'équilibre qui se base sur l'équation de profil d'équilibre de plage développée par Bruun (1954) (Eq. I.1).

$$h(y) = Ay^{2/3} \quad (\text{Eq. I.1})$$

avec h la hauteur d'eau ; y la distance au large par rapport au trait de côte et A le coefficient de forme du profil d'équilibre ou *profile scale parameter* exprimé en $m^{1/3}$. La relation entre le coefficient A et la taille du grain moyen a été mise en évidence par Moore (1982) qui propose une méthode simple pour déterminer ce coefficient (Tableau I.2).

Table III-3-3
Summary of Recommended A Values (Units of A Parameter are m^{1/3})

D(mm)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.1	0.063	0.0672	0.0714	0.0756	0.0798	0.084	0.0872	0.0904	0.0936	0.0968
0.2	0.100	0.103	0.106	0.109	0.112	0.115	0.117	0.119	0.121	0.123
0.3	0.125	0.127	0.129	0.131	0.133	0.135	0.137	0.139	0.141	0.143
0.4	0.145	0.1466	0.1482	0.1498	0.1514	0.153	0.1546	0.1562	0.1578	0.1594
0.5	0.161	0.1622	0.1634	0.1646	0.1658	0.167	0.1682	0.1694	0.1706	0.1718
0.6	0.173	0.1742	0.1754	0.1766	0.1778	0.179	0.1802	0.1814	0.1826	0.1838
0.7	0.185	0.1859	0.1868	0.1877	0.1886	0.1895	0.1904	0.1913	0.1922	0.1931
0.8	0.194	0.1948	0.1956	0.1964	0.1972	0.198	0.1988	0.1996	0.2004	0.2012
0.9	0.202	0.2028	0.2036	0.2044	0.2052	0.206	0.2068	0.2076	0.2084	0.2092
1.0	0.210	0.2108	0.2116	0.2124	0.2132	0.2140	0.2148	0.2156	0.2164	0.2172

Notes:
 (1) The A values above, some to four places, are not intended to suggest that they are known to that accuracy, but rather are presented for consistency and sensitivity tests of the effects of variation in grain size.
 (2) As an example of use of the values in the table, the A value for a median sand size of 0.24 mm is: $A = 0.112 \text{ m}^{1/3}$. To convert A values to feet^{1/3} units, multiply by $(3.28)^{1/3} = 1.49$.

Tableau I.2 Récapitulatif des valeurs du coefficients A pour différents grains moyens (U.S. Army Corps of Engineers, 2002)

Selon Dean (1991), le profil de plage rechargé peut prendre différentes allures par rapport au profil initial à savoir : intersectant, non-intersectant et submergé. En effet, pour un même volume de sable, la forme du profil rechargé ne sera pas la même selon la granulométrie du sédiment d'emprunt. La Figure I.4 montre l'allure d'un profil rechargé pour un même volume de sable apporté, soit 340 m³/m dans cet exemple, mais caractérisé par une granulométrie différente. A_F et A_N font référence aux coefficients de forme du sable rechargé et de la plage initiale respectivement. Un sable d'emprunt plus grossier que celui de la plage d'accueil ($A_F > A_N$) entrainera la création d'un profil rechargé qui viendra intersecter le profil initial et ce avant la profondeur de fermeture. Cela permettra également d'obtenir une grande largeur de plage sèche (Figure I.4-A). Deuxième cas de figure, le profil rechargé peut être non-intersectant par rapport au profil de la plage initiale avant la profondeur de fermeture. Ceci se produit notamment quand le sable d'emprunt possède une granulométrie similaire voire plus fine que celui de la plage d'accueil. Pour un sable de rechargement de granulométrie semblable à celui du site d'accueil, le profil rechargé prendra une forme similaire à celui de la plage après rééquilibrage. Plus la granulométrie du sédiment apporté diminuera ($A_F = A_N$ puis $A_F < A_N$), plus la largeur de la plage va diminuer et engendrer un étalement le long du profil du sédiment apporté (Figure I.4 B & C). Et enfin, un sédiment plus fin ($A_F < A_N$) peut engendrer un profil de plage submergé, c'est-à-dire sans plage sèche après rééquilibrage (Figure I.4 D). Il est donc possible de jouer sur la taille du sédiment si on souhaite une largeur de plage plus ou moins importante ou en fonction de l'allure du profil souhaité.

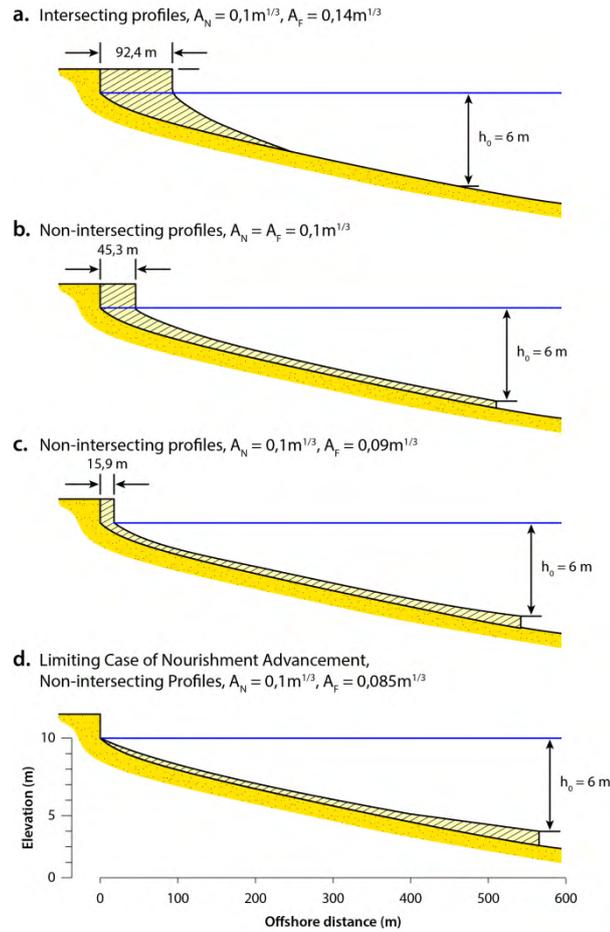


Figure I.4 Exemple d'allure de pente du profil rechargé par rapport au profil initial selon différentes granulométries (d'après Dean, 1991)

2.4. Détermination du volume à mettre en œuvre

La notion de volume est primordiale dans le dimensionnement d'un rechargement d'un point de vue de son efficacité. Une sous-estimation du volume entraînera potentiellement une érosion trop rapide du rechargement. Un surdimensionnement peut entraîner une augmentation inutile des coûts de l'opération. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour le dimensionnement du volume.

Il a été montré dans les sections précédentes que la détermination du volume nécessaire est fonction de la granulométrie du sédiment disponible et de l'allure de pente souhaitée après rééquilibrage. Les équations permettant de calculer le volume théorique par mètre linéaire à mettre en œuvre selon l'allure du profil et la granulométrie sont consultables en Annexe 1. Cette méthode est notamment utilisée aux Etats-Unis (U.S. Army Corps of Engineers, 2002).

Beaucoup de publications font référence à l'importance de mettre en œuvre un volume supplémentaire à celui calculé afin de pallier à l'érosion rapide qui va se produire suite à l'adaptation et réajustement du profil aux conditions hydrodynamiques. Il est effectivement également important de créer une surépaisseur du rechargement par rapport au besoin initial afin d'anticiper les pertes lors des travaux ou celles dues à un rééquilibrage progressif de la pente de plage (U.S. Army Corps of Engineers, 2002). Aux Pays-Bas, ce surplus peut atteindre 20 % du volume initialement calculé, voire 40 % (Verhagen, 1996). L'estimation du surplus peut également être réalisée grâce au retour d'expérience.

D'autres méthodes d'estimation du volume nécessaire peuvent être mentionnées comme celle basée sur le taux d'érosion du site. C'est pourquoi des études préalables sont primordiales afin de déterminer ce taux. Cette méthode est notamment utilisée aux Pays-Bas.

2.5. Exemple de dimensionnement : les Pays-Bas

Les Pays-Bas possèdent une méthode de dimensionnement solide et bien définie qui se décompose selon les 5 étapes suivantes (Verhagen, 1993) :

- Utilisation des mesures de paramètres côtiers (d'au moins 10 ans)
- Calcul des taux d'érosion par m³/an par secteur côtier
- Ajout de 40 % pour compenser les pertes de sable
- Multiplication de la quantité obtenue par la durée de vie souhaitée du projet
- Mise en place de cette quantité de sable sur la plage entre le pied de dune et la ligne des 1 m sous le niveau de basse mer

Cette méthode requiert une base de données de 10 ans minimum afin de déterminer le taux d'érosion du site en m³/an. Le surplus de sable ajouté à hauteur de 40 % du volume précédemment calculé correspond à « l'excès d'érosion » engendré par la réorganisation morphologique de la plage aux conditions hydrodynamiques du milieu. Cette réorganisation entraîne une perte due au transport longitudinal ainsi qu'à la redistribution du sédiment le long du profil transversal de plage. Cette estimation de 40% peut être affinée grâce à de précédents suivis de rechargements qui ont eu lieu sur les secteurs en questions (Verhagen, 1996). La multiplication de ce taux par le nombre d'année souhaité, en général 5 ans, permet d'obtenir le volume à recharger adéquat. Un taux d'érosion mal évalué ou un surplus de sable sous-estimé entraînera une durée de vie du projet plus courte que prévu.

2.6. Suivi de l'évolution du rechargement

Des suivis post-rechargements sont nécessaires afin de rendre compte de l'efficacité ou non de l'opération. Pour cela des suivis topo-bathymétriques et granulométriques sont recommandés au cours des mois et années qui suivent l'implantation du rechargement. Il est également important de comprendre la réponse du rechargement face au régime de houle, les éventuelles modifications des courants ou encore de l'évolution du rythme d'érosion. Les ajustements morphologiques étant intenses les premiers mois, voire les premières années après la mise en œuvre d'un rechargement sédimentaire, il est crucial d'avoir un suivi intensif juste après l'implémentation du rechargement.

La connaissance de tous ces phénomènes va permettre de dresser un bilan de l'évolution du projet dans un objectif de gestion sur le long terme. Plusieurs enseignements découleront de ces observations, notamment l'adaptation de la fréquence et du volume des rechargements d'entretien. Il est donc nécessaire d'établir au préalable un plan de suivi adapté, surtout les premières années, celles-ci étant les plus décisives dans l'efficacité de l'opération. Un exemple de plan de suivi est consultable dans le manuel d'ingénierie côtière des Etats-Unis (U.S. Army Corps of Engineers, 2002) en Annexe 1).

Le développement des techniques de mesure permet d'améliorer la qualité du suivi de l'évolution des rechargements comme avec le LiDAR topographique aéroporté (Gares *et al.*, 2006) ou à l'aide de caméra hyperspectrale (Deronde *et al.*, 2006). Ce suivi permettra de disposer d'un retour d'expérience pour les futures opérations sur le site ou à proximité.

3. Performance d'un rechargement

3.1. Comment définir la performance d'un rechargement ?

La performance d'un rechargement est une notion assez complexe à définir étant donné l'érosion consécutive à ce procédé qui par conséquent est souvent considérée par le grand public comme une méthode peu efficace (Elko & Wang, 2007). Un rechargement sédimentaire peut être qualifié d'efficace si les objectifs du projet sont atteints, auquel cas les problèmes résulteraient d'un mauvais dimensionnement. Effectivement, peu de temps après leurs mises en œuvre, certains rechargements sédimentaires ne se sont pas maintenus et tout le volume rechargé est exporté hors de la zone, ce qui s'est produit à plusieurs reprises sur certaines plages de la côte Est des Etats-Unis.

Mais cette notion de performance repose surtout sur la durée pendant laquelle ces objectifs vont être assurés. La performance est donc fortement corrélée à la longévité du rechargement sédimentaire. La question de la définition de la longévité se pose alors. Aux Etats-Unis, la durée de vie d'un rechargement sédimentaire est définie comme le temps nécessaire entre sa mise en œuvre et la perte de la moitié du volume rechargé (Leonard *et al.*, 1990a). La longévité d'une opération dépendrait principalement du rythme auquel est exporté le sable hors de la zone de rechargement. Cette érosion est alors souvent qualifiée de « perte ». C'est la remarque que fait Verhagen (1996) dans son étude. Il précise que du point de vue du gestionnaire, le sable exporté hors de la zone de rechargement est bel et bien perdu, tandis que du point de vue du géomorphologue le sable érodé en question n'est pas perdu, mais vient alimenter d'autres portions de côte à proximité. Cette position peut être effectivement discutée dans la mesure où l'érosion longitudinale pourrait plutôt être considérée comme un apport bénéfique sur les secteurs adjacents. Certains projets ont d'ailleurs parfois pour objectifs de venir alimenter les plages en aval. L'exemple actuel le plus marquant est le *Sand Motor* (section 3.2.1), dont la vocation est de venir alimenter une large portion de côte grâce aux agents dynamiques qui vont redistribuer progressivement le sable. Dans une étude consacrée au suivi de ce projet (de Schipper *et al.*, 2016), les auteurs insistent sur la nécessité de raisonner en termes de redistribution sédimentaire sur les secteurs voisins plutôt que de « perte ». Cette affirmation est d'autant plus évidente si le projet en lui-même a pour objectif de venir alimenter les secteurs adjacents.

3.2. Facteurs influençant la durée de vie d'un rechargement

La durée de vie d'un rechargement sédimentaire, et donc sa performance, est variable en fonction d'une multitude de facteurs. Cette sous-partie tend à répertorier les principaux paramètres influençant cette longévité.

Selon Davis *et al.* (2000), huit paramètres jouent un rôle dans la variation de la longévité d'un projet :

- Le transport sédimentaire longitudinal régional
- Le régime de houle
- Les caractéristiques granulométriques du site d'emprunt
- L'existence d'un gradient ou d'une inversion dans la dérive littorale
- La présence d'aménagements durs
- La présence de rechargement sédimentaire sur un secteur adjacent
- La variation d'orientation du trait de côte
- La méthode de réalisation du projet

Leonard *et al.* (1990a) ont analysés plusieurs paramètres afin de déterminer ceux qui influent le plus sur la longévité de 43 opérations de rechargements sédimentaires menées le long de la côte Est des Etats-Unis. Certains facteurs ont plutôt trait à des paramètres de dimensionnement comme la granulométrie, la longueur de la portion rechargée, le volume par mètre linéaire rechargé, la méthode de réalisation de l'opération, la proximité d'embouchures, les constructions existantes et d'autres basés sur des facteurs extérieurs comme la fréquence des tempêtes. Les résultats de cette étude démontrent que ce dernier paramètre est prépondérant dans l'influence de la durée de vie d'un rechargement, en accord avec de précédentes études (Leonard *et al.*, 1988). La longévité serait donc corrélée 1) au nombre de tempêtes qui frappent le rechargement lors de la première année après sa mise en œuvre - 2) à la durée entre la fin de l'implantation du projet et la toute première tempête (Tableau I.3).

Longévité	Nombre de tempêtes lors de la première année	Longévité	Temps entre la fin de la mise en œuvre et la première tempête
< 2ans	Au moins 2 tempêtes	<1 an	0,25 à 4 mois
2 à 5 ans	1 tempête maximum	1-5 ans	1 à 39 mois
> 5 ans	Aucune tempête	>5 ans	20 à 53 mois

Tableau I.3 Influence des tempêtes sur la longévité des rechargements sédimentaires selon l'étude de (Leonard *et al.*, 1990a)

Un rechargement sédimentaire touché par au moins 2 tempêtes lors de sa première année aurait une longévité inférieure à 2 ans. Cette durée de vie serait encore plus restreinte, soit inférieure à 1 an, si la tempête se produit dans les 4 mois qui suivent la mise en œuvre du rechargement.

Le volume rechargé par mètre linéaire semble jouer également un rôle significatif dans la durée de vie du rechargement sédimentaire (Leonard *et al.*, 1990a). Il a été mis en évidence que les rechargements avec de petits volumes par mètre linéaire (<100 m³/m) ont une faible longévité, de l'ordre de 2 ans maximum, tandis que les rechargements avec un volume important (>450 m³/m) avaient une durée de vie dépassant les 5 ans. Ces observations sont en accord avec d'autres études comme celle de Stauble & Hoel (1986) qui montrent que le volume par mètre linéaire influe sur le pourcentage de sable remanié après une année sur plusieurs plages de Floride. Néanmoins ce volume par mètre linéaire, bien qu'étant un paramètre important, fait partie d'un ensemble de facteurs. En effet, Leonard *et al.* (1990a) démontrent que pour un même volume par mètre linéaire, une hauteur significative de vague plus importante entrainera une diminution de la longévité du projet.

3.3. Est-il possible de prédire la longévité d'une opération ?

La question de la prédictibilité de la longévité d'un rechargement sédimentaire est capitale dans la conception d'un projet pour des raisons de gestion. La multitude de facteurs à prendre en compte, que ce soit des paramètres de dimensionnement du rechargement ou de facteurs extérieurs comme les conditions météorologiques, rend complexe la prédiction de la performance du projet. Il est néanmoins possible d'estimer l'évolution d'un rechargement et sa performance grâce à des relations empiriques et à la modélisation numérique qui ne cesse de se développer.

Un certain nombre de relations empiriques permettent d'estimer l'évolution du volume rechargé et sa longévité comme c'est le cas du *renourishment factor* de (James, 1975) qui permet d'estimer le temps entre le rechargement initial et le rechargement d'entretien et par conséquent la

durée de vie de l'opération initiale. Dean (1988) a également développé une relation pour calculer le temps nécessaire pour perdre un certain pourcentage de volume rechargé (Eq. I.2) :

$$t_{50} = 8,7 \frac{L^2}{H_b^{5/2}} \quad (\text{Eq. I.2})$$

avec t_{50} le temps pour que la moitié du volume rechargé soit érodé, L la longueur de la plage rechargée et H_b la hauteur de déferlement. Cette équation se base sur les pertes longitudinales en partant du principe que les pertes transversales sont négligeables.

La modélisation numérique peut également être un outil pour simuler et tenter de prédire le comportement et la performance d'un rechargement sédimentaire à court ou long terme (Arriaga *et al.*, 2017; Brown *et al.*, 2016; Grunnet *et al.*, 2012; Kuroiwa *et al.*, 2011; Van Leeuwen *et al.*, 2007). La modélisation peut permettre de répondre à de nombreuses questions comme la réaction du rechargement face à l'impact d'une tempête, le taux d'érosion moyen du site après le rechargement, l'évolution du profil de plage ainsi que les volumes d'entretien nécessaires pour augmenter la durée de vie du projet. De nombreux modèles sont disponibles dont les modèles GENESIS (*GENERALISED model for Simulating Shoreline change*), SBEACH ou encore Delft3D pour les plus connus. La modélisation est également un moyen de tester différents scénarios de rechargement (emplacement, volume, longueur de plage concernée etc.) afin de choisir les paramètres de dimensionnement optimal. C'est par exemple le cas de l'un des sites de suivi de cette étude, le rechargement de plage au droit de la digue des Alliés, dont le dimensionnement a été réalisé à l'aide d'une approche hybride couplant un modèle bidimensionnel de morphodynamique côtière et un modèle « one-line » d'évolution du trait de côte (Grunnet *et al.*, 2012).

La fiabilité de ces moyens permettant d'estimer la performance des rechargements sédimentaires est néanmoins parfois discutée étant donné la difficulté de simuler leurs évolutions vu le nombre de variables à prendre en compte (Capobianco *et al.*, 2002; Thieler *et al.*, 2000).

3.3.1. Les rechargements d'entretien

Afin de palier à l'érosion qui se produit à la suite d'un rechargement sédimentaire et entretenir ainsi la performance d'une opération, il est nécessaire d'effectuer plus ou moins régulièrement des rechargements d'entretien. Appelées également rechargements périodiques, ces opérations permettent d'entretenir le rechargement initial et donc de maintenir un stock de sable adéquat selon les objectifs du projet.

Les rechargements d'entretien sont à planifier dès la conception du projet initial afin d'anticiper certaines questions notamment quant aux sources de sable disponibles ou des coûts et d'avoir une estimation des volumes à mettre en œuvre. La question de la fréquence des rechargements d'entretien se pose également. Aucune norme n'est réellement prédéfinie. Le volume et/ou la fréquence des rechargements d'entretien dépendent du projet en question. Aux Etats-Unis, l'intervalle de temps avant un rechargement d'entretien peut aller de deux ans comme à Sandbridge en Virginie jusqu'à dix ans comme c'est le cas à Panama City en Floride (National Research Council, 1995). Il est également mentionné que de manière générale, les côtes exposées à de fortes énergies font l'objet de rechargement d'entretien avec une fréquence plus importante que les projets situés sur une côte soumise à une énergie plus faible.

Bien que certains points peuvent être anticipés comme les conditions énergétiques générales du site ou encore le taux d'érosion moyen, d'autres variables sont beaucoup moins prévisibles. C'est

le cas des conditions météorologiques qui vont engendrer un réajustement des volumes et/ou de la fréquence des rechargements d'entretien. Une période sujette à un nombre anormal de tempêtes ou de coups de vent entrainera une réévaluation à la hausse des volumes et/ou de la fréquence des rechargements d'entretien à mettre en œuvre pour entretenir l'opération initiale. L'efficacité ou non des éventuelles mesures d'accompagnement du projet va également influencer ces paramètres.

Il est néanmoins important d'avoir une estimation de ces volumes et de déterminer la fréquence des rechargements d'entretien nécessaires dès la phase d'avant-projet, ce qui peut être obtenu à l'aide des différentes méthodes évoquées précédemment.

3.3.2. Mesures d'accompagnements

Ces mesures d'accompagnements permettent notamment de stabiliser le rechargement et ainsi augmenter sa durée de vie et éventuellement espacer la fréquence des rechargements d'entretien. Ces mesures sont diverses et peuvent tendre vers l'utilisation de méthodes dures ou douces. Certains réensablements sont par exemple stabilisés à l'aide d'épis (Traynum *et al.*, 2010). Ce genre d'installation va ainsi permettre de limiter le transport longitudinal. A noter qu'un choix réfléchi de leur emplacement est à faire, par rapport à la configuration du site et à la dérive littorale, afin de ne pas bloquer complètement le transit littoral sous peine de déplacer le problème d'érosion. L'U.S. Army Corps of Engineers (2002) émet des recommandations quant au placement des épis par rapport au rechargement. Il est notamment précisé de ne pas installer ces structures au milieu d'une cellule littorale sous-peine de bloquer le transit sédimentaire. Certaines configurations sont plus propices à l'utilisation d'épis, avec un impact négligeable sur les secteurs adjacents, notamment en limite de cellule littorale. Ce point est d'autant plus judicieux si le rechargement se trouve à proximité d'une passe de marée ou d'un canyon sous-marin où le sable risque d'être perdu ou de combler certaines zones qui ne devraient pas l'être.

Des mesures de stabilisation appartenant à la famille des méthodes souples peuvent également être mises en œuvre comme les ganivelles, fascines ou plantations de plantes stabilisatrices. Ces opérations permettent alors de lutter contre les envols de sable en maintenant ce stock sableux sur le secteur rechargé. En effet dans le cas des rechargements de plage, la surface de plage sèche étant augmentée, les envols de sable s'amplifient également. La disposition de fascines ou ganivelles peut prendre différente forme (lignes, casiers, rangées, en zigzag) et leur nombre, leur orientation et leur espacement est évidemment variable en fonction du site. Ces structures nécessitent un entretien car une fois que le niveau de sable accumulé atteint le sommet des structures, leur efficacité diminue. Plusieurs options peuvent alors être envisagées en fonction des objectifs préalablement définis, comme la plantation d'oyats pour stabiliser la zone, l'ajout de nouvelles rangées pour accroître l'accumulation de sable (Savage & Woodhouse, 1969) ou encore le nettoyage des structures en enlevant le sable qu'il est possible de disperser sur le site. La plantation de végétaux comme les oyats à l'avantage de contribuer également au développement de la biodiversité du site. C'est également un bon rapport coût/bénéfices dans la mesure où les végétaux plantés vont se développer et se multiplier. En zone urbaine, les plantations nécessitent des protections afin d'éviter les piétinements. Ce type de mesures, que ce soit des fascines ou plantations, doivent évidemment être placées au-delà de la limite des plus hautes mers astronomiques et hors d'atteinte des plus fortes vagues afin de ne pas être détruites par l'attaque des vagues.

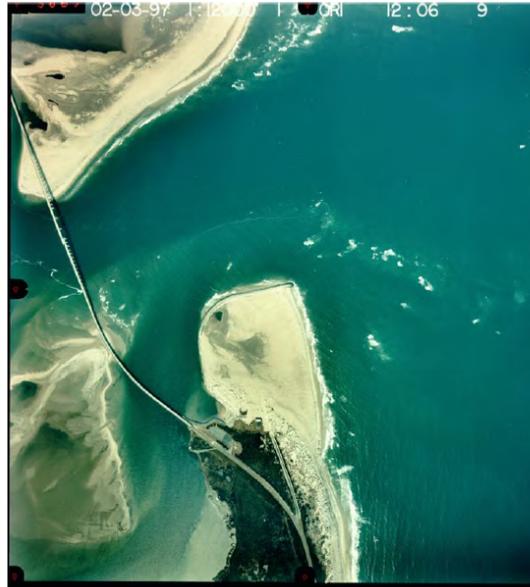


Figure I.5 Epis en limite de rechargement, Oregon Inlet, Caroline du Nord (U.S. Army Corps of Engineers, 2002)

L'installation de tels dispositifs peut être réalisée à différents endroits, directement sur le site rechargé pour y maintenir le plus possible le stock sableux, en arrière de la zone rechargée pour piéger le sable avant qu'il n'envahisse les éventuels aménagements urbains ou dans l'objectif de développer des dunes, voire également sur un front dunaire déjà existant pour le restaurer ou le renforcer. Cette option est en effet un bon moyen de renforcer le système dune-plage et ainsi accroître la protection côtière. La combinaison de plusieurs dispositifs comme l'installation de ganivelles puis la plantation d'oyats est également possible pour augmenter l'efficacité de ces mesures de stabilisation.

4. Impacts sur les écosystèmes

Les écosystèmes côtiers se révèlent être des milieux à l'équilibre fragile. Appartenant à la famille des techniques dites douces de protection du littoral, les rechargements sédimentaires ont l'image de pratique peu dommageable pour l'environnement. Deux écoles s'opposent néanmoins quant à la question des conséquences des rechargements sur les écosystèmes côtiers mais également marins, les effets pouvant être localisés sur le lieu de dépôt, mais également dans la zone d'emprunt parfois au large (Greene, 2002). Certains scientifiques considèrent en effet que cette méthode est sans impact ou avec des effets négligeables (Löffler & Coosen, 1995; Miller *et al.*, 2002), tandis qu'au contraire d'autres sont plus sceptiques et discutent des effets de cette méthode sur les écosystèmes (Nelson, 1988; Peterson & Bishop, 2005). Les rechargements sédimentaires peuvent causer des perturbations plus ou moins significatives et plus ou moins durables. Cette pratique peut engendrer des pressions sur un ou plusieurs organismes en particulier voire sur l'écosystème entier. Ce thème est bien documenté et cette sous-partie vise à en donner les grandes lignes.

4.1. Zone de prélèvement

Soumise au dragage, la zone d'emprunt se trouve perturbée de multiples manières. Le dragage entraîne un prélèvement des sédiments qui a pour conséquence une modification du fond marin (changement morphologique, modification des courants, de la composition du sédiment etc.) qui aura des répercussions sur les espèces benthiques qui sont directement touchées en raison de l'aspiration du sédiment (Newell *et al.*, 1998).

Le dragage provoque également une augmentation de la turbidité à cause de la remise en suspension des matériaux lors du prélèvement du sédiment. Toutes les espèces se retrouvent impactées, mais avec un degré de gravité différent. En effet, les espèces mobiles (poissons, mammifères, oiseaux, crustacés), gênées par les vibrations, le bruit ou la baisse de luminosité, peuvent quitter temporairement la zone perturbée. En fonction de leur place dans la chaîne alimentaire, le départ de certaines espèces représentant des proies engendre également le départ des prédateurs. L'augmentation de la turbidité implique d'autre part la diminution de la luminosité plus ou moins longue, et plus ou moins importante en fonction du taux de matériaux en suspension. Les espèces benthiques, selon leur tolérance aux perturbations du milieu peuvent alors souffrir de ce phénomène. Les organismes vivant sur le fond marin peuvent également subir un enfouissement suite à la redéposition d'une partie du sédiment en suspension ou au remaniement suite au dragage.

L'ampleur des conséquences du dragage dépend de la nature des sédiments, du type de dragage, de l'étendue de la zone d'emprunt et de la quantité de sédiment prélevé, de la nature de la perturbation, et de la capacité d'adaptation ou de résilience des organismes (Thompson, 1973).

Des études démontrent que le site de prélèvement aurait la capacité de se rétablir dans l'année qui suit le dragage (Greene, 2002). Cette question de la résilience semble discutable puisque certaines publications font référence à un temps plus important pour que le site retrouve ses caractéristiques initiales. Cette faculté de réadaptation semble propre à chaque milieu en fonction des caractéristiques du biotope et des organismes qui s'y trouvent. (Greene, 2002) conclut que la capacité du benthos à se rétablir dépend d'un certain nombre de facteurs comme la période et de la durée du dragage, du type d'équipement utilisé pour réaliser l'opération, de la composition du sédiment prélevé, de la quantité de sable prélevé, de la faune présente sur le site et sa capacité d'adaptation, des caractéristiques du nouveau sédiment de surface, des caractéristiques biologiques des organismes qui recolonisent le site, de la qualité de l'eau, des conditions hydrodynamiques du site et aux alentours et enfin le taux de sédimentation qui suit le dragage.

4.2. Zone de dépôt

En fonction de la localisation de l'apport sableux, les pressions engendrées et les espèces affectées ne sont pas forcément les mêmes. (Speybroeck *et al.*, 2006) s'attachent à discuter des effets des rechargements de plage sur l'écosystème côtier. Dans cette publication, ces auteurs ont étudié cinq groupes pouvant potentiellement être impactés par une opération de rechargement sédimentaire : le microphytobenthos, les plantes vasculaires, les arthropodes, le zoobenthos marin et enfin l'avifaune. Ces organismes sont présents sur une portion plus ou moins grande du profil de plage (Figure I.6), que ce soit de manière permanente comme les plantes en haut de plage, ou variable en fonction de leurs activités, comme les oiseaux avec les zones de nidification en haut de plage et les secteurs de chasse sur la zone intertidale ou au-delà. Cette publication ne mentionne cependant pas les éventuels impacts des rechargements sur les mammifères comme les phocidés ou encore sur certains reptiles comme les tortues marines.

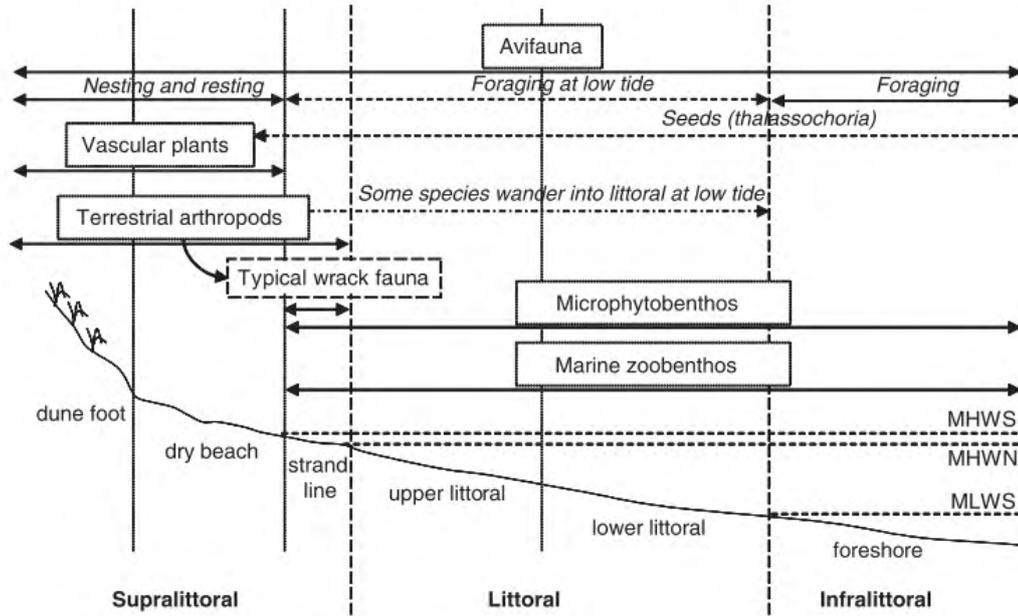


Figure I.6 Schéma des différents organismes et de leurs activités le long du profil de plage potentiellement impactés par une opération de rechargement sédimentaire (Speybroeck *et al.*, 2006)

De manière générale, les effets engendrés par les rechargements peuvent être répertoriés en trois groupes, à savoir ceux liés aux travaux, à la qualité du sédiment et enfin ceux liés à la quantité de sédiment (Speybroeck *et al.*, 2006). Les degrés d'impacts des effets sont variables en fonction de leur durabilité et de leur intensité. Ils peuvent être momentanés comme la gêne occasionnée par le bruit ou les vibrations lors des travaux ou plus durables comme la modification de la composition du sédiment. Comme pour la zone de prélèvement, les impacts peuvent être indirects comme la disparition de proies ou plus directs comme l'enfouissement des organismes. L'enfouissement des plantes (Manzanera *et al.*, 1998; Aragonés *et al.*, 2015) mais également du zoobenthos (Rakocinski *et al.*, 1996; Menn *et al.*, 2003) est une conséquence inévitable dans le cadre d'une opération de rechargement. La question qui se pose alors est la capacité et le temps de résilience des groupes d'organismes touchés. Il est difficile de donner un temps de résilience général étant donné les comportements et aptitudes propres à chaque espèce et de leur relation avec le milieu en question. Quelques exemples peuvent néanmoins être cités comme l'étude de Lewis *et al.*, (2012). Dans cette étude portant sur le nombre d'individus de quatre espèces de la macrofaune benthique sur le littoral néerlandais, les résultats démontrent qu'un rétablissement de l'abondance initiale s'effectue au bout d'un an après la réalisation du rechargement pour 3 des 4 espèces (*Haustorius arenarius*, *Eurydice pulchra* et *Bathyporeia sarsi*). La dernière espèce (*S. squamata*) semble avoir profité du rechargement pour sur-coloniser le site. De manière générale, le temps de réadaptation semble variable d'une espèce à l'autre en fonction de sa place dans l'écosystème en question (Adriaanse & Coosen, 1991; Jones *et al.*, 2008). La « sur-colonisation » est néanmoins la preuve que certaines espèces peuvent tirer avantage de la mise en œuvre d'un rechargement sédimentaire. Des conséquences positives peuvent être mises en évidence comme la création d'un rechargement de plage qui augmente la zone de nidification des tortues (Montague, 1993) ou des oiseaux (Perrow & Davy, 2002). La restauration voire la création d'un habitat pour certaines espèces comme des reposoirs à phoques (Lembrechts *et al.*, 2012) peut également être l'un des objectifs d'une telle opération. Il faut toutefois prendre en

considération les potentiels effets négatifs afin de minimiser les impacts sur la faune et la flore déjà présentes.

5. Les coûts d'un rechargement sédimentaire

L'estimation des coûts moyens d'une méthode de protection du littoral est assez complexe à réaliser étant donné les caractéristiques variables d'un site et d'un projet à l'autre, le dimensionnement de la mesure à mettre en œuvre ou encore le type de matériel utilisé pour ne citer que ces quelques éléments. D'autant plus que les coûts d'entretien et de maintenance sont à prendre en compte sous peine de mettre en œuvre une méthode à durée de vie limitée. Dans le rapport final du programme Conscience (Van Rijn, 2010), une tentative de comparaison est effectuée entre les coûts moyens de différentes protections du littoral aux Pays-Bas (Tableau I.4).

Type de structure	Construction + coûts de maintenance sur 50 ans (en Euros/par m linéaire de côte/an)	
Epis en enrochements	50 à 150	
Enrochements	100 à 200	
Rechargement d'avant-plage (tous les 5 ans)	100 à 200 (si le sable est disponible et facilement accessible)	
Digue, perré	150 à 300	
Rechargement de plage (tous les 3 ans)	200 à 300 (si le sable est disponible et facilement accessible)	
Brise-lames submergé	200 à 400	
Brise-lames émergé	250 à 500	

Tableau I.4 Estimation des coûts de différentes mesures de protection du littoral en €/mètre linéaire/an (d'après Van Rijn, 2010)

Les brise-lames semblent être en moyenne la protection du littoral qui reviendrait le plus cher à implanter et entretenir, en opposition avec des épis en enrochements qui serait la méthode la moins coûteuse. Il en ressort également les montants des rechargements sédimentaires sont variables selon leur localisation. Les rechargements d'avant-plage seraient moins coûteux à réaliser et entretenir avec 100 à 200 €/ml/an contre 200 à 300 €/ml/an pour les rechargements de plage.

Les estimations du Tableau I.4 sont basées sur une analyse des coûts des méthodes de protection du littoral aux Pays-Bas. Ces derniers bénéficient d'une pratique rigoureuse des rechargements et d'un retour d'expérience assez conséquent, d'où l'évaluation de ces coûts qui pourraient approcher une bonne estimation. Ces estimations sont néanmoins adaptées à leur pratique assez « homogène ».

Chapitre II. Aperçu de la pratique des rechargements sédimentaires dans le monde

Après une première expérimentation en 1923 aux Etats-Unis, la technique du rechargement sédimentaire n'a cessé de se développer partout dans le monde. Les pays peuvent avoir un degré d'utilisation variable qui peut aller de la simple expérimentation ou pratique occasionnelle à l'intégration de cette méthode dans une stratégie nationale de protection du littoral. Les rechargements sédimentaires sont très utilisés aux Etats-Unis, en Australie ainsi que dans plusieurs pays européens (Bird & Lewis, 2014). Bird & Lewis (2014) consacrent tout un chapitre à la revue des pratiques de rechargements dans le monde. Avant de traiter des Etats-Unis et de l'Europe qui auront une sous-partie qui leur sera entièrement consacrée, un tour d'horizon de cette pratique dans les autres régions du monde va d'abord être réalisé.

1. Tour du monde des pratiques

En **Australie**, malgré quelques travaux de rechargements sédimentaires limités préconisés par des ingénieurs dans les années 1960, c'est véritablement à partir des années 1970 avec la pression politique pour faire face au problème d'érosion que la protection des plages par rechargements s'est développée dans la baie de Port Philippe, située sur la côte méridionale du pays dans l'Etat du Victoria. Un programme de préservation des plages a été initié par la *Ports and Harbours Division* en 1974 (Finkl & Walker, 2005). Aucun bilan de la pratique de cette méthode en Australie n'est disponible avant celle de Cooke *et al.* (2012). Selon cette publication, l'Australie comptabilise 130 plages rechargées entre 2001 et 2011. La majorité des opérations, soit 42 %, mettent en œuvre des volumes compris entre 101 m³ et 50 000 m³ et la fréquence des rechargements est assez élevée avec un intervalle de temps d'un an voire moins pour 45 % des opérations. Les réensablements ont pour objectif de protéger les infrastructures côtières ainsi que les espaces dédiés au tourisme et assurer la sécurité des personnes. Les plages particulièrement concernées par les rechargements sont localisées près des grands centres urbains comme la baie de Port Philippe avec 30 projets de rechargements de plage recensés entre 1975 et 2010 (Bird, 2011), Adélaïde localisé dans l'Etat d'Australie-Méridionale (Bird & Lewis, 2014) et la Gold Coast située à la limite des Etats du Queensland et de la Nouvelle-Galles du Sud (Tomlinson *et al.*, 2006). L'érosion des plages est principalement due aux tempêtes qui frappent le littoral, mais est également liée au transport sédimentaire par la dérive littorale. Concernant la mise en œuvre, les opérations sont le plus souvent réalisées au printemps afin de favoriser l'accrétion, mais hors des périodes estivales pour ne pas perturber les activités touristiques. La majorité des rechargements se font sur la zone intertidale ou en haut de plage afin d'élargir l'espace balnéaire pour le tourisme en plus d'assurer le rôle de protection initial. L'Australie possède au total 9 *by-passing* afin de recharger régulièrement des secteurs en érosion (Cooke *et al.*, 2012).

Certaines publications témoignent de l'utilisation des rechargements sédimentaires en **Nouvelle-Zélande** notamment celle Healy *et al.* (1990) de qui fait état d'une dizaine de sites de rechargement au sein du pays. La Nouvelle-Zélande utilise cette méthode afin de reconstruire les plages, que ce soit après des tempêtes ou à cause de l'érosion chronique, et afin d'apaiser la perception du public qui tend à considérer que les plages les plus fréquentées s'érodent depuis des

années. Les rechargements sont également utilisés comme moyen de stockage des sables de dragage ou issus de travaux et en tant que stratégie de gestion côtière pour restaurer les dunes afin de lutter contre les potentiels effets de l'élévation du niveau marin.

Des études récentes de suivis de projets mentionnent l'expérimentation des rechargements dans plusieurs pays asiatiques comme en **Malaisie** (Shibutani *et al.*, 2013), en **Inde** (Ramana Murthy *et al.*, 2008), au **Sri Lanka** (Azoor *et al.*, 2015) ou encore au **Viet Nam** (Nguyen *et al.*, 2015) mais aucune revue générale ne permet de se rendre compte de la pratique nationale de ces pays. Au **Japon**, malgré la mise en place en 2000 d'une nouvelle loi concernant la protection du littoral et faisant du rechargement sédimentaire un moyen légal de protection côtière, cette pratique reste encore peu commune (Nishi & Dean, 2005). Nishi & Dean (2005) recensent 42 projets en tout, avec un volume moyen de 44 800 m³ de sable rechargé par opération. La plus grosse opération fait état d'un apport sableux d'environ 275 000 m³. Dans cette étude, les rechargements au Japon sont également considérés comme étant assez chers. L'auteur ajoute que des recommandations seraient nécessaires afin d'encadrer la pratique au sein du pays. En **Chine**, comme dans beaucoup d'autres pays, ce sont les méthodes dures de protection du littoral qui ont longtemps dominé. Puis il a été reconnu que les méthodes douces représentaient une approche durable pour les environnements côtiers à la fin du 20^{ème} siècle (Cai *et al.*, 2010). Le premier réensablement a eu lieu à Hong Kong en 1990 où 20 000 m³ ont été placés sur la plage de Repulse Bay le long de la mer de Chine méridionale, complètement détruite lors de la seconde guerre mondiale. Depuis cette date, 16 opérations de rechargement de plage ont eu lieu (Figure II.1) avec des volumes compris entre 12 000 m³ et 1,5 Mm³ (Kuang *et al.*, 2011a). Les opérations sont relativement de petites échelles compte tenu des volumes mis en place par rapport à la longueur de plage concernée avec une moyenne de 165,8 m³/m (Cai *et al.*, 2010). Trois étapes sont mises en évidence dans l'histoire de la pratique des réensablements en Chine. Avant 1990, un apport de sable pouvait être effectué sur les plages durant l'été en vue d'augmenter l'espace balnéaire. Mais un manque de connaissance des processus morpho et hydrodynamiques entraînaient une érosion rapide des volumes placés. De 1990 à 2005, de petits rechargements combinés à des aménagements durs afin de stabiliser les plages ont vu le jour. Néanmoins, certains d'entre eux ont rapidement été érodés. Ce n'est qu'à partir de 2005 qu'une prise de conscience s'est faite quant à la nécessité d'une protection du littoral et des écosystèmes côtiers, c'est pourquoi le nombre de projets a nettement augmenté depuis 2005 (Figure II.1). Des études de dimensionnement du projet et de suivi sont également effectuées.

Peu d'études en **Afrique** permettent de se rendre compte de la pratique le long des côtes de ce continent. Quelques projets comme en **Afrique du Sud** à Durban peuvent néanmoins être mentionnés. Quatre rechargements de plage y ont été réalisés mobilisant de larges volumes de sable, le premier en 1953, le second en 1982 avec 650 000 m³ et les deux derniers en 2009 et 2010 avec 250 000 m³ à chaque opération afin de restaurer la plage après le passage d'une tempête en 2007 (Corbella & Stretch, 2012; Bird & Lewis, 2014). D'autres pays semblent expérimenter les rechargements sédimentaires comme l'**Egypte** (Frihy *et al.*, 2010; Negm *et al.*, 2015) ou encore le **Nigeria** (Ibe *et al.*, 1991).

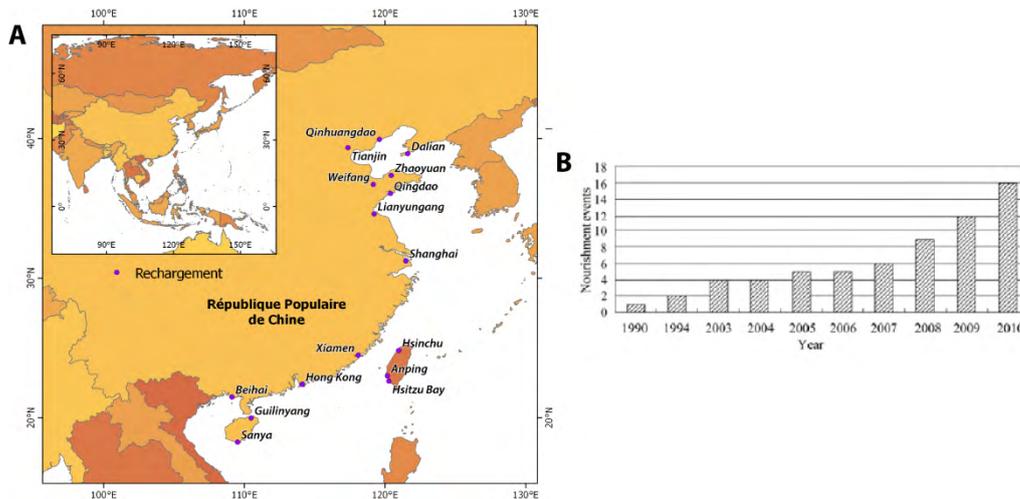


Figure II.1 (A) Localisation des rechargements de plages en Chine (d'après Kuang *et al.*, 2011b) et (B) évolution des volumes au fil des années (Cai *et al.*, 2010)

En **Amérique centrale et du Sud**, cette méthode semble assez peu utilisée de manière générale. Au **Brésil** par exemple, l'utilisation des méthodes dures domine encore aujourd'hui. Quelques opérations de rechargements sédimentaires peuvent néanmoins être dénombrées comme à Vitória dans l'État de l'Espirito Santo sur la plage de Camburi, dans la baie de Mangaratiba située dans l'Etat de Rio de Janeiro sur la plage de São Braz ou encore près de Cabo Frio également situé dans le même Etat (Vera-Cruz, 1972). Le rechargement le plus important du Brésil est celui de la plage de Copacabana en 1969-1970. La largeur de plage est passée de 55 m à 140 m grâce au refoulement de 3,5 Mm³ de sable (Vera-Cruz, 1972). La plage de Varadero à **Cuba** aurait également bénéficié d'un rechargement sédimentaire après avoir subi des dégâts lors de tempêtes (Bird et Lewis, 2014). D'autre pays ont également utilisés cette méthode comme l'**Argentine** à Mar del Plata (Marcomini & López, 2006) ou le **Mexique** sur la plage de Cancùn (Sanchez *et al.*, 2011; de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2013). C'est cette même plage qui a bénéficié du plus important rechargement du pays en 2009 avec 5,2 Mm³ afin de lui redonner ses caractéristiques après le passage de plusieurs tempêtes.

2. Les Etats-Unis : précurseurs en termes de rechargements sédimentaires

L'intérêt pour la protection côtière s'est développé aux Etats-Unis à partir de la fin du 19^{ième} et début du 20^{ième} siècle. En effet, le grand nombre de tempêtes et ouragans qui frappèrent les côtes de New York et du New Jersey et les dégâts engendrés, combinés à la pression anthropique en pleine croissance sur le littoral des villes de New York et Philadelphia furent l'une des raisons de la prise de conscience d'une nécessité d'accroître les protections côtières (Hillyer, 2003). Comme ailleurs dans le monde, c'est par l'utilisation des méthodes traditionnelles c'est-à-dire d'aménagements durs que la lutte contre l'érosion du littoral a démarré. Malgré la fixation et protection temporaire du trait de côte par ces structures rigides, le problème de déficit sédimentaire n'était cependant en aucun cas réglé (Dean, 1987; Davison *et al.*, 1992). C'est en 1923 à Coney Island à New York que le premier rechargement de plage des Etats-Unis a été réalisé. Pour cette opération, 1,3 millions de m³ de sable ont été dragués dans le port de New-York puis déposés sur la plage de Coney Island (Davison *et al.*, 1992) sur une longueur d'environ 1 km. A noter néanmoins que l'objectif de ce premier

rechargement visait plutôt à augmenter l'espace balnéaire que de protéger la côte. Les tous premiers rechargements ont le plus souvent été entrepris grâce à l'opportunité que représentaient les sables de dragages issus de l'entretien des chenaux de navigation ou du développement des ports (Campbell & Benedet, 2006).

C'est véritablement à partir des années 1950 que la manière de repenser la protection du littoral s'est développée avec la prise de conscience de l'efficacité des méthodes douces (Hillyer, 2003). Que ce soit dans le guide des pratiques de protection du littoral ou par le biais du Centre de recherche en ingénierie côtière (CERC), l'accent est mis sur les rechargements sédimentaires comme méthode alternative de défense du littoral.

Aujourd'hui le rechargement sédimentaire est la méthode privilégiée de protection du littoral aux Etats-Unis, que ce soit pour créer des zones tampons et amortir l'impact des tempêtes (Benedet *et al.*, 2005; Elko, 2005), l'aspect touristique ou comme moyen de stockage des sédiments de dragage. La pratique des rechargements est bien encadrée et les procédures de mise en œuvre claires. Un chapitre y est consacré dans le Coastal Engineering Manual (CEM) (U.S. Army Corps of Engineers, 2002) qui est un manuel d'ingénierie côtière. L'objectif de ce guide est de mettre à disposition les méthodes et procédures de réalisation de projets d'ingénieries côtières.

L'évolution de la pratique de cette méthode aux Etats-Unis est assez facile à suivre au fil du temps étant donné la multitude d'inventaires disponibles. Le premier inventaire réalisé en 1952 répertorie 72 opérations de rechargements entre 1922 et 1950 (Hall, 1952). La majorité des opérations sont localisées sur les côtes de New-York, du New Jersey et de la Caroline du Sud. S'ensuit au fil des années toute une série de publications scientifiques sur les pratiques nationale et régionale qui permettent de suivre le développement de cette méthode sur la façade atlantique (Pilkey & Clayton, 1987, 1989; Valverde *et al.*, 1999), sur la façade pacifique (Clayton, 1991; Wiegel, 1994) ou encore le long du golfe du Mexique (Dixon & Pilkey, 1991; Trembanis & Pilkey, 1998).

Dans l'étude de Campbell & Benedet (2006), environ 200 zones de rechargements sont recensées aux Etats-Unis et environ 650 millions de m³ de sable (Figure II.2) ont été utilisés pour les rechargements de plage depuis les années 30, soit en moyenne 9,2 millions de m³/an. Dans cette étude, une projection des quantités de sédiments mis en œuvre pour les rechargements est également mentionnée et fait état d'un volume qui va doubler voire tripler d'ici 25 ans (Figure II.2) puis se stabiliser voire diminuer à cause des rechargements d'entretien qui devraient ensuite dominer.

A noter que dans une étude plus récente, Coburn (2012) fait état d'un volume de 1,3 milliards de yard cube, soit quasiment 1 milliard de m³, utilisés pour cette méthode de protection du littoral depuis le début de son utilisation. 1 900 opérations de rechargements seraient également comptabilisées dans cette étude plus récente. Aujourd'hui des bases de données, consultables par le grand public via des sites web interactifs (Western Carolina University, s. d.), recensent un grand nombre opérations réalisées jusque 2016 par Etats ou plages.

Table 04. Estimated total nourishment volumes for the U.S.

State	Total Volume
New York	80,000,000
New Jersey	60,000,000
Delaware	5,000,000
Maryland	7,000,000
Virginia	11,000,000
North Carolina	40,000,000
South Carolina	20,000,000
Georgia	5,500,000
Florida Atlantic	65,000,000
Florida Gulf	38,000,000
Alabama	1,600,000
Mississippi	8,000,000
Louisiana	12,000,000
Texas	9,100,000
California	180,000,000
Total	642,200,000

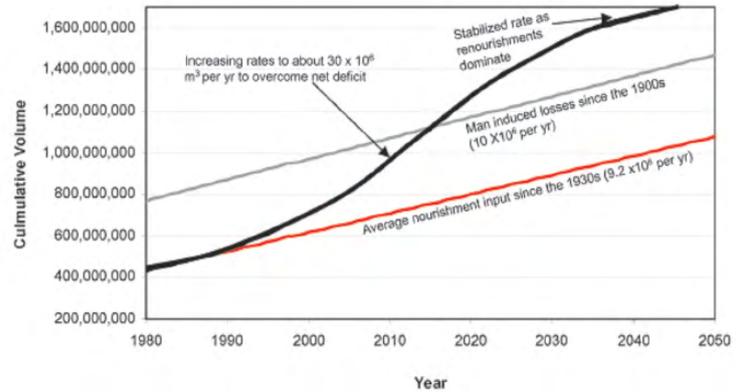


Figure II.2 Estimation des volumes utilisés pour les rechargements de plage aux Etats-Unis en 2006 et projection (Campbell & Benedet, 2006)

3. Les rechargements en Europe

D’après la littérature scientifique, le premier rechargement en Europe a été réalisé au Portugal en 1950 à Estoril, à une quinzaine de kilomètres à l’ouest de Lisbonne (Bird et Lewis, 2014). Depuis, l’utilisation de cette méthode s’est largement développée au sein du continent pour intégrer des pratiques variées en fonction des pays.

L’étude de (Hanson *et al.*, 2002) menée dans le cadre du projet SAFE (*Performance of Soft Beach Systems and Nourishment Measures for European Coasts*) apporte une description détaillée de l’utilisation des rechargements sédimentaires de certains pays européens que ce soit par le biais d’un bref historique de l’utilisation de cette méthode au sein du pays étudié, du recensement des opérations effectuées, des différents aspects de la conception des projets, de la méthodologie et des éventuels suivis effectués post-rechargement. Associée à cette publication, celle de Hamm *et al.*, (2002) menée également dans le cadre du projet dresse les conclusions de l’étude et développe certaines recommandations. Les pays dont la pratique est détaillée dans ces deux études sont l’Allemagne, le Danemark, les Pays-Bas, la France, le Royaume-Uni, l’Espagne et l’Italie. Le Tableau II.1 rassemble les chiffres clés caractérisant la pratique des rechargements de ces sept pays. A noter que dans cette étude les données ont été récoltées jusqu’en 1999 seulement. Bien que cette étude permette d’avoir une base de comparaison entre ces différents pays, ces données ont été actualisées dans la mesure du possible grâce à la consultation de publications plus récentes.

Pays	Date du premier rechargement sédimentaire	Nombre de sites rechargés	Volume total rechargé (millions de m ³)	Nombre moyen annuel de projet	Stratégie sur le long terme	Origine des fonds
France	1962	26	12	<1	Non	Locale
Italie	1969	36	15	1	Non	Nationale/Régionale
Allemagne	1951	60	50	3	Oui	Fédérale/Nationale
Pays-Bas	1970	30	110	6	Oui	Nationale
Espagne	1985	400	110	10	Non	Nationale
Danemark	1974	13	31	3	Oui	Nationale/Locale
Royaume-Uni	années 1950	32	20	4	Non	Nationale/Locale
Europe				27,5		
Etats-Unis	1922			30	Non	Fédérale/Locale

Tableau II.1 Synthèse des pratiques de rechargements en Europe (d’après Hamm *et al.*, 2002)

Le volume annuel de rechargement en Europe était de 28 Mm³ jusqu'en 1999. Jusqu'à cette date, les Pays-Bas et l'Espagne se classaient en première position en termes de volume total utilisé pour les rechargements sédimentaires avec 110 Mm³. Malgré un même volume en 1999, leur pratique est assez différente comme il est possible de le remarquer avec le nombre de sites concernés par ces opérations, soit 400 pour l'Espagne contre 30 seulement pour les Pays-Bas. De plus, contrairement à l'Espagne, les rechargements sédimentaires font partie de la stratégie nationale de défense du trait de côte aux Pays-Bas. C'est la France avec 12 Mm³ qui se classe en dernière position en termes de volume total, devancée de peu par l'Italie avec 15 Mm³. D'après Hamm *et al.*, (2002), ces deux pays ont comme point commun le manque d'anticipation de l'utilisation de cette méthode, qui vient le plus souvent en réponse à un problème d'érosion sur un site. Un manque de stratégie globale à long-terme de prévention et d'anticipation est également souligné.

3.1. Revue par pays

Premier pays européen, d'après Hamm *et al.* (2002) à expérimenter le rechargement sédimentaire en 1950 à Estoril près de Lisbonne, le **Portugal** utilise néanmoins assez peu cette méthode. La protection côtière passe plutôt par l'utilisation massive d'aménagements durs comme les épis (Taborda *et al.*, 2005). Jusqu'en 1997, 29 rechargements auraient été réalisés sur 12 sites pour un volume total de 6,6 Mm³ (Hanson *et al.*, 2002). Plusieurs opérations peuvent être citées sur la côte sud en Algrave sur la plage de Praia da Rocha (Psuty & Moreira, 1992), à Cancela Peninsula (Dias *et al.*, 1999) ou encore sur la côte Ouest comme à Troia (Silveira *et al.*, 2013). Plusieurs auteurs recommandent l'utilisation des rechargements sédimentaires après des études et comparaisons de coûts/bénéfices entre plusieurs méthodes de protection du littoral (Magalhães *et al.*, 2004; Taborda *et al.*, 2005).

Second pays à expérimenter les rechargements sédimentaires, l'**Allemagne** a effectué 150 opérations de rechargements jusqu'en 1999, sur 60 sites, ce qui représente un volume total de 50 millions de m³ de sables. Ce pays se place en troisième position dans le classement de Hanson *et al.* (2002) en termes de volumes de sédiments consacrés à cette protection. Le tout premier rechargement sédimentaire au sein de ce pays a eu lieu sur l'île de Norderney en 1951. Un volume de 1,2 Mm³ a été dragué dans les lagunes littorales puis placé sur la plage de Norderney à l'Ouest de l'île (Kunz, 1990). En Allemagne, les rechargements se répartissent principalement sur les îles de la Frise-Orientale, sur les îles frisonnes septentrionales et le long de la mer Baltique. La protection de ces îles barrières au large représente un enjeu majeur, car leur présence forme un rempart naturel à la côte.

Les premières expérimentations de rechargements au **Royaume-Uni** datent du début des années 1950. Néanmoins c'est à partir des années 1990 que leur utilisation prend son essor. Selon Hanson *et al.* (2002), en 1999 le Royaume-Uni totalise un volume de 20 Mm³ utilisé pour les rechargements. Cette méthode est utilisée aussi bien à des fins de protection du littoral, notamment pour protéger les digues, qu'à des fins touristiques. A noter qu'il existe une distinction bien marquée dans la littérature britannique entre les rechargements sédimentaires, définis comme un apport sédimentaire sur une plage à partir de sable dragué en mer ou extrait de l'arrière-pays ou de carrière, et les *beach recycling* qui pourrait correspondre à une sous-catégorie de rechargement. Cette méthode fait référence à un transfert de sable qui s'est accumulé sur une plage dû à la dérive littorale, vers la plage d'où il provient. C'est principalement la côte de la Manche qui bénéficie de rechargements sédimentaires. A titre d'exemple, un volume de 6,72 Mm³ au total a été rechargé sur les plages de Sussex et du Kent depuis 1950 et 7,61 Mm³ ont été transférés (Moses & Williams, 2008).

En ce qui concerne l'**Italie**, depuis la première opération de rechargement de plage en 1969, 50 rechargements ont été réalisés sur 36 sites représentant un volume de 15 Mm³. Le nombre de plages rechargées s'élève à 72 en 2002 (Valloni & Barsanti, 2007). La majorité des rechargements mettent en œuvre de petits volumes de 100 000 à 150 000 m³. Quelques rechargements massifs peuvent néanmoins être cités, comme à Venise-Palestrina avec 4 Mm³, à Venise-Cavallino avec 2 Mm³, à Cosenza-Paola avec 1 Mm³ et enfin Ostie près de Rome avec 0,95 Mm³ (Valloni et Barsanti, 2007). Toujours d'après cette étude, les rechargements sédimentaires peuvent avoir différentes finalités comme l'augmentation de la largeur de la plage pour des aspects touristiques, la restauration de plage afin de protéger des bâtiments, des routes, des parcs ou réserves ou encore le remplacement de structures dures du type épis.

L'**Espagne** comptabilisait environ 600 opérations de rechargements et rechargements d'entretien jusqu'en 1999 (Hanson *et al.*, 2002), équivalent à une moyenne de 275 000 m³ par opération de rechargement. L'érosion des côtes est principalement causée par l'interruption du transport sédimentaire par les infrastructures portuaires ou le développement des stations balnéaires avec l'essor du tourisme dès les années 60. Le principal objectif des rechargements est d'assurer un espace récréatif suffisant lors des périodes touristiques. Selon une étude nationale datant de 1995 (National Research Council, 1995), sur la période 1983-1993, 14 % du littoral espagnol a été alimenté en sable.

Au **Danemark**, une politique de gestion du littoral a été implantée en 1982 suite à l'érosion sévère du littoral engendrée par la tempête de 1981 qui a provoqué un important recul des dunes, une rupture des digues et l'inondation de l'arrière-pays. 97% des volumes consacrés au rechargement ont été effectués sur le littoral de la mer du Nord, seulement trois opérations ont été réalisées sur les plages le long de la mer Baltique (Hanson *et al.* 2002). L'objectif de cette stratégie est d'assurer un niveau de sécurité contre des tempêtes de période de retour de 100 ans. Initialement, la stratégie mise en place était basée sur le renforcement des dunes ainsi que sur la construction d'aménagements durs. Puis progressivement, l'utilisation des rechargements sédimentaires s'est développée notamment à partir des années 1980 (Madsen *et al.*, 2011). Le rythme de rechargement sédimentaire était d'environ 1 Mm³/an à la fin des années 80 pour passer à 3 Mm³/an à la fin des années 90. Suite aux résultats du projet Nourtec (Lastrup *et al.*, 1996), il a été décidé de placer 1/3 des volumes consacrés aux rechargements sédimentaires dans les petits-fonds et non plus sur les plages. Depuis 2000, dans la partie centrale du littoral bordant la mer du Nord c'est même 60 % des rechargements sédimentaires qui sont des rechargements d'avant-plage.

En plus de ces pays où l'utilisation des rechargements sédimentaires est assez bien développée, une pratique occasionnelle peut également être évoquée dans d'autres pays du Nord-Est de l'Europe comme en Suède (Hanson *et al.*, 2002) qui privilégie toutefois les méthodes dures, en Lituanie (Pupienis *et al.*, 2014), en Estonie à Pirta ou Narva-Joseuu (Walker, 2012) ou encore en Pologne. Dans ce pays, le rechargement sédimentaire est une méthode qui a été introduite à la fin des années 1970 et qui protège désormais environ 60 km de côte (Pruszk, 2004). L'utilisation s'est notamment développée dans les années 1989-1995 (Zawadzka, 1997). Des articles mentionnent également la réalisation de petites expérimentations en Grèce (Hanson *et al.*, 2002) ou encore à Malte (Borg *et al.*, 2006) dans la baie de Saint George.

3.2. Utilisation des rechargements en Belgique et aux Pays-Bas

Le cas des Pays-Bas et de la Belgique, de par leur stratégie en matière de protection du littoral, mérite une analyse plus détaillée. Ces deux pays privilégient autant que possible les

méthodes douces pour protéger leur littoral (Figure II.3). De plus, leur littoral se situe dans la continuité de notre site d'étude et possède donc des caractéristiques et problématiques comparables.

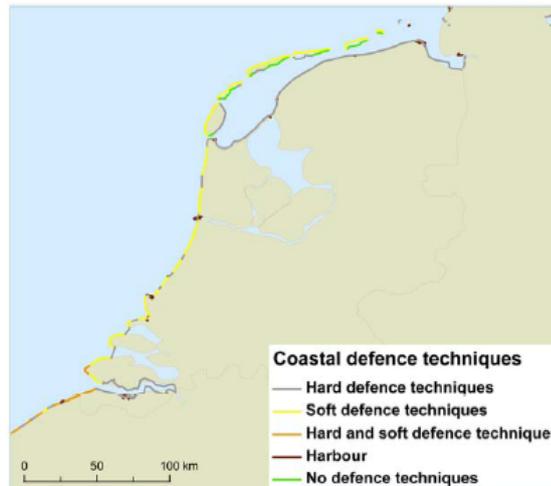


Figure II.3 Les types de défenses côtières en Belgique et Pays-Bas (OSPAR, 2009)

3.2.1. Les Pays-Bas : leader européen en rechargement sédimentaire

Avec 9 millions de personnes (sur 16,7 millions au total) vivant dans les secteurs sous le niveau moyen marin, la protection du littoral, afin d'assurer la sécurité des basses terres, représente un enjeu vital aux Pays-Bas (Stive *et al.*, 2013). 65 % de leur produit national brut est de plus généré dans la région côtière. Ce pays possède 350 km de côte découpée en 3 parties : *the Delta coast*, *the Holland coast* et *the Wadden coast* (Tableau II.2). La nécessité d'une gestion de l'érosion du littoral va s'accroître dans un contexte de changement climatique étant donné la vulnérabilité des côtes néerlandaises face aux submersions marines et inondations. Actuellement, 75% des côtes sont protégées par des dunes, dont la largeur varie de 100 m à quelques kilomètres, et 15 % par des ouvrages comme les digues (Mulder *et al.*, 2011). Les digues sont d'ailleurs les premiers remparts contre la mer depuis le 9^{ème} siècle et ont longtemps été le plus important moyen de protection de leur littoral.

L'expérimentation des rechargements de plage a débuté dans les années 1950 étant donné les résultats concluants de cette technique aux Etats-Unis et en Allemagne (Roelse, 1990). La tempête de 1953 qui a frappé la mer du Nord, *The Great Surge*, s'est révélée être un élément déclencheur dans la politique de gestion du littoral des Pays-Bas. Cette tempête a effectivement fait 1835 victimes, 750 000 habitants ont été touchés et environ 160 000 hectares ont été inondés (van Veen, 1962).

Après cette tempête, le gouvernement hollandais adopte une nouvelle politique en matière de sécurité face aux inondations définie dans le Plan Delta (Roeland & Piet, 1995). Ainsi les digues et les dunes ont été renforcées et une dizaine de barrages ont été construits entre les années 60 et 80 (van Koningsveld & Mulder, 2004). Ces moyens de protection n'ont cependant pas arrêté l'érosion des côtes. C'est pourquoi, un virage dans la gestion du littoral néerlandais s'est opéré en 1990 avec l'implantation de la *Dynamic Preservation Policy* afin de combattre l'érosion des côtes (Mulder *et al.* 2011).

Bien que les rechargements sédimentaires soient utilisés occasionnellement depuis les années 60-70, c'est véritablement avec l'implantation de cette politique qu'a débuté l'utilisation

massive de cette méthode. Cette stratégie vise à stopper l'érosion des côtes par le maintien du trait de côte à sa position de 1990 par l'alimentation artificielle des plages principalement. Pour cela une ligne de référence a été définie appelée *Basal Coast Line* (Taal *et al.*, 2006). Avant 1990, c'est « seulement » 61,1 millions de m³ (1,61 millions de m³/an) qui ont alimenté les plages, dont environ 53% sont localisés dans la sous-région du Delta Coast. A partir de l'implantation de la *Dynamic Preservation Policy* en 1990, les Pays-Bas ont vu leur volume consacré aux rechargements sédimentaires exploser. Le volume total de 110 Mm³ estimé dans l'étude Hanson *et al.* (2002) est passé à 268,3 millions de m³ (van der Spek & Elias, 2013) en 2012. Ce volume est d'autant plus important si on le rapporte au nombre de kilomètres de côtes des Pays-Bas à savoir 350 km, soit environ 766 000 m³/km.

L'étude de van der Spek & Elias (2013) met en évidence également le changement de technique de rechargement utilisée par les néerlandais. Initialement, le pays utilisait exclusivement le rechargement de plage et ce, jusque dans les années 90 environ. L'inconvénient de ce type de rechargement est d'entraîner une érosion rapide du volume excédentaire de sable. Le rechargement d'avant-plage est donc venu progressivement remplacer le rechargement de plage, pour enfin devenir la technique privilégiée aux Pays-Bas depuis les années 2000 en raison de sa durée de vie plus longue, de 3 à 5 ans, et de son coût moins important (Hamm *et al.*, 2002; van der Spek & Elias, 2013).

Les volumes consacrés à ces rechargements vont de 1 à plusieurs millions de m³ de sable (Hanson *et al.*, 2002; van der Spek & Elias, 2013). Avec des rechargements d'avant-plage, une modification des processus dans la zone de surf s'opère entraînant l'atténuation voire l'annulation dans certains cas de l'érosion de la plage (Grunnet & Ruessink, 2005; van Duin *et al.*, 2004). La Figure II.4 récapitule l'évolution des volumes annuels utilisés pour les rechargements aux Pays-Bas de 1991 à 2012. Le début de la pratique du rechargement de l'avant-plage est également mis en évidence dans cette figure.

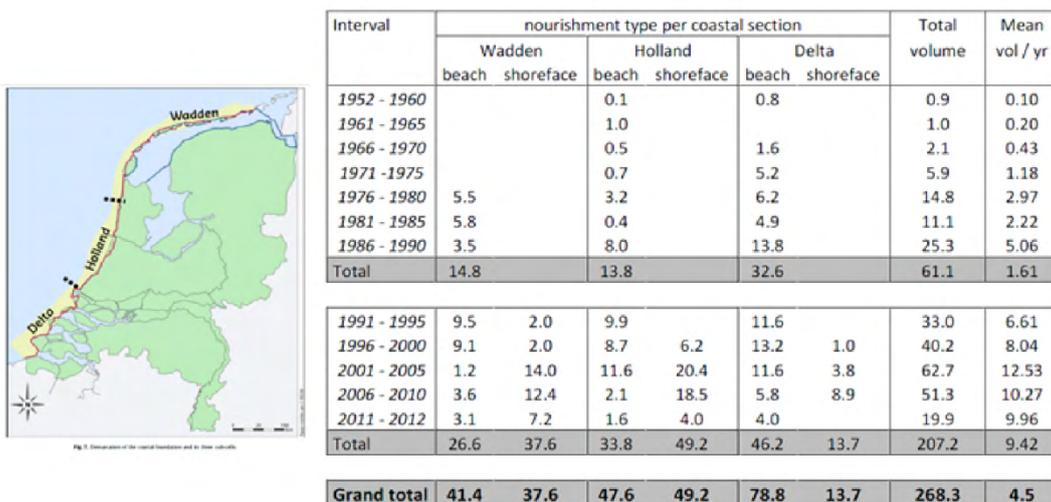


Tableau II.2. Volume de sables (en Mm³) (van der Spek & Elias, 2013)

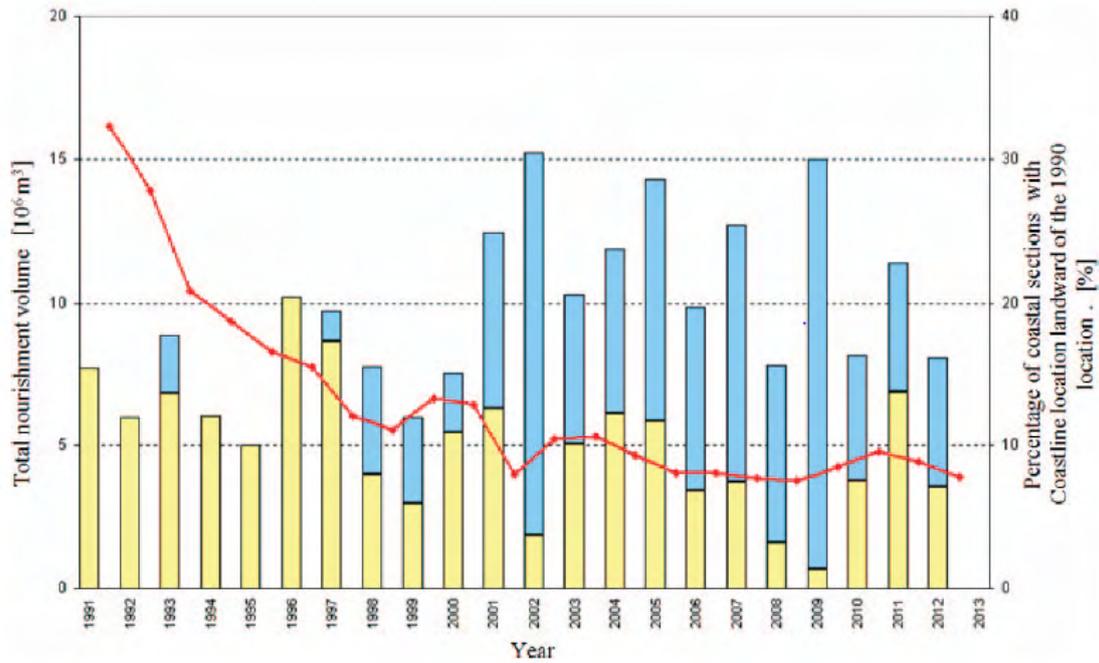


Figure II.4. Evolution des volumes annuels de rechargements de plage (en jaune) et d'avant plage (en bleu) de 1991 à 2012 (Stive *et al.*, 2013)

Des études néerlandaises (de Schipper, 2014; Stive *et al.*, 2013) font référence également à un troisième type de rechargement : le *mega-nourishment*. Cette catégorie a notamment été créée pour le rechargement de 21 Mm³ situé entre Ter Heijde et Kijkduin au sud des Pays-Bas. Les opérations réalisées pour ce rechargement se sont déroulées de mars à novembre 2011. Cette expérience innovante appelée « *The Sand Engine* » ou « *Sand Motor* » (<http://www.dezandmotor.nl>) s'inscrit dans une philosophie de construire avec la nature (« *building with nature* »). Créée à partir de sable dragué à environ 10 km au large du site d'accueil, cette péninsule de 128 hectares en forme de crochet s'étendait à la fin des travaux sur 2 km de longueur et 1 km de largeur (Figure II.5). La finalité de ce rechargement est avant tout d'assurer la protection d'une large portion du littoral, environ 10 km selon les modélisations, contre les submersions marines et inondations. Pour cela, le concept est de laisser les processus naturels et les agents dynamiques opérer pour redistribuer en douceur les sédiments le long du littoral.

Contrairement aux rechargements d'avant-plage dont la durée de vie est d'environ 3 à 5 ans, le Sand Motor présente l'avantage d'avoir une espérance de vie beaucoup plus longue, de l'ordre de 20 ans. De ce fait, l'écosystème sera moins souvent perturbé par les travaux répétés (dragage, rainbowing, reprofilage). Ce projet s'inscrit également dans une volonté de créer de nouveaux espaces naturels et touristiques. La forme initiale de crochet de la péninsule a été pensée pour qu'elle puisse offrir des espaces propices à l'installation d'espèces lors de son évolution comme c'est le cas avec le développement de la lagune (Stive *et al.*, 2013). Ce projet inclut un suivi complet de la morphologie mais également de la biologie et des écosystèmes.

Les rechargements sédimentaires sont également bénéfiques aux dunes. Des transferts entre plage et dunes sont mis en évidence et 26% du volume de sable issu des rechargements s'accumule dans les dunes (Arens *et al.*, 2013) lors d'un suivi effectué entre 1993 et 2008.



Figure II.5 A) Sand Motor en juillet 2011 (source : Joop van Houdt / Rijkswaterstaat) et B) Sand Motor en août 2016 (source : <http://www.dezandmotor.nl/>)

Avec une telle pratique et l'expérimentation continue de nouveaux concepts, les Pays-Bas sont les leaders européens en termes d'utilisation de cette méthode de protection du littoral. Cette tendance va se confirmer dans les années futures étant donné la stratégie de protection du littoral adoptée par les Pays-Bas. En effet, la Commission delta 2008 a livré des recommandations afin de maintenir la sécurité face à l'élévation du niveau marin dans un contexte de changement climatique (Kabat *et al.*, 2009). Le volume annuel de l'alimentation artificielle des côtes est déjà passé de 6 millions de m³/an en 1990 à 12 millions de m³/an en 2012 (Stive *et al.*, 2013).

3.2.2. La Belgique

La Belgique possède 67 km de côte composée de plages sableuses et de digues entrecoupées de dunes et de 4 zones portuaires de grande envergure, Nieuport, Ostende, Blankenberge et Zeebrugge. Comme aux Pays-Bas, cette portion de côte est fortement artificialisée. Dans l'arrière-pays, 400 000 habitants vivent dans les zones basses poldérisées.

Comme beaucoup de pays européens, la Belgique a connu au cours du 20^{ème} siècle un basculement progressif des ouvrages de protection en dur vers l'intégration de méthodes plus douces, comme les rechargements sédimentaires dans sa stratégie de protection du littoral. Selon le rapport (OSPAR, 2009), il est possible de comptabiliser sur le linéaire côtier belge 35 km de digues, 40 km d'épis, 20 km de rechargement sédimentaire, 20 km de reprofilage de plage et 20 km de reconstruction de dunes. Ainsi, et comme il est possible de le voir sur la Figure II.6 des combinaisons entre méthodes dures et douces sont souvent mises en place.

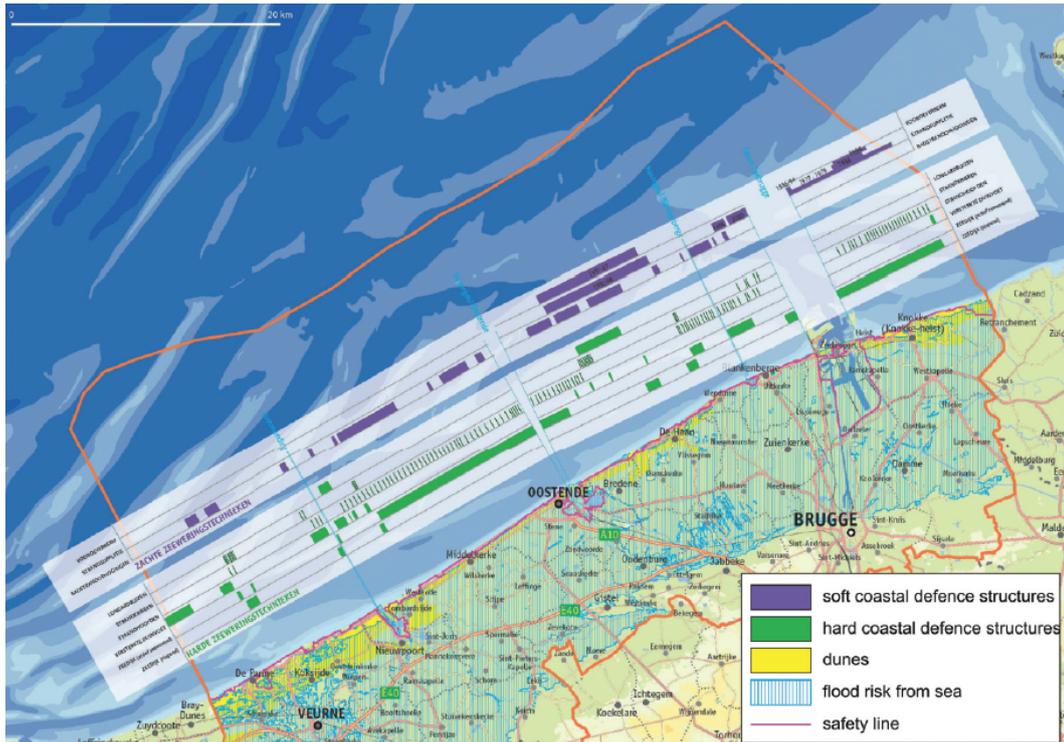


Figure II.6 : Méthodes douces et méthodes rigides le long de la côte belge (Verwaest *et al.*, 2015)

La première opération de rechargement aurait eu lieu en 1968 (Hanson *et al.*, 2002), mais aucun détail sur le lieu ni le volume n'est précisé. La première grosse opération de rechargement sédimentaire a eu lieu dans les années 70 avec l'extension du port de Zeebrugge. Ces travaux ont entraîné le dragage de plusieurs millions de tonnes de sédiments. Le gouvernement décida alors d'utiliser une partie de ce sable pour recharger la plage de Knokke en érosion (Charlier & De Meyer, 1995). La première étape du rechargement a eu lieu en 1977 avec 8,5 Mm³ placés sur 8 km de côte. Des suivis ont mis en évidence le développement de dunes grâce au transport éolien en provenance du haut de plage rechargé. Cette plage a en contrepartie subi une érosion de 50³/ml lors des 2 premières années après les travaux. Lors de la seconde étape, c'est 1 Mm³ qui a été déposé sur la plage en 1986 sur 2,5 km.

Désormais le rechargement sédimentaire est une méthode commune de protection du littoral en Belgique. Selon Hanson *et al.* (2002), la Belgique aurait mis en œuvre au total un volume de 18,3 Mm³ de sable pour les rechargements depuis les premières expérimentations. Contrairement aux Pays-Bas, aucune étude n'est disponible pour apporter un état des lieux complet des rechargements en Belgique et de leur localisation (Vanden Eede, 2013).

La Figure II.7 donne un aperçu de l'évolution des volumes annuels mis en œuvre pour les rechargements sédimentaires entre 1992 et 2014. Des pics d'utilisation sont visibles en 1992, 1995, 1996 et 1999 mais on constate une utilisation régulière uniquement depuis 2004 avec des volumes qui n'ont cessé d'augmenter depuis 2011.

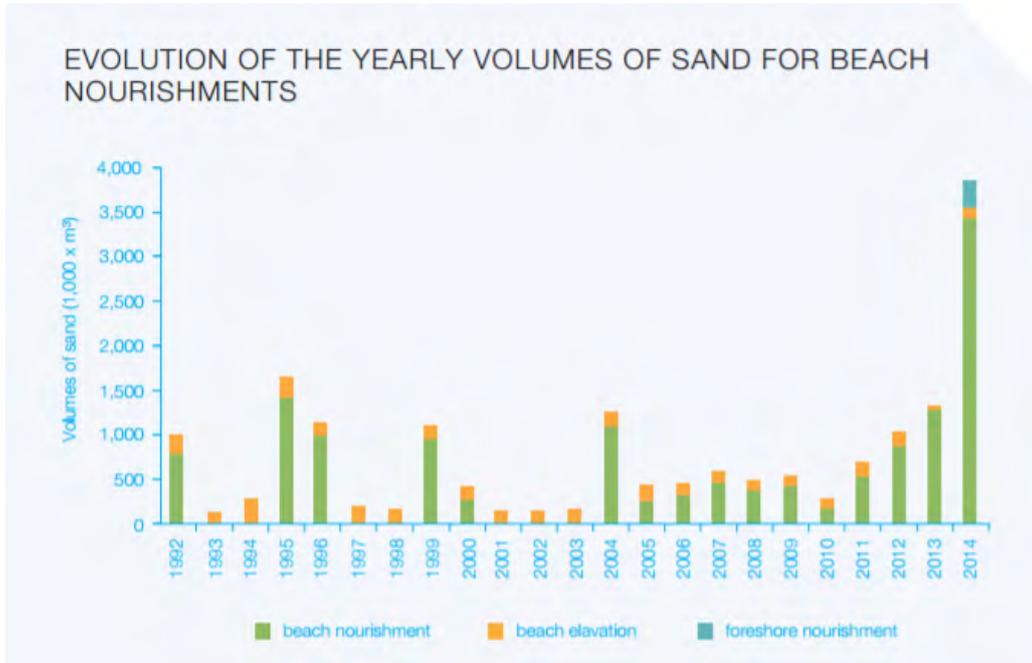


Figure II.7 Evolution des volumes annuels de sable pour les rechargements sédimentaires en Belgique entre 1992 et 2014 (Verwaest *et al.*, 2015)

Cette évolution des volumes depuis 2011 est à mettre en relation avec le plan directeur de sécurité côtière appelé *Integrated Master Plan for Coastal Safety*. En 2007, la Belgique a initié l'élaboration de ce programme afin de mettre en place des mesures pour assurer la défense de la côte et de l'arrière-pays belge en élevant le niveau de protection pour répondre à des événements extrêmes de période de retour de 1000 ans tout en prenant en compte les effets du changement climatique comme une élévation du niveau marin de +30 cm d'ici 2050 (Mertens *et al.*, 2009). Ce Master Plan a été approuvé en juin 2011 et pose donc les bases d'une nouvelle stratégie de protection littorale pour la Belgique pour un futur proche et lointain (jusqu'en 2050). L'analyse de différentes mesures de protection a été réalisée selon tout un panel de paramètres comme la localisation et les caractéristiques du milieu, les enjeux qui y sont associés, les réductions du risque d'inondation, les impacts environnementaux ou encore l'étude coût/bénéfice (Mertens *et al.*, 2011). Le coût de ce programme s'élève à 300 millions d'euros.

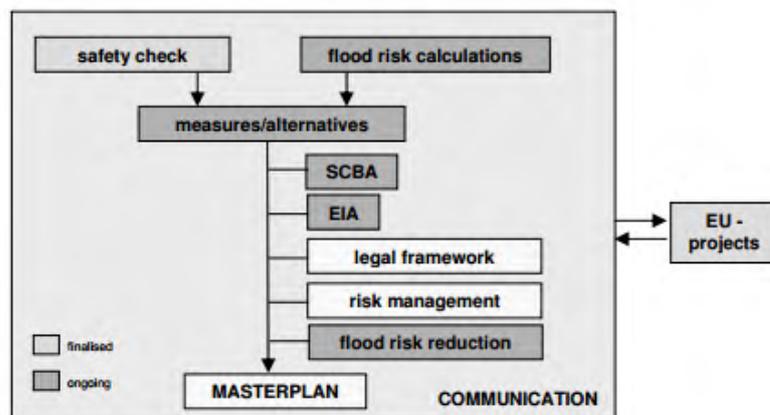


Figure II.8 Différents éléments du Master Plan (Mertens *et al.*, 2009)

20 Mm³ de sable seront nécessaires pour effectuer les réensablements de plage et protection de dunes ainsi que pour les entretenir jusqu'en 2050. La durée de vie des réensablements est prévue pour 5 ans afin d'ajuster les volumes en fonction de l'élévation du niveau marin et pour ne pas surdimensionner le rechargement du profil de plage (Mertens *et al.*, 2011). Les structures rigides sont repensées afin de s'adapter aux nouvelles problématiques liées à l'élévation du niveau de la mer, comme par exemple l'élévation de la hauteur des digues, l'installation de murets anti-inondation ou la construction d'ouvrages atténuateurs de vagues. Une combinaison de méthodes souples et rigides est également envisagée en fonction des enjeux des différents secteurs. Le Tableau II.3 rassemble les projets prévus dans le cadre de cette stratégie. Il est possible de trouver dans la presse des informations quant à certaines opérations. Par exemple sur la plage de Middelkerke à côté d'Oostende, un rechargement de 950 000 m³ a été effectué en 2014 (<https://www.rtbf.be/>). A Oostende des structures rigides sont combinées à des méthodes plus souples afin de garantir une protection optimale face aux assauts de la mer. Un rechargement de plage provisoire a été réalisé en 2004 et dimensionné pour résister à un événement d'une période de retour de 100 ans, suivi par la rénovation de la digue combinée à un ouvrage atténuateur de vagues ainsi qu'à un rechargement massif de 1,6 Mm³ en 2012-2013 (<http://afdelingkust.be/>) (Figure II.9).

COASTAL ZONE	COASTAL PROTECTION MEASURE
De Panne	dune nourishment + beach nourishment
St. Idesbald - Koksijde	beach nourishment
Koksijde	dune nourishment + reconstruction of road
Harbour of Nieuwpoort	storm surge barrier
Middelkerke - Westende	beach nourishment + storm return wall around casino
Raversijde – Mariakerke	beach nourishment + storm return wall
Oostende center	beach nourishment + stilling wave basin
Harbour of Oostende	storm return wall
East Bank of Oostende	beach nourishment
De Haan-Wenduine	beach nourishment + storm return wall
Harbour of Blankenberge	storm return wall + erosion resistant slopes
Blankenberge	beach nourishment
Harbour of Zeebrugge	storm return wall + erosion resistant slopes
Knokke-Heist	beach nourishment
Zwin	International dyke

Tableau II.3 Tableau récapitulatif des travaux prévus dans le cadre du Master Plan (Mertens *et al.*, 2009)

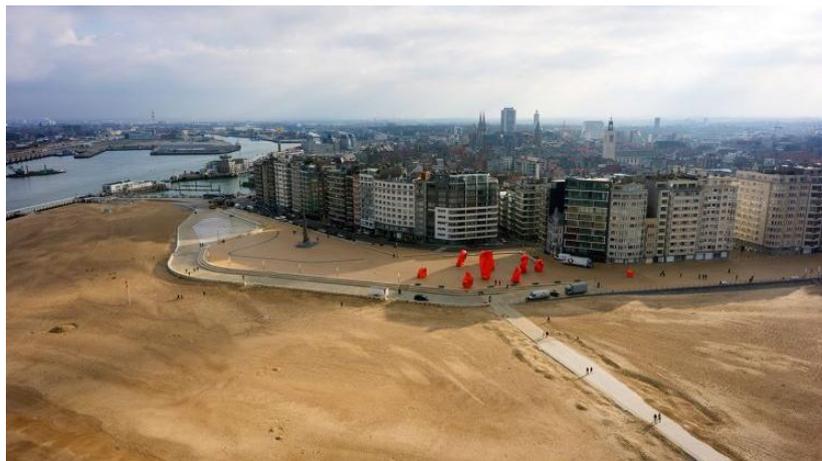


Figure II.9 Aménagements réalisés à Oostende avec rechargement de la plage et rénovation du front de mer avec la création d'un ouvrage atténuateur de houles (<http://afdelingkust.be>)

Chapitre III. Les rechargements sédimentaires en France

1. Méthodologie

1.1. Inventaires disponibles

Peu de publications inventorient les opérations de rechargements sédimentaires en France. En 1993, Alain Miossec réalise un premier inventaire, limité à la façade Atlantique, bien que des opérations de rechargements sédimentaires aient été menées ailleurs le long des côtes françaises (Miossec, 1993).

Douze opérations sont ainsi recensées. Cet inventaire reste cependant assez succinct. En effet, aucune information concernant les dates des travaux, les volumes concernés ou encore les longueurs de plage rechargée ne sont répertoriés. En plus des localisations, une seule information supplémentaire est néanmoins fournie concernant la provenance du sable utilisé pour le rechargement : sables pris dans un port, sables dragués au large, sables pris sur une autre plage et enfin sables pris sur la plage elle-même. Cette dernière catégorie fait d'ailleurs référence plutôt à un remodelage d'estran si l'on s'en tient à notre définition de rechargement sédimentaire. Les opérations réalisées à La Baule et Saint-Jean-de-Luz peuvent par conséquent être exclues de l'inventaire étant donné que ce sont des remodelages de plage.

On répertorie donc dix rechargements de plage, dont un aux Sables d'Olonne qui était en projet à l'époque mais qui finalement s'est soldé par l'installation d'un système Ecoplage (Fattal & Walker, 2008). Parmi les neuf dernières opérations restantes :

- 4 correspondent à des rechargements dont le sable a été prélevé sur une autre plage : Saint-Brévin, Comberge, Fromentine et Cap Breton
- 2 font référence à des opérations où le sable a été dragué dans un port : Anglet et Saint-Brévin
- 2 ont été réalisées à partir de sable dragué au large : Arcachon et Châtelailon-Plage
- 1 rechargement à Brest, pour lequel le lieu de prélèvement des sédiments n'est pas indiqué

Selon Miossec, jusqu'en 1993, l'utilisation des rechargements sédimentaires sur la façade atlantique reste donc rare avec uniquement neuf opérations recensées.

Un second inventaire plus exhaustif a été réalisé par Solange Pupier-Dauchez dans sa thèse (Pupier-Dauchez, 2002) (Figure III.1). Ce recensement se révèle être une source documentaire importante pour faire un état des lieux des rechargements jusqu'au début des années 2000.

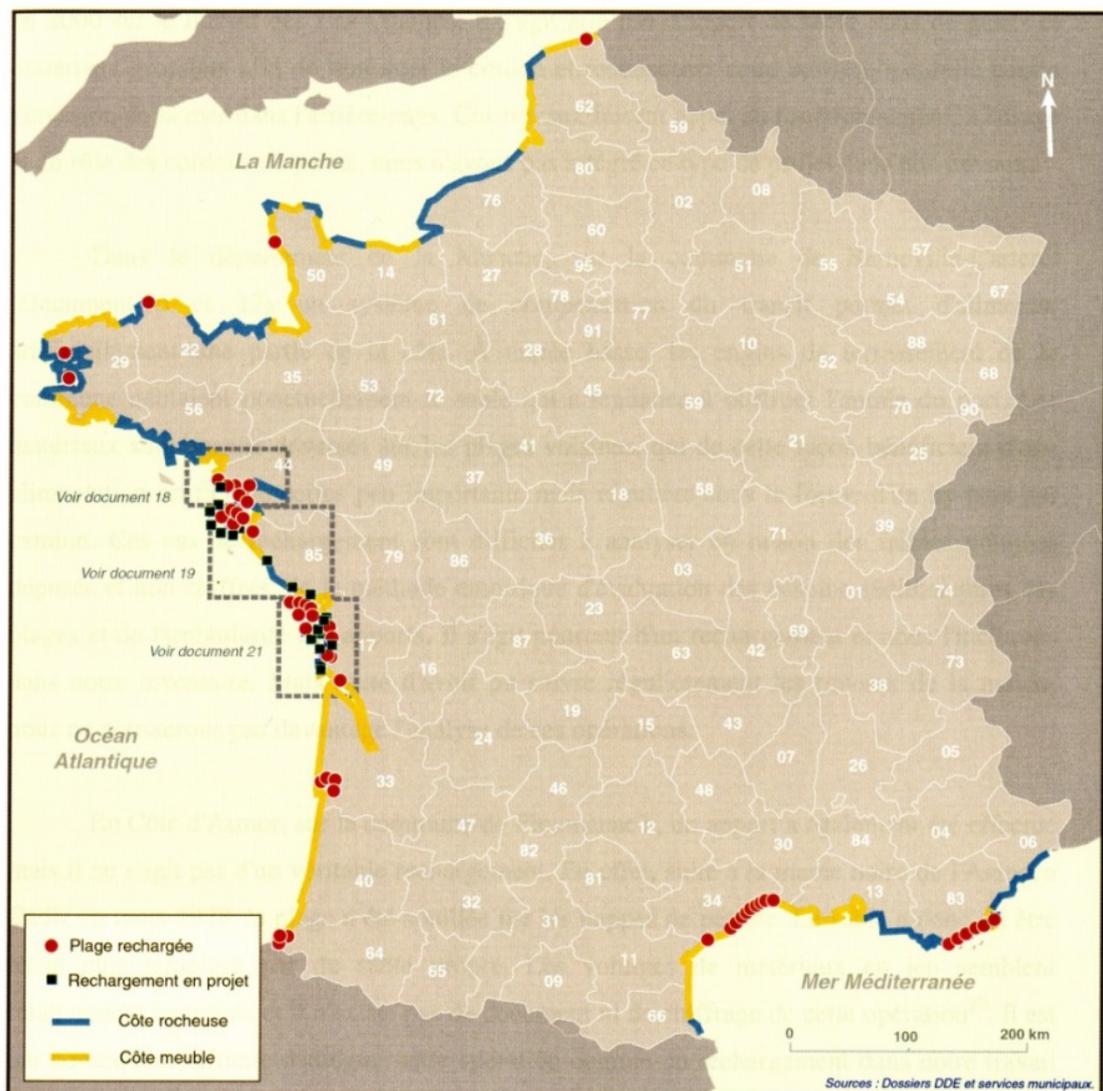


Figure III.1 Carte de la localisation des rechargements sédimentaires mis en œuvre jusqu'en 2002 ou en projet sur le territoire de la France métropolitaine (Pupier-Dauchez, 2002)

Il existe également un autre inventaire, issu du projet SAFE (Hanson *et al.*, 2002), publié la même année que la thèse de Pupier-Dauchez (2002). La partie française de l'étude a été réalisée par le bureau d'études Sogreah. Cette référence n'a pas été employée comme source d'information par Pupier-Dauchez (2002) étant donné l'imprécision de certaines informations selon elle. Le manque de vérification des données, l'amalgame fait entre différentes opérations (pose de ganivelles incluse dans l'inventaire par exemple) et l'inexactitude de certains volumes sont critiqués par Pupier-Dauchez d'où le choix de ne pas utiliser ces informations dans son inventaire. Selon cette étude, 115 rechargements ont été réalisés en France sur 26 sites, représentant un volume total de 12 Mm³ de sédiment.



Figure III.2 Inventaire des opérations de rechargements de plage réalisé dans le cadre du projet SAFE (Hanson *et al.*, 2002)

1.2. Actualisation des données

Le travail très complet de Pupier-Dauchez (2002) s'est révélé être la principale source d'information afin d'établir un état des lieux des rechargements en France jusqu'au début des années 2000, en 2002 exactement, date de fin de collecte de données de Pupier-Dauchez. La Figure III.1 montre la localisation de tous les rechargements et projets répertoriés dans la thèse de Pupier-Dauchez. L'année 2002 marquera donc la limite arbitraire avec laquelle les données actualisées pourront être comparées. Néanmoins au cours de nos recherches visant à actualiser ce premier inventaire, un certain nombre de rechargements sédimentaires mis en œuvre avant 2002 et non mentionnés par Pupier-Dauchez ont été découverts. C'est pourquoi sa base de données a été complétée afin de bénéficier d'un inventaire plus exhaustif jusqu'en 2002. Le Tableau III.1-A récapitule les données de Pupier-Dauchez (2002) tandis que le Tableau III.1-B présente les données complétées jusqu'en 2002.

Pour l'actualisation des données jusqu'en 2016, plusieurs sources d'informations ont été sollicitées. Dans un premier temps, une demande par courriel a été envoyée à chaque Direction Départementale des Territoires et de la Mer (DDTM), dans certains cas un entretien téléphonique a directement pu être effectué. Les DDTM doivent en effet être sollicitées par les maîtres d'œuvres souhaitant effectuer un rechargement sédimentaire. Les DDTM sont donc susceptibles de bénéficier de bases de données des opérations qui ont eu lieu sur leur territoire. Plusieurs cas de figures se sont alors présentés :

A Inventaire corrigé et complété de Pupier-Dauchez (2002)							B Inventaire corrigé et complété de Pupier-Dauchez (2002)						
Départements	Nombre de communes concernées	Volume total	Nombre d'opération	Région	Départements	Nombre de communes concernées	Nombre d'opération	Volume minimal ¹ (Mm ³)	Volume maximal ¹ (Mm ³)	Volume total du département (Mm ³)	Volume total de la région (Mm ³)		
Nord (59)	1	300 000,00	2	Hauts-de-France	Nord (59)	1	>5	140 000,00	250 000,00	890 000,00 *	890 000,00 *		
Pas de Calais (62)	0	0,00	-		Pas de Calais (62)	0	-	-	-	0,00	0,00		
Somme (80)	0	0,00	-		Somme (80)	0	-	-	-	0,00	0,00		
Seine-Maritime (76)	0	0,00	-	Normandie	Seine-Maritime (76)	0	-	-	-	0,00	0,00		
Eure (27)	0	0,00	-		Eure (27)	0	-	-	-	0,00	0,00		
Calvados (14)	0	0,00	-		Calvados (14)	0	-	-	-	0,00	?		
Manche (50)	1	?	1		Manche (50)	1	1	?	?	?	?		
Ille-et-Vilaine (35)	0	0,00	-	Bretagne	Ille-et-Vilaine (35)	0	-	-	-	0,00	0,00		
Côtes d'Armor (22)	0	0,00	-		Côtes d'Armor (22)	0	-	-	-	0,00	0,00		
Finistère (29)	2	190 000,00	2		Finistère (29)	6	11	5 000,00	166 000,00	402 886,00	442 886,00 *		
Morbihan (56)	0	0,00	-		Morbihan (56)	2	2	40 000,00	40 000,00	40 000,00 *	40 000,00 *		
Loire-Atlantique (44)	6	217 000,00	9	Pays de la Loire	Loire-Atlantique (44)	6	9	2 000,00	100 000,00	217 000,00	395 400,00		
Vendée (85)	3	107 600,00	7		Vendée (85)	4	13	3 500,00	50 000,00	178 400,00	178 400,00		
Charente-Maritime (17)	11	1 026 100,00	14	Nouvelle-Aquitaine	Charente-Maritime (17)	13	>22	2 000,00	330 000,00	1 117 500,00	1 117 500,00		
Gironde (33)	4	2 392 615,00	89		Gironde (33)	4	92	2 100,00	168 000,00	2 510 715,00	2 510 715,00		
Landes (44)	0	0,00	-		Landes (44)	0	-	-	-	0,00	0,00		
Pyrénées-Atlantiques (64)	2	8 157 700,00	>58		Pyrénées-Atlantiques (64)	2	>64	1 000,00	790 000,00	8 175 700,00 *	8 175 700,00 *		
Pyrénées-Orientales (66)	0	0,00	-	Occitanie	Pyrénées-Orientales (66)	3	>26	500,00	30 000,00	246 100,00 *	246 100,00 *		
Aude (11)	0	0,00	-		Aude (11)	0	-	-	-	0,00	0,00		
Hérault (34)	5	959 000,00 *	>11		Hérault (34)	5	>16	5 000,00	270 000,00	1 027 000,00 *	1 453 100,00 *		
Gard (30)	0	0,00	-		Gard (30)	1	1	180 000,00	180 000,00	180 000,00	180 000,00		
Bouches-du-Rhône (13)	0	0,00	-	Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Bouches-du-Rhône (13)	0	-	-	-	0,00	0,00		
Var (83)	6	226 300,00	6		Var (83)	6	6	2 300,00	200 000,00	226 300,00	338 200,00 *		
Alpes-Maritimes (06)	0	0,00	-		Alpes-Maritimes (06)	3	>20	140,00	70 000,00	111 900,00 *	111 900,00 *		
Haute-Corse (2B)	0	0,00	-	Corse	Haute-Corse (2B)	1	2	15 000	100 000,00	115 000,00	115 000,00 *		
Corse-du-Sud (2A)	0	0,00	-		Corse-du-Sud (2A)	0	-	-	-	0,00	0,00		

* volume de certaines opérations non disponible

Spodar, 2018

Volume total avant 2002 : 15 438 501,00

Tableau III.1 A) Bilan des données concernant les rechargements sédimentaires jusqu'en 2002 en France issues de la thèse de Pupier-Dauchez (2002) - B) Inventaire complété et corrigé des rechargements sédimentaires en France jusqu'en 2002 (en bleu figurent les départements dont les données ont été complétées et/ou corrigées de l'inventaire de Pupier-Dauchez (2002))

- Réponse de la part des DDTM :
 - o Présence de rechargements sédimentaires :
 - transmission d'une liste de données plus ou moins exhaustive concernant les rechargements sédimentaires qui ont été réalisés au sein du département
 - ou absence de bases de données disponibles mais transmission d'informations complémentaires (notamment autres contacts)
 - o Absence de rechargements sédimentaires ou aucune information disponible
- Absence de réponse de la part des DDTM

D'autres organismes (Syndicats mixtes, communautés de communes etc.) ont également été contactés par le biais des DDTM, ce qui a permis de compléter le recensement des opérations. Une recherche bibliographique a également pu venir compléter cet inventaire grâce à des articles scientifiques, plans de gestion des sédiments, rapports techniques ou articles de presses. L'ensemble des sources utilisées pour cet inventaire sont synthétisés dans l'Annexe 3.

Il est globalement assez difficile de trouver des détails sur les opérations autres que les dates et volumes mis en œuvre, bien qu'une multitude de caractéristiques permette de décrire un rechargement sédimentaire (coût, volume par mètre linéaire, granulométrie, technique de mise en œuvre...). C'est pourquoi ces deux paramètres – date et volume - sont à la base de cette analyse. Dans la mesure du possible, d'autres informations complémentaires (zone de prélèvement, linéaire du rechargement etc) ont été compilées.

La liste de rechargements sédimentaires actualisée depuis 2002 est non exhaustive étant donné la difficulté de répertorier l'ensemble des opérations. De plus les volumes indiqués ne sont que des valeurs minimales.

La difficulté de trouver des données et informations est une forme de résultat en soi mettant en évidence le manque de bases de données au niveau local comme au niveau national concernant cette pratique. Ce type de protection du littoral ne semble pas systématiquement répertorié au sein des DDTM alors que dans l'idéal un suivi simple mais rigoureux permettrait d'avoir des éléments de retours d'expériences pour de futures opérations.

2. Etats des lieux des rechargements sédimentaires en France

L'analyse va être menée en faisant un point sur les rechargements par régions et départements jusqu'en 2002, puis les données recueillies dans le cadre de ce travail doctoral vont permettre d'actualiser cet inventaire pour la période 2003-2016 (Tableau III.2 et Figure III.3).

Du début des années 50 jusqu'en 2002, un volume total d'environ 15,4 Mm³ de sable est comptabilisé (Tableau III.1-B et Figure III.4-A). De 2003 à 2016, il est possible de comptabiliser un volume de 14,4 Mm³. L'analyse par région et départements va néanmoins permettre de mettre en évidence certaines disparités (Figure III.4).

Inventaire de 2003 à 2016

Région	Départements	Nombre de communes concernées	Nombre d'opérations	Volume minimal ¹ (m ³)	Volume maximal ¹ (m ³)	Volume total du département (m ³)	Volume total de la région (m ³)
Hauts-de-France	Nord (59)	1	5	60 000,00	3 000 000,00	4 648 400,00	4 718 400,00
	Pas de Calais (62)	2	4	3 000,00	50 000,00	68 000,00	
	Somme (80)	1	1	2 000,00	2 000,00	2 000	
Normandie	Seine-Maritime (76)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	18 000,00 *
	Eure (27)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
	Calvados (14)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
	Manche (50)	3	>3	2 000,00	10 000,00	18 000,00 *	
Bretagne	Ille-et-Vilaine (35)	0	0	-	-	0,00	377 237,00
	Côtes d'Armor (22)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
	Finistère (29)	7	10	500,00	35 000,00	95 000,00	
	Morbihan (56)	5	6	1 037,00	200 000,00	282 237,00	
Pays de la Loire	Loire-Atlantique (44)	1	2	8 000,00	210 000,00	218 000,00	529 770,00
	Vendée (85)	6	13	570,00	51 000,00	311 770,00	
Nouvelle-Aquitaine	Charente-Maritime (17)	11	23	1 500,00	300 000,00	1 052 300,00	5 700 222,00 *
	Gironde (33)	8	68	100,00	1 100 000,00	3 046 903,00	
	Landes (44)	0	-	-	-	0,00	
	Pyrénées-Atlantiques (64)	4	27	3 000,00	378 000,00	1 601 019,00 *	
Occitanie	Pyrénées-Orientales (66)	3	32	2 500,00	60 000,00	440 800,00 *	2 861 300,00 *
	Aude (11)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
	Hérault (34)	7	11	20 000,00	600 000,00	2 265 500,00	
	Gard (30)	1	1	155 000,00	155 000,00	155 000,00	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Bouches-du-Rhône (13)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	388 947,00 *
	Var (83)	2	2	3 000,00	12 000,00	15 000,00	
	Alpes-Maritimes (06)	8	>51	30,00	57 000,00	373 947,00 *	
Corse	Haute-Corse (2B)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Corse-du-Sud (2A)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
Volume (m³) total à partir de 2003 :						14 593 876,00	

* volume de certaines opérations non disponible

¹ analyse faite uniquement sur les volumes connus

n/a : non disponible

Spodar, 2018

Tableau III.2 Caractéristiques des rechargements sédimentaires par départements entre 2003 et 2016

L'ensemble des opérations toutes dates confondues se localisent sur la Figure III.3. Sur cette figure est également indiqué l'emplacement des secteurs géographiques (A Façade Manche-mer du Nord, B nord de la façade atlantique, C sud de la façade atlantique et D façade méditerranéenne) qui seront étudiés plus particulièrement dans la partie suivante. Dans ces secteurs géographiques seront présentés les volumes des rechargements ainsi que leurs répartitions en fonction de la date des opérations (avant et après 2002). Les volumes seront exprimés sous la forme de diagramme circulaire dont la surface est proportionnelle au volume total par commune. A noter que les écarts entre les valeurs extrêmes des rechargements par communes sont tellement importants qu'il n'a pas été possible de représenter proportionnellement les volumes inférieurs à 20 000 m³. L'échelle des diagrammes est constante entre les cartes des secteurs géographiques en revanche l'échelle géographique de chaque carte est différente.

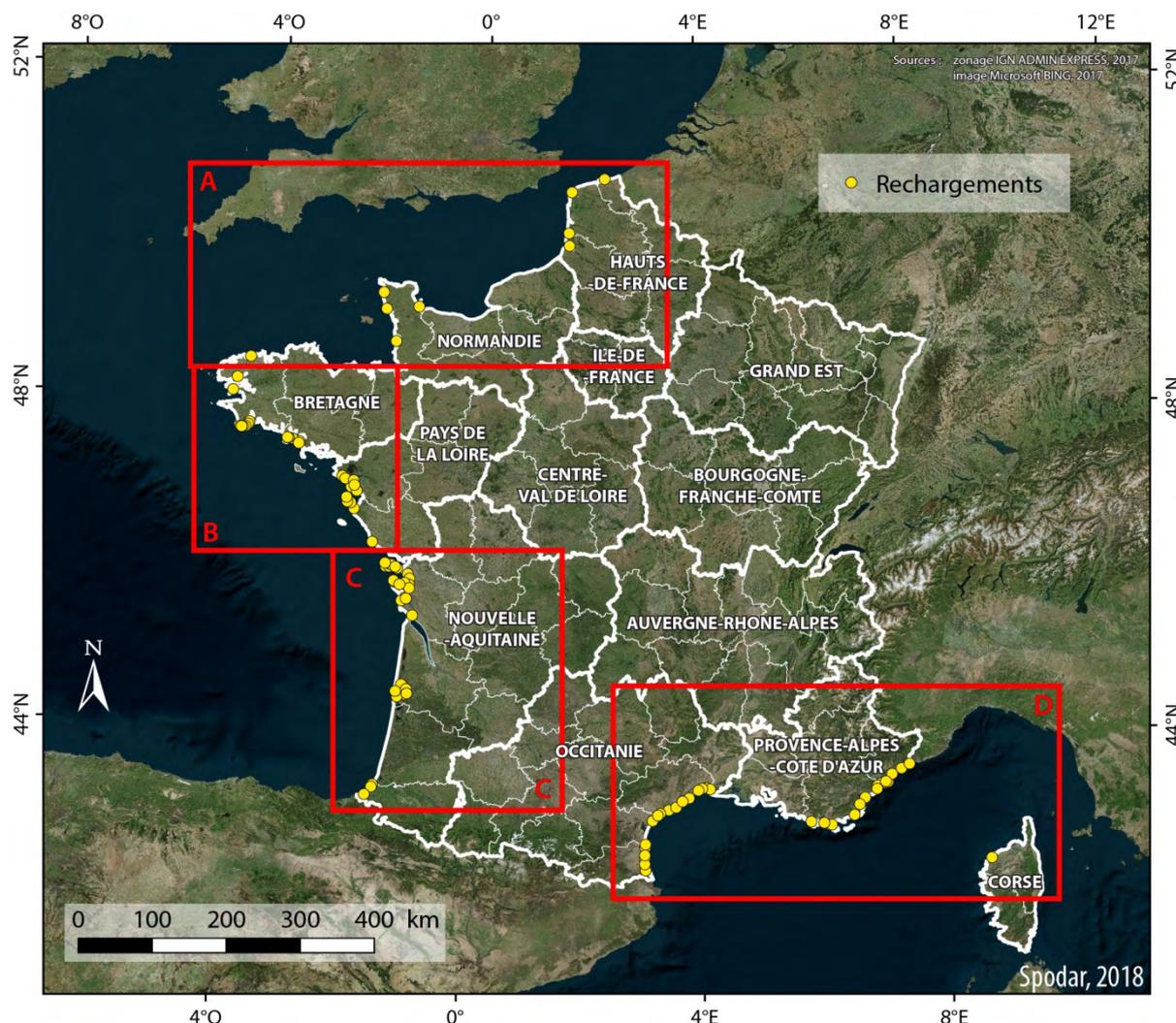


Figure III.3. Carte communes ayant mis en œuvre des rechargements sédimentaires en France métropolitaine et grands secteurs géographiques (A – Façade Manche-mer du Nord, B – nord de la façade atlantique, C - sud de la façade atlantique et D façade méditerranéenne)

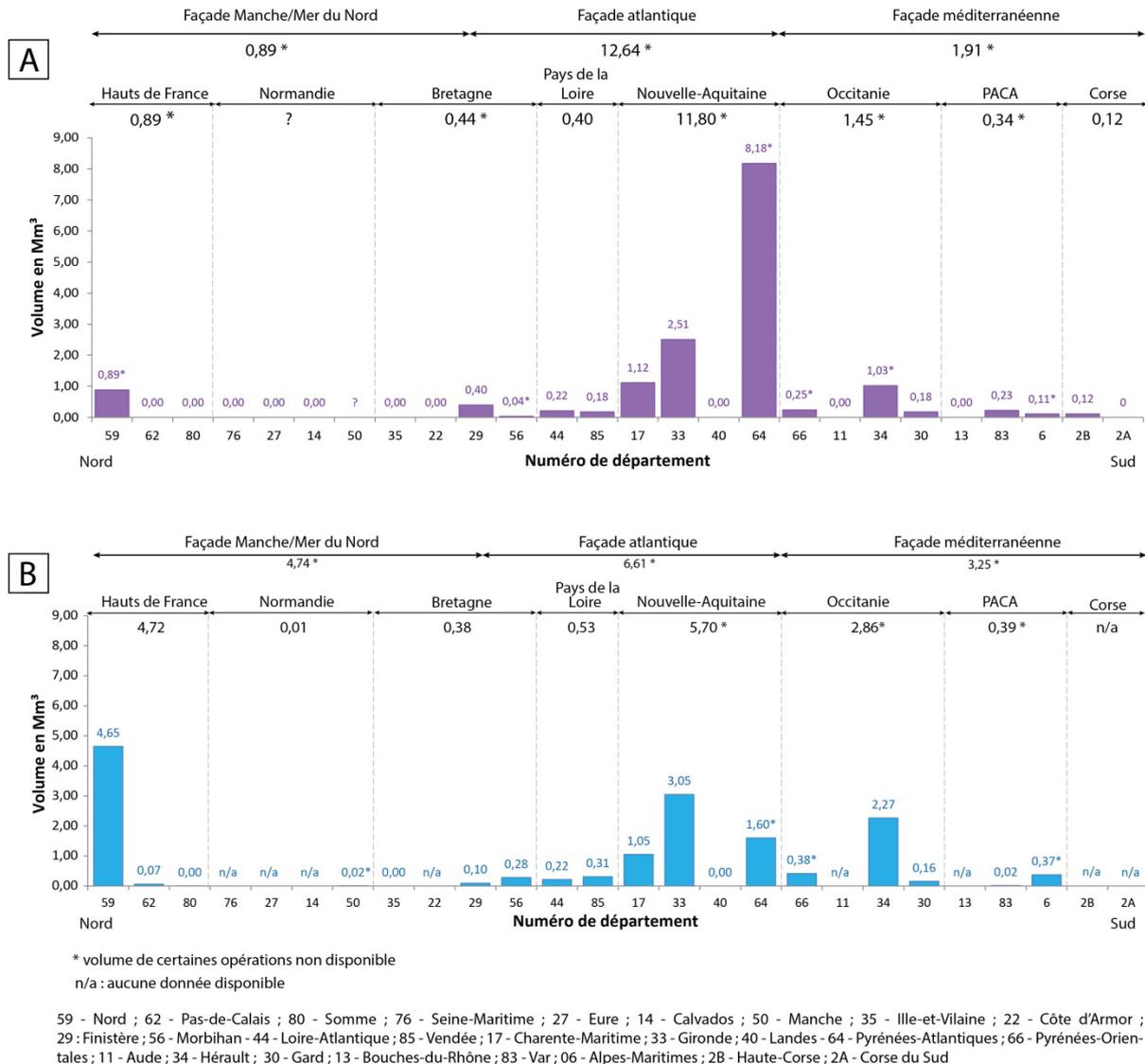
2.1. Façade Manche-Mer du Nord

La façade Manche-Mer du Nord est celle qui comptabilisait le moins d'opérations jusqu'en 2002 (Figure III.4-A). En termes de volumes, 0,89 Mm³ de sable seulement avait été mis en œuvre. Les départements du Nord (0,89 Mm³ au minimum) et de la Manche (volume de l'unique opération effectuée à Barneville-Carteret inconnu) sont les seuls à avoir implémenté cette technique. Entre 2003 et 2016, le volume global de sable utilisé pour cette méthode atteint 4,73 Mm³. De grandes disparités demeurent néanmoins entre les régions et départements qui bordent cette façade maritime.

2.1.1. Hauts de France

Dunkerque est la seule commune des Hauts-de-France à avoir utilisé cette méthode avant 2002. Pupier-Dauchez (2002) ne faisait référence qu'à deux rechargements effectués en 1978 et 1988, pour un volume de 150 000 m³ lors de chaque opération. Nos recherches ont permis de compléter ces informations. Les deux opérations effectuées en 1978 et 1988 correspondent en

réalité à des rechargements de 250 000 m³ et 140 000 m³ respectivement (Oblinger, 2008). De plus, d'autres rechargements de plage ont été effectués dans le cadre de travaux d'agrandissement du port ouest de Dunkerque entre 1983 et 1988, comme l'indiquent les travaux de Bertier (2009) et Tresca (2013). Tous les volumes ainsi que le détail des opérations ne sont néanmoins pas connus. La finalité de tous ces rechargements était de protéger des infrastructures et ouvrages portuaires. Aucune autre opération ne semble avoir été effectuée dans les départements du Pas-de-Calais et de la Somme.



Spodar, 2018

Figure III.4 Volumes par départements, régions et façades maritimes jusqu'en 2002 (A) et de 2003 à 2016 (B)

Entre 2003 et 2016, c'est un total de 4,72 Mm³ de sable qui ont été utilisés pour les rechargements sédimentaires dans les Hauts-de-France (Figure III.4-B). Cette région se place donc en deuxième position des plus utilisatrices en termes de volumes mis en œuvre depuis 2003. La quasi-totalité de ce sable, soit 4,65 Mm³, concerne uniquement le département du Nord et la commune de Dunkerque (Figure III.5). Comme c'était le cas avant 2002, une partie des rechargements effectués sont liés aux travaux d'agrandissements et d'aménagements du port de Dunkerque. De manière

générale, tous ces rechargements ont comme point commun la défense du littoral ainsi que la protection d'infrastructures et ouvrages portuaires.

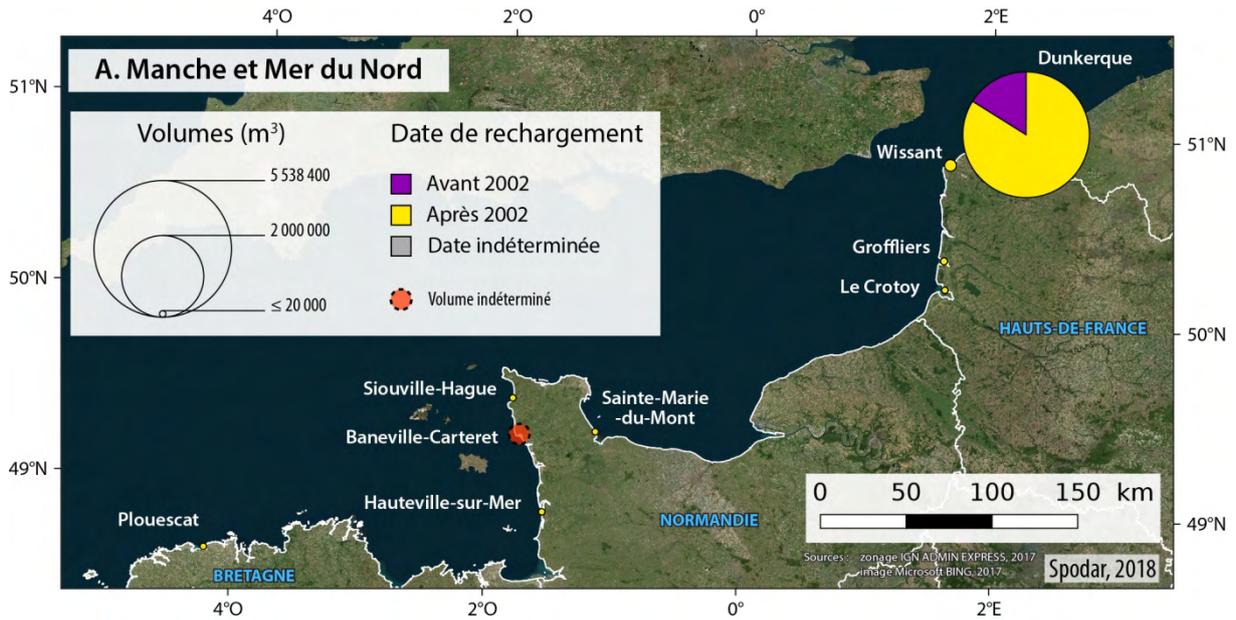


Figure III.5 Localisation des rechargements sédimentaires sur la façade Manche/Mer du Nord

Dans le Pas-de-Calais, l'actualisation des rechargements à partir de 2003 a permis de mettre en évidence l'émergence de l'utilisation de cette méthode en 2011. La mise en œuvre de cette technique est néanmoins modeste avec seulement quatre opérations comptabilisées, dont trois à Groffliers, sur la rive nord de la baie d'Authie et un à Wissant (Figure III.5). La situation de ces deux sites est délicate puisqu'ils subissent une érosion sévère et les quatre opérations ont été effectuées en urgence. La station balnéaire de Wissant, localisée dans la baie qui porte le même nom, est encadrée de massifs dunaires, la dune de la baraque Fricot, la dune du Châtelet et la dune d'Aval dans sa partie Ouest et la dune d'Amont dans sa partie Est. La partie ouest et centrale de la baie connaît un fort problème d'érosion et de recul du trait de côte depuis plusieurs décennies. L'abaissement de l'estran au droit du perré de Wissant a engendré la fragilisation de l'ouvrage lors de tempêtes et plusieurs destructions de celui-ci ont été observées comme en 1999 (Paxion & Cohen, 2002) et en 2007 (Herbert *et al.*, 2009). La dune d'Aval, située à l'ouest du perré, est en érosion, avec un recul du trait de côte de l'ordre de 3,1 m/an entre 1963 et 2009 et plus récemment de 1,7 m/an entre 2008 et 2014 (Crapoulet, 2015). Cette situation est d'autant plus critique qu'un lotissement est situé à quelques mètres en arrière de la falaise dunaire. Afin de protéger la dune d'Aval, un rechargement d'urgence de 50 000 m³ en haut de plage et sur le front dunaire a été mis en œuvre en juillet 2016, le maître d'ouvrage étant la commune de Wissant. Ce rechargement, dont le coût s'élève à 1,3 million d'euros, a été complété par l'installation de plusieurs rangés de brise-lames en pieux. La Figure III.6 rend compte de l'évolution du site entre septembre 2016 (deux mois après le rechargement) et janvier 2017 (six mois après le rechargement).

Sur la rive nord Baie d'Authie (Figure III.5), afin de renforcer le cordon dunaire en forte érosion, 5 000 m³ de sable, prélevés sur la plage de Berck, ont été déposés en mars 2011 au niveau du lieu-dit le « Bois de Sapins » afin d'éviter la rupture du cordon dunaire et de protéger les terres basses arrières-littorales d'une possible submersion marine. En septembre 2015, 3000 m³ de sable ont été à nouveau déversés et 15 000 m³ supplémentaires ont été déposés en octobre et novembre 2015 (source : SOS Baie d'Authie).



Figure III.6 Dune d'Aval à Wissant, A) en septembre 2016 (source : Mylène Ruz) - B) en janvier 2017 (source : Drone Littoral - Adrien Cartier)

Concernant la Somme, une seule opération a pu être inventoriée au Crotoy avec 2 000 m³ de sable rechargé (Figure III.4-B) (<http://www.baiedesomme.org>). Néanmoins, des rechargements en galets de volumes beaucoup plus importants sont mis en œuvre dans ce département comme c'est le cas à Cayeux-sur-mer où 24 épis ont été implantés en 2015, complétés par un rechargement de 1 million de tonnes de galets. Cet inventaire excluant les rechargements en galets, ce rechargement massif n'est donc pas pris en compte dans le recensement, mais il mérite d'être mentionné afin d'indiquer que d'autres types de rechargements avec des matériaux différents sont utilisés en France.

2.1.2. Normandie

Dans la Manche, un seul rechargement de plage, dont le volume est inconnu, a pu être répertorié jusqu'en 2002 (Pupier-Dauchez, 2002).

Entre 2003 et 2016 l'utilisation des rechargements sédimentaires reste assez limitée d'après nos recherches. Seules trois opérations ont pu être répertoriées pour un volume total de 18 000 m³ (Figure III.5). Néanmoins il semblerait qu'une petite dizaine de sites bénéficieraient de rechargements de quelques milliers de m³ par opération dans le département de la Manche (source : DDTM-50). Le détail de ces opérations n'a pas pu être trouvé. Ce département, principalement composé de côtes sableuses peut effectivement se prêter plus facilement à l'implantation de rechargements, contrairement au Calvados et à la Seine-Maritime dont le littoral se caractérise essentiellement par une côte à falaise. Aucune donnée concernant les rechargements sédimentaires

n'a été trouvée dans ces deux derniers départements, ni dans celui de l'Eure (deux communes littorales uniquement).

2.1.3. Bretagne – Façade Manche

Aucun rechargement n'a été répertorié avant 2002 sur la façade Manche de la Bretagne (Ille-et-Vilaine, Côtes d'Armor et littoral nord du Finistère) (Pupier-Dauchez, 2002).

A partir de 2003, une seule opération de 5 000 m³ a été inventoriée à Plouescat dans le Finistère (source : DDTM-29) (Figure III.7). Aucune donnée pour les Côtes d'Armor n'a pu être trouvée. Un projet de réalisation d'un enrochement et d'un rechargement de plage à Trégastel est mentionné dans la presse locale (Le Télégramme). L'enrochement a été mis en œuvre en mars 2017, tandis que le rechargement devait être effectué avant l'été 2017. En Ille-et-Vilaine, seul du reprofilage de plage semble s'opérer sur certaines communes (source : DDTM-35).

2.2. Façade atlantique

La pratique des rechargements sédimentaires sur la façade atlantique est plus courante, avec des opérations identifiées dans tous les départements bordant cette façade, à l'exception du département des Landes, que ce soit avant ou après 2002 (Figure III.4). A noter que la répartition des rechargements sédimentaires est assez hétérogène le long de cette façade quelle que soit la période considérée. Le volume total atteint 12,64 Mm³ sur la période de 1949 (date du premier rechargement de la région) à 2002 (Figure III.4-A), tandis que ce volume est de 6,61 Mm³ entre 2003 et 2016 (Figure III.4-B).

2.2.1. Bretagne – Façade atlantique

Contrairement au cas de la façade Manche, un certain nombre de rechargements sédimentaires ont été effectués sur la façade atlantique de la côte bretonne jusqu'en 2002. Deux opérations ont pu être recensées dans les travaux de Pupier-Dauchez (2002) et onze autres ont pu être répertoriées grâce à des données fournies par la DDTM-29 et trouvées dans des documents de la DDTM-56. Ainsi jusqu'en 2002, onze opérations dans le Finistère (0,44 Mm³) et deux dans le Morbihan (0,04 Mm³ minimum, avec une des deux opérations dont le volume n'est pas connu) peuvent être comptabilisées (Tableau III.1-B). Cette pratique reste donc assez modérée dans cette région avant 2002. La plus importante opération, avec 166 000 m³ de sable a été effectuée à Brest sur la plage du Moulin Blanc en 1978, ce qui en fait la première opération du département et de la région (Guilcher & Hallegouet, 1991; Pupier-Dauchez, 2002).

A partir de 2003, un volume de sable de 0,37 Mm³ a pu être comptabilisé, réparti de la manière suivante : huit opérations dans le Finistère pour 90 000 m³ en tout (source : DDTM-29; (Fichaut & Suanez, 2008)) et six opérations dans le Morbihan pour 0,28 Mm³ (source : Ouest-France, site de la ville de Lorient) (Tableau III.2). Le rechargement le plus volumineux, avec 215 000 m³ de sable, est localisé à Gâvres et a été effectué en 2012 sur la Grande Plage. Le sable a été placé sur 1,5 km de plage. La même année à Gâvres, la plage de Goërem a également été rechargée avec 50 000 m³ de sable sur un linéaire de 500 m (source : Ouest-france).

2.2.2. Pays de la Loire

Dans cette région, 22 opérations de rechargements sédimentaires ont été effectuées jusqu'en 2002. En **Loire-Atlantique**, on note neuf opérations pour un volume total de 0,22 Mm³ entre 1977 (date de la première opération) et 2002 (Pupier-Dauchez, 2002, 2008) (Tableau III.1-B). Le volume

des opérations varient de 2 000 m³ sur une plage de La Plaine-sur-Mer à 100 000 m³ à Pornic en 1982.

L'actualisation des données sur la période 2003-2016 n'a permis de trouver que deux nouvelles opérations en Loire-Atlantique situées à la Baule (source : DREAL des Pays de la Loire ; site de la ville de la Baule). En 2003-2004 un rechargement de plage d'environ 215 000 m³ a eu lieu sur la Grande Plage sur un linéaire de 3,3 km, soit environ 63,6 m³/ml (source : DREAL des Pays de la Loire). Ce projet avait d'ailleurs été mentionné dans la thèse de Pupier-Dauchez (2002). Le sable nécessaire à l'intervention a été prélevé dans le gisement sableux du Pilier situé à -16 m CM de profondeur et localisé à environ 20 km de la zone de rechargement. Des transferts par camions ont également été effectués entre le Pornichet et la Baule à raison de 15 000 m³ annuels dans le but d'entretenir le rechargement de plage. Le rechargement de plage suivant effectué en 2013 résulte du dragage du port et 8 000 m³ ont été refoulées sur la plage de la Baule.

En **Vendée**, jusqu'en 2002 les rechargements sédimentaires se concentrent sur l'île de Noirmoutier, avec douze des treize rechargements comptabilisés (Pupier-Dauchez, 2002, 2008). Le volume total de sable utilisé atteint 0,18 Mm³. Les volumes varient de 3 500 m³ sur la plage de La Linière à Noirmoutier-en-l'Île à 50 000 m³ sur la plage de la Fromentine à La Barre-de-Monts. Ces rechargements de plage se caractérisent par des volumes assez faibles. La finalité de ces opérations est principalement la lutte contre l'érosion du littoral.

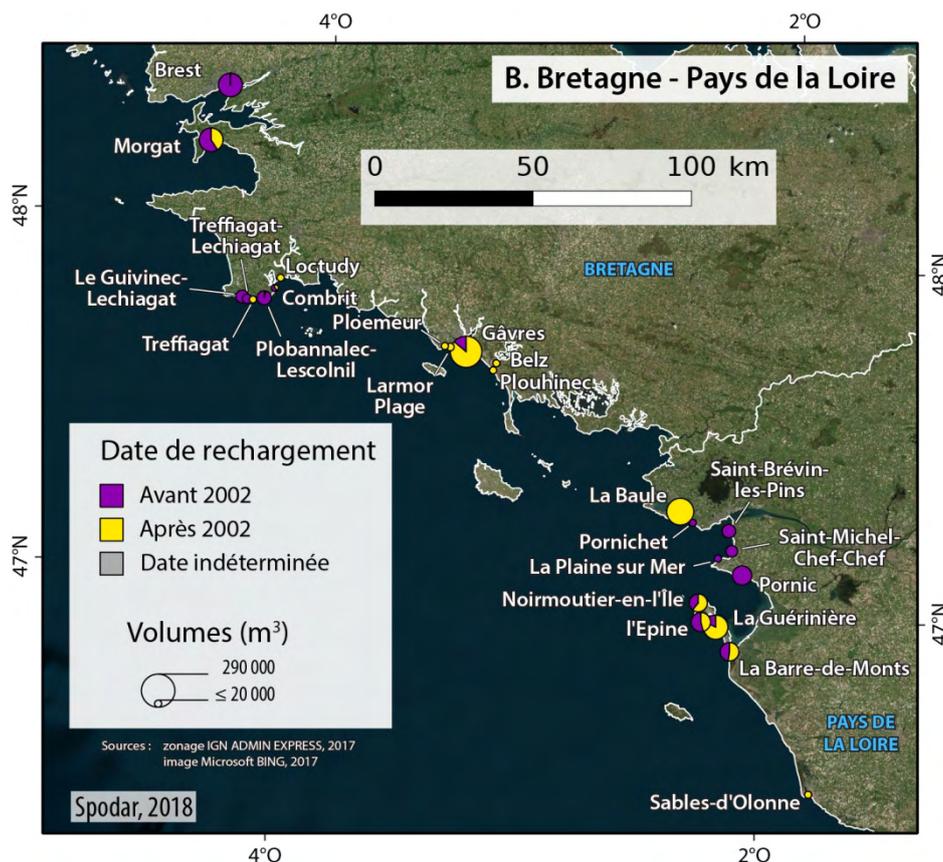


Figure III.7 Localisation des rechargements sédimentaires en Bretagne et Loire-Atlantique

Treize autres rechargements ont pu être comptabilisés entre 2003 et 2016. Ces rechargements se localisent encore principalement sur l'île de Noirmoutier (11 opérations sur 13).

Les volumes mis en œuvre restent assez modestes avec deux rechargements qui atteignent 51 000 m³ à l'Épine et la Guerinière (Pupier-Dauchez, 2008; Fattal *et al.*, 2010), pour un total de 0,31 Mm³. Le stock de sable consacré à cette méthode a donc augmenté par rapport à la période comprise entre 1991 (date du premier rechargement du département) et 2002. A noter que les rechargements effectués sur l'île de Noirmoutier se localisent uniquement sur la façade de l'île tournée vers l'Atlantique, quelle que soit la période, témoignant de la forte érosion qui touche cette partie de l'île plus exposée.

2.2.3. Nouvelle-Aquitaine

Avant 2002, la région Nouvelle-Aquitaine se démarque très nettement de toutes les autres en termes de volumes consacrés aux rechargements sédimentaires, avec 11,80 Mm³ au minimum (volume de certaines opérations mises en œuvre non connues) (Figure III.4-A). Les volumes par départements sont néanmoins très variables avec 1,12 Mm³ pour la Charente-Maritime, 2,51 Mm³ pour la Gironde et enfin 8,18 Mm³ pour les Pyrénées-Atlantiques (Tableau III.1-B). Aucun rechargement n'a été identifié dans les Landes. Au sein même des trois départements qui utilisent cette méthode, des variabilités apparaissent.

En **Charente-Maritime**, le premier rechargement a eu lieu en 1989. Jusqu'en 2002, treize communes ont mis en œuvre 22 rechargements de plage au minimum. Certains volumes évoqués font en effet référence à plusieurs opérations dont le détail est inconnu. Les données de Pupier-Dauchez (2002) ont été complétées par des données de la DDTM-17. La localisation des rechargements (Figure III.8) montre qu'ils se répartissent de manière homogène le long de la côte du département. Les volumes utilisés par opérations vont de 2 000 m³, rechargement effectué à Loix en 1997, à 330 000 m³, rechargement effectué à Châtelailon-Plage de 1989 à 1991. Jusqu'en 2002, ce rechargement était d'ailleurs le plus gros rechargement de plage de France. Avant la mise en œuvre de ce rechargement assez volumineux, le littoral de Châtelailon-Plage a fait l'objet de nombreux aménagements pour lutter contre l'érosion (Paskoff & Prat, 2004).

Sur la période 2003-2016, le volume de sable consacré à la réalisation de rechargements de plages en Charente-Maritime s'élève à 1,05 Mm³ pour 23 opérations. L'article de Pupier-Dauchez (2008) ainsi qu'une liste conséquente mais non exhaustive d'opérations fournie par la DDTM-17 ont contribué à actualiser cet inventaire. Le rechargement le plus volumineux a eu lieu à la Couarde-sur-Mer où 300 000 m³ ont été refoulés sur la plage du Boutillon en 2003. On note que les volumes totaux mis en œuvre sur la période 1989-2002 et 2003-2016 restent assez similaires (1,12 Mm³ et 1,05 Mm³).

C'est dans le département de **la Gironde** qu'a eu lieu le deuxième rechargement de France en 1949. Une particularité est à souligner dans la répartition des rechargements, avec leur concentration à l'intérieur du Bassin d'Arcachon. Cette baie présente une dynamique spécifique avec beaucoup de zones de sédimentation et par conséquent les chenaux doivent être régulièrement dragués afin de maintenir une sécurité optimale pour la navigation. La gestion du bassin et la mise en œuvre de divers travaux maritimes comme le dragage des chenaux et les rechargements sont effectués par le Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon (SIBA) depuis 1964. Jusqu'en 2002, quatre communes ayant utilisé les rechargements avaient été recensées à savoir Arcachon, la Teste de Buch, Gujan-Mestras et Lège-Cap Ferret. Sur ces quatre communes, il a été possible de comptabiliser 91 opérations entre 1949 et 2001, représentant un volume total de 2,51 Mm³ jusqu'en 2002. Ces rechargements sont liés à un double objectif : celui de maintenir la sécurité de navigation

dans le bassin par le biais de dragages ainsi que celui de lutter contre les submersions marines. Les volumes par opérations varient de 2 100 m³ à 168 000 m³.

L'actualisation des données en Gironde sur la période 2003-2016 a permis de mettre en évidence que la localisation des opérations se concentrent encore dans le Bassin d'Arcachon. Quatre nouvelles communes – Lanton, Arès, Andernos-les-Bains et le Teich - en plus de celles précédemment citées rechargent leurs plages. Entre 2003 et 2016, les rechargements sédimentaires totalisent un volume de 3,05 Mm³ et il est possible de dénombrer environ 68 opérations grâce aux données fournies par le SIBA. Un rechargement de plage massif 1,1 Mm³ (le plus important de Gironde) sur 3 km de longueur a été réalisé sur la plage du Pyla à La Teste de Buch en janvier 2003 afin de renforcer cette portion du littoral en érosion. Puis, entre 2005 et 2015, un programme d'entretien réalisé par Sogreah, a été établi afin de compenser les pertes du premier rechargement. Ainsi, environ 150 000 m³ ont été refoulés tous les 2 ans. Le renouvellement de ces rechargements d'entretien a été autorisé sur la période 2016-2026 avec le même volume et la même fréquence. Les sédiments ont été prélevés sur le flanc Est du chenal du Bernet par une drague aspiratrice en marche puis refoulés sur site par *rainbowing*. De manière générale, la réalisation de rechargements sédimentaires pour lutter contre l'érosion du littoral reste fortement liée aux activités de dragages indispensables dans le bassin. Ce réemploi permet une valorisation des sables de dragage.

Le département des **Pyrénées-Atlantiques** se distingue par le volume de sable utilisé pour les rechargements sédimentaires qui s'élève à 8,18 Mm³ sur la période 1965-2002, soit 53% du volume consacré à cette méthode en France jusqu'en 2002 (Figure III.4-A). De plus, seules deux communes mettent en œuvre cette technique, Saint-Jean-de-Luz et Anglet, ce qui accroît encore la spécificité de ce département. Deux sources ont permis de compléter les données de Pupier-Dauchez (2002), une étude de l'érosion de la côte basque (Alexandre *et al.*, 2003) ainsi que des magazines d'informations de la ville de Saint-Jean-de-Luz. A Anglet, entre 1965 et 2002, 7,98 Mm³ de sables ont été rechargés sur les plages et avant-plages. Il s'agit d'un volume minimal, les volumes de 1981 à 1984 ne sont en effet pas connus. Les problèmes d'érosion du secteur d'Anglet sont liés aux travaux d'aménagements successifs à l'embouchure de l'Adour, située au Nord de la commune, qui est également l'entrée du port de Bayonne (Brière, 2006). En parallèle de ces constructions au fil des années, qui perturbent la dynamique sédimentaire naturelle, d'importants travaux de dragage à l'entrée du chenal d'accès au port ont été effectués. Initialement, ce sable était clappé au large puis, à partir de 1965, il a été utilisé pour recharger la plage et l'avant-plage d'Anglet. Ces rechargements réguliers et massifs sont la solution pour évacuer les importants stocks de sables qui obstruent l'entrée du port de Bayonne et renforcer la portion de littoral en érosion. Au total, entre 1975 et 1998 un volume d'environ 536 000 m³ de sable a été refoulé sur la plage, tandis qu'entre 1965 et 2002 7,5 Mm³ au minimum ont été clapés dans les petits-fonds à environ -5 m CM. Ces rechargements effectués exclusivement à l'avant-plage sont l'une des autres particularités d'Anglet. Ce type de rechargement était en effet très peu pratiqué en France avant 2003. Le plus gros rechargement dans les petits-fonds correspond à 790 000 m³ clapés en 1980. A Saint-Jean-de-Luz, deux sites sont rechargés, la Grande Plage et la plage des Flots Bleus. Vingt-huit opérations ont eu lieu à Saint-Jean-de-Luz de 1971 à 2002, pour un volume total de 194 000 m³.

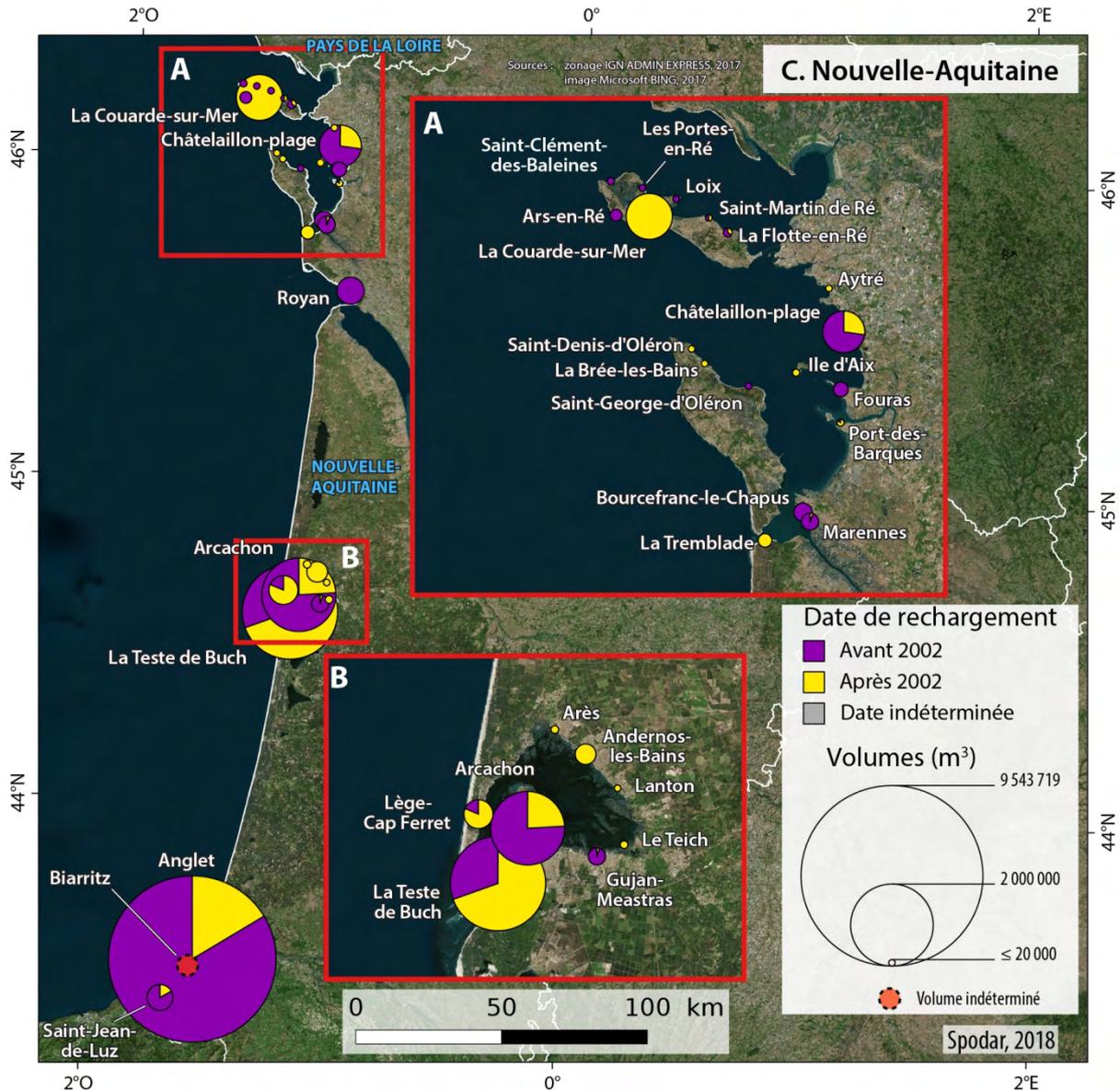


Figure III.8 Localisation des rechargements sédimentaires en Nouvelle-Aquitaine

Entre 2003 et 2016, la pratique des rechargements sédimentaires dans les Pyrénées-Atlantiques semble être un peu moins importante que lors de la période précédente (Figure III.4-C). En plus de Saint-Jean-de-Luz et Anglet, deux autres communes ont mis en œuvre des rechargements : Guéthary et Biarritz (DDTM-64). Un seul rechargement sédimentaire a été effectué à Biarritz en 2013. Aucune information sur l'opération, pas même le volume, n'a été communiquée. Les principales actions sur cette commune concernent le reprofilage de plage. A Guéthary, des rechargements sont également effectués d'après la DDTM-64, mais aucune information n'est disponible. Toujours selon la DDTM-64, les communes de Bidart et Hendaye n'effectuent que des reprofilages de plages. Entre 2003 et 2016, un volume total minimum de 1,6 Mm³ a été utilisé à Anglet (1,56 Mm³ minimum) et Saint-Jean-de-Luz (39 000 m³). L'arrêt des clapages à Anglet entre 2004 et 2009, a contribué à faire baisser le volume total. Une reprise des rechargements d'avant-plage en 2010 s'est produite mais une partie des volumes n'est pas connue. Deux opérations par an sont effectuées, la première au printemps et la seconde à l'automne. A Saint-Jean-de-Luz un rechargement de plage annuel de 3 000 m³ de sable en provenance de Capbreton a été réalisé sur la

Grande Plage entre 2003 et 2015. Un arrêt des opérations a néanmoins été observé depuis cette date. Seul un reprofilage a été effectué en 2016 (DDTM-64).

2.3. Façade méditerranéenne

Cette façade maritime à la particularité d'avoir accueilli le premier rechargement de plage de France à Cannes en 1891. Depuis cette date et jusqu'en 2002, 1,90 Mm³ de sable ont été utilisés pour cette méthode. Ce volume a augmenté entre 2003 et 2016 pour atteindre 3,73 Mm³. A noter que la dynamique n'est néanmoins pas la même entre les régions et départements.

2.3.1. Occitanie

Dans la région Occitanie, un volume de 1,45 Mm³ minimum a pu être comptabilisé entre 1972 et 2002. Le premier rechargement de plage a eu lieu au Grau du Roi en 1972 où le refoulement de 180 000 m³ avait pour objectif la création d'une plage (Raynal *et al.*, 2011). Malgré l'émergence progressive de l'utilisation de cette méthode à partir de cette date, cette région est surtout marquée par la mise en œuvre de structures de protection dites dures (épis, enrochements, brise-lames). En 1960, la mise en place du plan Racine destiné à aménager le littoral du Languedoc-Roussillon (ex-Occitanie) marque un tournant dans la construction de ces structures de protection du littoral. En effet, avant 1960, 27 structures seulement ont été construites, tandis que leur nombre s'élève à 402 en 2011 (Raynal *et al.*, 2011). Les travaux de rechargements sédimentaires effectués entre 1972 et 2002 s'accompagnent souvent d'aménagements durs, comme c'est le cas à Agde, où plusieurs opérations de rechargements ont été accompagnées de la mise en place de brise-lames (Pupier-Dauchez, 2002; Raynal *et al.*, 2011).

La pratique des rechargements sédimentaires s'est bien développée dans la région Occitanie entre 2003 et 2016 (Figure III.4-B et Figure III.8). A partir de 2003, un virage s'est d'ailleurs opéré avec l'encouragement de l'Etat et de la Région, par le biais de nouvelles orientations stratégiques de gestion du littoral (MIAL-LR, 2003; Rey-Valette *et al.*, 2013), à utiliser des méthodes douces afin de stopper l'artificialisation de la côte. Un plan de gestion des sédiments a été réalisé en 2011 à l'échelle régionale afin de « proposer des solutions de gestion durable du littoral ». Beaucoup de données concernant les rechargements ont d'ailleurs été trouvées dans l'un des rapports de ce plan de gestion où un recensement de toutes les méthodes de protection du littoral, dures et souples, a été effectué (Raynal *et al.*, 2011). D'autres sources d'informations ont permis de compléter l'inventaire à savoir des rapports de l'Observatoire de la Côte Sableuse CATtalane (De La Torre *et al.*, 2014b, 2015; Lothe *et al.*, 2016), des articles scientifiques (Vanroye, 2008; Vanroye & Barthaz, 2010; Rey-Valette *et al.*, 2013), des articles de presse de journaux locaux ou des sites internet de certaines agglomérations (l'Indépendant ; Hérault Tribune ; L'Écoute ; www.thau-agglo.fr). Entre 2003 et 2016, sur l'ensemble de la région, les nouvelles opérations de rechargement ont mobilisé 2,86 Mm³ minimum pour 44 opérations (Tableau III.2).

Le département qui se distingue sur cette façade maritime est l'**Hérault** avec un volume total de 1,03 Mm³ mis en œuvre jusqu'en 2002 (Figure III.4-A). Les volumes des opérations connues sont variables, avec globalement de petites opérations de l'ordre de quelques milliers de mètres cube. Deux opérations un peu plus volumineuses se démarquent, la première à Agde en 1993 avec 175 000 m³ et la seconde à Palavas-les-Flots en 1992 avec 160 000 m³. Le nombre exact d'opérations de rechargements est néanmoins difficile à estimer car certaines données ont été rassemblées sur plusieurs années sans plus de détails. Il est néanmoins possible d'estimer que ce nombre d'opérations est supérieur à seize.

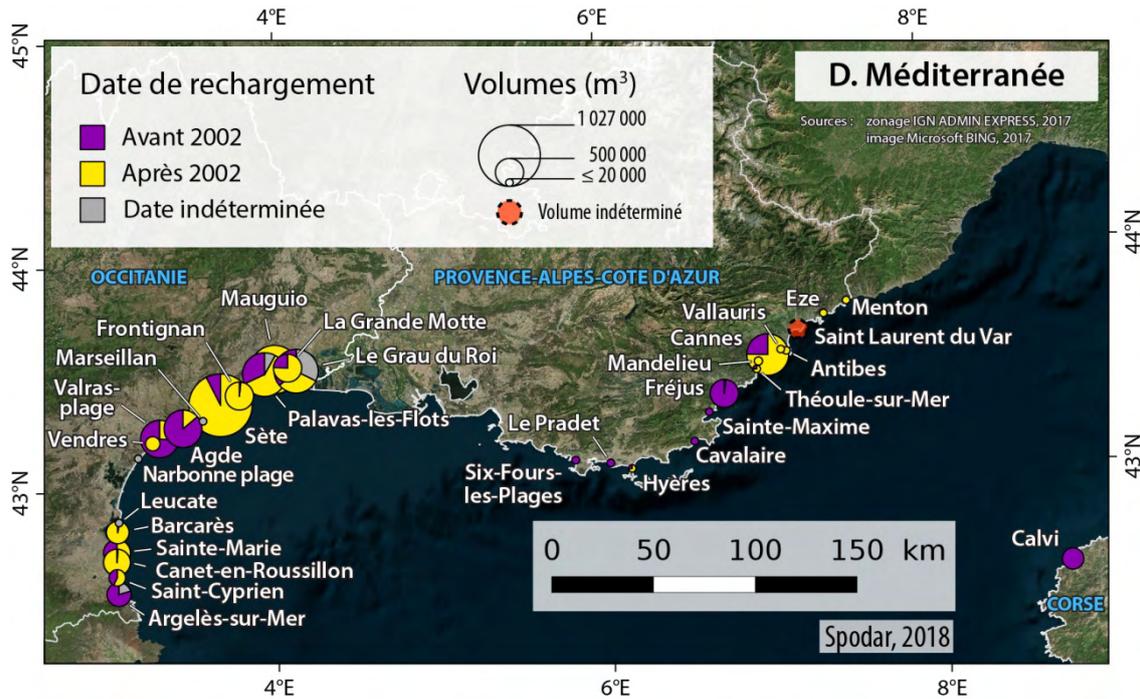


Figure III.9 Localisation des rechargements sédimentaires sur la façade méditerranéenne

Depuis 2003, les opérations de rechargement dans l'Hérault totalisent un volume de 2,27 Mm³ pour 11 opérations. Sur le littoral du golfe d'Aigues-Mortes, un projet de grande envergure a été réalisé, à cheval sur les départements de l'Hérault et du Gard en 2007 et 2008. Au total, ce sont 1,07 Mm³ (Tableau III.2) qui ont été refoulés dans plusieurs secteurs entre 2007 et 2008 (Vanroye, 2008) répartis de la manière suivante (d'ouest en est) : 300 000 m³ (sur 2950 m de linéaire côtier) dans le secteur de Palavas-les-Flots, 205 000 m³ à Carnon Est (sur 1 750 m), 410 000 m³ (sur 3 350 m) à Mauguio ainsi que 155 000 m³ (sur 1 985 m) à Boucanet sur la commune du Grau du Roi. Trois épis ont également été implantés au Boucanet et l'allongement d'un brise-lame a été effectué à Carnon en complément des rechargements. La zone de prélèvement est localisée au niveau de la flèche sous-marine de l'Espiguette. Le sable a été prélevé à l'aide d'une drague aspiratrice en marche, puis refoulé sur la plage via des conduites. Cette opération de grande ampleur sur toute une portion de littoral est le témoin d'un tournant dans la réalisation de mesures de protection du littoral dans cette région et notamment dans l'Hérault où un autre grand projet a été lancé en 2007. En effet à partir de cette date a eu lieu sur le lido de Sète à Marseillan un projet global afin de repenser complètement l'aménagement du secteur, que ce soit la protection du littoral, la renaturation du site ou encore son accessibilité (www.thau-agglo.fr). Il est intéressant de remarquer que le rechargement sédimentaire s'imbrique dans tout un système de protection du littoral composé de drains de plage installés en 2012 et de tubes atténuateurs de houles posés au large en 2012. Le rechargement a été effectué sur 2 km de linéaire côtier, et les 510 000 m³ rechargés ont été répartis de la manière suivante : 410 000 m³ sur la plage et 100 000 m³ dans les petits fonds à -2/-3 m.

Les deux autres départements de l'Occitanie à avoir utilisé cette méthode, le **Gard** et les **Pyrénées-Orientales**, semblent avoir une utilisation plus limitée de cette technique jusqu'en 2002. Dans le Gard, le seul rechargement inventorié correspond à la toute première opération mise en place dans la région, localisée au Grau du Roi. A partir de 2003 un seul rechargement de plage a été

inventorié dans le Gard pour un volume de 155 000 m³ (2007-2008) dont l'opération est incluse dans le grand projet du Golfe d'Aigues-Mortes.

Dans les Pyrénées-Orientales, 26 opérations au minimum pour un volume total de 246 100 m³ avaient été inventoriées avant 2002. Les données de toutes les opérations ne sont pas systématiquement complètes. A noter que toutes ces opérations concernent uniquement trois communes : Argelès-sur-Mer, Saint-Cyprien et Sainte-Marie. Les rechargements sont d'ampleur assez modeste avec des volumes connus qui vont de 900 m³ à 30 000 m³.

A partir de 2003, c'est un total de 30 rechargements qui a pu être recensé, mais les volumes de toutes les opérations ne sont pas connus. Un volume total de 0,38 Mm³ minimum peut être comptabilisé. Les rechargements dont les volumes sont connus ne dépassent pas 60 000 m³.

Dans l'Aude, deux rechargements ont été effectués, mais aucune date n'a été trouvée, ne permettant donc pas de situer ces opérations dans l'une des deux périodes. Les volumes seront néanmoins totalisés dans le tableau qui récapitule l'ensemble des volumes par département, toutes dates confondues (section 3).

2.3.2. Provence Alpes Côtes d'Azur (PACA)

C'est en PACA qu'a eu lieu le tout premier rechargement de plage de France. Cette première opération a eu lieu à Cannes (Alpes-Maritimes) en 1891 (Namvrine, 1996). A la fin du XIX siècle, le développement du boulevard de la Croisette prend du retard car ce secteur est régulièrement submergé lors de tempêtes. La plage très étroite (14 m de large en 1868) devant le perré adossé au boulevard, ne permettait pas d'amortir l'énergie des vagues. Ce perré nécessitait d'ailleurs régulièrement des réparations. C'est pourquoi un projet de confortement de l'ouvrage et de protection du boulevard est lancé avec la mise en œuvre d'un rechargement de plage afin d'augmenter le stock sédimentaire et créer une zone tampon pour amortir les vagues. L'apport de sable de 2 800 m³ va s'étendre sur 3 ans, de 1891 à 1893. Ce rechargement ne résista cependant pas longtemps aux tempêtes et ne recevra pas d'apports sableux pour l'entretenir. Depuis cette première expérimentation en 1891, les rechargements sédimentaires ont mobilisé 338 340 m³ dans la région PACA jusqu'en 2002, avec 226 300 m³ pour le Var et 112 040 m³ pour les Alpes-Maritimes. De 2003 à 2016, le volume global atteint 0,39 Mm³ dans cette région (Figure III.4-B). Aucune donnée n'a pu être obtenue pour le département des Bouches-du-Rhône. Nos recherches ont mis en évidence la trace de projets sans pour autant avoir la certitude de leur mise en œuvre. Dans le doute, ces opérations n'ont donc pas été répertoriées. Ces projets, qu'ils aient abouti ou non, sont néanmoins les témoins d'un certain intérêt pour cette pratique. A noter qu'aucun rechargement subtidal n'a été recensé, tous les rechargements étant effectués sur les plages.

Dans le **Var**, six opérations seulement ont été effectuées dans six communes différentes, avec la quasi-totalité des volumes inférieurs à 13 000 m³. Seule une opération volumineuse réalisée à Fréjus en 1989 peut être citée, où 200 000 m³ ont été refoulés sur la plage de Saint-Aygulf (Chavand & Migniot, 1992; Pupier-Dauche, 2002). Les rechargements dans ce département, dont l'objectif est de lutter contre l'érosion, ont également une finalité touristique.

L'utilisation des rechargements dans ce département semble avoir beaucoup diminué au vu des données qui ont pu être recueillies. Entre 2003 et 2016 seuls deux rechargements sédimentaires ont pu être comptabilisés pour un volume total de 15 000 m³ (Tableau III.2).

Dans les **Alpes-Maritimes**, trois communes seulement utilisent cette méthode à savoir Antibes, Cannes et Mandelieu (Sogreah, 2009). A Cannes, il aura fallu attendre près de 70 ans pour qu'un nouveau rechargement soit effectué en 1961 avec un volume de 70 000 m³ (Namvrine, 1996). Entre 2003 et 2016, 51 opérations au minimum ont été comptabilisées dans ce département. Ce nombre est sous-estimé car certains secteurs bénéficient de rechargements annuels de l'ordre de quelques centaines de mètre cube depuis plusieurs années sans plus de détails sur la période exacte (Sogreah, 2009). Cet important nombre d'opérations pour un volume total de 373 947 m³ témoigne donc de la mise en œuvre de petits volumes.

Bien que n'étant pas intégré à cet inventaire, il convient de faire remarquer que des rechargements de galets ont lieu dans ce département et notamment à Nice depuis 1976 (Anthony *et al.*, 2011; Anthony & Cohen, 2007; Cohen, 2014).

2.3.3. Corse

Avant 2002, seules deux opérations ont été effectuées à Calvi en Haute-Corse en 1996 et 2001 (De La Torre *et al.*, 2014a) pour un volume de 15 000 m³ et 100 000 m³ respectivement. Aucun nouveau rechargement n'a pu être trouvé pour la Corse depuis 2003. Il semble que la plage de Calvi soit régulièrement réensablée, et des projets de rechargement sont mentionnés dans la presse locale à Ajaccio et sur la plage de la Marara, au sud de Bastia.

3. Synthèse des rechargements sédimentaires en France

3.1. Bilan général

La toute première expérimentation de rechargement en France a eu lieu dans les Alpes-Maritimes en 1891 à Cannes. Mais c'est dès le début des années 50 que certains départements ont véritablement implanté cette technique sur leur littoral, les pionniers étant la Gironde (1949) et les Pyrénées Atlantiques (1965). Contrairement à ce qu'affirmaient Hamm *et al.* (2002) et Hanson *et al.* (2002), le premier rechargement en France n'a donc pas eu lieu en 1962. C'est à partir des années 70, la technique se multiplie et est utilisée sur toutes les façades maritimes (Figure III.10).

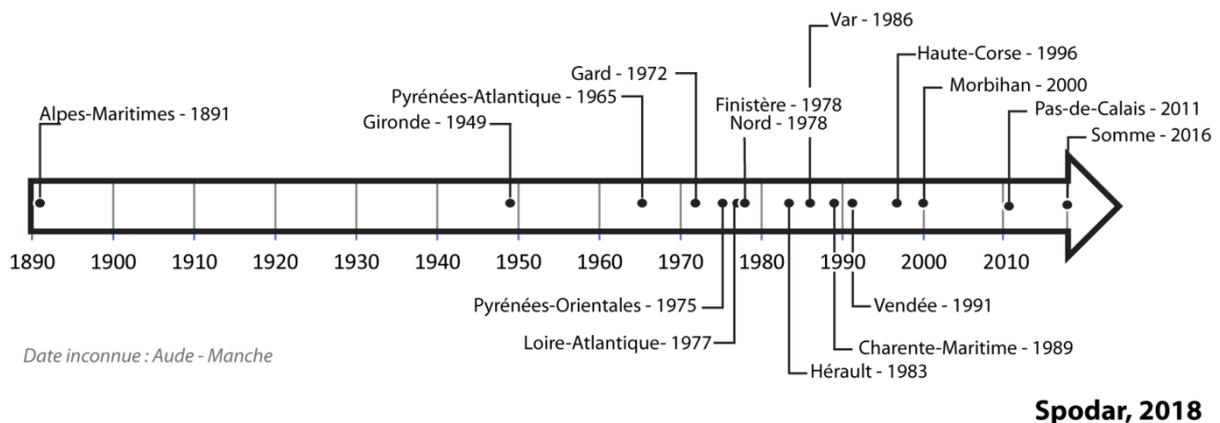


Figure III.10 Date des premiers rechargements par départements

Le Tableau III.3 synthétise les volumes utilisés pour les rechargements sédimentaires en France métropolitaine jusqu'en 2002 et sur la période 2003-2016, ainsi que le bilan total toutes dates

confondues. A noter que le bilan total n'est parfois pas exactement égal à l'addition du volume des deux périodes. En effet pour certains départements (cas de l'Aude par exemple), quelques opérations non datées ont été répertoriées et comptabilisées dans le bilan final.

Inventaire des rechargements sédimentaires en France jusqu'en 2016

Région	Département	Date du premier rechargement	Nombre d'opérations jusqu'en 2016	Volume jusqu'en 2002	Volume 2003 - 2016	Volume total du département jusqu'en 2016 (m ³)	Volume total de la région jusqu'en 2016 (m ³)
Hauts-de-France	Nord (59)	1978	> 10	890 000,00 *	4 648 400,00	5 538 400,00	5 608 400,00
	Pas de Calais (62)	2011	4	0,00	68 000,00	68 000,00	
	Somme (80)	2016	1	0,00	2 000	2 000,00	
Normandie	Seine-Maritime (76)	-	n/a	0,00	n/a	n/a	18 000,00
	Eure (27)	-	n/a	0,00	n/a	n/a	
	Calvados (14)	-	n/a	0,00	n/a	n/a	
	Manche (50)	?	> 4	?	18 000,00 *	18 000,00	
Bretagne	Ille-et-Vilaine (35)	-	n/a	0,00	0,00	0,00	820 123,00
	Côtes d'Armor (22)	-	n/a	0,00	n/a	n/a	
	Finistère (29)	1978	21	402 886,00	95 000,00	497 886,00	
	Morbihan (56)	2000	8	40 000,00 *	282 237,00	322 237,00	
Pays de la Loire	Loire-Atlantique (44)	1977	11	217 000,00	218 000,00	435 000,00	925 170,00
	Vendée (85)	1991	26	178 400,00	311 770,00	490 170,00	
Nouvelle-Aquitaine	Charente-Maritime (17)	1989	> 45	1 117 500,00	1 052 300,00	2 169 800,00	17 504 137,00
	Gironde (33)	1949	> 160	2 510 715,00	3 046 903,00	5 557 618,00	
	Landes (44)	-	-	0,00	0,00	0,00	
	Pyrénées-Atlantiques (64)	1965	> 91	8 175 700,00 *	1 601 019,00 *	9 776 719,00	
Occitanie	Pyrénées-Orientales (66)	1975	> 58	246 100,00 *	440 800,00 *	716 900,00	4 554 400,00
	Aude (11)	?	2	?	?	5 000,00	
	Hérault (34)	1983	> 27	1 027 000,00	2 265 500,00	3 337 500,00	
	Gard (30)	1972	3	180 000,00	155 000,00	495 000,00	
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Bouches-du-Rhône (13)	-	-	0,00	n/a	n/a	727 287,00
	Var (83)	1986	8	226 300,00	15 000,00	241 300,00	
	Alpes-Maritimes (06)	1891	> 71	111 900,00 *	373 947,00 *	485 987,00	
Corse	Haute-Corse (2B)	1996	2	115 000,00	n/a	115 000,00	115 000,00
	Corse-du-Sud (2A)	-	-	0,00	n/a	n/a	

* volume de certaines opérations non disponible
 † analyse faite uniquement sur les volumes connus
 n/a : non disponible

Volume (m³) total des rechargements en France : 30 272 517,00

Spodar, 2018

Tableau III.3 Récapitulatif des volumes mis en œuvre jusqu'en 2002, sur la période 2003-2016 et des volumes totaux par départements et régions jusqu'en 2016

La Figure III.11 synthétise l'ensemble des volumes consacrés aux rechargements sédimentaires par communes selon les deux périodes, jusqu'en 2002 et entre 2003 et 2016. Cette figure permet de voir les volumes des rechargements avec la même échelle spatiale. A la différence des précédentes figures, elle permet d'appréhender l'importance de la disparité des volumes par communes employés sur l'ensemble du territoire.

Ce bilan, bien que non exhaustif, vu le nombre de données imprécises et manquantes, révèle qu'en 2016, ce sont 30,27 Mm³ de sable qui ont été utilisés pour réalimenter le littoral en France. Bien que les moyennes annuelles ne soient pas représentatives, on constate qu'entre 1949 (date du premier rechargement, celui de Cannes en 1891-93 étant exclu) et 2002, un volume de 285 900 m³/an en moyenne était consacré aux rechargements sédimentaires. Depuis 2003, se sont 1 042 400 m³/an en moyenne qui sont mis en œuvre, soit une très nette progression de cette pratique.

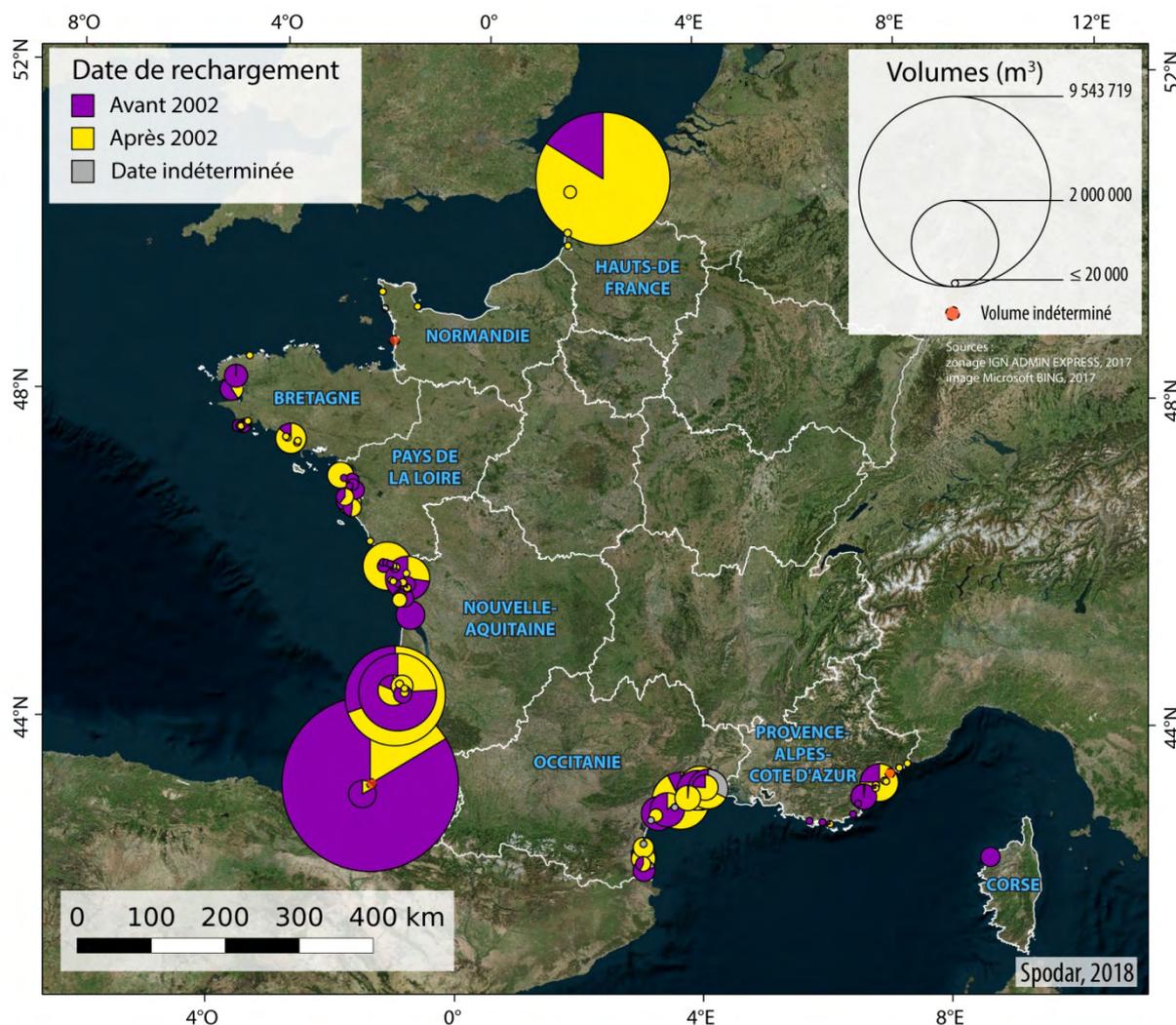


Figure III.11 Localisation des rechargements sédimentaires en France métropolitaine

Des disparités en termes de volumes et de pratique apparaissent à l'issue de ce bilan. Les Pyrénées-Atlantiques, la Gironde et le Nord se distinguent en termes de volumes ($> 5 \text{ Mm}^3$) jusqu'en 2016. Pour ces trois cas, ce sont les activités de dragage – dragage d'entretien de l'entrée du port de Bayonne et des chenaux du Bassin d'Arcachon et dragages d'entretien couplés à des dragages issus de grands travaux d'aménagements pour le port de Dunkerque – qui libèrent des stocks de sable importants et offrent l'opportunité de la mise en œuvre de rechargements sédimentaires. Dans le cas de Bayonne et du Bassin d'Arcachon, les sables sont redéposés sur les plages adjacentes en déficit sédimentaire. A Dunkerque, ces sables servent à conforter et protéger des ouvrages portuaires. Ces trois départements ont néanmoins connus une évolution différente sur les deux périodes.

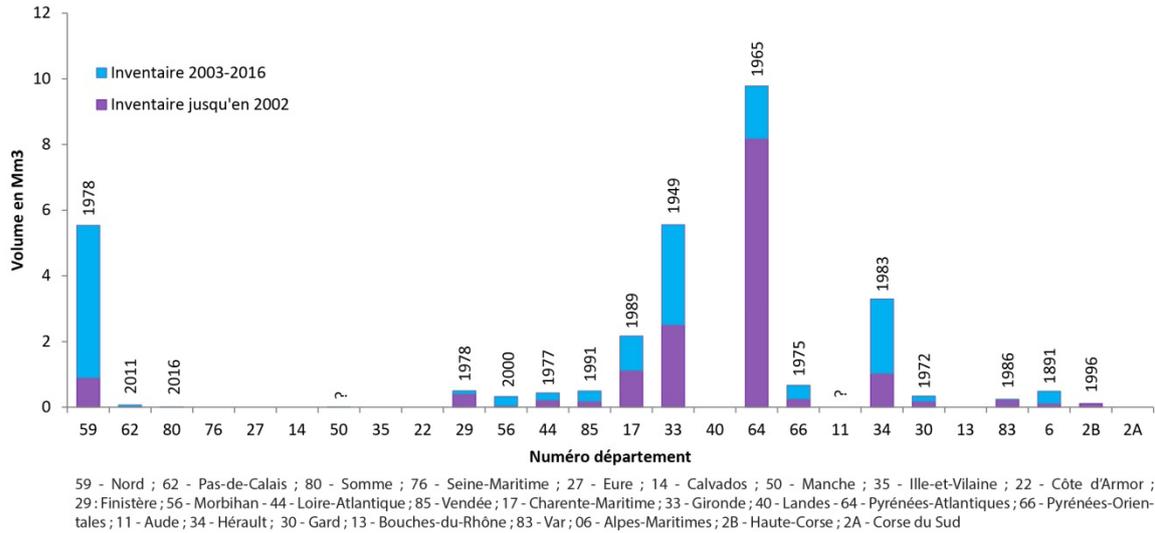


Figure III.12 Bilan des volumes par départements et par périodes

Globalement sur la façade Manche/mer du Nord et Atlantique, les rechargements sédimentaires répondent surtout à des problématiques d'érosion du littoral pour la majorité des opérations ainsi qu'à des besoins de gestion des sédiments de dragage pour les départements les plus utilisateurs. Sur la façade méditerranéenne, la finalité majeure reste également la protection et l'aménagement du littoral, notamment pour l'Occitanie, mais on note également plus d'opérations à vocation touristique effectuées avant les périodes estivales, notamment en PACA. Cela peut en partie expliquer les nombreuses opérations de petits volumes qui sont mises en œuvre. La configuration de la côte et sa nature rocheuse avec de petites plages peut également en partie expliquer les volumes restreints utilisés.

Sur l'ensemble de la France métropolitaine, les rechargements de plage avec des volumes ≥ 1 Mm³ en une seule opération sont assez rares, alors que des opérations de telles ampleurs ou mettant en œuvre plus de Mm³ de sable sont beaucoup plus courantes dans les pays très utilisateurs de la technique comme les Etats-Unis, les Pays-Bas ou encore la Belgique. On note deux rechargements majeurs en France, l'un localisé à Dunkerque sur la plage de Malo-les-Bains avec 1,5 Mm³ et un second situé à la Teste-de-Buch avec 1,1 Mm³. Le caractère massif de ces deux opérations n'est pas le même avec un rechargement concentré sur environ 1 km à Dunkerque, soit 1200 m³/ml, et sur 3,2 km à la Teste-de-Buch soit environ 344 m³/ml. Parmi les opérations de grande ampleur, il est également possible de citer celle effectuée dans le Golfe d'Aigues-Mortes avec 1,07 Mm³ en tout, répartis cependant sur différents secteurs.

Bien que moins utilisée que dans d'autres pays comme en Belgique ou aux Pays-Bas, la pratique des rechargements sédimentaires en France tend tout de même à s'intensifier. Dans le cadre du changement climatique, l'Etat encourage d'ailleurs la mise en place d'une démarche plus durable de la gestion du trait de côte à travers des recommandations et actions à mettre en place. Les rechargements sédimentaires sont de plus en plus préconisés par exemple dans les Programmes d'Actions et de Prévention des Inondations (PAPI) comme c'est le cas par exemple dans le PAPI Bresle-Somme-Authie qui prévoit des rechargements annuels de 35 000 m³ pendant 5 ans au niveau du lieu-dit le « Bois de Sapins », sur la rive nord de la baie d'Authie. Des plans de gestion à l'échelle

régionale ou des stratégies régionales émergent depuis quelques années, comme le Plan de Gestion des Sédiments du Languedoc-Roussillon ou encore la Stratégie régionale gestion de la bande côtière du littoral aquitain, qui prône une gestion plus durable du littoral, dont les rechargements sédimentaires font partis.

- Une pratique en progression, mais à quels coûts ?

Bien que des fourchettes de prix existent, il est assez compliqué d'évaluer le coût précis d'une opération de rechargement sédimentaire. De manière générale, le coût d'une opération varie fortement en fonction de :

- la technique utilisée et du matériel pour effectuer le rechargement
- la distance entre le site d'extraction et le site de dépôt
- le volume de sédiment mis en œuvre

Dans le détail, une multitude de paramètres propres à chaque projet viennent moduler le coût total d'une opération comme le mentionne un rapport du programme Liteau II (Certain, 2005). Dans ce programme, les coûts fixes et les coûts variables relatifs au volume à recharger sont détaillés. Parmi ces coûts fixes se trouvent :

- l'amenée/repli du matériel de dragage : variable en fonction du type de drague utilisée, de la distance entre le port d'attache de cette drague et le lieu d'extraction, des navires complémentaires nécessaire (chaland ou barge)
- les fourniture/déploiement/retrait des éventuelles conduites de refoulement (immergés ou submergés)
- les coûts divers liés aux études préalables (levés bathymétriques, prélèvements de sédiments, analyse courantologique etc)

Le coût en fonction du m^3 est corrélé au matériel de dragage utilisé puisqu'il va dépendre de la durée d'un cycle de dragage et par conséquent du volume de sable extrait par jour. Le coût journalier de déploiement de la drague est également à prendre en compte tout dépendra du volume à extraire et la capacité de la drague d'une part, mais également des éventuelles contraintes météorologiques qui sont susceptibles d'immobiliser le navire temporairement et des contraintes de marée. Le cycle de dragage évoqué précédemment comprend le temps nécessaire pour remplir la drague ou charger une barge, la durée du trajet entre le site d'extraction et de dépôt et la méthode de refoulement. C'est la combinaison de tous ces éléments qui va venir participer à l'estimation du coût de l'opération. Il est donc difficile de chiffrer de manière générale le coût d'une opération en prenant en compte uniquement son volume étant donné les nombreux facteurs à prendre en compte.

Afin d'illustrer la variété de coût moyen par m^3 d'une opération à l'autre en France, quelques exemples peuvent être cités. On remarque que le coût moyen par mètre cube d'un gros rechargement peut se révéler être inférieur à celui d'une opération beaucoup plus petite. C'est le cas notamment de deux rechargements, celui de Dunkerque en 2014 avec $1,2 \text{ Mm}^3$ pour un coût moyen de $3,71 \text{ €/m}^3$ de sable soit un total de $4\,450\,000 \text{ €}$ et celui de Châtelailon-Plage en 1989-1991 avec un volume total de $330\,000 \text{ m}^3$ pour $11,52 \text{ €/m}^3$ de sable, soit $3,38 \text{ Mm}^3$ (Paskoff & Prat, 2004). Dans les informations sur le mode de conception disponible entre ces deux projets, c'est la distance entre site le prélèvement et site de dépôt qui semble entrer en jeu dans l'augmentation du coût à Châtelailon, à savoir 25 km. Plus le lieu d'extraction sera éloigné, plus le cycle de dragage risque d'être long et donc engendrer une mobilisation du matériel de dragage assez longue (selon également le volume de sédiments à extraire).

Cela témoigne notamment de l'importance d'une bonne conception du projet afin de minimiser le plus possible les coûts d'un point de vue du déploiement du matériel notamment. Malgré cela, la contrainte d'une zone de prélèvement en sédiment adapté est parfois inévitable d'où des coûts qui peuvent rapidement grimper.

- La question de la source de sédiment

Un essor de l'utilisation des rechargements sédimentaires entraîne la problématique de la disponibilité en sédiments. En effet, au-delà du volume parfois conséquent à trouver, les contraintes liées à la compatibilité granulométrique entre le site de prélèvement et le secteur à recharger peuvent se révéler être un frein à la mise en œuvre d'opérations. S'ajoute à cela la qualité physico-chimique du sédiment qui doit à juste titre répondre à certains critères de qualités et ne pas dépasser des seuils de contamination.

Les sources de sable peuvent être multiples : milieu marin ou côtier, fluvial, terrestre ou encore portuaire. Les domaines portuaires se révèlent être une source potentiellement abondante de sable. Les dragages, activités indispensables pour assurer la sécurité dans la navigation des navires, peuvent être une potentielle source en sable à disposition de manière régulière. En témoignent les deux communes qui ont utilisé le plus de sable pour recharger leur plage jusqu'en 2016, Anglet, avec un sable en provenance des activités de dragage du port de Bayonne et Dunkerque dont le sable dragué est réinjecté sur son propre littoral. Cette approche n'est pas réservée aux grands ports et l'ensemble des ports peuvent se révéler être une source de sédiments pour recharger des plages en déficit sédimentaire situées à proximité.

**Partie II. Les rechargements sédimentaires
sur la façade maritime du Grand Port
Maritime de Dunkerque**

Chapitre IV. Présentation et caractérisation du littoral dunkerquois et des sites d'études

Introduction du chapitre

La façade maritime du port de Dunkerque s'étend le long de la Côte d'Opale. Avant de s'intéresser particulièrement à la description de cette façade portuaire et aux deux sites « ateliers », la caractérisation du cadre régional va être menée afin de rendre compte des spécificités du littoral méridional de la mer du Nord. Ce chapitre s'attache également à présenter les conditions météorologiques et hydrodynamiques générales de ce secteur qui sont déterminantes dans l'évolution de ce secteur côtier.

1. Caractéristiques générales du littoral de la Côte d'Opale

1.1. Situation géographique et contexte géomorphologique

La Côte d'Opale (région Hauts-de-France) représente le linéaire côtier le plus septentrional de France et s'étend de la Baie d'Authie à la frontière belge sur environ 140 km (Figure IV.1). Elle se compose de deux façades maritimes, à savoir une façade occidentale orientée N-S qui borde la Manche entre la Baie d'Authie et le Cap Gris-Nez, puis une seconde façade orientée SO/NE, du Cap Gris-Nez jusqu'à la frontière belge, qui borde le sud de la mer du Nord. De manière générale, le littoral de la Côte d'Opale se caractérise par des plages sableuses associées à des massifs dunaires (Battiau-Queney *et al.*, 2001), entrecoupées de falaises dans le Boulonnais (Lahousse & Pierre, 2003; Pierre, 2006) et par les estuaires de l'Authie, la Canche, et la Slack (Dobroniak, 2005; Deloffre *et al.*, 2007). L'avant côte est caractérisée par un réseau complexe de bancs sableux dont les longueurs sont comprises entre 3 et 70 km avec des hauteurs variant de 10 à 30 m (Augris *et al.*, 1990; Clabaut, 1988; Vicaire, 1991) et par des dunes sous-marines (mégarides et vagues sableuses), pouvant atteindre la dizaine de mètres de hauteur (Le Bot & Trentesaux, 2004).

La façade qui nous intéresse particulièrement dans le cadre de cette étude est baignée par la partie méridionale de la mer du Nord (Figure IV.1). Cette portion du littoral borde la plaine maritime flamande qui s'étend de Sangatte jusqu'à la Flandre occidentale en Belgique, correspondant à la partie sud-occidentale de la vaste plaine côtière de la mer du Nord (Sommé, 1975). La partie française de cette plaine s'étend sur un linéaire de 80 km environ. Elle forme une bande d'une largeur moyenne de 12 km, pour atteindre 20 km au maximum au niveau des anciens estuaires de la Hem et de l'Aa. Cette plaine se caractérise par des dépôts de remplissage datant de l'Holocène pouvant atteindre une épaisseur de 25 m dans les axes des anciennes vallées (Mrani-Alaoui & Anthony, 2011; Margotta *et al.*, 2016). Il s'agit d'une zone à topographie basse avec des altitudes situées entre 0 et 5 m au-dessus du niveau marin actuel. A partir du XI^{ème} siècle, ce territoire marécageux a été progressivement asséché et endigué à des fins agricoles (Pin *et al.*, 2007). A partir du XII^{ème} l'organisation de l'assèchement du territoire et de l'endiguement devient plus structurée, avec la création des waterings, système de drainage qui connaîtra diverses améliorations au fil des siècles comme le développement du nombre de fossés et canaux ou encore l'installation de systèmes

de pompages. Actuellement, 1600 km de canaux permettent de drainer et d'évacuer les eaux excédentaires du territoire soit par gravité soit par pompage. Les eaux sont évacuées à la mer via des canaux exutoires à Calais, Gravelines et Dunkerque.

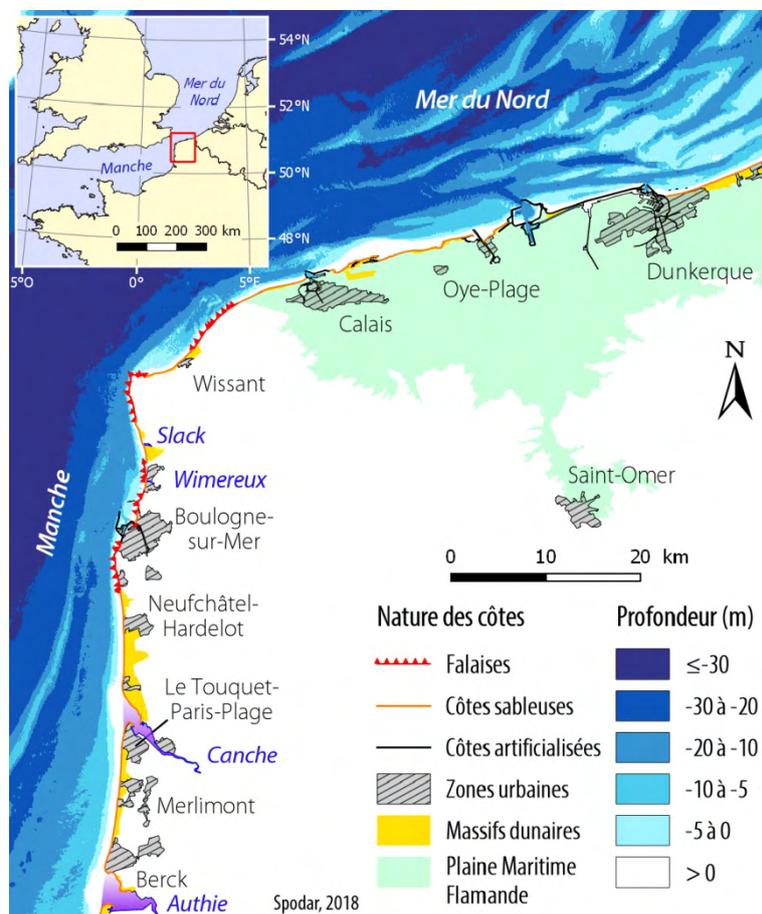


Figure IV.1 Localisation et cartographie du littoral de la Côte d'Opale

La plaine maritime flamande forme donc un vaste polder, quadrillé par le système des wateringues. D'une altitude moyenne de 2 m NGF, le polder est par conséquent sous le niveau des Pleines Mers de Vives-Eaux (PMVE) (Pin *et al.*, 2007), certaines zones se situant même à -2,5 m NGF comme dans la commune Les Moères. Ces terres basses sont protégées des incursions marines par un cordon dunaire, entrecoupé de remparts artificiels de types digues ou perrés au niveau des zones urbanisées ou portuaires. Une forte anthropisation caractérise cette côte avec les ports de Calais et Dunkerque et une importante urbanisation (villes, stations balnéaires). Sur les 80 km de linéaire côtier que forme la plaine maritime flamande française, 42,7 km sont artificialisés (soit 54,1 %) (CEREMA, 2017).

1.1. Caractéristiques morphologiques des plages

Les plages macrotidales de la côte d'Opale sont caractérisées par de larges estrans sableux à pente faible, dont la morphologie est marquée par un système composé d'une alternance de barres intertidales et de bâches parallèles au littoral (Figure IV.2), entrecoupées de chenaux de drainage (*Ridge and runnel system*) (King & Williams, 1949; Reichmüth & Anthony, 2008a). De nombreux travaux ont contribué à étayer les connaissances concernant ces plages à barres et à bâches,

caractéristiques du littoral de la côte d'Opale (Corbau, 1995; Sipka, 1998; Sipka & Anthony, 1999; Reichmüth, 2003; Reichmüth & Anthony, 2002; Anthony *et al.*, 2004, 2005; Oblinger & Anthony, 2008; Oblinger, 2008; Cartier, 2011; Cartier & Héquette, 2013). D'après ces études, le nombre de barres oscille entre deux et six le long de l'estran. Elles se positionnent dans la zone de déferlement et de dissipation des vagues. L'évolution de ce type de plage est marquée par un rythme saisonnier, en lien avec les conditions énergétiques qui varient au cours de l'année. Pendant les périodes hivernales, les plages subissent un démaigrissement combiné à un aplanissement plus ou moins marqué du système barres-bâches. Cette évolution morphologique est souvent liée à des conditions météorologiques plus énergétiques, en particulier pendant les périodes hivernales (Reichmüth, 2003; Maspataud, 2011). Au contraire, les périodes plus clémentes en saison estivale, sont favorables à l'engraissement des plages, avec des barres et des bâches bien développées (Sipka, 1998; Reichmüth & Anthony, 2008b).



Figure IV.2 Photographie du système barres-bâches à Malo-terminus (secteur situé à 3 km à l'est de l'un des sites de suivis) (Photo : Drone Littoral)

Ces larges estrans de sable fin sont surmontés par un cordon dunaire d'une hauteur de 10 à 15 m. Ces dunes, appelées « dunes flamandes » (Briquet, 1930; Sommé, 1975), forment l'unique rempart naturel qui protège la plaine maritime des incursions marines. Elles se caractérisent par une morphologie d'ensemble simple où les formes de remaniement sont rares, sauf pour ce qui est des dunes localisées à l'est de Dunkerque, où des dunes paraboliques indiquent une évolution plus complexe (Fauchois, 1998).

2. Caractéristiques météorologiques, hydrodynamiques et contexte sédimentaire

2.1. Conditions anémométriques au large et à la côte

Les différents types de temps qui affectent les côtes du nord-ouest de l'Europe engendrent de manière générale deux directions de vents majeurs dans la Manche et le sud de la mer du Nord (Vanhée, 2002; Héquette & Rufin-Soler, 2007; Maspataud, 2011). La direction dominante provient du secteur sud-ouest en lien avec les dépressions nord atlantiques qui remontent dans la Manche. Le

secteur NE forme la seconde fenêtre d'origine des vents, bien qu'ils soient moins fréquents. Ces derniers sont alors associés à des dépressions en provenance de la mer du Nord.

Dans le cadre de cette étude, des données de vent au large enregistrées à la station Sandettie ont été acquises pour la période 2012-2017. Ne bénéficiant pas de données de vent provenant d'autres stations au large, ces enregistrements horaires effectués sur une période de cinq ans offrent néanmoins un aperçu des conditions anémométriques au large (Figure IV.3).

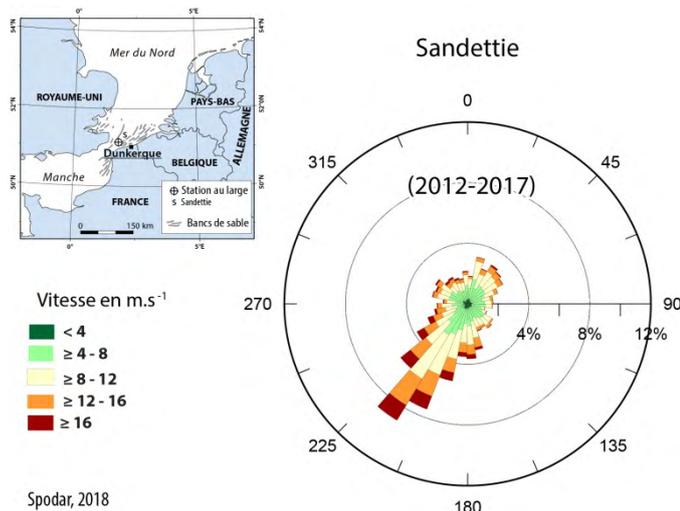


Figure IV.3 Rose des vents au large enregistrées à la station Sandettie (2012-2017)

Les vents moyens et forts ≥ 8 m/s représentent plus de la moitié des enregistrements avec 55% tandis que les vents les plus forts ≥ 16 m/s correspondent à une part non négligeable des mesures avec 6%. Les deux directions de vents précédemment évoquées se distinguent également.

Il convient de préciser que des variabilités temporelles dans la distribution des vitesses de vent au large ainsi que dans leurs directions ont lieu (Figure IV.4). Quelle que soit la période de l'année, il est possible de constater les vents du secteur SO dominant, notamment au printemps et en été. On observe également des vents de secteur NE assez fréquents au printemps. En automne et en hiver, on remarque que le faisceau des directions est globalement plus étalé, avec des vents de secteur NO fréquents. Les vents les plus forts sont enregistrés au cours de la période hivernale (Guerber *et al.*, 2008).

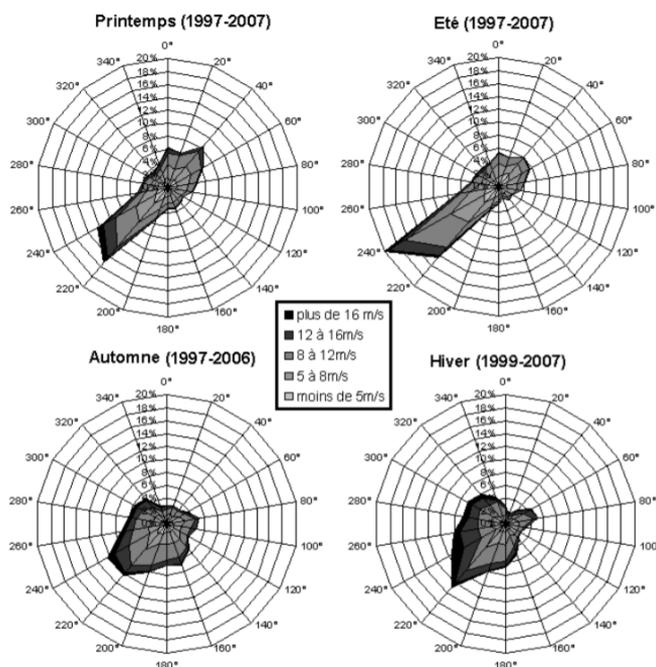


Figure IV.4 Rose des vents saisonnières sur la période 1997-2007 avec un pas de temps de 10 min (Données VLIZ, Westhinder, d'après Guerber *et al.*, 2008)

Ces deux directions de vent, sud-ouest et nord-est, caractérisent également les vents enregistrés à Dunkerque (Figure IV.5). L'orientation OSO-ENE du littoral dunkerquois expose plus le littoral de manière générale aux vents de secteur NE qui arrivent plus frontalement que ceux de secteur SO qui sont longitudinaux. L'intensité des vents diffère cependant entre les vents au large et à Dunkerque, avec un affaiblissement des vitesses à la côte. La majorité des enregistrements sont compris entre 4 et 8 m/s avec une fréquence de 48 %. Les vents moyens et forts ≥ 8 m/s représentent 30% des mesures, tandis que les vents forts (> 16 m/s) sont peu fréquents avec à peine 1% des mesures.

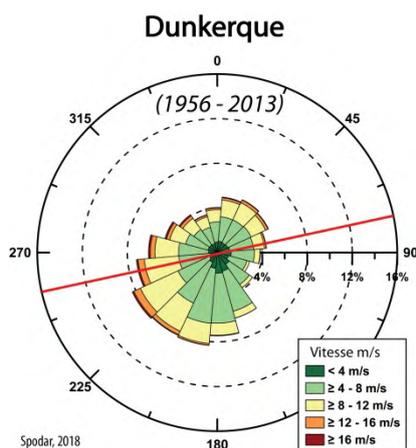
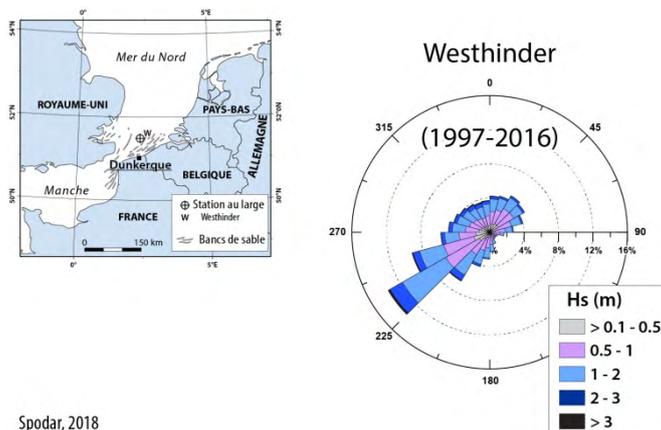


Figure IV.5 Rose des vents trihoraires à Dunkerque sur la période 1956-2013 (données Météo-France). Le trait rouge correspond à l'orientation du littoral à Dunkerque

2.2. Conditions hydrodynamiques

2.2.1. La houle

En adéquation avec les données de vents au large, les vagues proviennent principalement du secteur SO et OSO (Figure IV.6). Ces houles proviennent de l'Atlantique, remontent dans la Manche et se propagent dans la mer du Nord. La seconde origine des vagues correspond au secteur NE, avec des vagues qui proviennent de la mer du Nord.



Spodar, 2018
Figure IV.6 Rose des houles au large (bouée Westhinder 1996-2016)

La distribution des hauteurs de vagues mesurées à la bouée Westhinder entre 1996 et 2016 sont synthétisées dans le Tableau IV.1. On observe alors que près de 57 % des enregistrements sont inférieurs à 1 m.

Classes de hauteurs significatives	Fréquence (%)
< 0,5	19,9
0,5 à 1 m	36,9
1 à 1,5 m	22,8
1,5 à 2 m	11,5
2 à 2,5 m	5,4
≥ 2,5 m	3,5

Tableau IV.1 Distribution des hauteurs significatives de vagues enregistrées à la bouée Westhinder (1996-2016)

Plusieurs études antérieures ont montré que le climat de houles était variable au cours de l'année en lien avec les conditions climatiques (Bonnefille *et al.*, 1971; Sipka, 1998). Deux périodes d'agitations se distinguent avec une première période calme d'avril à octobre où les vagues les moins hautes (< 1,25 m) sont les plus fréquentes et une seconde période beaucoup plus énergétique qui s'étend d'octobre à mars. A noter que les effets des tempêtes associés à une forte houle le long de ce littoral, soumis habituellement à des vagues d'assez faible énergie, sont déterminants dans l'évolution du trait de côte. Selon (Maspataud, 2011), lors de tempêtes, les hauteurs de vagues peuvent atteindre près de 5 m au large et près de 1,80 m sur la plage, correspondant à ce qui a pu être mesuré sur l'estran au cours de nos campagnes de terrain.

Sur la côte méridionale de la mer du Nord, les directions de vagues de secteur NO à NNE principalement soulignent la réfraction notable des vagues de secteur SO qui s'opère entre le large et

la côte (Bonnetille *et al.*, 1971; Corbau, 1995). La présence de nombreux bancs subtidaux à l'avant-côte (Figure IV.1) engendre une dissipation importante de l'énergie des vagues ce qui entraîne une diminution de leur hauteur significative du large à la côte (Héquette *et al.*, 2009). Près de la côte à Dunkerque, 80% des vagues sont inférieures à 1,2 m (Clabaut, 1991).

2.2.2. La marée

Le régime tidal le long la Côte d'Opale est semi-diurne, se composant de deux basses mers et deux hautes mers par jour soit une périodicité de 12 heures et 24 minutes. Une périodicité bimensuelle responsable des cycles de vives-eaux et de mortes-eaux est également observable. L'environnement macrotidal qui caractérise ce littoral résulte de l'amplification de l'onde de marée suite à son passage de l'océan Atlantique à la bathymétrie peu profonde qui caractérise la Manche et la mer du Nord. Le marnage engendré le long de la Côte d'Opale est donc macrotidal (4 à 8 m) voire mégatidal (> 8 m) et décroît de la Manche vers la mer du Nord. Le régime hydrodynamique dans ce secteur est par conséquent fortement influencé par la marée. Sur le littoral dunkerquois, le marnage oscille entre 3,54 m à 5,45 m lors de périodes de mortes-eaux (coefficient 45) et vives-eaux (coefficient 95) respectivement. Le Tableau IV.2 synthétise les altitudes atteintes lors des marées astronomiques (coefficient 120), de vives-eaux (coefficient 95) et de mortes-eaux (coefficient 45).

Niveau de Plus Haute Mer Astronomique	PHMA	6,48 m
Niveau des Pleines Mers de Vives-Eaux	PMVE	6,05 m
Niveau des Pleines Mers de Mortes-Eaux	PMME	5,00 m
Niveau moyen	NM	3,24 m
Niveau des Basses Mers de Mortes-Eaux	BMME	1,50 m
Niveau des Basses Mers de Vives-Eaux	BMVE	0,60 m
Niveau de Plus Basse Mer Astronomique	PBMA	-0,01 m

Tableau IV.2 Niveaux marins à Dunkerque calés sur le zéro hydrographique (en Cote Marine (CM)) (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, 2017)

La circulation tidale se caractérise par l'alternance de deux courants : 1) le courant de flot lié à la phase montante de la marée, qui s'écoule parallèlement à la côte vers le N et vers l'ENE le long de la façade de la Manche et de la mer du Nord respectivement – 2) le courant de jusant lié à la phase descendante de la marée, à l'inverse dirigé vers l'OSO le long de la façade de la mer du Nord et vers le S le long de la façade de la Manche. L'intensité de ces deux courants est variable selon les coefficients de marée. De plus, on observe une dissymétrie notable entre le flot et le jusant en termes d'intensité mais également de durée. Le flot se caractérise par des vitesses plus élevées, mais c'est le jusant qui présente une durée d'action dominante (Vicaire, 1991). Le courant de flot commence environ 3h avant la pleine mer pour atteindre une vitesse maximale 1h30 avant la pleine mer. Concernant le courant de jusant, ce dernier s'initie entre 2h30 et 3h après la pleine mer, tandis que sa vitesse maximale est atteinte 3h45 après la pleine mer (Vicaire, 1991). L'intensité des courants au large est particulièrement importante dans cette région, notamment dans le détroit du Pas-de-Calais où les courants peuvent atteindre 2 m/s lors des marées de vives-eaux (Beck *et al.*, 1991). Sur l'estran, l'onde de marée étant réduite, l'intensité des courants est plus modeste, pour atteindre une vitesse moyenne de 0,30 m/s lors du flot et 0,15 m/s pendant le jusant sur la composante longitudinale. Les courants transversaux sont encore plus faibles pour atteindre des valeurs d'environ 0,06 m/s (Reichmüth & Anthony, 2007).

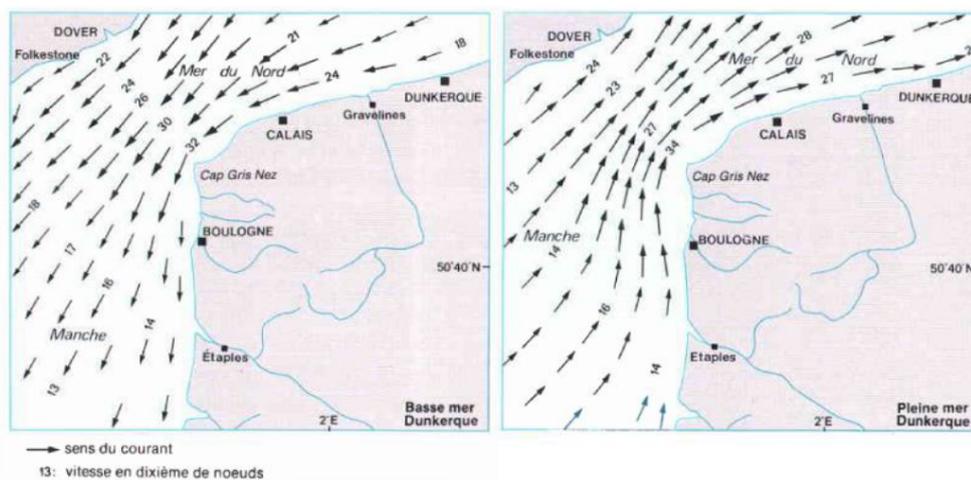


Figure IV.7 Carte des courants de surface au cours de la marée descendante (à gauche) et montante (à droite) (Augris *et al.*, 1990)

2.2.3. Les surcotes

Aux niveaux de marées théoriques peuvent s'ajouter ou se soustraire une certaine hauteur d'eau en lien avec les conditions météorologiques. Lorsque la différence de hauteur entre le niveau d'eau observé et le niveau d'eau prédit est positif on parlera de surcote. A l'inverse une hauteur négative correspond à une décote. Les variations de pressions atmosphériques peuvent être à l'origine de de ces phénomènes en induisant des rééquilibrages hydrostatiques. Par rapport à la moyenne de 1013 hPa au niveau de la mer, une hausse de 1 hPa provoque un abaissement de 1 cm du niveau du plan d'eau prédit, tandis que la baisse de 1 hPa induit une élévation de 1 cm de ce niveau. L'action des vents, en fonction de leurs directions, vitesses et durée, peuvent également être à l'origine d'une variation de la hauteur prédite du plan d'eau. L'orientation va notamment jouer dans le phénomène de décote ou surcote qui va être observé. De forts vents d'afflux seront notamment à l'origine de surcote avec un apport de masse d'eau important sur le littoral. Les interactions entre ces phénomènes météorologiques peuvent induire d'importantes surcotes ou décotes de 1 à 2 m dans notre région (Chaverot *et al.*, 2008). Lorsque ces surcotes sont associées à des marées de vives-eaux, des épisodes érosifs majeurs peuvent alors se produire (Vasseur & Héquette, 2000; Clabaut *et al.*, 2000; Ruz & Meur-Ferec, 2004; Ruz *et al.*, 2005).

2.2.4. Impacts des forçages sur la dynamique sédimentaire

Les courants marins puissants en Manche et mer du Nord induisent un transport sédimentaire important, en particulier au large où l'action de la marée est plus intense qu'à la côte. La vitesse des courants est fréquemment supérieure aux vitesses de mise en suspension des sédiments en raison d'une granulométrie assez fine. Que ce soit au large ou à l'avant-côte, le transport est lié aux fluctuations de la marée. Les pics de transport des sédiments sont corrélés aux pics de vitesse des courants de marée.

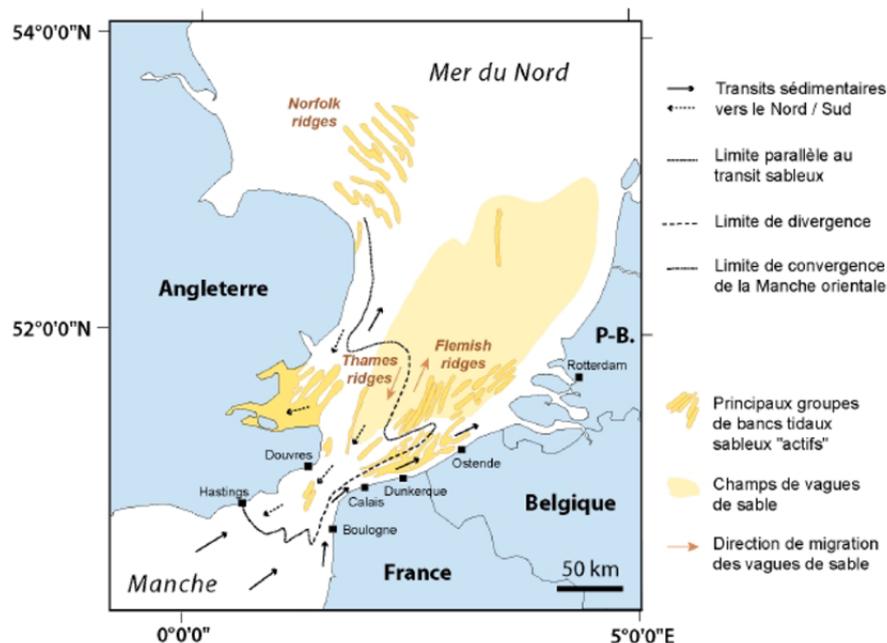


Figure IV.8 Directions des transits sédimentaires et localisation des bancs subtidaux entre la Manche et la mer du Nord (Houbolt, 1968; McCave, 1971; Belderson *et al.*, 1982; Stride, 1982; Dewez *et al.*, 1989; Maspataud, 2011)

L'action combinée des forçages précédemment décrits, avec dissymétrie des courants tidaux en faveur d'un flot plus intense que le jusant ainsi que des vents et vagues originaires majoritairement du secteur OSO, engendre un transport sédimentaire résiduel dirigé vers l'est parallèlement à la côte (Anthony et Héquette, 2007 ; Héquette *et al.*, 2008a). Du fait d'une taille de grain particulièrement fine, les sédiments sont de plus facilement mobilisables par les courants de marées ce qui induit un transport sédimentaire conséquent.

Les petits-fonds qui se caractérisent par de nombreux bancs sableux parallèles à la côte conditionnés par les forts courants tidaux. A noter que l'action combinée des houles de tempêtes et des courants tidaux peut induire une migration de ces bancs vers la côte (Héquette & Aernouts, 2010; Anthony, 2013; Ruz *et al.*, 2017). Ces bancs constituent un stock sédimentaire important. Leur présence peut être identifiée lors d'une houle énergétique avec un déferlement sur leur crête.

3. Présentation du Grand Port Maritime de Dunkerque

Le Grand Port Maritime de Dunkerque (GPMD) s'imbrique donc sur cette façade maritime. Au fil de son développement et extension, l'artificialisation du littoral a progressivement affecté 17 km de linéaire côtier. Aujourd'hui, le port est constitué par deux entités, le port Ouest et le port Est, séparées par un linéaire de plage d'environ 11 km, la plage du Clipon et la plage au droit de la digue du Break (Figure IV.9). Le développement du port avec notamment son extension progressive vers l'ouest est associé à d'importantes modifications du littoral. En lien avec le sujet de notre étude, des rechargements de plage ont en plus été effectués au fil des travaux, c'est pourquoi un retour sur l'extension du port mérite d'être effectué.



Figure IV.9 Façade portuaire de Dunkerque et localisation des deux sites de suivis, celui à l'avant-port Ouest face à la digue du Ruytingen (A) et celui à Malo-les-Bains face à la digue des Alliés (B)

3.1. Historique du développement du port

La partie la plus ancienne du port se situe à l'emplacement actuel du port Est. Simple port de pêche au hareng à l'origine, l'activité commerciale va débiter à partir du XIV^{ème} siècle. Les premières grandes infrastructures avec la construction de deux jetées de 350 m ainsi qu'un quai de 450 m de longueur vont apparaître au XVI^{ème} siècle (Figure IV.11-A) (Corbau, 1995). La ville se fortifie au cours du XVII^{ème} siècle et les peintures et cartes de l'époque permettent de constater la présence d'un vaste estran ainsi que d'un large cordon dunaire de part et d'autre de la ville (Figure IV.11). C'est après la première guerre mondiale que l'impact du développement du port sur le littoral va s'intensifier. En effet, de 1930 à 1938, un nouvel avant-port est créé, composé de la construction de la jetée Ouest ainsi que du prolongement d'une jetée déjà existante, la jetée Est.

A partir de 1958, l'extension du port vers l'ouest débute avec la création d'un bassin minéralier, appelé Bassin Maritime, qui est construit en deux phases : la première sur 2 km jusqu'en 1962 et la seconde sur 5,5 km jusqu'en 1969 (Figure IV.10). Ce bassin se retrouve connecté à celui de Mardyck. Cette extension vers l'ouest entraîne la destruction du massif dunaire. La digue du Break, qui s'étend sur 6 km, est construite au cours de la même période entre 1959 et 1962, afin de protéger de la mer du Nord ces nouveaux bassins (Figure IV.9).



Figure IV.10 Photographies prises avant (1970), pendant (1984) et après (2004) le creusement du canal des dunes (sources : archives du GPMD) (Tresca, 2013)

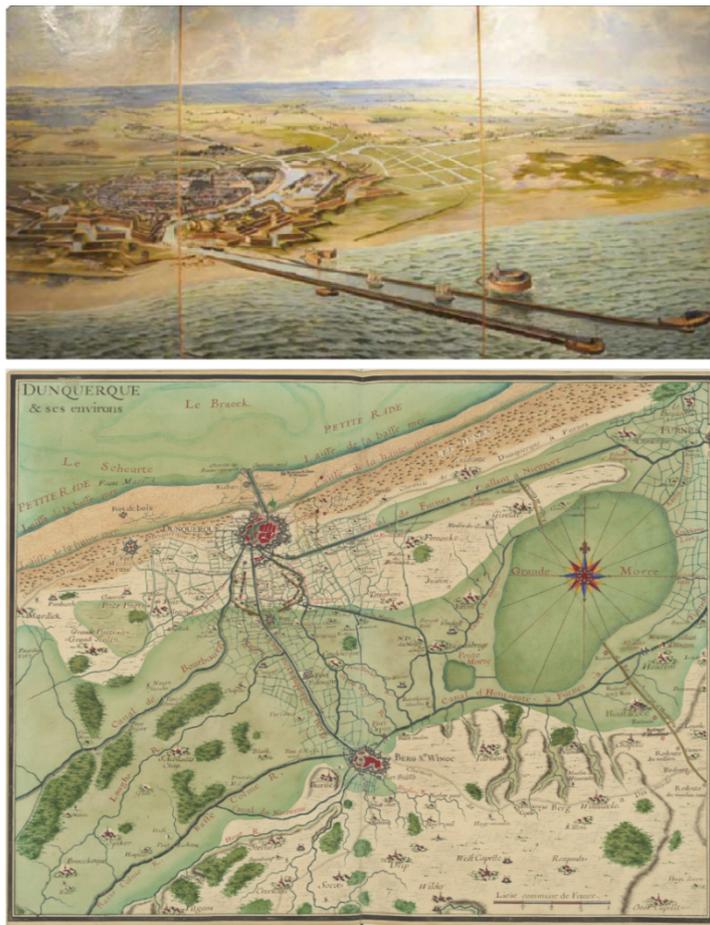


Figure IV.11 Peinture représentant la ville fortifiée de Dunkerque ainsi que les deux jetées du port au XVII^{ème} siècle (source : musée portuaire de Dunkerque) (en haut) et carte du littoral et de l'arrière-pays en 1700 (source : archives municipales de Dunkerque) (en bas)

Le développement des infrastructures portuaires se poursuit avec une nouvelle phase de grande ampleur correspondant aux travaux de construction du Port Ouest et de son avant-port de 1971 à 1974. L'implantation d'un nouveau port répond à un besoin d'accueil de navires plus importants de 300 000 tonnes pour un tirant d'eau de 23 m, contre 115 000 tonnes et 14,2 m de tirant d'eau pour le port Est. Au cours de ces travaux, 100 Mm³ de sédiments ont été dragués et une grande partie, dont le volume est inconnu, a été utilisée pour créer l'embase de la jetée du Clipon (Meur-Ferec & Ruz, 1998). Entre 1982 et 1984, le canal des Dunes est creusé afin d'effectuer la jonction entre le bassin de Mardyck et le port Ouest et ainsi relier les deux sous-ensembles du port Est et Ouest. Lors creusement du canal des Dunes, les sédiments sablo-limoneux dragués ont été refoulés sur la plage du Clipon afin de créer une bande de protection entre les nouveaux ouvrages portuaires et la mer du Nord. Le volume rechargé sur la plage s'élève à 500 000 m³ permettant la création d'une plateforme sableuse supratidale de 150 m de large et dont une partie a été nivelée à 10 m CM (Meur-Ferec & Ruz, 1998; Bertier, 2009; Tresca, 2013).

Ce secteur rechargé a ensuite été en partie aménagé dans le but de créer des dunes bordières avec l'installation de fascines et la plantation d'oyats pour favoriser l'accumulation éolienne et stabiliser le site (Tresca, 2013).

Les derniers travaux portuaires conséquents concernent l'implantation d'un terminal méthanier sur la période 2011-2016 au sud de la digue du Ruytingen. Le creusement d'une darse pour l'accueil des navires de ce nouveau terminal a engendré le dragage d'un important stock de sédiment, dont une partie a été refoulé au droit de la digue du Ruytingen, représentant notre second site de suivi.

La superposition du trait de côte actuel sur la carte d'Etat-Major du XIX^{ème} siècle illustre clairement l'artificialisation du littoral ainsi que l'avancée du trait de côte vers le large qui peut atteindre 2 km (Tresca, 2013) (Figure IV.12). D'après (Bertier, 2009), les territoires gagnés sur la mer entre les années 1949 et 2000 s'étendent sur 10 km².

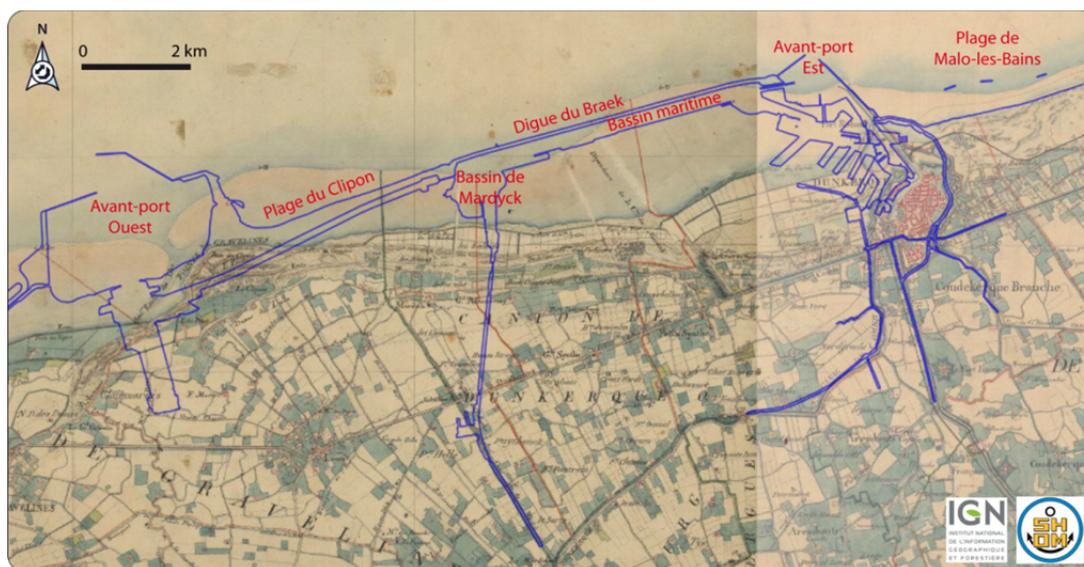


Figure IV.12 Superposition du trait de côte actuel (de 2009) sur la carte d'Etat-Major du XIX^{ème} siècle (d'après Tresca (2013))

3.2. Engagement environnemental du GPMD

Malgré une artificialisation du trait de côte assez massive, une certaine « renaturation » de ce littoral est observable que ce soit de manière spontanée ou par le biais d'interventions des gestionnaires du port, comme évoqué précédemment avec la création de dunes sur le secteur du Clipon. Dans ce secteur ouest de la façade portuaire, l'anse du Clipon se caractérise également par une morphologie particulière composé d'une zone sablo-vaseuse où la présence de salicornes a été observée. Une flèche sablo-graveleuse se situe également dans ce secteur, appelée localement « flèche des sternes » (Figure IV.9) en raison de la présence de colonies de sternes naines. Plusieurs types de dunes se sont également développées dans le secteur est du port sur la digue du Break (dunes de sommet de digue, dunes de pied de digue etc) (Tresca, 2013). La façade du port représente une Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique (ZNIEFF) de type I. De plus, cette façade intègre le site Natura 2000 « Bancs des Flandres ». Des schémas de gestion et des outils spécifiques au GPMD ont également été élaborés comme le Schéma Directeur du Patrimoine Naturel (SDPN) ou encore le Plan de Gestion des Espaces Naturels (PGEN).

En plus d'une importante gestion de la biodiversité, l'engagement environnemental du GPMD passe également par une gestion de ses sédiments de dragage. L'entretien des infrastructures du

port (chenaux de navigation, bassins, darses etc) nécessite un dragage régulier afin d'éviter l'envasement de celles-ci. Le permis d'immersion du port de Dunkerque autorise un volume de dragage de 6,5 Mm³/an, avec 1,2 Mm³/an pour le Port Est et 5,3 Mm³/an pour le Port Ouest. Le GPMD est doté de nombreux documents et outils afin d'orienter, encadrer et planifier la gestion des sédiments de dragage. Parmi ces documents le Plan d'Aménagement et de Développement Durable (PA2D) tend à concilier activités portuaires et préservation de l'environnement. En découle le Schéma Directeur des Dragages (SDD), établi dès 2006 et régulièrement renouvelé, qui est un outil stratégique dont la finalité est de définir les lignes directrices majeures des filières de gestion des sédiments et de fixer des objectifs environnementaux. Ce document est lié au Plan de Gestion Opérationnel des Dragages (PGOD), l'outil opérationnel, qui établit un mode opératoire précis pour la gestion des sédiments. A noter que tous ces documents spécifiques au GPMD sont évidemment en lien avec la réglementation française en vigueur, d'où des renouvellements réguliers. Plus concrètement, différentes filières de gestion en fonction de la nature et de la qualité des sédiments sont mises en œuvres. Les vases immergeables, sont clappées en mer, dans l'une des quatre zones d'immersion prévues à cet effet. Concernant les vases non immergeables, c'est-à-dire dont la qualité physico-chimique n'est pas satisfaisante et interdit leur immersion en milieu naturel, une gestion à terre est effectuée avec un traitement dans un bassin de décantation. Plusieurs formes de valorisations de ces sédiments traités ont été expérimentées comme le réemploi dans une butte paysagère, la création d'un linéaire de 700 m de route et dans la fabrication de blocs de parements de brise-lames (Herman *et al.*, 2014). Enfin, les sables sains sont prioritairement employés dans des opérations de reconstitution du domaine public maritime de type rechargement ou encore confortement d'ouvrage.

3.3. Présentation détaillée des sites ateliers

Deux rechargements sédimentaires massifs ont été effectués sur la façade portuaire. L'un est localisé à l'avant-port Ouest (Figure IV.9-B) tandis que le second est localisé à Malo-les-Bains à l'est de l'avant-port Est (Figure IV.9-A). Il convient de préciser que la présentation des sites qui va à présent être effectuée concerne uniquement les sites avant rechargement. Une description du site après les travaux de rechargement sera faite dans la suite de ce manuscrit.

3.3.1. La plage de Malo-les-Bains

Sur la Figure IV.13 illustrant l'état du site en 2009 (avant rechargement), les différents ouvrages et éléments caractéristiques abordés dans les paragraphes suivants ont été indiqués.

- Historique des aménagements

La partie est du port Est de Dunkerque se caractérise au XIX^{ième} siècle par un large estran ainsi qu'un cordon dunaire bien développé. Le perré de Malo-les-Bains a été construit en plusieurs étapes entre 1896 et 1908, en lien avec le développement de la station balnéaire (Corbau, 1995). La digue des Alliés, appelée à l'origine digue de l'Est, fut construite en 1876 à des fins militaires pour protéger la ville fortifiée. Elle est reliée à la jetée Est du port déjà existante à l'époque. Cette jetée fut prolongée en 1898 de 140 m. Comme mentionné précédemment, l'avant-port du port Est n'est construit que dans les années 30 avec des modifications apportées à la jetée Est et la construction d'une jetée Ouest.

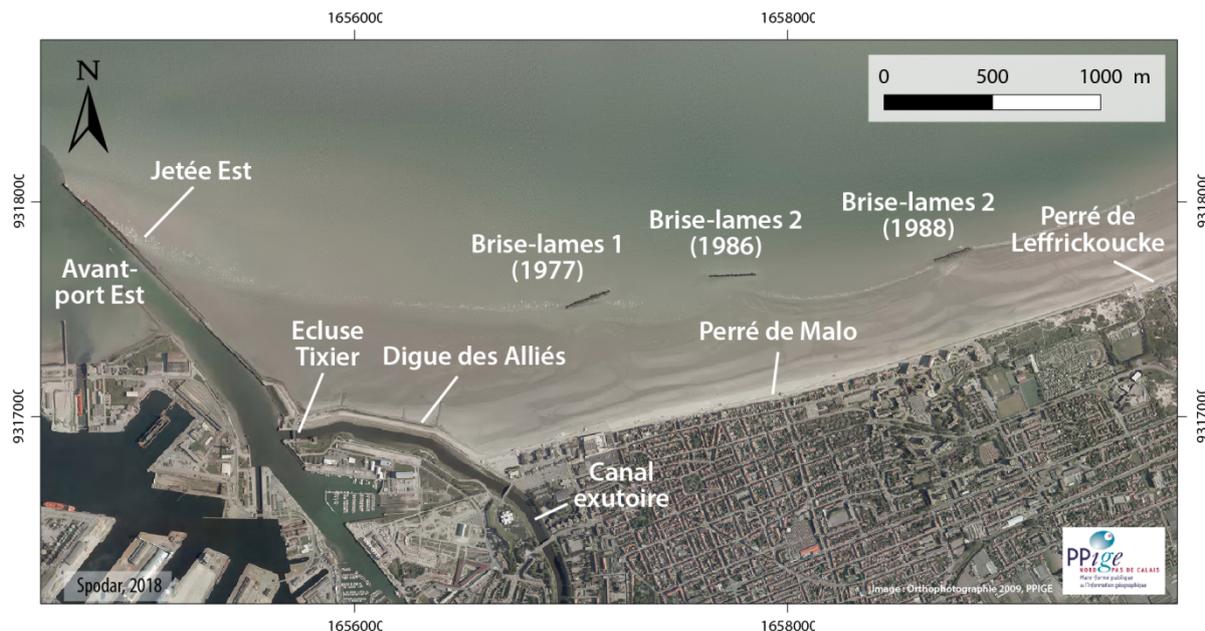


Figure IV.13 Cartographie des ouvrages et éléments caractéristiques du site de Malo-les-Bains (ortho photo de 2009)

En 1938, la construction d'un canal exutoire et d'une écluse (l'écluse Tixier) permettant d'évacuer à la mer les eaux du polder, s'achèvent et la digue des Alliés devint alors la rive droite de l'unique canal exutoire du territoire dunkerquois du réseau des Wateringues (Wateringue du Nord à l'époque) (Figure IV.13). L'extension du port Est que ce soit le simple prolongement des jetées ou la construction de l'avant-port a vraisemblablement entraîné une érosion de la plage au droit de la digue des Alliés (Le Gorgeu & Guitonneau, 1954). L'avant-port représente effectivement un obstacle à la dérive littorale vers l'est (Oblinger, 2008). Les plus anciennes photos aériennes du site datant de 1920 mettent effectivement en évidence l'absence de plage sèche au droit de la digue des Alliés lors des marées hautes. Plusieurs aménagements ont été installés afin de lutter contre l'érosion. Trois épis ont été construits en haut d'estran, perpendiculairement à la digue des Alliés, dans les années 30. En 1978, un rechargement de sable de 250 000 m³ a été effectué en haut de plage et deux brise-lames ont été implantés parallèlement à la plage. Avec la poursuite de l'abaissement de la plage, un troisième brise-lame a été construit en 1988, accompagné encore une fois d'un rechargement de 140 000 m³ (Oblinger, 2008).

- La digue des Alliés : un ouvrage clé pour la protection du territoire mais vulnérable

La digue des Alliés sépare donc le domaine maritime du canal exutoire. Cet ouvrage assure ainsi une double protection, la première contre les submersions marines, et la seconde contre les crues continentales du réseau des Wateringues. Les eaux continentales excédentaires sont évacuées à la mer via cet unique canal exutoire du secteur hydraulique dunkerquois du réseau des Wateringues (Annexe 4) et l'écluse Tixier. Cet ouvrage Tixier se compose de cinq portes à la mer. Lors des hautes mers, ces portes sont fermées afin d'empêcher les eaux de la mer du Nord de s'engouffrer dans les chenaux et d'envahir le polder. Les eaux continentales sont alors retenues dans le réseau jusqu'au moment des basses mers où les portes de l'écluse Tixier s'ouvrent pour permettre l'évacuation des eaux douces par un écoulement gravitaire renforcé par un système de pompage. A

noter que si des hautes mers se conjuguent à une période de crue, un système de pompage est activé afin de les rejeter dans la mer du Nord en maintenant les portes fermées (Annexe 5).

Deux accidents ont cependant révélé la vulnérabilité de la digue des Alliés lors de deux tempêtes sévères, en 1949 et 1953. La première tempête en provenance du secteur NO du 1^{er} et 2 mars 1949 s'est produite lors de coefficients de marée de 85-87. L'assaut des vagues a engendré une brèche de 200 m au centre de l'ouvrage ainsi qu'un franchissement du perré de Malo-les-Bains par les vagues (Maspataud *et al.*, 2013). La seconde tempête du 31 janvier et 2 février 1953 correspond à l'événement appelé « *the North Sea flood of 1953* » ou encore « *the Great Surge* » qui a frappé toute la côte méridionale de la mer du Nord (McRobie *et al.* 2005). Les vents de secteur nord à nord-ouest, associés à une marée de vive-eau ont engendré un niveau d'eau estimé à 7,90 m CM, sachant cependant qu'aucune mesure marégraphique n'est disponible à cette période en Manche (Daubord, 2014). D'après les archives du port de Dunkerque, la valeur de la surcote a été estimée à 2,35-2,40 m (Bernier *et al.*, 1979). Ce haut niveau d'eau associé à de fortes houles a engendré la rupture de la digue à deux endroits se soldant par deux brèches de 200 m et 120 m de longueur (Figure IV.14), de part et d'autre de celle de 1949 (Le Gorgeu & Guitonneau, 1954). Une submersion marine s'est alors produite et les bas quartiers de dunkerque ont été inondés (Figure IV.14).

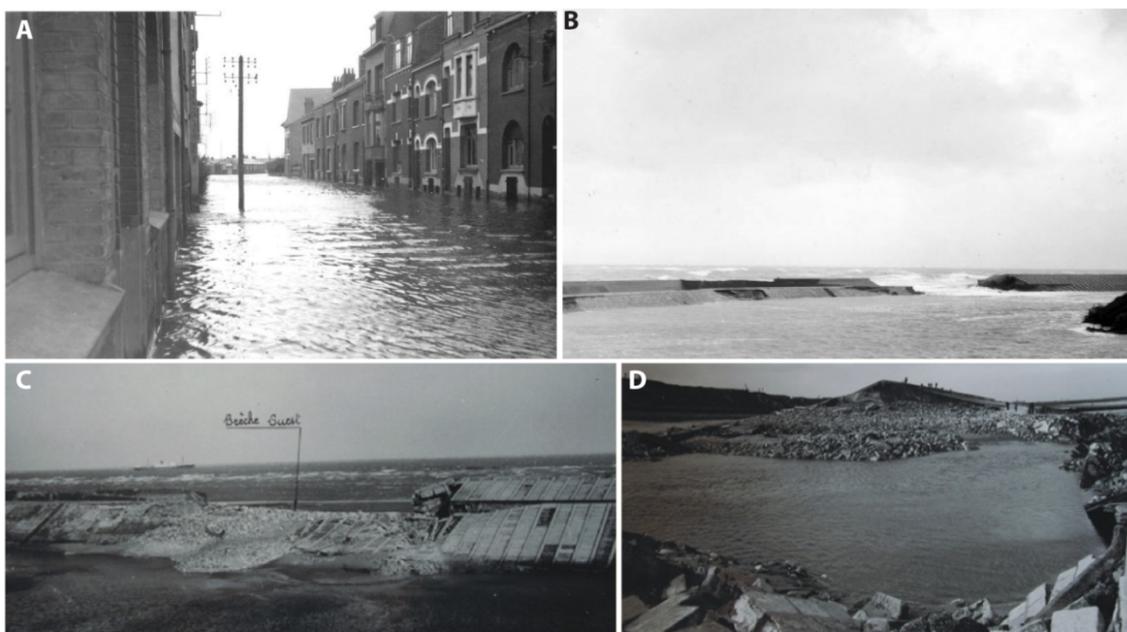


Figure IV.14 Photographies de la rupture de la digue, de la submersion et des inondations avec en A) la rue Paul Dufour inondée, B) un aperçu de la submersion marine, C) la brèche ouest et en D) la brèche est

Aujourd'hui, la partie sommitale de la digue est à + 12 m CM après son élévation en 1949 (profil complet de la digue disponible en Annexe 6), mais la plage restreinte qui se situe au pied de l'ouvrage ne garantit pas une protection optimale contre les hauts niveaux d'eau et les vagues.

- Caractéristique du site

La plage au droit de la digue des Alliés représente la partie la plus occidentale de la plage de la station balnéaire de Malo-les-Bains. Plusieurs ouvrages jouxtent cette plage - à savoir (d'ouest en est) la jetée Est, la digue des Alliés, le perré de Malo-les-Bains et une partie du perré de Leffrinckoucke - sur 4,5 km environ en direction de la Belgique (Figure IV.13). La plage, en

particulier pour la partie au droit de la digue des Alliés, se situe en zone d'abri par rapport aux vagues dominantes de secteur SSO à OSO grâce à la présence de l'avant-port Est. En revanche les vents et les houles de secteur N à NE viennent frapper frontalement le site. Les bancs subtidaux au large contribuent néanmoins à l'atténuation de ces houles, le plus proche d'entre eux étant le banc du Hills (Figure IV.15). Entre la plage et ce banc, la zone est caractérisée par des petits-fonds compris entre 0 m CM à -5/-6 m CM mais également par un chenal de navigation appelé Chenal Est atteignant une profondeur de -20 m CM (Figure IV.15).

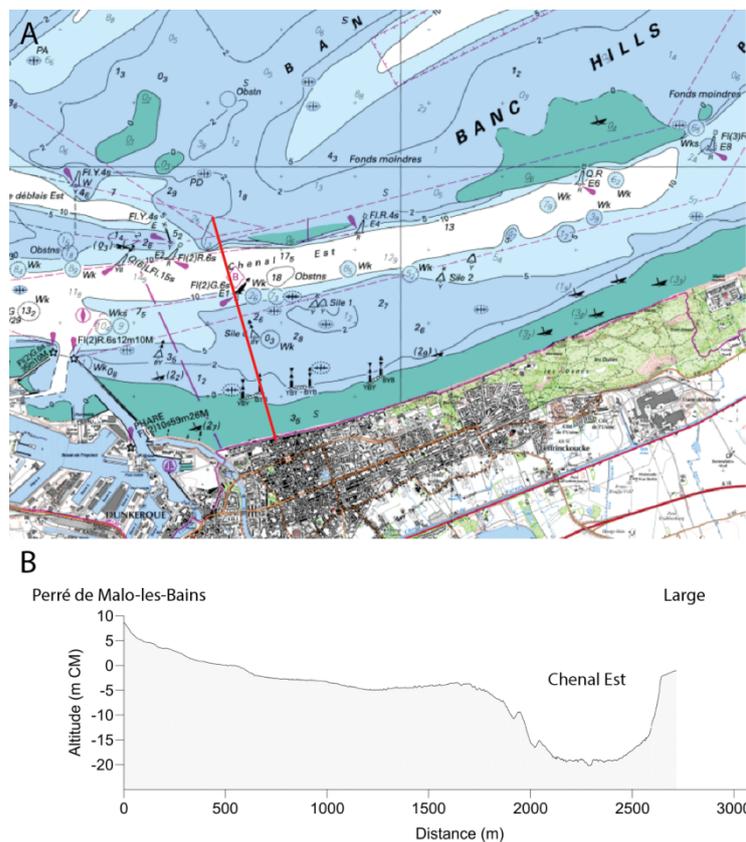


Figure IV.15 A) Carte marine du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) et carte de l'Institut Géographique National (IGN) (source : www.geoportail.fr) - B) Profil topo-bathymétrique du site de Malo-les-Bains (profil extrait d'un MNT réalisé par GEOXYZ en 2011)

Au niveau de Malo-les-Bains et de Leffrinckoucke l'estran, en pente faible ($\tan\beta = 0,012$ à $0,015$), se découvre sur 350 à 400 m à marée basse lors des marées de vives-eaux. Comme toutes les plages de la côte d'Opale, la plage de Malo-les-Bains est caractérisée par un système de barres et de bâches entrecoupé par des chenaux de vidange (Oblinger & Anthony, 2008). D'un point de vue granulométrique, le sédiment se caractérise par un sable fin à moyen, avec un grain moyen de 0,14 mm à 0,24 mm, bien à très bien classé (Danish Hydraulic Institute, 2012). L'échantillonnage réalisé par le bureau d'étude Danish Hydraulic Institute (DHI) lors de la caractérisation du site avant le rechargement dans l'étude de conception de dispositif de protection de la digue, montre également une variation de la taille des grains, avec une granulométrie décroissante du haut vers le bas de l'estran. Le haut de plage, au niveau de la digue-promenade de Malo-les-Bains, la partie la plus

fréquentée de la station balnéaire, est chaque année reprofilé par la mairie de Dunkerque à la fin de l'hiver afin de l'aménager pour la période estivale. Du fait de son rehaussement, le haut de plage peut accueillir divers aménagements comme les cabines de plage, les terrasses de bars et restaurants ou encore des aires de jeux. Lors de la période hivernale et/ou en cas de risques d'événements extrêmes ou intenses (coups de vent, grandes marées etc.), ce haut de plage est également parfois remodelé afin de créer un bourrelet de sable afin de protéger le perré ou certains aménagements



Figure IV.16 Photographie prise le 22/03/2015 de bourrelets sableux modelés pour protéger des hauts niveaux d'eau les cabines de plage situées en arrière pendant les grandes marées (photo : Alexandra Spodar)

Cependant, au droit de la Digue des Alliés avant la mise en œuvre du rechargement sédimentaire, la plage était entièrement submergée à marée haute. Les vagues pouvaient alors atteindre l'ouvrage. Grâce à des simulations numériques effectuées par DHI (Danish Hydraulic Institute, 2012) lors de l'étude de caractérisation du site, le rythme d'érosion au niveau de la digue des Alliés a été estimé à $- 10\ 000\ \text{m}^3/\text{an}$. Ce secteur souffrait effectivement d'une érosion chronique comme mentionné dans l'historique du site.

3.3.2. La digue du Ruytingen

La digue du Ruytingen se localise à l'avant-port Ouest (Figure IV.9). Avant les modifications apportées par l'Homme, cette portion de littoral se caractérisait par un large estran et un massif dunaire bien développé. Pendant la première guerre mondiale, ces dunes ont été remodelées et aménagées pour la création de campements militaires (Bertier, 2009). L'entre-deux guerres offre une finalité plus touristique à ce secteur, avec le développement d'une petite station balnéaire (Meur-Ferec & Ruz, 1998). Pendant la seconde guerre mondiale, un certain nombre de blockhaus ont été construits engendrant d'importants remaniements dans la partie dunaire. Mais c'est l'extension du port vers l'ouest qui entraîne les modifications les plus notables le long de ce littoral (Figure IV.17). La construction de la digue du Ruytingen en 1973 et 1974 est liée à la création du nouvel avant-port Ouest. L'ensemble formé par cet ouvrage et la jetée du Clipon ($\sim 1,5\ \text{km}$) qui le prolonge sert effectivement à protéger le port Ouest des houles du large, limitant ainsi l'agitation à l'intérieur du domaine portuaire.

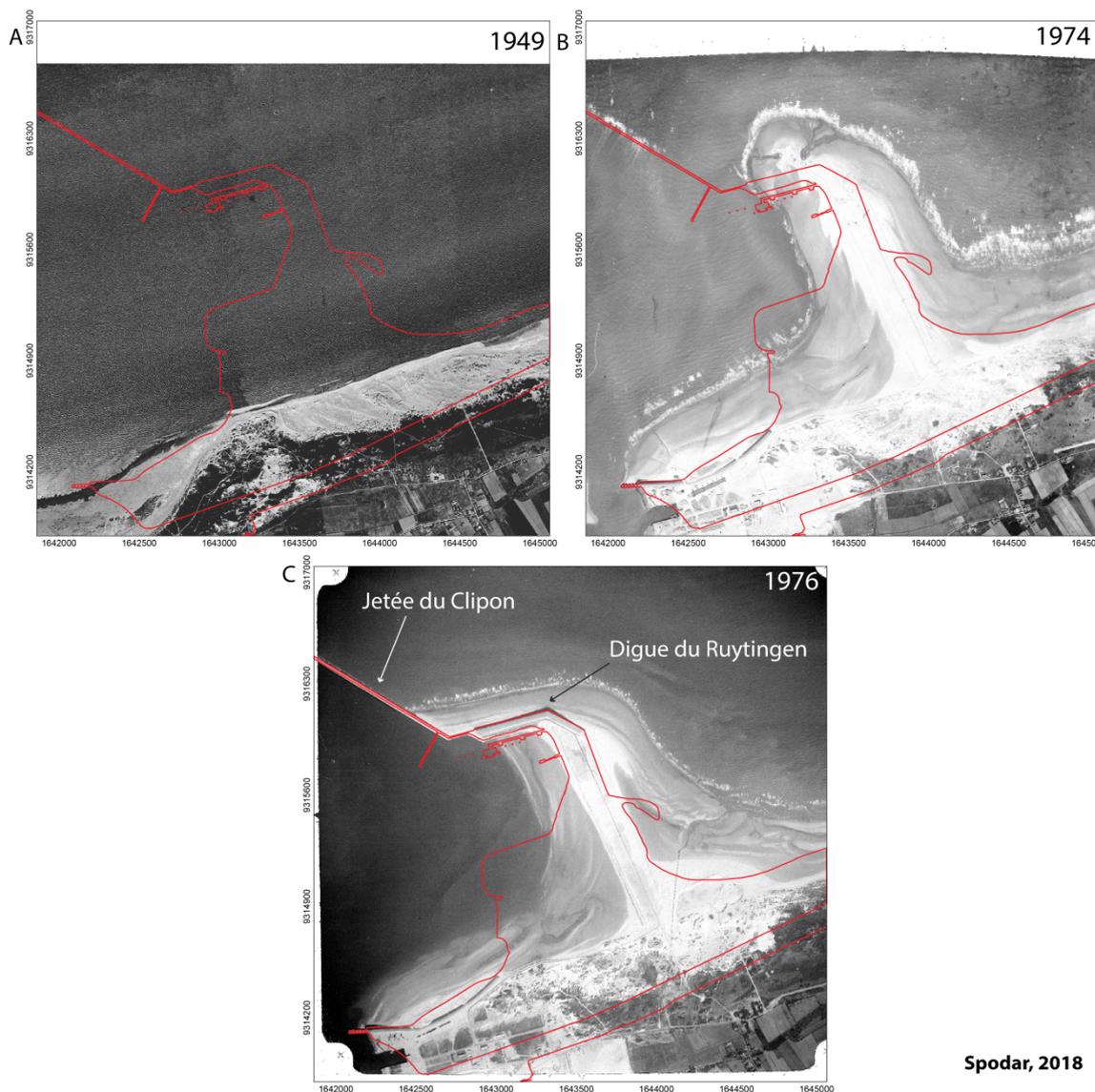


Figure IV.17 Etat initial du site en 1949 avant les travaux de l'avant-port Ouest (A), en 1974 pendant la construction d'une plateforme dans la partie Est de l'avant-port Ouest (B) et en 1976 après les travaux de construction de la digue du Ruytingen et de la jetée du Clipon (C) (source des photos aériennes : IGN)

Actuellement, l'avant-côte face à l'ouvrage se caractérise par la présence du chenal intermédiaire qui relie les ports Ouest et Est, atteignant des profondeurs d'environ 15-16 m CM (Figure IV.18-A). On note également la présence d'un banc au nord-est de la digue du Ruytingen, le banc de Mardyck, qui s'étend sur l'avant-côte face à la plage du Clipon. Entre ce banc et l'ouvrage se trouve une dépression localement « la fosse » du Ruytingen qui atteint une profondeur de -5 m CM (Figure IV.18-B).

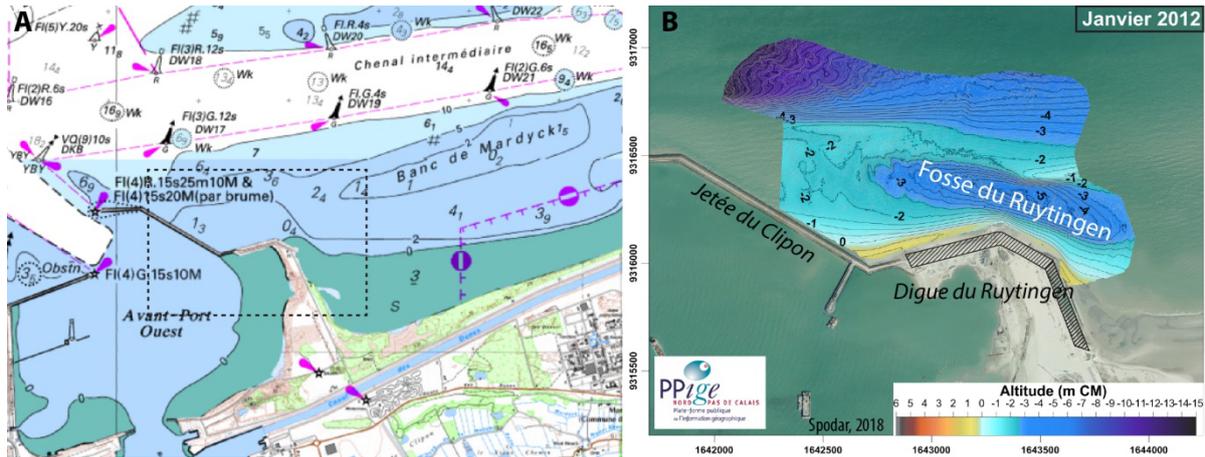


Figure IV.18 Carte marine du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) et carte de l'Institut Géographique National (IGN) (source : www.geoportail.fr) de l'avant-port Ouest (A) et levé topobathymétrique de janvier 2012 avant les travaux de rechargement (B)

Concernant la partie intertidale, la présence d'une plage au droit de la digue du Ruytingen est visible sur la photo aérienne de 1976, bien qu'elle ne soit pas très large (Figure IV.17-C). En revanche en 2009 avant le lancement de travaux (Figure IV.19), la plage au pied de la digue du Ruytingen est quasi-inexistante même à basse mer. Des prélèvements granulométriques effectués en 2007 par le bureau d'études Sogreah mettent en évidence la présence d'un sable fin sur l'étroite bande de sable le long de l'ouvrage avec un grain médian compris entre 0,14 et 0,19 mm.

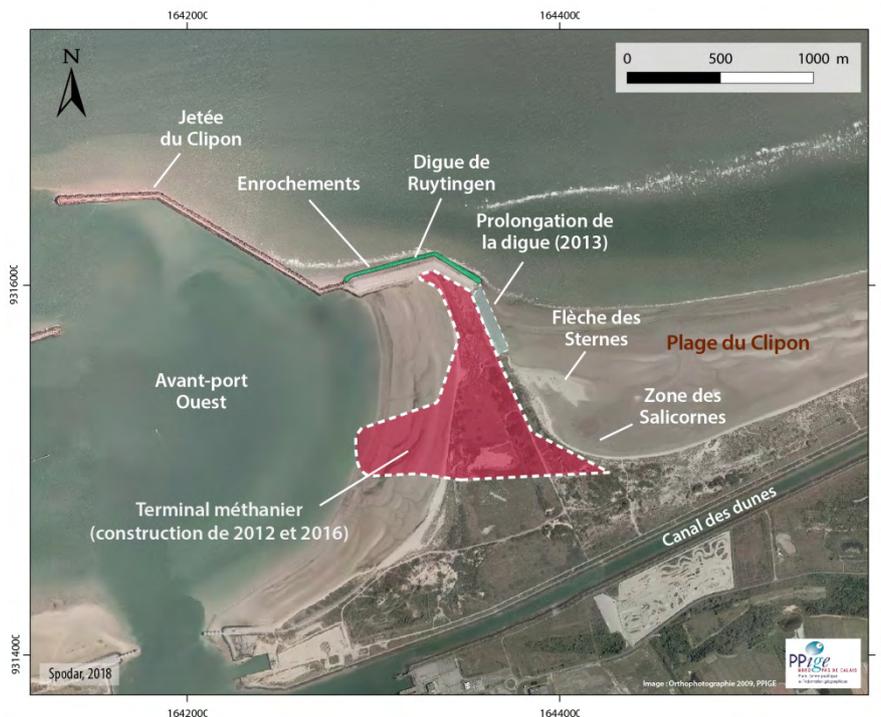


Figure IV.19 Cartographie des ouvrages et éléments caractéristiques du site de l'avant-port Ouest (orthophotographie de 2009)

En lien avec la construction du terminal méthanier, la digue du Ruytingen a été prolongée vers le sud sur 350 m en 2011. L'ouvrage prend désormais la forme d'un « arc » d'environ 1,1 km de long au total, composé de trois arêtes, pour une altitude de 8,5 m NGF. Suite à la construction du terminal méthanier en 2011, la digue doit assurer également la protection de cette infrastructure qui a été implantée juste en arrière de celle-ci. Les risques étant multipliés en cas d'accidents liés à une potentielle rupture de l'ouvrage, un confortement de la digue par rechargement a donc été effectué.

Conclusion du chapitre

Le long de la côte méridionale française de la mer du Nord, où se situe le port de Dunkerque, le régime hydrodynamique est contrôlé par un forçage tidal intense auxquels se surimpose les épisodes énergétiques de tempêtes associées à de fortes houles. Le port de Dunkerque est venu progressivement modifier le trait de côte par une artificialisation massive et fige aujourd'hui 17 km de littoral. Les deux sites qui ont été étudiés se localisent dans deux secteurs bien différents du port. Il convient de préciser que la configuration et la structure de la façade portuaire n'exposent pas ces deux sites de suivis aux mêmes intensités face aux forçages météorologiques et hydrodynamiques. Effectivement, l'avant-port Ouest forme une entité beaucoup plus avancée vers le large que le reste de la façade portuaire et que le littoral dunkerquois de manière général. L'ensemble des jetées et digues, dont la digue du Ruytingen, servant à protéger l'avant-port se retrouvent alors en position très exposée. La plage au niveau de la digue du Ruytingen reçoit donc frontalement les vagues de secteur NO à NE, auxquels s'ajoute une plus grande vulnérabilité à ceux d'origine du secteur ouest. Au contraire, de par sa configuration, l'avant-port Est confère à la plage au droit de la digue des Alliés une protection majeure face aux forçages d'origine du secteur ouest et sud-ouest. En revanche, le site se retrouve moins protégé face aux événements de secteur N à NE.

Chapitre V. Approche méthodologique : acquisition et traitement

1. Données morphologiques de la plage et de l'avant-plage

Un important suivi topographique et bathymétrique a été effectué depuis la mise en œuvre des deux rechargements sédimentaires afin de suivre leur évolution. Dans le cadre de ce travail doctoral, un suivi de terrain a été effectué par la réalisation de profils topographiques de plage. Un autre type de levé topographique sur une vaste emprise est également disponible. Ces levés effectués à la demande du GPMD ont été mis à disposition de ce travail doctoral. Ces deux types de levés sont complémentaires avec des profils topographiques réalisés à plus haute fréquence temporelle que les levés sur une vaste emprise. Le système de projection de l'ensemble des données a été uniformisé et ces dernières sont toutes exprimées en Lambert 93 CC50.

1.1. Suivi topographique de l'estran

1.1.1. Profil topographique de plage

1.1.1.1 Matériel utilisé et fonctionnement

Les profils topographiques ont été réalisés à l'aide d'un DGPS (*Differential Global Positioning System*) Leica TPS Syst1200. Ce DGPS se compose d'une base fixe ainsi que d'une antenne mobile reliée par un signal radio. La base fixe est installée sur un point dont les coordonnées géographiques sont connues avec une précision atteignant le centimètre grâce à un géoréférencement à l'aide de points de nivellement IGN. L'unité mobile, composée d'une antenne et d'un ordinateur de bord qui enregistre les mesures, est manipulée par un opérateur sur le terrain afin d'acquérir les données topographiques. L'installation de l'antenne GPS sur une canne elle-même fixée sur une roue de vélo permet l'acquisition de données en continu, tous les 0,5 m en distance ou 0,1 m en altitude, permettant ainsi une augmentation de la densité de point de mesure enregistrée.

Les deux éléments qui composent le système, base fixe et antenne mobile, utilisent les mêmes satellites à partir desquels ils se synchronisent et calculent leur position. La base fixe effectue ensuite une comparaison entre la position calculée d'une part et les coordonnées précises qui ont été paramétrées au préalable par l'opérateur d'autre part. Les corrections en X, Y et Z déduites par la base sont instantanément envoyées à l'antenne mobile par transmission radio. Cette dernière corrige alors sa position avant d'enregistrer les mesures dans l'ordinateur de bord. Sur celui-ci se trouvent des lignes géoréférencées symbolisant les profils à suivre sur le terrain.

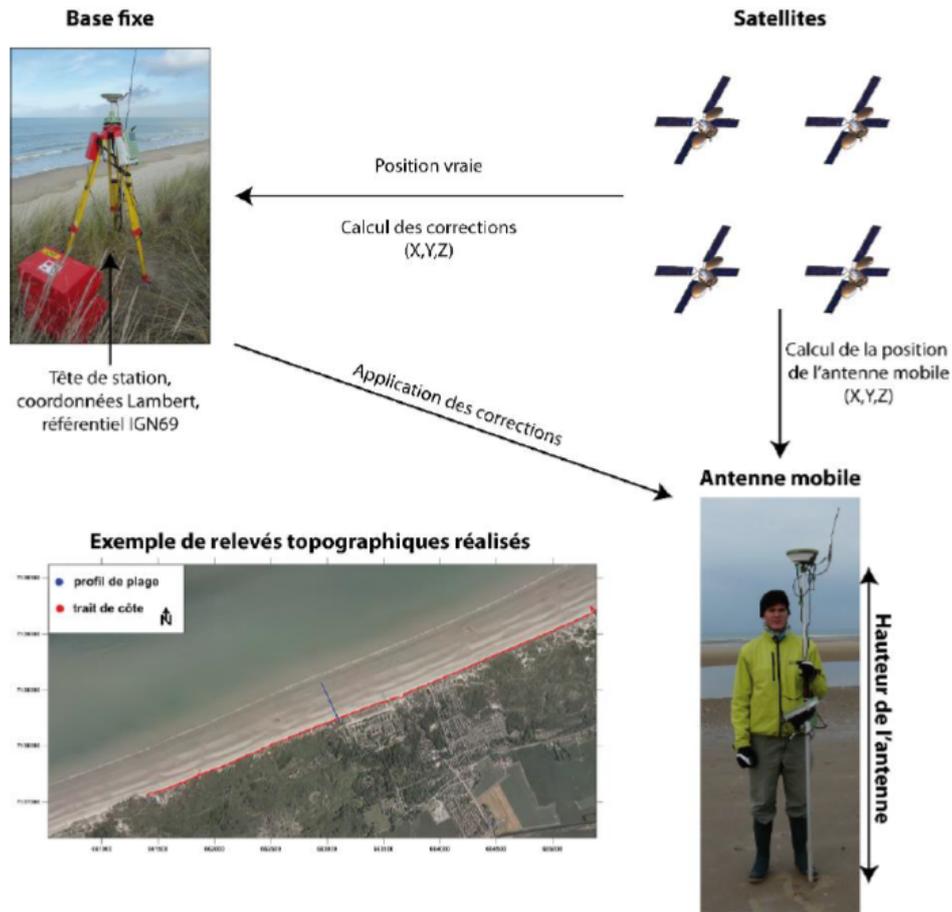


Figure V.1 Principe de fonctionnement pour l'acquisition de mesures topographiques à l'aide d'un DGPS Leica TPS Syst1200 (d'après Crapoulet, 2015)

1.1.1.2 Dates des levés et emprises

Afin de caractériser la morphologie de l'estran des deux rechargements, neuf profils ont été répartis sur les deux sites (Figure V.2). Un certain compromis a dû être effectué entre le temps de réalisation de l'ensemble d'un lever – devant être effectué lors d'une seule basse mer - et la représentativité morphologique du site. Les neuf profils sont réalisables lors d'une seule sortie de terrain à l'aide de deux opérateurs et recouvrent de manière homogène l'ensemble des deux sites. Les profils transversaux sont réalisés lors des basses mers et de préférence lors de grands coefficients afin de pouvoir mesurer la plus portion la plus large possible de l'estran. Les profils ont été tracés et géoréférencés à l'aide du logiciel *Qgis* puis importés dans l'ordinateur de bord du récepteur GPS mobile afin de servir de repère à suivre une fois sur le terrain. Sur les deux sites, le P1 est le profil le plus à l'ouest tandis que le P9 se trouve le plus à l'est.

Le Tableau V.2 récapitule l'ensemble des dates de levés de profils sélectionnées pour l'analyse. Certains ont dû être éliminés suite à des problèmes techniques. A noter que des contraintes d'accessibilité propres au site de la digue du Ruytingen ont également engendré des restrictions d'accès. En effet, la présence de sternes naines à proximité directe du rechargement a engendré une interdiction de l'accès au site du 15 avril au 15 juillet. S'ajoute à cela les restrictions d'accès liées aux travaux du terminal méthanier situé à proximité.

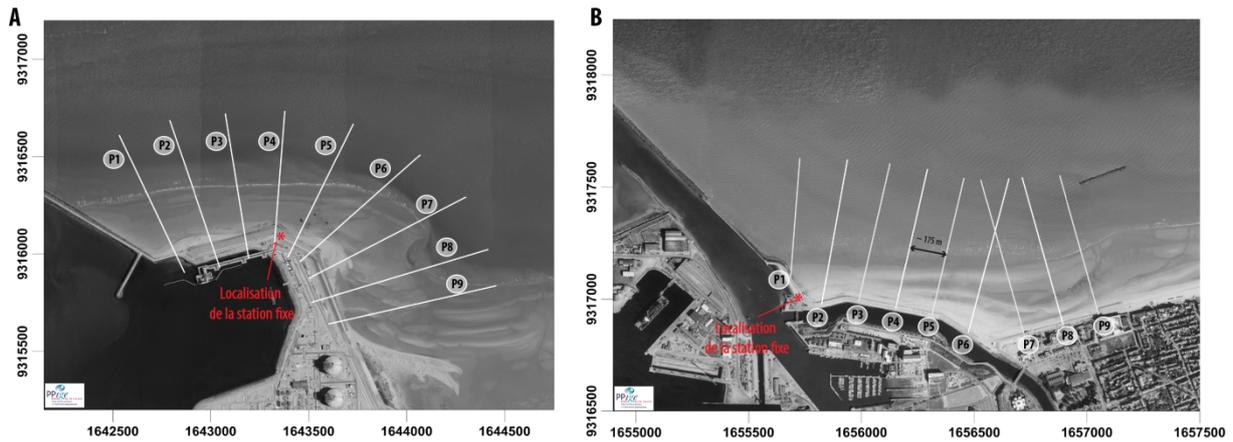


Figure V.2 Localisation des profils sur le site de l'avant-port Ouest (A) et à Malo-les-Bains (B)

Rechargement face à la digue des Alliés		Rechargement face à la digue du Ruytingen	
Date	Coefficient de marée	Date	Coefficient de marée
20/02/2015	116	22/01/2015	98
06/03/2015	67	21/04/2015	104
03/04/2015	79	23/07/2015	56
22/05/2015	84	16/12/2015	76
05/06/2015	89	14/01/2016	93
13/11/2015	85	26/02/2016	87
23/11/2015	84	05/12/2016	64
13/01/2016	96	15/02/2017	89
28/01/2016	80		
28/06/2016	62		
28/07/2016	60		
21/11/2016	58		
02/12/2016	79		
16/12/2016	105		
06/01/2017	58		
18/01/2017	73		
14/02/2017	96		
14/04/2017	86		

Tableau V.1 Récapitulatif des dates des profils sélectionnés pour l'analyse

1.1.1.3 Précision et marge d'erreur

Deux marges d'erreur sont à prendre en compte. La première est relative à la marge d'erreur constructeur de l'appareil et correspond à +/- 1 à 2 cm en X et Y et de +/- 2 à 3 cm en Z. La deuxième source d'erreur est liée à la manipulation de l'antenne mobile par l'opérateur sur le terrain. Les causes qui peuvent amener à des biais sont diverses, les plus courantes étant le vent qui fait légèrement pencher l'antenne lors de la prise de mesure ou encore l'enfoncement de la roue sur laquelle est fixée l'antenne GPS dans le sable meuble. Cette marge d'erreur est estimée à +/- 3 à 4 cm. Au total, il convient alors d'estimer la marge d'erreur à +/- 6 cm en X et Y et +/- 7 cm en Z en sélectionnant les valeurs les plus importantes.

1.1.1. Grands levés topographiques surfaciques

Des levés topographiques et bathymétriques ont été effectués sur une vaste superficie avec une densité de points importante. Ces levés ont été effectués à la demande du GPMD depuis l'initiation des travaux de rechargement et ont été mises à disposition de ce travail de thèse.

1.1.1.4 Matériel utilisé et fonctionnement

Des levés topographiques sur une large superficie sont disponibles pour cette étude afin de caractériser la morphologie de tout l'estran en complément des profils de profils qui ne donnent qu'une vision transversale de l'évolution. Sur le terrain, ces levés ont également été réalisés à l'aide d'un DGPS (section 1.1.1.1) fixé sur un quad (Figure V.3). A noter que deux des levés effectués dans le cadre de travail doctoral sur le site de Ruytingen en avril 2016 et février 2017 ont été effectués à pied permettant de prendre des mesures topographiques dans des secteurs difficiles d'accès en quad (zones sablo-vaseuses par exemple).



Figure V.3 Système d'installation du DGPS sur un quad

1.1.1.5 Dates des levés et emprises

Les dates disponibles pour les deux sites sont synthétisées dans le Tableau V.2. Un levé initial est disponible pour caractériser le site avant la mise en œuvre des opérations, juin 2011 pour le secteur de Malo-les-Bains (digue des Alliés) et janvier 2012 pour le site de l'avant-port Ouest (digue du Ruytingen).

A Rechargement face à la digue des Alliés			B Rechargement face à la digue du Ruytingen		
	Date	Entreprise		Date	Entreprise
Avant rechargement	07/06/2011	HydroConsult	Avant rechargement	09/01/2012	GEOxyz
	14/02/2014	Sodraco		27/03/2014	GEOxyz
	21/03/2014	GEOxyz	Après rechargement	15/04/2015	GPMD
	01/10/2014	GEOxyz		14/04/2016	Thèse
	27/02/2015	LOG		01/02/2017	Thèse
Après rechargement	16/09/2015	LOG			
	17/02/2016	LOG			
	17/11/2016	LOG			
	31/05/2017	LOG			

Tableau V.2 Synthèse de dates des grands levés surfaciques effectués sur le site de Malo-les-Bains (A) et de l'avant-port Ouest

Le nombre de relevés topographiques se révèle être un atout pour un suivi précis de l'évolution de l'estran après la mise en œuvre des rechargements sur les deux sites. En revanche l'un

des inconvénients majeurs de ces levés est la superficie variable de l'estran qui a été couverte selon les dates, particulièrement dans le cas du rechargement face à la digue du Ruytingen (Figure V.4-A). En effet, les contraintes de ces levés étaient multiples avec par exemple la présence de zones sablo-vaseuses ou de plateformes de gravats en haut de plage qui n'ont pas forcément toujours été mesurées, notamment quand les mesures étaient effectuées en quad (MNT de mars 2014 et de avril 2015). De plus en fonction du coefficient de marée pendant les mesures, les levés ne s'étendent par forcément jusqu'à la même limite en bas de plage diminuant l'emprise commune. Ainsi, l'emprise commune déterminée recouvre donc 277 000 m² (Figure V.4-B). La création d'une emprise commune était nécessaire pour déterminer l'évolution des volumes sur une surface cohérente. De plus, cette emprise commune a été découpée selon trois secteurs (Figure V.4-B) afin de caractériser plus en détail l'évolution volumétrique. Ces secteurs ont été déterminés selon un critère de localisation (ouest, central et est).

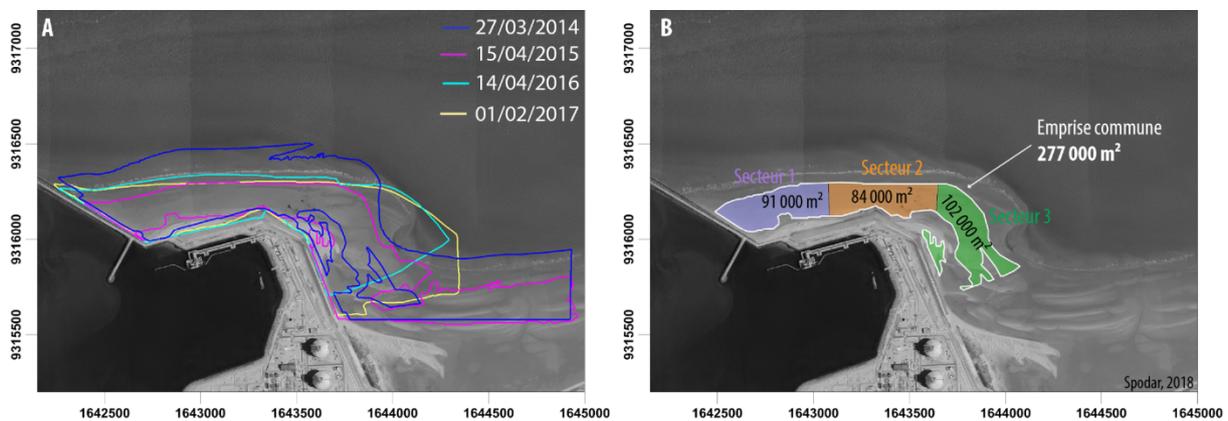


Figure V.4 Superposition des emprises des levés topographiques de l'estran (A) et emprise commune sélectionnée et secteurs d'analyse (B)

Concernant le site de Malo-les-Bains, les différentes superficies couvertes par les levés correspondent à deux emprises différentes. Les levés effectués en 2014 (mars et octobre) concernent uniquement la zone rechargée (Figure V.5). Puis à partir de 2015, les cinq levés disponibles englobent la zone rechargée et s'étendent en plus sur 2 km vers l'est pour recouvrir une superficie de 1 328 000 m² au total (Figure V.5).

Afin de détailler les variations de volumes, l'emprise globale a été découpée selon cinq secteurs du n°1 à l'ouest au n°5 à l'est. Les secteurs 1 et 2 correspondent donc à la zone rechargée face à la digue des Alliés, tandis que les secteurs en aval de la zone de rechargement s'étendent du secteur 3 au secteur 5.

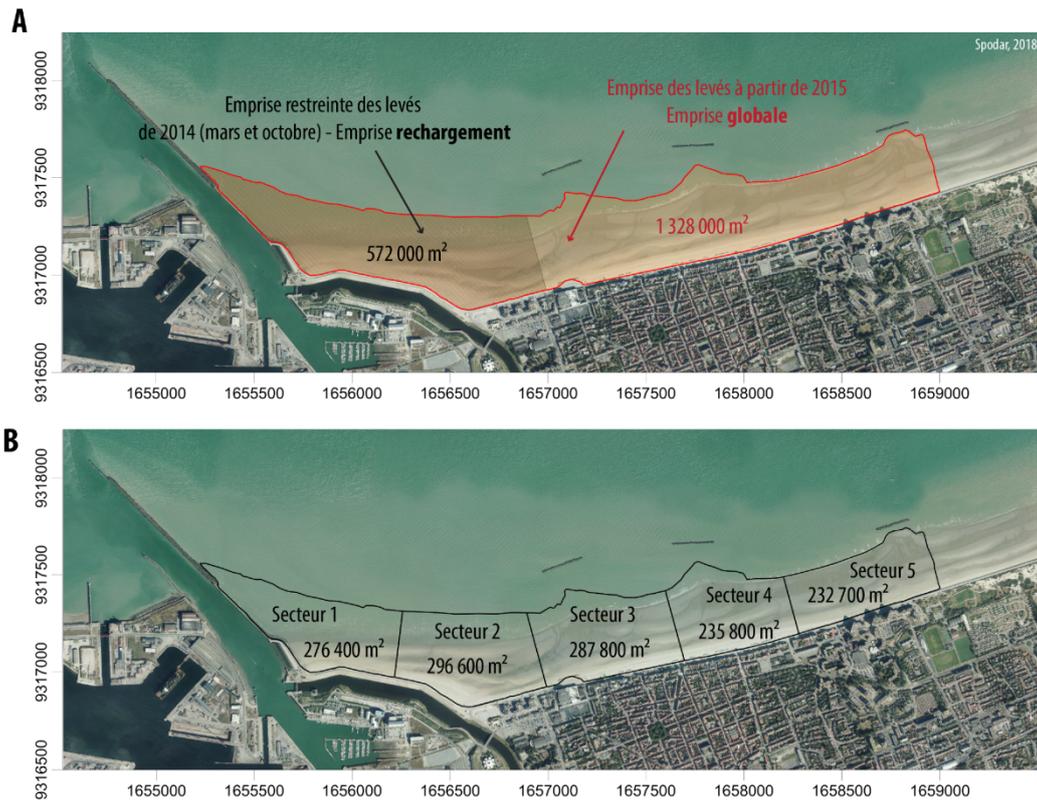


Figure V.5 Aperçu des deux emprises de travail : l'emprise « rechargement » (levés de mars et octobre 2014) et l'emprise « globale » (levés à partir de 2015) (A) et aperçu des cinq secteurs (B)

1.1.1.6 Précision et marge d'erreur

Pour estimer la marge d'erreur des mesures effectuées en quad, des comparaisons ont été effectuées sur le terrain avec des mesures effectuées à pied sur un même linéaire de plage. La différence entre les deux jeux de données est inférieure à 1 cm, indiquant que la marge d'erreur pour les mesures effectuées en quad sont les mêmes que celle effectuées à pied, soit +/- 6 cm en X et Y et +/- 7 cm en Z.

1.2. Suivi bathymétrique des petits-fonds

1.2.1.1 Matériel utilisé, fonctionnement et marge d'erreur

Les levés bathymétriques effectués à la demande du GPMD par différentes entreprises, avant et après les travaux de rechargement, ont permis de cartographier l'avant-plage des deux sites. Ces levés ont systématiquement été effectués à l'aide d'un sondeur multifaisceaux. En fonction des différents équipements, la précision des sondes a été estimée +/- 0,10 m.

1.1.1.1 Dates des levés et emprises

Les dates des levés bathymétriques sont récapitulées dans le Tableau V.3. Trois levés sont disponibles pour le site de Malo-les-Bains tandis que le nombre de levés bathymétriques s'élève à 8 pour le site face à la digue du Ruytingen.

A Rechargement face à la digue des Alliés			B Rechargement face à la digue du Ruytingen		
	Date	Entreprise		Date	Entreprise
Avant rechargement	Juin 2011	HydroConsult	Avant rechargement	09/01/2012	GE0xyz
	14/02/2014	Sodraco		10/03/2013	GE0xyz
Après rechargement	11/01/2016	InGEO		28/05/2013	GE0xyz
	12/01/2017	InGEO		24/10/2013	GE0xyz
				27/03/2014	GE0xyz
				15/10/2014	GE0xyz
				21/04/2016	InGEO
			14/04/2017	InGEO	

Tableau V.3 Synthèse des dates des levés bathymétriques effectués sur le site de Malo-les-Bains (A) et de l'avant-port Ouest

Pour l'analyse de l'évolution (volumétrique notamment) du rechargement face à la digue du Ruytingen, une emprise commune aux levés bathymétriques effectués à partir de mars 2013 a dû être déterminée. Le problème lié aux superficies des levés très variables a de nouveau été rencontré pour la bathymétrie (Figure V.6-A).

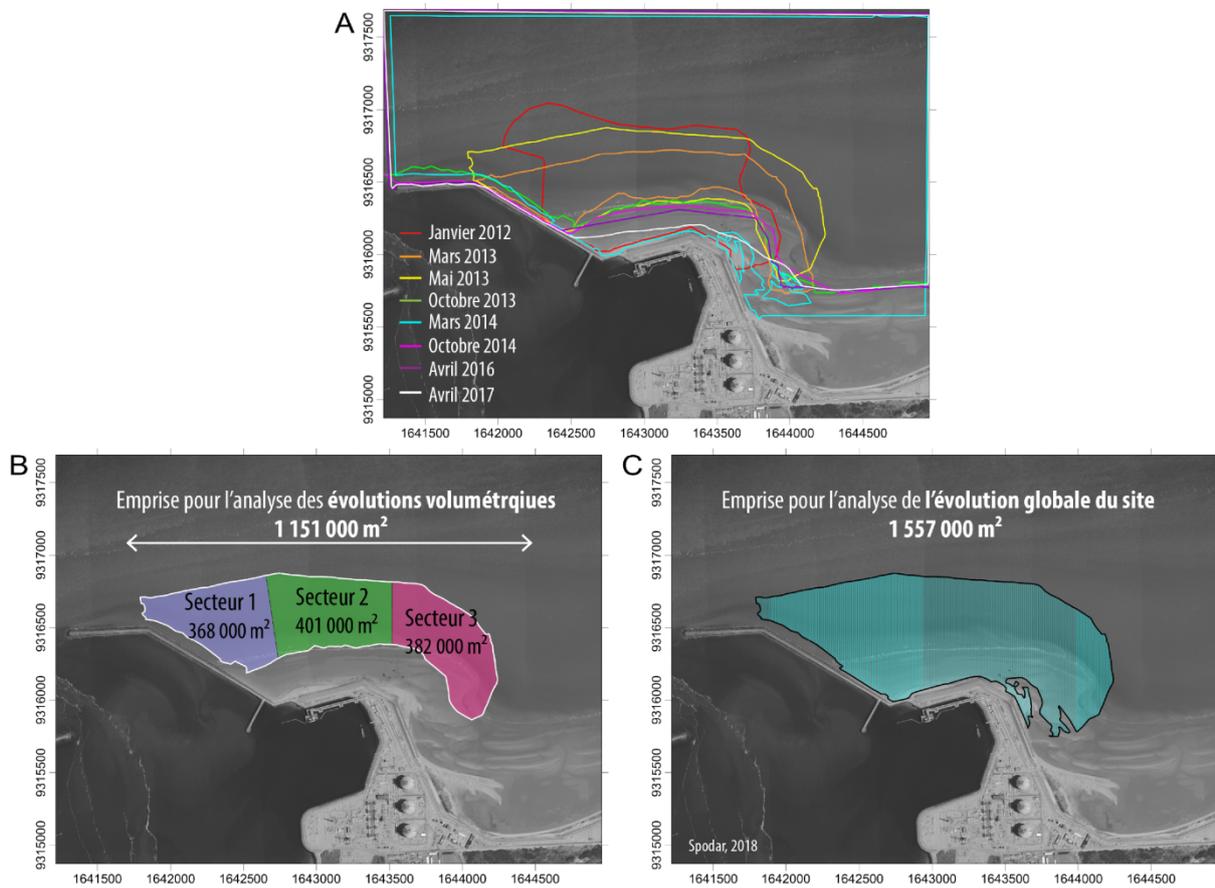


Figure V.6 Emprises de l'ensemble des levés bathymétriques (A), aperçu du choix de l'emprise pour le calcul des variations volumétriques (B) et de celle pour le calcul de l'évolution globale du site (C)

La surface commune à l'ensemble des levés aurait été trop restreinte et non pertinente. Des choix ont dû être faits afin de déterminer des emprises cohérentes et assez larges. Deux emprises ont donc été sélectionnées :

- **Emprise commune pour les calculs de volumes** (Figure V.6-B) : pour mettre en évidence une évolution volumétrique suite à la mise en œuvre du rechargement, la détermination d'une emprise commune à l'ensemble des levés à partir de mars 2013

était indispensable afin que les calculs soient faits sur une surface comparable. Sur les sept levés disponibles depuis cette date, le premier de mars 2013 dont l'emprise était la moins étendue a été exclu, ce qui aurait sinon restreint encore plus la zone de calculs des volumes. L'emprise déterminée pour les variations volumétriques est donc celle sur la Figure V.6-B et recouvre 1 151 000 m². Cette emprise sera notamment utilisée dans le chapitre 7.

- **Emprise pour l'estimation du bilan volumétrique global** (Figure V.6-B) : avec comme objectif le calcul de l'évolution volumétrique globale sur l'ensemble de l'estran, sans prendre en compte la dimension d'évolution, une emprise commune plus large a pu être déterminée, incluant l'estran. Cette emprise 1 557 000 m² sera notamment utilisée dans le chapitre 8.

1.3. Traitement des données morphologiques

1.3.1. Traitement et création des profils de plage

Une fois les mesures de terrain effectuées, les fichiers de points sont exportés de l'ordinateur de bord du GPS pour être ensuite importés dans le logiciel Excel. A partir du semis de points mesurés, les profils sont tracés et restitués en 2D via la macro Excel ©*Profiler 3.2* créée et développée par Oliver Cohen de l'Université du Littoral Côte d'Opale (Figure V.7). La densité de points (1 point de mesure tous les 0,5 m en planimétrie et 0,1 m en altitude) est telle que l'approximation du rendu de la topographie par interpolation est considérablement minimisée.

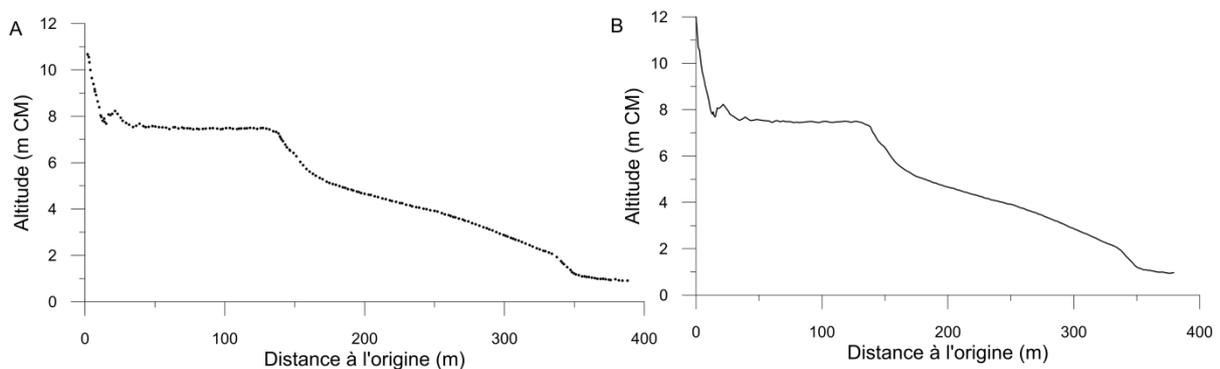


Figure V.7 Exemple d'interpolation de points pour le traçage d'un profil (profil P4 mesuré sur le site de Malo-Bains le 20 février 2015) avec en A) le semis de points bruts mesurés et en B) le profil tracé par *Profiler 3.2*

En plus de tracer les profils transversaux, cette macro permet également de calculer les volumes des profils par mètre linéaire, de réaliser des différentiels altimétriques entre deux profils effectués à des dates différentes et donc de calculer les variations volumétriques par mètre linéaire. A noter qu'à partir de ces profils seront calculées les variations volumétriques nettes, correspondant à la différence entre les pertes de sable et les gains entre deux dates, ainsi que les variations volumétriques totales correspondant à l'addition du volume perdu et gagné afin de quantifier l'ensemble des variations volumétriques sur l'estran.

Il convient de préciser que certains profils ont parfois été extraits de Modèle Numérique de Terrain (au cours des années antérieures au démarrage de ce travail de thèse notamment) afin

d'avoir un jeu de données complet depuis les mises en œuvre des rechargements sédimentaires. L'extraction en question a été effectuée sous le logiciel ©*Surfer*.

1.3.2. Création des Modèles Numériques de Terrain (MNT) de plage et d'avant-plage

Les grands levés topographiques ou bathymétriques effectués sur une vaste superficie ont permis de créer des Modèles Numériques de Terrain (MNT) à partir des nuages de points bruts X, Y et Z. Le logiciel utilisé pour l'interpolation et la construction de grille surfacique de la morphologie de la plage ou de l'avant-plage est ©*Surfer (Golden Software)*. C'est la technique de triangulation avec interpolation linéaire qui a été sélectionnée pour la réalisation des grilles. La taille de la maille de ces grilles a été fixée à 1 m.

1.3.3. Calcul des bilans sédimentaires

Toujours en utilisant le logiciel ©*Surfer*, il a été possible d'observer précisément l'évolution de la morphologie de la plage ou de l'avant-plage entre deux dates, mais également d'en calculer les variations volumétriques (nettes et totales), par la soustraction de deux MNT. Un troisième MNT, appelé MNT différentiel, rend ainsi compte de l'évolution d'un secteur. Pour déterminer l'évolution volumétrique d'une zone, il est primordial de travailler sur une emprise commune pour que la comparaison des volumes soit cohérente d'où la détermination d'emprises commune précédemment présentées. De plus, afin d'affiner l'analyse des bilans sédimentaires sur des zones plus restreintes et de mettre en évidence des variabilités spatiales sur les deux sites, des secteurs ont été déterminés (Figure V.4, Figure V.5, Figure V.6).

En lien avec la précision des données topographiques de +/- 0,7 m en Z, la marge d'erreur a été étendue à +/- 0,1 m afin de prendre en compte l'interpolation des points qui peut générer une erreur. La marge d'erreur des bilans sédimentaires sur l'estran a donc été fixée à +/- 0,10 m³/m². Même principe pour les données bathymétriques où la précision des données de +/- 0,1 m en Z a été étendue à +/- 0,15 m, soit une marge d'erreur des bilans sédimentaires pour la partie subtidale de +/- 0,15 m³/m².

2. Données hydrodynamiques et météorologiques

2.1. Données anémométriques au large

Les données anémométriques au large sur la période 2012-2017 proviennent de la station Sandettie (Figure V.8) et ont été fournies par MET Office. Cette station est située à environ 16 km au large de Calais. Il s'agit de données horaires de directions et forces du vent.

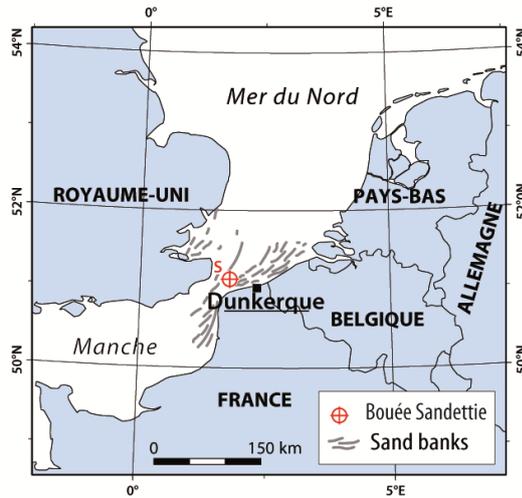


Figure V.8 Localisation de la bouée Sandettie

A noter que dans l'analyse des données, la série de mesure globale sera découpée selon différents intervalles de temps relatifs aux périodes de mesures morphologiques.

2.2. Données de vagues au large

Les données de vagues au large sur la période 2012-2017, hauteur significative (H_s) et période (T), proviennent également de la station Sandettie (Figure V.8). Ces données horaires ne sont pas directionnelles. C'est pourquoi, les directions des vents ont été utilisées à plusieurs reprises comme indicateurs de la direction des vagues. Ces paramètres de vagues ont été utilisés pour calculées les puissances moyennes de vagues \bar{P} (Eq. V.1) et les puissances cumulées des vagues P_c (Eq. V.2):

$$\bar{P} = \frac{1}{16} \rho g H_s^2 c_g \quad (\text{Eq. V.1})$$

$$P_c = \sum \frac{1}{16} \rho g H_s^2 c_g \quad (\text{Eq. V.2})$$

avec ρ la densité de l'eau de mer en kg.m^{-3} , g la constante gravitationnelle en m.s^{-2} et C_g la vitesse de groupe des vagues en m.s^{-1} déterminée à partir de la théorie linéaire en utilisant la période des vagues. A noter que les données de la station Westhinder située à 36 km au large des côtes belges et habituellement utilisées pour les études du littoral de l'est dunkerquois (Héquette *et al.*, 2009; Ruz *et al.*, 2009; Héquette & Cartier, 2016) n'ont pas été utilisées en raison d'importantes lacunes pendant la période de suivi, notamment lors de la campagne de mesures hydrodynamiques réalisée à Malo-les-Bains en février 2016.

2.3. Données anémométriques à la côte

Les vents à la côte proviennent de la station Météo France localisée à Dunkerque au niveau de l'avant-port Est sur la période 2013-2017 (Figure V.9). Ces données ont été privilégiées à celles enregistrées à l'avant-port Ouest et fournies par le GPMD (pour l'analyse du site de Ruytingen) étant donné les nombreuses données aberrantes présentes dans les enregistrements. Les données de

Météo-France, nettoyées et validées, ont par conséquent été privilégiées. Ces enregistrements de directions et de vitesses sont horaires.

1.2. Données marégraphiques

Les données utilisées proviennent du marégraphe de Dunkerque situé à l'avant-port Est (Figure V.9). Les données sont fournies par le Service Hydrodynamique et Océanographique de la Marine (SHOM) et téléchargées via le site www.refmar.fr. Ces données horaires sont exprimées en heures TU+0. La référence utilisée pour exprimer les niveaux d'eaux est le Zéro Hydrographique (0 IGN + 2,693 m à Dunkerque Est). Les données du SHOM ont été privilégiées par rapport à celles issues du marégraphe de l'avant-port Ouest (pour l'étude du rechargement au droit de la digue du Ruytingen) car elles ont bénéficié d'un contrôle, de corrections et de validation, contrairement aux données du port qui sont des données brutes dans lesquelles un certain nombre de données aberrantes ont été identifiées.



Figure V.9 Localisation du marégraphe et de la station météorologique du port Est de Dunkerque (fond de carte ©IGN source des photos: <https://www.infoclimat.fr/> et <http://refmar.shom.fr/>)

2.4. Mesures hydrodynamiques à la côte

Dans le but de caractériser les conditions hydrodynamiques du site après rechargement et d'apporter par la suite des explications quant aux variations morphologiques observées, des expérimentations de terrain impliquant le déploiement d'instruments de mesure ont été menées afin de caractériser les conditions hydrodynamiques à la côte.

2.4.1. Types d'appareils déployés

2.4.1.1 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

L'ADCP est un courantomètre permettant d'enregistrer la hauteur et la direction de la houle ainsi que la vitesse et direction du courant (Figure V.10). Comme leur nom l'indique, l'enregistrement des paramètres de courant repose sur le principe de l'effet Doppler. L'ADCP émet des impulsions

acoustiques à une fréquence de 1200 Hz et calcule les vitesses et directions du courant en mesurant les variations de fréquence de l'écho qui va être réfléchi par les particules en suspension dans l'eau. Trois vecteurs à partir desquels est calculée la vitesse du courant sont alors déterminés à savoir un vecteur Nord (V_n), un vecteur Est (V_e) et un vecteur Vertical (V_v). L'ADCP présente un avantage majeur en comparaison d'autres appareils courantométriques puisqu'il est en capacité de mesurer les paramètres de courants dans toute la colonne d'eau. Les mesures s'effectuent alors à différentes profondeurs selon la taille de cellule (*bin*) au préalable programmée. Dans notre cas, la taille de cellule a été programmée à 0,2 m. L'ADCP est équipé d'un capteur de pression mesurant les variations de la surface de l'eau et enregistrant les paramètres de houles ainsi que le niveau d'eau. Dans le cas de l'expérimentation à Malo-les-Bains, l'ADCP a été placé dans les petits-fonds et fixé dans une structure en métal lestée par des blocs de bétons. La structure a ensuite été posée sur le fond puis attachée à des ancrs afin d'assurer le maintien de sa position.

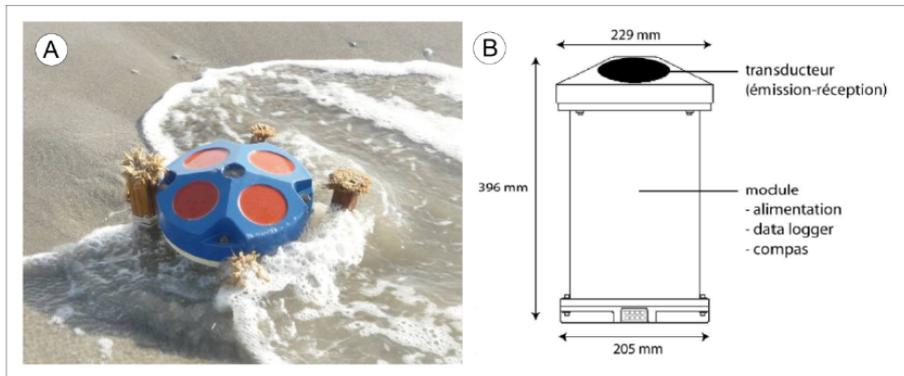


Figure V.10 Photographie d'un ADCP enfoui dans le sable (A) et schéma de l'appareil (d'après Maspataud, 2011)

2.4.1.2 MIDAS DWR (Valeport)

Le Midas DWR est un autre type de courantomètre houlographe basé sur un principe de fonctionnement différent de celui de l'ADCP. C'est en effet le principe de Faraday qui va permettre l'enregistrement des données de courant. Le Midas DWR possède des capteurs qui vont générer un champ électromagnétique. Lorsque les particules dans l'eau vont venir perturber ce champ électromagnétique, un courant électrique proportionnel à la vitesse de l'écoulement va être créé, permettant ainsi de mesurer la vitesse et la direction du courant. A la différence de l'ADCP, le Midas DWR effectue uniquement les enregistrements au niveau des capteurs, soit à environ 0,2 m dans notre cas. Cet appareil possède également un capteur de pression permettant l'enregistrement des variations de niveau d'eau et de la houle. Les Midas DWR déployés sur la plage ont été enterrés dans le sable et lestés avec des blocs de béton et ancrs.

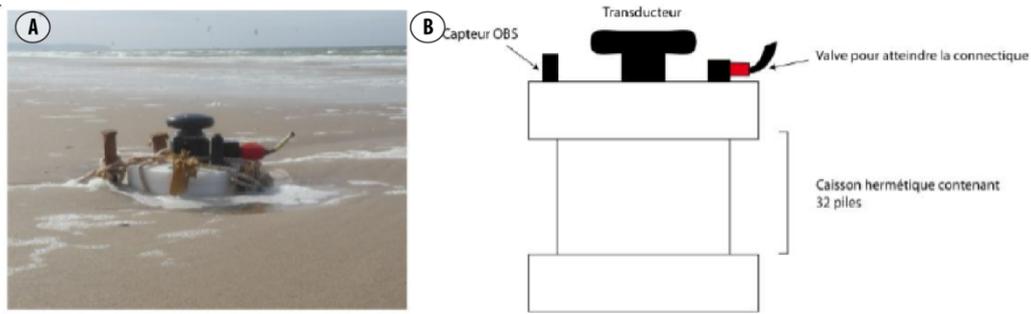


Figure V.11 Photographie d'un MIDAS Valeport enfoui dans le sable (A) et schéma de l'appareil (d'après (Cartier, 2011))

2.4.1.3 S4 ADW (InterOcean)

Dernier type d'appareil utilisé, le S4 ADW est un courantomètre électromagnétique, dont le principe de fonctionnement est similaire à celui du MIDAS DWR. Cet appareil est doté de deux électrodes qui se trouvent à son équateur. Un champ électromagnétique est créé par le S4 et celui-ci est perturbé par l'eau en mouvement. Le courant électrique qui est généré est proportionnel à la vitesse du courant hydrodynamique. Cet appareil mesure le courant à sa périphérie uniquement, à environ 0,4 m au-dessus du fond. Le S4 est également équipé d'un capteur de pression.

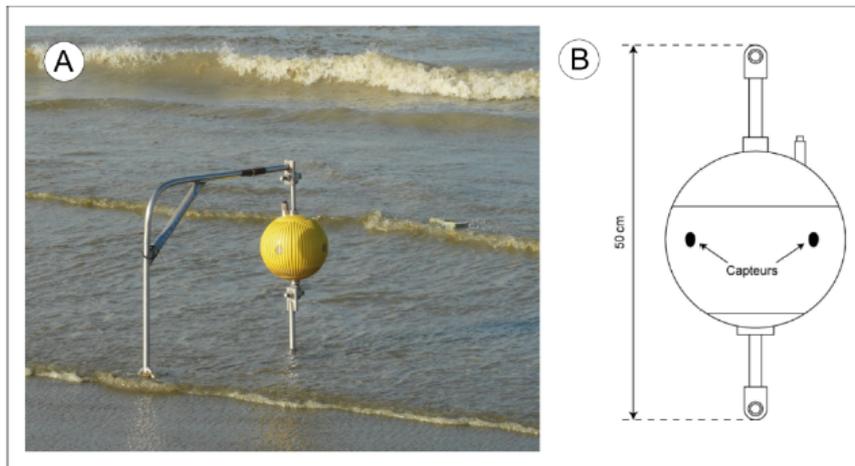


Figure V.12 Photographie d'un S4 fixé sur une structure (A) et schéma de l'appareil (B) (d'après Maspataud, 2011)

2.4.2. Plan de déploiement des instruments

Une campagne de mesures hydrodynamiques a été réalisée pour chaque site, la première en mars 2013 sur le secteur du rechargement subtidal face à la digue du Ruytingen et la seconde en février 2016 sur le site de Malo-les-Bains face à la digue des Alliés. A noter que l'ensemble des appareils ont été programmés selon les mêmes caractéristiques à savoir une durée d'enregistrements (*burst*) de 9 minutes toutes les 15 minutes avec une fréquence de 2 Hz.

2.4.2.1 Expérimentation de terrain dans le secteur du rechargement subtidal face à la digue du Ruytingen : mars 2013

La campagne de mesures hydrodynamiques s'est déroulée du 29 mars au 12 avril 2013, soit un mois après la fin des travaux de rechargements face à la digue du Ruytingen. Les appareils ont été placés dans le secteur est du rechargement. Trois instruments ont été déployés le long d'un profil de plage, deux S4 et un ADCP. Un S4 a été placé dans les petits-fonds à -1,2 m CM, tandis que les autres appareils ont été placés sur l'estran, le second S4 en bas de plage à +1,3 m CM et l'ADCP à +3,2 m CM en milieu d'estran. A noter que les appareils placés sur l'estran présentent des lacunes d'enregistrements dans les séries de données correspondant au moment où les appareils sont émergés lors des basses mers. Il convient de préciser que ces données proviennent d'une expérimentation de terrain antérieure au démarrage de la thèse (Héquette *et al.*, 2013). Ce travail doctoral a néanmoins pu bénéficier des données issues de cette campagne de mesures.

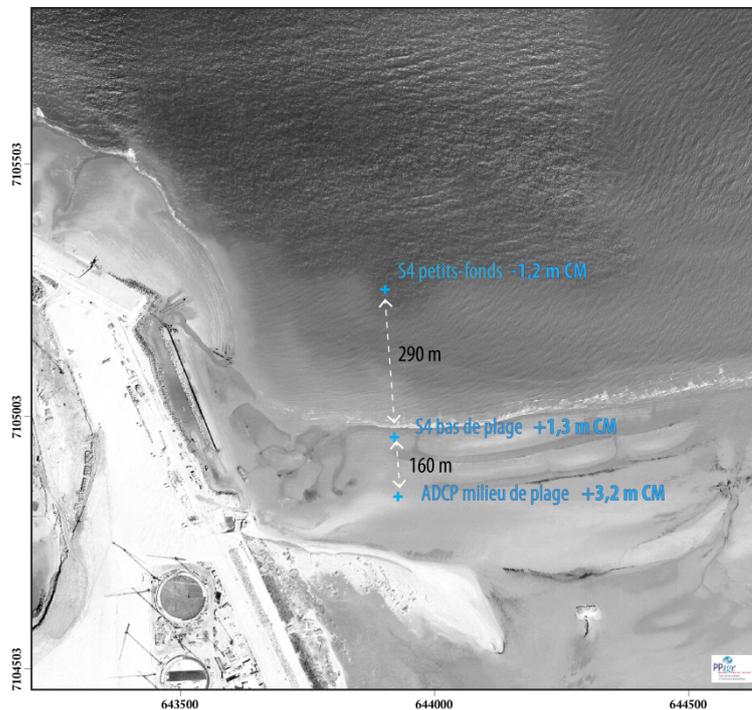


Figure V.13 Plan de déploiement des appareils avec la localisation des appareils sur une ortho photo de 2013

2.4.2.2 Expérimentation de terrain dans le secteur du rechargement de plage face à la digue des Alliés: février 2016

Une première campagne de mesure avait été effectuée en novembre 2015, mais au vu des problèmes rencontrés au cours de cette expérimentation, liés notamment au dysfonctionnement d'un appareil et à la dégradation d'un second, cette campagne n'a pas pu être exploitée.

En février 2016, sur une période de 10 jours, trois courantomètres houlographes ont été déployés afin de caractériser la houle et les courants sur le site. Il convient de préciser que ces mesures ont donc été réalisées deux ans après la mise en œuvre du rechargement de plage. Deux types d'instruments ont été utilisés : un ADCP, placé dans les petits-fonds, et deux Midas DWR (Valeport) déployés en bas de l'estran (Figure V.14). L'ADCP a été placé à environ -4 m CM, tandis

que le premier Valeport a été placé dans le secteur ouest à une altitude de +2,2 m CM (nom de l'appareil dans les analyses : Valeport Ouest) et le deuxième Valeport a été placé à +1,1 m CM dans le secteur Est du rechargement (nom de l'appareil dans les analyses : Valeport Est). Il convient de préciser que les deux Midas DWR présentent des lacunes d'enregistrements correspondant encore une fois au moment où les appareils sont émergés.

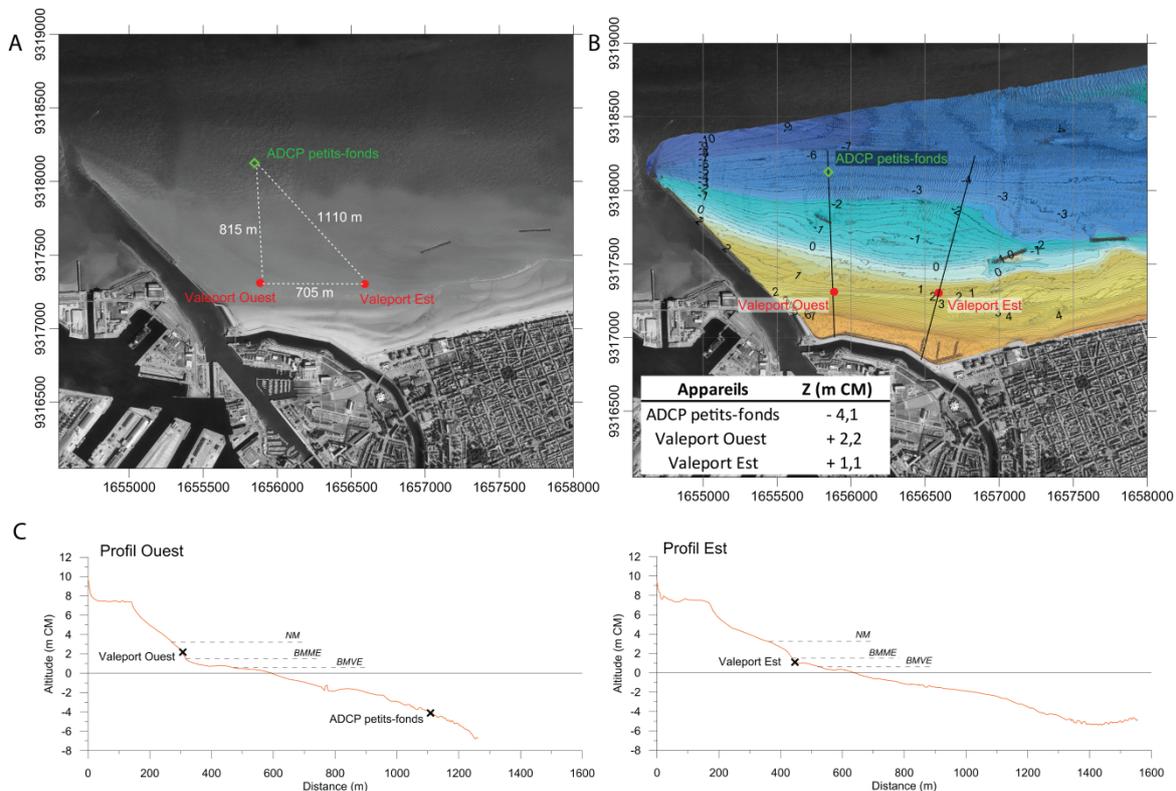


Figure V.14 Plan de déploiement des appareils avec en A) localisation des appareils sur une ortho photo de 2013, B) localisation des appareils sur MNT topo-bathymétrique effectué par le LOG (partie topographie) et Ingeo (partie bathymétrie) et C) localisation des appareils sur un profil topo-bathymétrique de la plage et de l'avant-plage

2.4.3. Traitement des données

2.4.3.1 Homogénéité des données hydrodynamiques

Plusieurs types d'appareils ont été utilisés lors des expérimentations de terrain, ce qui soulève la question de la cohérence des mesures. Lors de précédentes campagnes de mesures hydrodynamiques au sein du laboratoire LOG, l'homogénéité des données entre les différents appareils a pu être mise en évidence. En effet, lors d'une campagne menée par Sedrati (2006), la comparaison des mesures entre un ADCP et un S4 placés côte à côte lors de plusieurs marées a permis de démontrer la cohérence des enregistrements de hauteur d'eau, de hauteur significative de la houle et des vitesses de courants longitudinaux et transversaux. Dans la thèse de Jeanson (2009), les enregistrements issus d'un ADCP, d'un Midas Valeport et d'un ADV déployés à proximité les uns des autres ont également montré de bonnes corrélations. C'est pourquoi, en se basant sur ces précédentes études, il est possible de valider l'homogénéité des données bien qu'elles proviennent de type d'appareil différent.

2.4.3.2 Traitement des données de houle

Les données extraites de l'ADCP font l'objet de traitements grâce aux deux logiciels ©WaveMon et ©WaveView de la société Teledyne qui permettent d'obtenir par analyse spectrale la hauteur significative (Hs), la période pic (Tp) et la direction pic (Dp) de la houle pour chaque burst de 9 minutes.

Les données issues des courantomètres-houlographes S4 ont été traitées avec le logiciel ©Wave fourni par Interocean. Les paramètres de la houle, hauteur significative (Hs), la période pic (Tp) et la direction pic (Dp), sont calculés par transformée de Fourier des fluctuations de la surface libre de l'eau et en se basant sur la théorie linéaire de la houle.

Les Midas DWR sont des courantomètres-houlographes non-directionnels qui ont simplement permis d'obtenir la période (T) et la hauteur significative (Hs) de la houle qui a été déterminée comme la moyenne du tiers supérieur des hauteurs pendant chaque burst de 9 minutes. .

2.4.3.3 Traitement des données de courant

Pour les données de courant enregistrées par l'ADCP, c'est le logiciel ©WinADCP qui a été utilisé pour le traitement. Les vitesses et directions relatives au courant moyen ont pu être déterminées ainsi que les vitesses et directions du courant à différents niveaux dans la colonne d'eau, tous les 20 cm exactement (taille de chaque cellule de mesure).

Les courantomètres Midas Valeport ont fournis les paramètres suivants : vitesses de courants et directions moyennes (V_m et D_{cm}), vitesse sur la composante nord (V_n), et vitesse sur la composante est (V_e), auxquels s'ajoutent les vitesses transversales (V_t) (ou *crossshore*) et les vitesses longitudinales (V_l) (ou *longshore*).

Enfin les courants enregistrés par les S4 ont été traités grâce à une application de Interocean qui a fourni les vitesses et directions de courant moyen (V_m et D_{cm}) ainsi que les vitesses de courant sur les composantes nord (V_n) et est (V_e).

Comme évoqué précédemment dans la description des appareils, ces derniers ne mesurent pas forcément les courants moyens sur le fond marin à la même hauteur :

- les MIDAS Valeport mesurent le courant à 0,2 m au-dessus du fond
- certains ADCP (campagne hydrodynamique de Malo-les-Bains notamment) ont mesuré le courant moyen à partir de 0,6 m au-dessus du fond
- les S4 mesurent le courant moyen à 0,4 m au-dessus du fond

C'est pourquoi dans la mesure du possible, une homogénéisation a été effectuée. Le courant moyen à 0,2 m au-dessus du fond a pu être calculé pour l'ADCP grâce à une régression logarithmique à partir des mesures de courant effectuées à différents niveaux dans la colonne d'eau. En revanche, sans mesure dans la colonne d'eau dans le S4, la régression n'a pas pu être faite et le courant moyen à 0,2 m n'est pas pu être estimé.

3. Données granulométriques de surface

3.1. Méthode et plan d'échantillonnage

L'analyse granulométrique effectuée s'attache à déterminer l'évolution de la granulométrie de surface sur les deux sites rechargés. Environ 90 prélèvements (variable en fonction des coefficients de marée et donc de la surface découverte lors de l'échantillonnage) ont été récoltés lors de chaque campagne d'échantillonnage sur le site face à la digue des Alliés, tandis que ce nombre est

un peu moins important pour l'estran face à la digue du Ruytingen avec environ 70 échantillons. Un plan d'échantillonnage a été créé au préalable sur le logiciel *Qgis* puis importé dans le DGPS afin d'effectuer les prélèvements aux mêmes endroits (Figure V.15). Les échantillons ont été placés le long des profils de plage présentés en section 1.1.1 de ce chapitre afin d'effectuer un levé topographique simultanément. Pour chaque échantillon, environ 80 g de sable est récolté (deux boîtes de pétri) sur une profondeur de 14 mm (hauteur d'une boîte de pétri).

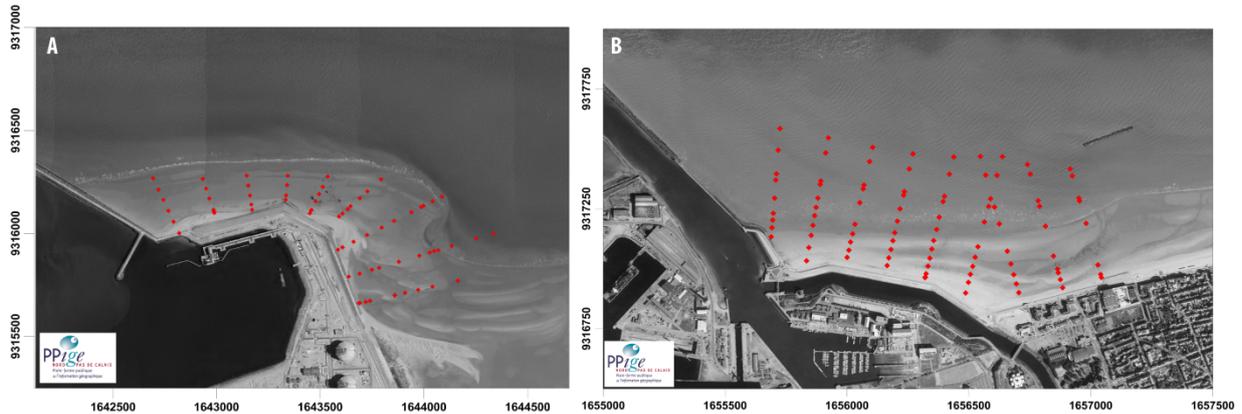


Figure V.15 Plan d'échantillon face sur le site de l'avant-port Ouest (A) et à Malo-les-Bains (B)

Trois échantillonnages ont été effectués pour chacun des sites dont voici les dates :

- Site de Malo-les-Bains : 06/03/2015 – 28/06/2016 – 14/02/2017
- Site de l'avant-port Ouest : 21/04/2015 – 26/02/2016 – 15/04/2017

3.2. Analyse en laboratoire

Une fois les prélèvements effectués, les analyses ont été effectuées avec un granulomètre laser *Beckman Coulter LS 230* par voie humide (Figure V.16). Ce granulomètre permet de déterminer l'ensemble du spectre granulométrique, entre $0,04 \mu\text{m}$ et $2\,000 \mu\text{m}$, grâce à un principe de fonctionnement basé sur la diffraction de Mie. La lumière émise par le laser est diffractée par les particules en suspension dans l'eau ce qui va permettre de calculer leur taille.

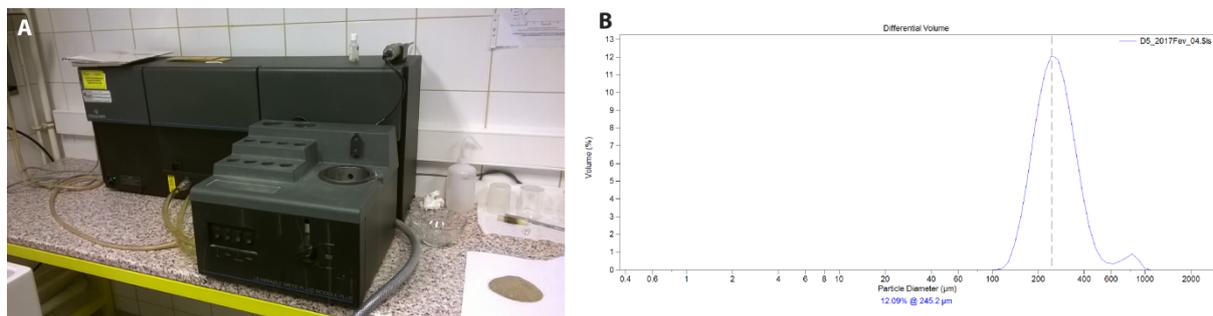


Figure V.16 Granulomètre laser *Beckman Coulter LS 230*(A) et exemple d'une courbe granulométrique (B)

Puis une fois analysés par le granulomètre laser, les paramètres granulométriques des échantillons, grain moyen, indice de tri et indice d'asymétrie, sont calculés selon les méthodes de (1954) et (1957).

Le grain moyen donne un aperçu général de l'éventail granulométrique moyen d'un échantillon :

$$Mz = \frac{\phi 16 + \phi 50 + \phi 84}{3} \quad (\text{Eq. V.3})$$

D'abord exprimé en phi (ϕ), les valeurs sont ensuite converties en mm :

$$Mz (\text{mm}) = 2^{Mz (\phi)} \quad (\text{Eq. V.4})$$

L'indice de tri (*sorting*), exprimé en ϕ , rend compte de la dispersion des tailles par rapport à la moyenne de l'échantillon considéré et donc de l'homogénéité ou non de ce dernier :

$$\sigma = \frac{\phi 84 - \phi 16}{4} + \frac{\phi 95 + \phi 5}{6,6} \quad (\text{Eq. V.5})$$

Une fois l'indice calculé, il faut se rapporter à la classification suivante pour caractériser le plus ou moins bon tri de l'échantillon:

$\sigma <$	0,35	: très bien trié
0,35	$< \sigma <$	0,50 : bien trié
0,50	$< \sigma <$	0,71 : moyennement bien trié
0,71	$< \sigma <$	1,00 : moyennement trié
1,00	$< \sigma <$	2,00 : mal trié
2,00	$< \sigma <$	4,00 : très mal trié
4,00	$< \sigma$: extrêmement mal trié

Enfin, l'indice d'asymétrie (*skewness*) indique la prépondérance de particules grossières (valeurs négatives) ou fines (valeurs positives) par rapport à la moyenne de l'échantillon :

$$Sk_i = \frac{\phi 16 + \phi 84 - 2 \phi 50}{2(\phi 84 - \phi 16)} + \frac{\phi 5 + \phi 95 - 2 \phi 50}{2(\phi 95 - \phi 5)} \quad (\text{Eq. V.6})$$

Il faut de nouveau se référer à classification suivante afin de caractériser la distribution des particules de l'échantillon :

+1,00	$> Sk_i >$	+0,30 : forte asymétrie vers les petites tailles
+0,30	$> Sk_i >$	+0,10 : asymétrie vers les petites tailles
+0,10	$> Sk_i >$	-0,10 : distribution granulométrique symétrique
-0,10	$> Sk_i >$	-0,30 : asymétrie vers les grandes tailles
-0,30	$> Sk_i >$	-1,00 : forte asymétrie vers les grandes tailles

4. Transport sédimentaire au niveau du fond marin

Lors des campagnes hydrodynamiques, des échantillons de sédiments ont été prélevés à proximité des appareils dans le but de déterminer leur grain moyen et d'estimer le seuil critique de

mise en mouvement des particules sous l'action combinée des vagues et des courants. Ce seuil critique a été calculé à l'aide du logiciel *Sedtrans05* basé sur les algorithmes développés par Grant et Masden (1986) pour le transport sédimentaire en domaine de plateau continental. Dans un premier temps, une estimation du facteur de frottement pour un courant combiné f_{cw} à partir de l'équation (Eq. V.7) est nécessaire :

$$\frac{1}{(4f_{cw}^{0.5})} + \log \left[\frac{1}{(4f_{cw}^{0.5})} \right] = \log \left(\frac{C_r u_b}{w z_0} \right) + 0.14(4f_{cw}^{0.5}) - 1.65 \quad (\text{Eq. V.7})$$

avec u_b la vitesse orbitale maximale au niveau du fond déterminée à partir de la théorie linéaire des vagues, w la fréquence des vagues en radian ($2\pi/T$), z_0 la rugosité du fond en lien avec la hauteur de la rugosité k_b , avec $z_0 = k_b / 30$ et C_r le rapport de puissance vague/courant.

Ce facteur f_{cw} va être utilisé pour déterminer la vitesse de cisaillement maximale liée à l'action des vagues u_{*wm} qui pourra ainsi être injecté dans l'équation (Eq. V.8) pour estimer la vitesse de cisaillement sur le fond du courant moyen combiné aux courants oscillatoires u_{*cw} séparé par un angle θ :

$$u_{*cw} = u_{*wm} [1 + 2(u_{*c}/u_{*wm})^2 \cos \theta + (u_{*c}/u_{*wm})^4]^{0.25} \quad (\text{Eq. V.8})$$

avec u_{*wm} la vitesse de cisaillement maximale liée à l'action des vagues, u_{*c} la vitesse de cisaillement liée au courant moyen.

Le seuil de mise en mouvement du sédiment est estimé en calculant la vitesse critique de cisaillement u_{*cr} selon l'approche de (Miller *et al.*, 1977) qui utilise la méthode de Yalin pour déterminer le paramètre critique sans dimension de Shields θ_{cr} . Ce paramètre θ_{cr} est utilisé pour calculer la contrainte critique sur le fond τ_{cr} selon l'équation (Eq. V.9):

$$\tau_{cr} = \theta_{cr} (\rho_s - \rho) g D_{50} \quad (\text{Eq. V.9})$$

avec ρ_s et ρ la densité du sédiment et du fluide, g la constante gravitationnelle et D_{50} le grain médian. Enfin, la contrainte critique de cisaillement est obtenue selon l'équation

$$u_{*cr} = (\tau_{cr}/\rho)^{0.5} \quad (\text{Eq. V.10})$$

Pour plus de détail sur les calculs et la procédure, on pourra se référer à la publication de Héquette *et al.* (2008b).

Chapitre VI. Analyse d'un rechargement de plage : le site de la digue des Alliés

1. Du dimensionnement du rechargement à sa mise en œuvre

1.1. Origine du projet

Dans un souci de renforcer l'efficacité des ouvrages et systèmes de protection du littoral, l'Etat a lancé un état des lieux et un diagnostic de ces derniers suite au passage de la tempête Xynthia (Plan Dignes). Plusieurs ouvrages, dont la digue des Alliés, ont été identifiés comme nécessitant une intervention. Des inspections visuelles côté mer et côté canal exutoire effectuées à la demande du GPMD en 2009 et 2010 par la société GETEC ont conclu à un état général non satisfaisant de la digue.

Ce constat était alors d'autant plus alarmant que la digue protège tout l'arrière-pays dunkerquois des submersions marines. Les effets de la tempête de 1953 illustrent les risques encourus en cas de rupture de l'ouvrage. Une augmentation de l'aléa submersion marine et de son emprise spatiale sont de plus à envisager dans le contexte actuel de l'élévation du niveau de la mer en lien avec le changement climatique. Ce point est illustré par plusieurs cartographies du rapport « Détermination de l'aléa de submersion marine intégrant les conséquences du changement climatique en région Nord – Pas-de-Calais » de (Danish Hydraulic Institute, 2012). La Figure VI.1 montre les secteurs potentiellement touchés par l'aléa submersion en cas de rupture de la digue des Alliés pour un événement de tempête avec une période de retour centennale en prenant en compte une élévation du niveau marin de 60 cm à l'horizon 2100. A noter que cette cartographie, élaborée dans le cadre d'un PPR risque submersion, ne prend pas en compte l'effet protecteur du rechargement. L'onde de submersion se propage alors dans le canal exutoire puis dans le canal de Furnes. Avec le débordement de ce dernier, les secteurs inondés à marée haute s'étendent jusqu'à la frontière belge.

Compte tenu du rôle stratégique de la digue ainsi que de sa vulnérabilité et fragilité structurelle constatée en 2009-2010, l'Etat a mandaté le GPMD en 2010 afin de piloter un projet de confortement de la digue. Le projet global se décompose par une phase de confortement et une phase de réparation de la digue.

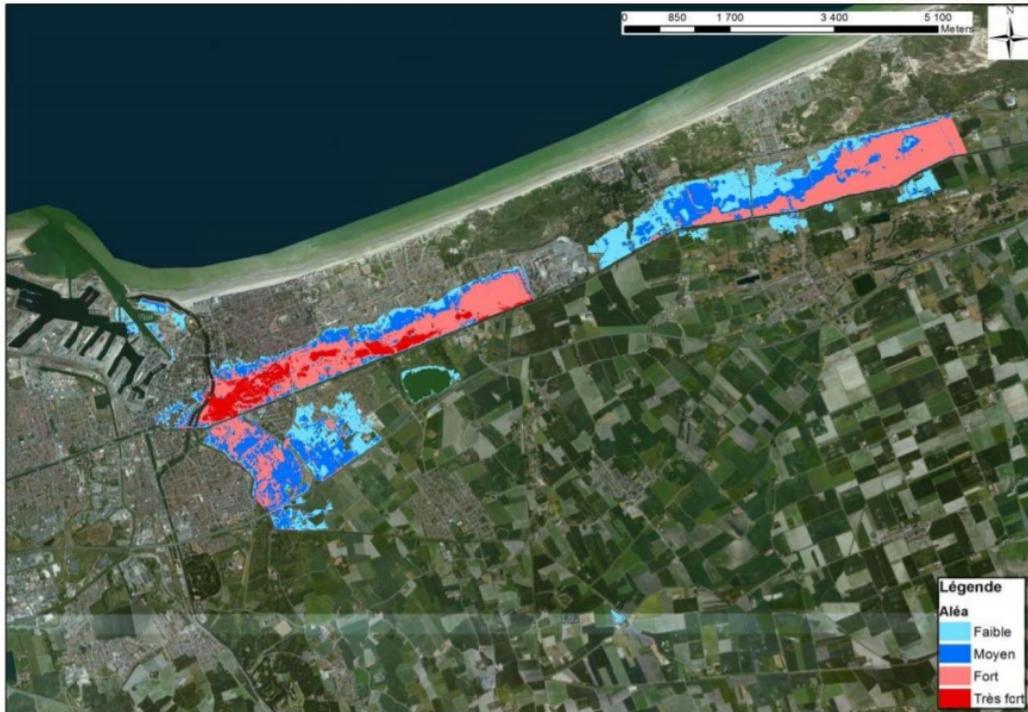


Figure VI.1 Cartographie de l'aléa de submersion marine modélisé pour un événement de tempête centennal en cas de rupture de digue à l'horizon 2100 (DHI, 2011)

1.2. Modélisation et dimensionnement du rechargement de plage

Le projet de conception du dispositif de renforcement a été confié au bureau d'études *Danish Hydraulic Institute* (DHI) en mai 2011 (Danish Hydraulic Institute, 2012). Cette étude est composée de différentes étapes allant de la caractérisation du site aux tests de différents scénarios via des simulations numériques, jusqu'au dimensionnement du scénario sélectionné.

L'objectif du renforcement est de mettre la digue hors d'atteinte des hauts niveaux d'eaux et des vagues de tempête afin de limiter les risques de fragilisation de l'ouvrage et de rupture comme cela s'est produit en 1949 et 1953 (voir Chapitre IV). Cette fragilisation peut s'expliquer par l'infiltration d'eau dans l'ouvrage et/ou l'affouillement du pied de digue par le déferlement des vagues sur l'ouvrage. La volonté du GPMD était de favoriser une méthode douce de défense contre la mer afin d'inscrire ce projet dans une stratégie de gestion durable du littoral. C'est pourquoi l'option du rechargement sédimentaire au droit de l'ouvrage était une condition *sine qua non* du projet de confortement afin de créer une zone tampon pouvant dissiper l'énergie de la houle avant qu'elle n'atteigne la digue. Les larges stocks de sable issus des dragages d'entretien dont bénéficie chaque année le GPMD offraient également l'opportunité d'être valorisés dans ce projet de rechargement sédimentaire.

Trois plans masses ont été proposés basés sur : un rechargement de plage (Figure VI.2-A), un rechargement de plage couplé à un rechargement subtidal (Figure VI.2-B) et un rechargement de plage associé à la création de deux brise-lames (Figure VI.2-C). Ce dernier plan masse a été écarté pour différentes raisons, à savoir son impact négatif sur la plage en aval avec une réduction de l'alimentation du sable vers l'est, son coût de réalisation plus élevé ainsi que la volonté du GPMD de mettre en œuvre une solution de protection du littoral entièrement souple en accord avec les recommandations du guide national sur la gestion du trait de côte (2010).



Figure VI.2 Plans masses proposés par DHI (DHI, 2012)

Ainsi, à partir des deux premiers plans masses sélectionnés (Figure VI.2-A&B), cinq scénarios ont été testés par DHI, basés sur un rechargement de plage simple, avec ou sans rechargement d'entretien, et une combinaison de rechargement de plage et de rechargement subtidal en faisant varier les volumes à mettre en œuvre.

Après une analyse des résultats de modélisation, le scénario sélectionné par le GPMD est basé sur un rechargement de plage avec entretien régulier. Les caractéristiques de base de ce scénario faisaient état d'un rechargement réalisé parallèlement à la digue, d'un volume d'environ 900 000 m³, d'un haut de plage nivelé à environ + 6 m CM ainsi que d'une pente d'équilibre du profil de 1/70 soit 1,42%. En accord avec la réglementation française en vigueur à cette date, ce rechargement de plage devait être dimensionné pour assurer une protection optimale de la digue en cas de tempête cinquantennale tout en prenant en compte une augmentation du niveau marin de 60 cm d'ici 2100. Des ajustements de dimensionnement ont par conséquent été effectués en se basant sur une analyse des valeurs extrêmes des niveaux d'eau et des vagues et une analyse de probabilités conjointes. Le détail de ces analyses pourra être consulté dans le rapport de DHI (2012). Un résumé en est néanmoins fait ici. La valeur extrême de niveaux d'eau sélectionnée pour une période de retour de 50 ans est celle correspondante aux niveaux marins extrêmes fournis par le (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, 2012) soit +7,32 m CM. La valeur de houle extrême à la côte a été estimée à partir d'un modèle de propagation de houle du large vers la côte. Les données de houles au large proviennent de l'Atlas Numérique d'Etats de Mer Océanique et Côtier (ANEMOC). Pour estimer les valeurs de houles extrêmes à la côte, une analyse statistique basée sur la méthode des renouvellements a été effectuée suivie d'un test par rapport à différentes lois de distribution. Pour une période de retour de 50 ans, une hauteur extrême de houle à la côte de 3,06 m a été retenue. Enfin, l'étape suivante correspond à une analyse de probabilité conjointe entre le niveau d'eau et la hauteur de houles extrêmes. Il en ressort que pour une période de retour de 50 ans, la houle extrême oscille entre 2,08 et 3,06 m pour un niveau d'eau extrême compris entre de +7,33 m et +6,37 m CM.

Deux scénarios de tempête ont alors été sélectionnés, en intégrant les 60 cm d'élévation du niveau marin, dont les caractéristiques sont les suivantes :

- niveau d'eau extrême de +6,97 m associé à une houle de 3,06 m
- niveau d'eau extrême de +7,92 m associé à une houle de 2,08 m

La modélisation a consisté à propager ces deux tempêtes sur deux profils de plage tests avec un haut de plage à +6 m CM (niveau de protection minimale) et un autre à +7,50 m CM (niveau de protection maximale). Le niveau de + 6 m CM correspond à une altitude du haut de plage similaire à l'altitude des plages situées à l'Est de Dunkerque et donc correspondant à un niveau de protection naturel. Le profil avec un haut de plage surélevé à +7,50m CM correspond à une surépaisseur afin d'anticiper l'abaissement progressif du niveau de plage entre les rechargements d'entretien. Les résultats ont démontré qu'avec un haut de plage à +6 m CM, l'agitation résiduelle en pied de digue n'était que de 0,50 m, pour l'évènement combinant le niveau d'eau à +7,93 m CM et une houle de 2,08 m. Un rechargement à + 6 m CM assure donc un niveau de protection satisfaisant. Avec une plage à + 7,50 m CM, l'agitation en pied de digue est quasiment nulle (de l'ordre de 0,05 m). Un rechargement de plage à la côte +7,50 m CM a donc été jugé optimal en termes de protection et d'anticipation de l'abaissement progressif du niveau de la plage jusqu'à + 6 m CM, qui est une altitude acceptable compte tenu de l'agitation en pied de digue évoquée précédemment.

Les caractéristiques définitives du dimensionnement du rechargement sont par conséquent les suivantes :

- un rechargement de 1 500 000 m³
- une plateforme nivelée à +7,5 m CM et d'une largeur de 200 m dans la partie centrale de l'ouvrage
- une pente inférieure à 1/20 (pente maximale)
- un sable d'emprunt avec un grain médian de 0,3 mm

La modélisation a permis d'estimer également l'évolution du rechargement et notamment son érosion. DHI (2012) avait estimé l'érosion chronique du site avant rechargement à 10 000 m³/an. A cette érosion s'ajoute celle consécutive au rechargement lui-même, estimée à 35 000 m³/an. Selon la modélisation réalisée par DHI (2012), l'essentiel de l'érosion devrait se produire dans la partie ouest de la digue (Figure VI.3) en raison d'un rééquilibrage du rechargement lié à un réalignement du tracé en plan de la plage. A noter que ce volume de sable de 45 000 m³/an ne serait pas perdu, mais redistribué longitudinalement. L'érosion en cas de tempête de période de retour de 50 ans a également été analysée. Lors d'un tel évènement tempétueux, il se produirait une redistribution du sable le long du profil avec une érosion en haut de plage et un engraissement en bas de plage. L'abaissement du haut de plage lors d'un tel évènement a été estimé à 10-15 cm.

Des rechargements d'entretien de l'ordre de 225 000 m³ ont été préconisés tous les 5 ans par DHI afin de pallier à l'érosion engendrée dans le secteur ouest. Ce choix d'un important volume rechargé tous les cinq ans plutôt qu'un plus petit volume à plus haute fréquence, découle d'une volonté d'éviter les travaux annuels et une perturbation du site.

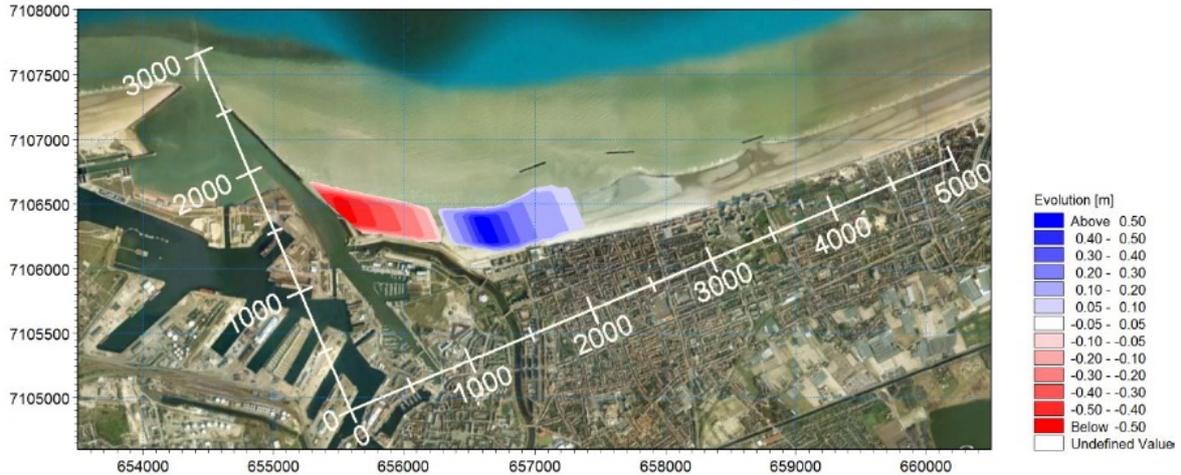


Figure VI.3 Modélisation de l'évolution du rechargement 10 ans après sa mise en œuvre sans rechargement d'entretien (DHI, 2012)

1.3. Choix de la zone de prélèvement

Le choix d'un site de prélèvement est conditionné par la granulométrie et par la qualité physico-chimique des sédiments. Ces deux paramètres ont été analysés afin de définir la source de sable optimale. Le GPMD dispose de larges stocks de sable issus des activités de dragage.

La zone de prélèvement sélectionnée se situe à l'entrée de l'avant-port Est à environ 2 km du site à réalimenter (Figure VI.4-A), à des profondeurs comprises entre -15 et -10 m CM. Le diamètre médian du sable présent sur la plage au droit de la digue est de 0,18 mm avant rechargement. La zone de prélèvement potentielle a été divisée en sous-zones afin d'affiner l'analyse granulométrique. Des différences apparaissent effectivement entre les sous-zones avec des secteurs présentant des sédiments plus fins que d'autres, en zone 1 notamment (Figure VI.4 A) où la proportion de vase est importante. Les sédiments des sous-zones 2 et 3 présentent une granulométrie supérieure à celle du site de rechargement (Figure 4B). L'utilisation de la méthode de James (1975) a permis de déterminer que la zone 2 était celle qui constituait la zone de prélèvement optimale en raison d'une granulométrie plus grossière pouvant favoriser la stabilité du rechargement (DHI, 2012).

Des analyses physico-chimiques ont été effectuées pour vérifier le seuil de contamination de différents éléments sur plusieurs échantillons de sédiments (métaux lourds, polychloro-biphényles, tributylétain, hydrocarbures aromatique polycyclique) en accord avec la législation française. Des analyses sur des composants organiques et bactériologiques ont également été effectuées. Si l'on se réfère à l'étude d'impact du projet, toutes les teneurs en contaminants sont inférieures aux limites réglementaires, autorisant par conséquent le prélèvement de sable à l'entrée de l'avant-port Est.

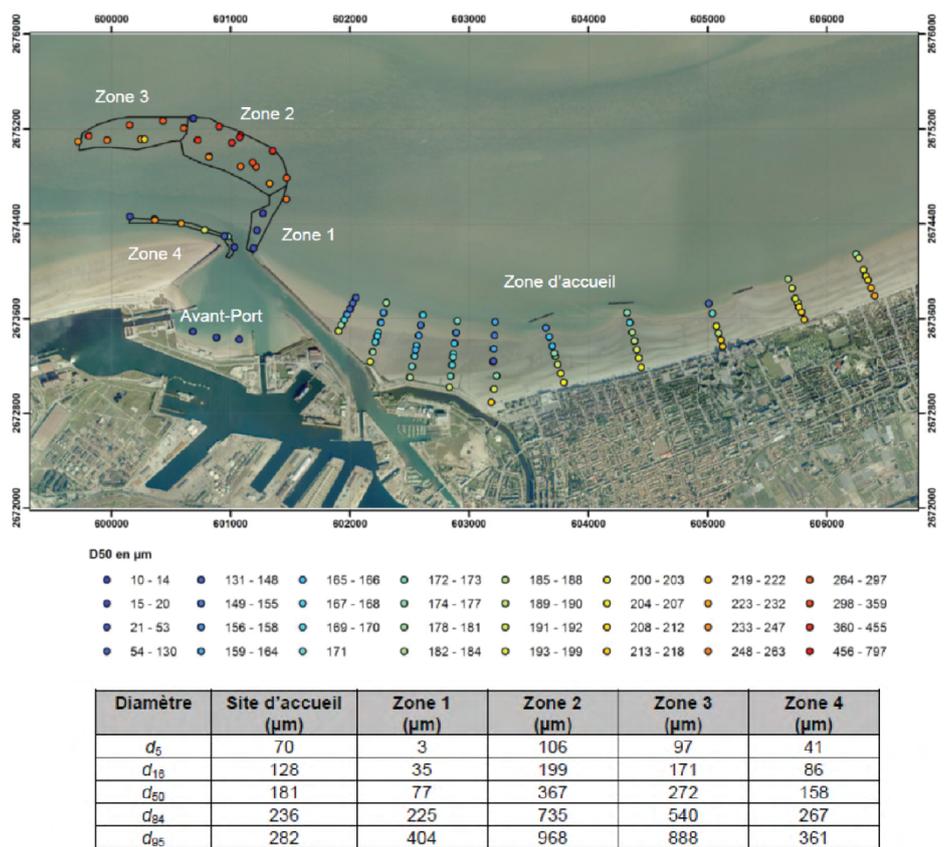


Figure VI.4 – A) Localisation des zones potentielles de prélèvement à l'entrée de l'avant-port-Est et cartographie de la granulométrie des échantillons dans la zone de prélèvement et sur le site de rechargement, B) Synthèse des percentiles des 4 zones potentielles d'emprunt et du site d'accueil

1.4. Travaux et évolution morphologique du site

Les travaux de rechargement se sont décomposés en deux étapes. La vulnérabilité de la digue a nécessité une intervention rapide dès fin 2011 et le déclenchement d'une procédure d'urgence afin de protéger l'ouvrage en cas de tempêtes au cours de l'hiver 2011-2012 (Figure VI.5). De premier rechargement, d'environ 300 000 m³ a été réalisé afin de créer une couche de protection au droit de la digue dans l'attente d'une intervention massive effectuée en 2014.

La Figure VI.6 présente la morphologie initiale de la plage en juin 2011 (Figure VI.6-A), ainsi que juste après le premier rechargement en janvier 2012 (Figure VI.6-B) et après le rechargement massif de mars 2014 (Figure VI.6-C). Il est possible de constater que le haut de plage en juin 2011 atteint à peine + 4 m CM. Lors des hautes mers, que ce soit les pleines mers de vives ou mortes eaux (isoligne bleue et verte respectivement sur la Figure VI.6), la plage était donc systématiquement submergée. A cette époque, les 3 épis au droit de la digue étaient encore visibles. Au niveau d'un profil topographique réalisé dans la partie centrale du site (profil P4, Figure VI.6D), la pente de plage est de 0,53 % (soit 1/189) entre le haut du profil et le niveau des BMVE, ce qui contraste avec la pente moyenne des plages à l'est de Dunkerque qui est de l'ordre de 1,5% (Reichmüth & Anthony, 2008b; Cartier & Héquette, 2013). On peut également noter une absence de barres et de bâches sur l'estran dans cette partie de la plage.



Figure VI.5 Travaux de rechargement de plage en janvier 2012 (Etape 1/2) (source : Antoine Tresca) - A) Drague connectée aux conduites de refoulement - B) Aperçu du régalaage du sable sur la plage par les engins de terrassement

Le coût de cette première intervention s'est élevé à 850 000 €. Cette première étape a eu lieu entre novembre 2011 et janvier 2012. Les travaux ont été effectués au cours de la période hivernale afin de limiter les éventuels impacts sur l'activité biologique et touristique. Le sable a été prélevé à l'aide d'une drague aspiratrice en marche (Figure VI.6-A). Une fois le chargement de la drague effectué après un prélèvement en sable au niveau de la zone 2, la drague venait se connecter à poste d'accostage connecté à une conduite de refoulement localisée dans le chenal de navigation à côté de la digue (symbole rouge sur Figure VI.6-B). Le sable était ensuite transporté via les conduites de refoulement jusque sur la plage avant d'être réparti sur l'ensemble du site par des engins de terrassement (Figure VI.6-B).

Des MNT différentiels permettent d'estimer les bilans sédimentaires (Figure VI.7). Ainsi, après le premier rechargement (Figure VI.7-A), un bilan sédimentaire de + 302 000 m³ a pu être déterminé. Il convient de remarquer que les zones d'apports sont localisées sur toute la longueur de la digue des Alliés sur environ 1 100 m, sur une largeur d'environ 180-200 m. L'apport sableux est localisé en haut de plage. L'accumulation peut atteindre localement une épaisseur supérieure à + 2 m dans la partie ouest et centrale de l'ouvrage (teintes violettes sur la Figure VI.7-A). Cette élévation du niveau de la plage a ainsi permis de recréer un haut de plage inexistant avant l'opération. Les niveaux des PMVE et PMME se sont déplacés vers le large et se localisent en janvier 2012 à 5,75 m et 46,75 m respectivement du pied de l'ouvrage si on se réfère au profil au profil P4. Concernant la pente du profil, deux portions se distinguent nettement, la première jusqu'au niveau des BMME dont la pente atteint 2,7 % et la seconde beaucoup plus plane de 1,6%. Avec cette première intervention, les trois épis ont été recouverts.

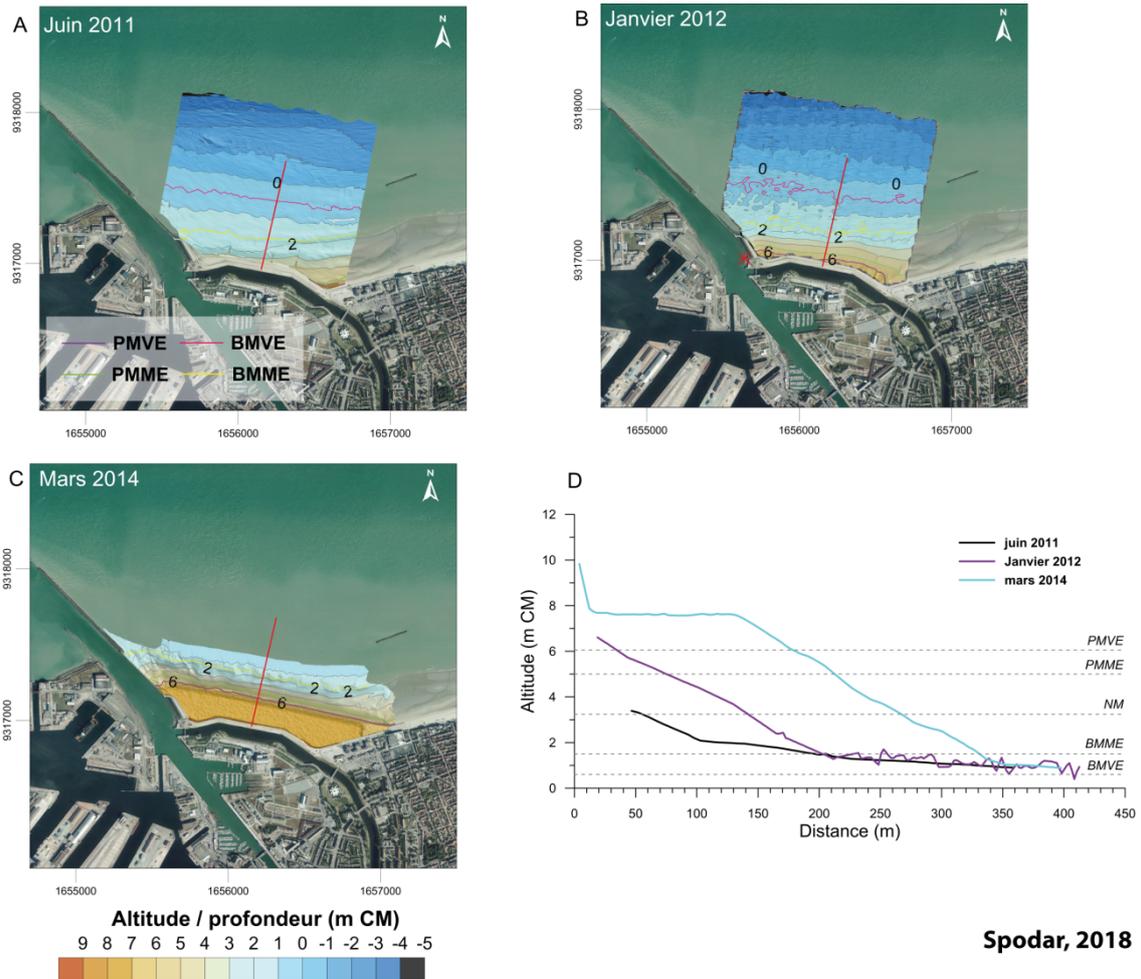


Figure VI.6 Evolution du site après les deux étapes de rechargements : A) Etat initial en juin 2011 - B) Après la 1^{ère} étape en janvier 2012 - C) Après la 2^{ème} étape en mars 2014 - D) Evolution de la topographie de la plage au niveau du profil P4 de juin à mars 2014. Avec PMVE : les pleines mers de vives-eaux - PMME : les pleines mers de mortes-eaux -BMME : les basses mers de mortes-eaux et BMVE : les basses mers de vives-eaux.

La deuxième étape du rechargement a bénéficié d'une labellisation Plan Submersion Rapide. Le coût des travaux de 4,2 M€ a donc été financés à 40 % par l'Union Européenne avec les Fonds Européens de Développement Régional et à 60 % par l'Etat avec les Fonds de Prévention des Risques Naturels Majeurs. Ce second rechargement a eu lieu en février 2014 en un mois seulement grâce aux travaux intensifs qui se sont déroulés 24h/24h et 7j/7j. La zone de prélèvement est restée la même, mais le mode opératoire a été légèrement modifié. La drague aspiratrice en marche *Bartolome Dias* de la société luxembourgeoise Jan de Nul a été mobilisée afin d'effectuer le prélèvement de sable. Une fois chargée, cette drague venait se connecter à des conduites flottantes présentes à proximité de la zone de prélèvement, au large du site de rechargement, puis le sable était transporté et refoulé sur la plage grâce à des conduites. Cette deuxième étape a fait l'objet d'un rechargement beaucoup plus conséquent de 1,2 Mm³ sur un linéaire de plage de 1700 m, soit 705 m³/ml.

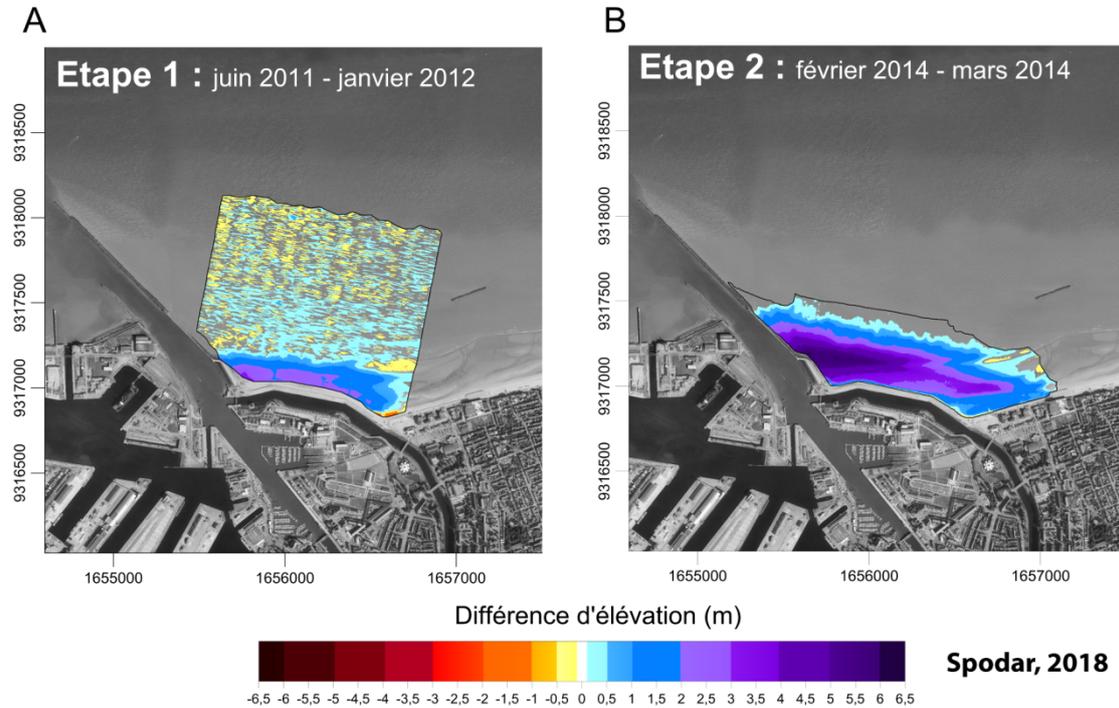


Figure VI.7 : MNT différentiel entre les différentes étapes des travaux – A) Etape 1 : entre juin 2011 et janvier 2012 – B) Etape 2 : entre février 2014 et mars 2014

Le différentiel altimétrique entre les levés topographiques effectués en février et mars 2014, soit avant et après ce deuxième rechargement, met en évidence cet apport massif de sable (Figure VI.7-B). Un bilan sédimentaire de $+ 1,22 \text{ Mm}^3$ a pu être calculé sur l'emprise concernée ($661\,000 \text{ m}^2$) soit environ $+ 1,84 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Les apports sédimentaires atteignent par endroit $+ 6 \text{ m}$, notamment dans le secteur ouest de l'ouvrage. Cette deuxième étape du rechargement a permis la création d'une large plateforme supratidale nivelée à environ $+ 7,6 \text{ m CM}$ (Figure VI.6-C Figure VI.8) afin de mettre la digue hors d'atteinte des hauts niveaux d'eau et vagues. Après cette opération, le pied de la digue se retrouve à une distance d'environ 139 m du niveau du PHMA, 152 m du PMVE et 186 m du PMME. En mars 2014, sur le profil P4, la pente au niveau de la plateforme est de $0,49\%$, tandis que la première portion de l'estran très raide atteint $3,0\%$ et celle du bas de plage, au-delà du BMME se caractérise par une pente de $0,37\%$.

1.5. Bilan des travaux sur la plage au droit de la digue

La Figure VI.9 met en évidence le bilan de l'ensemble des variations morphologiques de ce rechargement sur le secteur d'étude entre juin 2011, stade pré-travaux, et mars 2014, stade post-travaux. Le bilan sédimentaire fait état de $+ 1,45 \text{ Mm}^3$ sur l'emprise concernée (Figure VI.9), correspondant à $+ 2,05 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Comme prévu dans la modélisation, l'apport massif de sable a été réparti parallèlement à l'ouvrage afin de le protéger dans son ensemble.

Cette nouvelle plage est orientée NO-SE du fait de la configuration de la digue, une orientation différente de celle des plages à l'Est de Dunkerque (OSO-ENE). La Figure VI.6-C présente l'état du site en mars 2014 juste à la fin des travaux et représente ainsi le stade de référence avec lequel seront comparés les MNT post-travaux dans le but d'analyser l'évolution de ce rechargement de plage. En plus d'offrir une protection optimale pour la digue des Alliés, cette nouvelle plage se

révèle être un atout majeur pour la station balnéaire de Malo-les-Bains. Le rechargement de plage a permis de créer 236 000 m² de plage sèche au-dessus du niveau du PHMA, soit une plateforme supratidale d'environ 220 m de largeur dans le secteur ouest (au niveau du P2), 160 m dans la zone centrale (au niveau du P4) et 230 m de largeur (au niveau du P6).



Figure VI.8 Etat du site avant (A) et après (B) la deuxième étape des travaux de rechargement sédimentaire (source : A. cartier)

Aucun échantillonnage des sédiments de surface n'a été effectué sur la plage immédiatement après les travaux. Toutefois l'échantillonnage des sédiments de surface dans la zone d'emprunt a permis de déterminer un grain moyen de 0,47 mm (DHI, 2012). A défaut d'échantillonnage des sédiments de plage après le rechargement, il conviendra d'utiliser cette valeur moyenne comme valeur de référence, le sable ayant été refoulé et réparti de manière aléatoire et homogène.

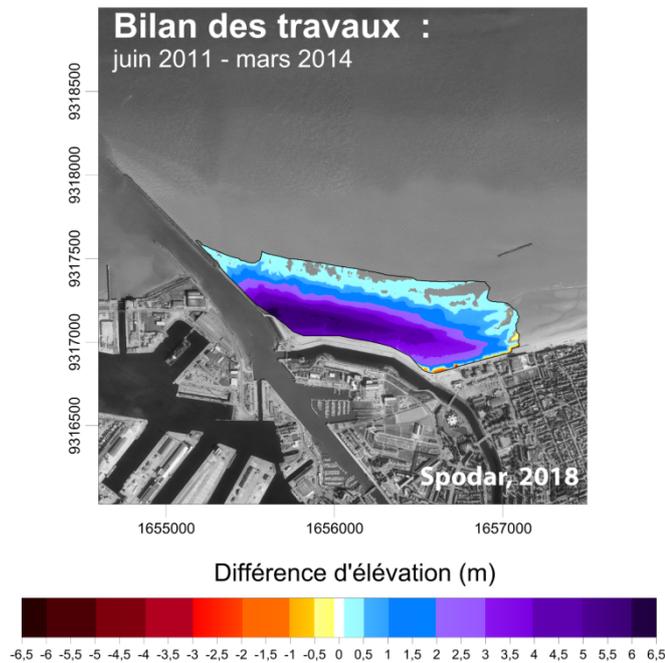


Figure VI.9 Variations d'altitude entre juin 2011 et mars 2014 suite aux deux opérations de rechargements de plage.

2. Analyse des conditions météo-marines au large et à la côte entre mars 2014 et mai 2017

L'étude des conditions météo-marines au large et à la côte va permettre d'apporter des réponses relatives à l'évolution morphologique du rechargement. L'analyse des conditions météo-marines s'étend de mars 2014 et mai 2017, période qui concorde avec les dates des grands levés topographiques effectués dans le cadre du suivi morphologique du rechargement de plage. Cette période d'analyse est précédée par un hiver particulièrement tempétueux. En effet au cours de l'hiver 2013-2014, sept tempêtes se sont succédé et ont balayé le littoral atlantique, de la Manche et de la mer du Nord. La plus marquante sur le littoral dunkerquois reste la tempête Xaver, les 5 et 6 décembre 2013, avec un niveau d'eau exceptionnel enregistré à Dunkerque de +7,43 m CM, soit une surcote de 1,26 m enregistrée à marée haute et une surcote instantanée maximale de 2,35 m enregistrée à basse mer le 5 décembre 2013 (Daubord, 2014). La période d'analyse des conditions météo-marines débute en mars 2014 après le passage de cette période hivernale tempétueuse. L'étude des conditions météo-marines de cette période d'un peu plus de 3 ans sera également menée selon un découpage en trois sous-périodes, correspondant aux dates des grands levés topographiques sur une large couverture surfacique, afin de mettre en évidence d'éventuelles variabilités. Ces sous-périodes sont les suivantes :

- Période 1 : mars 2014 – février 2015 → 1^{ère} année du rechargement
- Période 2 : mars 2015 – mi-février 2016 → 2^{ième} année du rechargement
- Période 3 : mi-février 2016 – mai 2017 → 3^{ième} année (+ 3 mois) du rechargement

2.1. Analyse des conditions anémométriques au large

Les données horaires de vent au large sont issues de la station Sandettie située à 16 km au large de Calais (voir Chapitre IV - Figure V.8 pour la localisation). Cette partie de l'analyse des conditions météo-marines est primordiale dans la mesure où le vent au large va conditionner la formation et la propagation de la houle et peut également avoir une influence sur les courants marins. Sur l'ensemble de la période comprise entre mars 2014 et mai 2017, les vitesses des vents au large se répartissent de la manière suivante :

- 9,26 % des vents < 4 m/s
- 35,58 % des vents entre 4 et 8 m/s
- 34,04 % des vents entre 8 et 12 m/s
- 15,12 % des vents entre 12 et 16 m/s
- 5,97 % des vents ≥ 16 m/s

Bien que les vents faibles inférieurs à 8 m/s représentent une part importante des enregistrements, une fréquence significative de vents moyens compris entre 8 et 16 m/s doit être soulignée. Bien que moins fréquents, les vents forts ≥ 16 m/s représentent une part non négligeable des enregistrements.

Sur cette période globale (03/2014 – 05/2017), les vents dominants sont originaires du SO, représentant 43 % des enregistrements, la composante NE quant à elle représente 22 % des enregistrements (Figure VI.10-A). Ces observations sont conformes au régime de vent régional avec

des dépressions originaires de l'Atlantique qui se propagent ensuite à travers la Manche et celles en provenance de la mer du Nord (Maspataud, 2011).

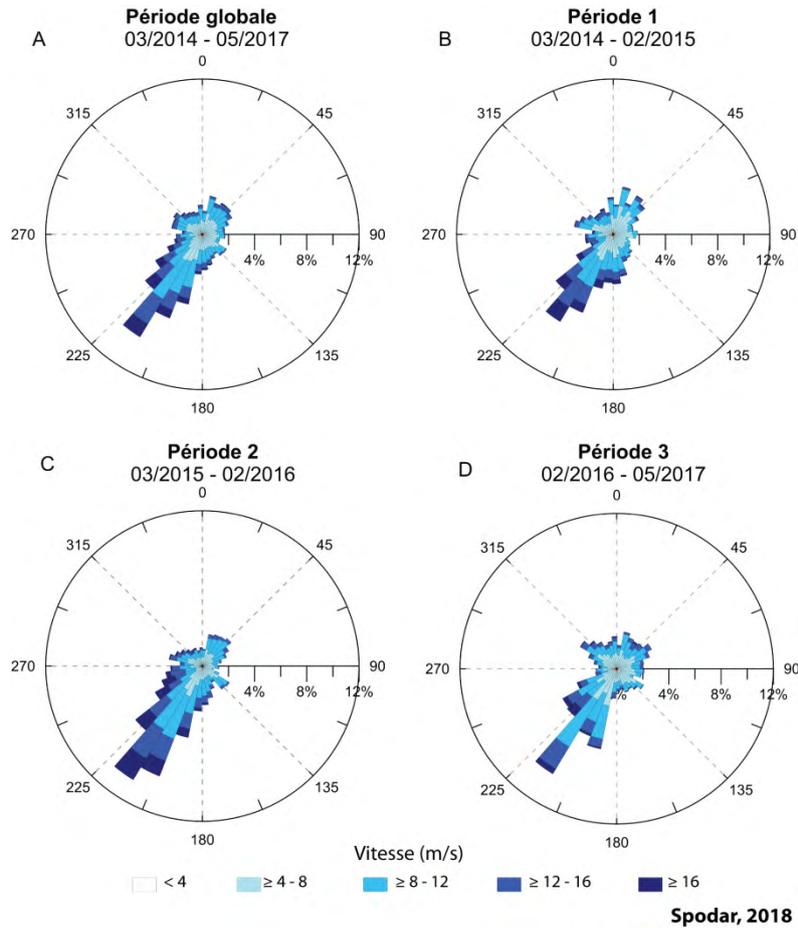
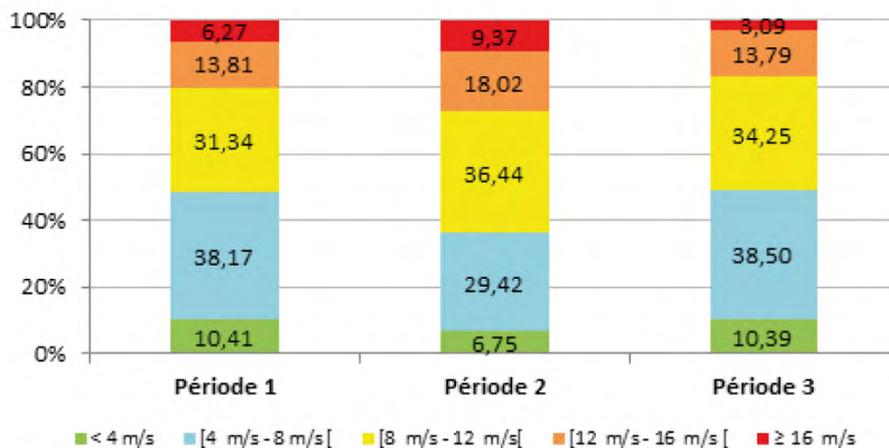


Figure VI.10 Rose des vents au large (station Sandettie) de mars 2014 à mai 2017 (A) et pendant les trois périodes d'étude

Les périodes 1, 2 et 3 se caractérisent par un vent moyen de 8,72 m/s, 9,91 m/s et 8,45 m/s respectivement et quelle que soit la période les vents du secteur SO prédominent largement (Figure VI.10 B-C-D).

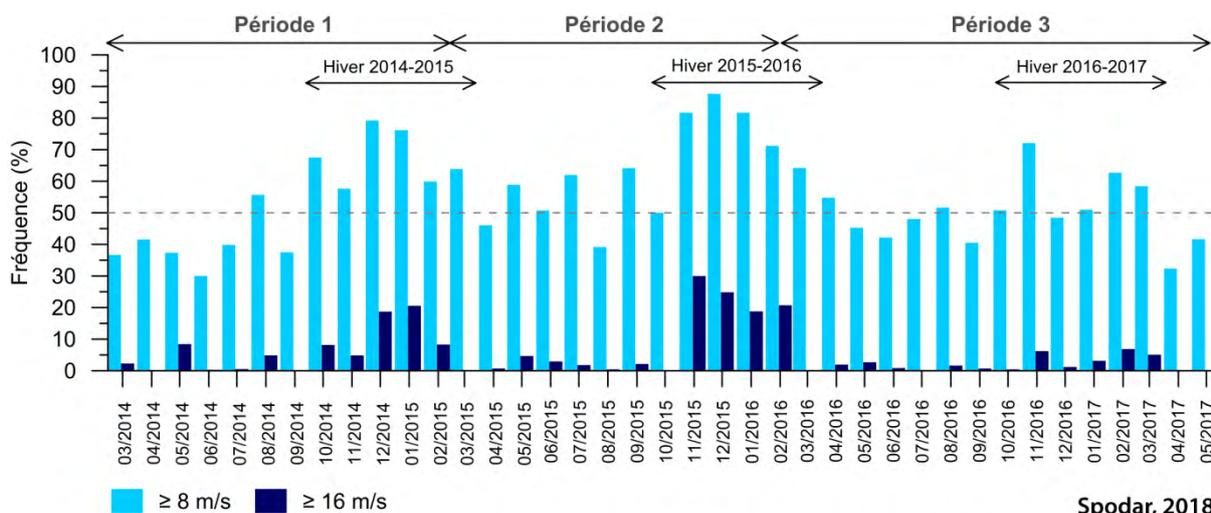
La Figure VI.11 présente la distribution des vents selon différentes catégories de vitesses. Les périodes 1 et 3 se différencient par la part plus importante de vents faibles à très faibles par rapport à la deuxième période lors de laquelle les vents ont été plus forts avec 18 % de vents compris entre 12 et 16 m/s et 9,37% de vents ≥ 16 m/s (contre 13,81% et 6,27% pour la période 1). Au cours de la troisième période d'analyse entre mi-février 2016 et mai 2017, une augmentation des vents faibles est enregistrée. A noter que la période 3 est plus longue et comprend deux périodes printanières, ce qui peut expliquer la plus faible proportion de vents forts.



Spodar, 2018

Figure VI.11 Fréquence par périodes des vents au large selon différentes catégories de vitesse

Afin de mettre en évidence d'éventuelles sous-périodes plus agitées, une analyse mensuelle des vents ≥ 8 m/s et ≥ 16 m/s a été menée (Figure VI.12). La tendance mensuelle laisse apparaître une certaine cyclicité. Les périodes de vent moyen et fort ≥ 8 m/s correspondent de manière générale à la fin de l'automne et à l'hiver (soit de novembre à février). En considérant ces périodes plus venteuses, que l'on peut qualifier « d'hivernales », la moyenne mensuelle des vents ≥ 8 m/s est de 68 % pour la période hivernale 2014-2015 et atteint 81% pour la période hivernale 2015-2016 puis décroît à 59% pour celle de 2016-2017. Ces périodes hivernales se distinguent également par la plus grande proportion de vents forts ≥ 16 m/s. Comme il est possible de le remarquer sur la Figure VI.12, c'est en 2015-2016 que les plus fortes fréquences mensuelles de vents ≥ 16 m/s ont été enregistrées, avec une fréquence mensuelle de vents forts qui atteint 30% en novembre 2015. De multiples événements tempétueux se sont en effet succédé au cours des mois de novembre et décembre 2015 (Figure VI.12). Durant l'hiver 2014-2015, un maximum de 21% de vent fort a été enregistré en janvier 2015. Une tendance à la baisse des vents forts est constatée au cours de l'hiver 2016-2017. Sur l'ensemble de la période de suivi (mars 2014-mai 2017), ces vents forts ≥ 16 m/s proviennent très majoritairement du secteur SO avec 81% des enregistrements.



Spodar, 2018

Figure VI.12 Fréquences mensuelles des vents au large ≥ 8 m/s et ≥ 16 m/s

2.2. Analyse des conditions anémométriques à la côte

Afin d'étudier la variabilité des conditions anémométriques à la côte entre mars 2014 et mai 2017 les données horaires de vents issues de la station Météo France à Dunkerque ont été analysées. Les épisodes venteux et tempêtes enregistrés au large à la station Sandettie n'ont pas forcément atteint la côte avec la même intensité. De manière générale les vents sont plus faibles à la côte et l'ensemble de la période comprise entre mars 2014 et mai 2017 est caractérisée par :

- 30,57 % de vents $<$ à 4 m/s
- 53,82 % de vents compris entre 4 et 8 m/s
- 14,09 % de vents compris entre 8 et 12 m/s
- 1,44 % de vents compris entre 12 et 16 m/s
- 0,08 % de vents \geq à 16 m/s

On constate une prédominance des vents de secteur SO avec 38,53% des enregistrements tandis que la fréquence des vents en provenance des 3 autres secteurs est relativement similaire avec 22 % pour le secteur NO, 21,34% pour le secteur NE et 18,10 % pour le secteur SE (Figure VI.13-A). Les vents moyens de 8 à 16 m/s représentent 15,53% des données. Concernant leur orientation, ces vents moyens proviennent principalement du secteur SO (36,58 %), puis NO (30,52 %) et NE avec une fréquence de 28,66 %. Bien que quasiment inexistant au cours de ces 3 années (soit 22 enregistrements horaires), les vents forts \geq à 16 m/s proviennent dans 95 % des cas du quart NO.

Au cours de la première année post-rechargement (période 1 de mars 2014 à février 2015), plus de la moitié des vents, soit 52%, sont compris entre 4 et 8 m/s et 34% des vents sont inférieurs à 4 m/s, soit un total de 86% de vents faibles (Figure VI.14-A). La fréquence de vents moyens (de 8 à 16 m/s) reste néanmoins non négligeable avec 14 %, tandis que les vents forts ne représentent que 0,1% des enregistrements. Les vents dominants proviennent du secteur SO (Figure VI.13-B & Figure VI.14-B).

La fréquence de vents très faibles (<4 m/s) au cours de la période 2 (mars 2015 – mi-février 2016) est de 24,6 %, tandis que la fréquence des vents compris entre 4 m/s et 8 m/s augmente très légèrement pour atteindre 55,1 % (Figure VI.14-A), les vents moyens sont plus fréquents, avec 20,2% des observations. Une très légère augmentation des vents forts peut également être remarquée. Les vents du quart SO sont prédominants (Figure VI.14-B).

Pendant la troisième période, la tendance générale est à la diminution des vents moyens et forts. Une dominance des vents de SO est encore une fois observable. Contrairement aux deux premières périodes, le quart NE représente la deuxième fenêtre de provenance des vents (Figure VI.14-B).

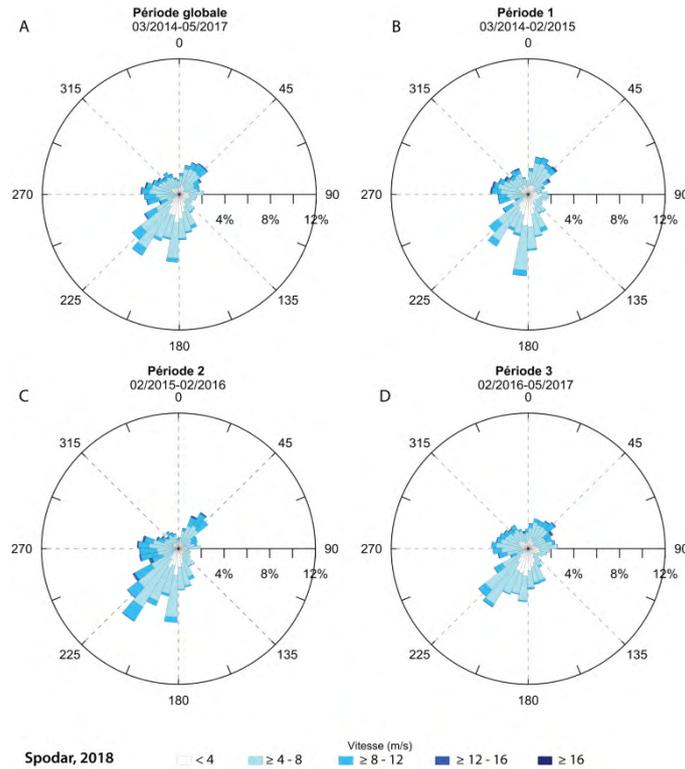
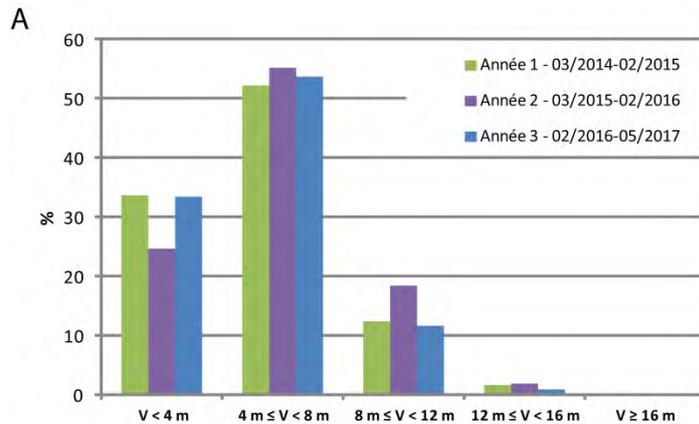


Figure VI.13 Rose des vents à Dunkerque A) sur la période globale d'étude 03/2014-05/2017, B-C-D) selon les trois sous-périodes



B

	NE (%)	SE (%)	SO (%)	NO (%)
Année 1 - 03/2014 - 02/2015	21,9	19,4	35,6	23,1
Année 2 - 03/2015 - 02/2016	19,3	16,4	44,1	20,2
Année 3 - 02/2016 - 05/2017	24,7	16,7	37,0	21,6

Spodar, 2018

Figure VI.14 Distribution des vitesses de vents à la côte par années (A) et distribution par secteurs d'origine (B)

2.3. Analyse des vagues au large

La houle représente un forçage important étant donné son rôle dans la remobilisation et le transport sédimentaire à la côte. Les vagues sont également responsables de modifications morphologiques majeures. Pour l'analyse des conditions de houles au large sur la période 2014-

2017, les données horaires issues de la bouée Sandettie seront considérées. Il est important de rappeler que les données de houle issues de cette station ne sont pas directionnelles.

La hauteur significative moyenne pour l'ensemble de la période de suivi (03/2014-05/2017) est de 0,60 m. Il faut souligner la prédominance de hauteurs de vagues inférieures à 1 m avec 80,43 % des mesures. Les vagues inférieures à 0,5 m atteignent même près de la moitié des enregistrements. Les vagues de hauteurs comprises entre 1 et 2 m représentent 16,75 % des mesures. Seules 2,69 % des vagues sont supérieures ou égales à 2 m et 0,14% seulement (soit 36 enregistrements) sont supérieures ou égales à 3 m. La hauteur maximale enregistrée atteint 3,5 m lors de 3 enregistrements :

- le 21/11/2015 pendant 2 h consécutives lors du passage d'un événement tempétueux de secteur O à NNO
- le 20/11/2016 au cours du passage de la tempête Nannette de secteur SO à S

Des variabilités peuvent être mises en évidence en comparant les 3 périodes d'analyse (Tableau VI.1).

	Hs < 1 m	1 m ≤ Hs < 2 m	2 m ≤ Hs < 3 m	Hs ≥ 3 m
Période 1 - 03/2014-02/2015	81,91	15,18	2,77	0,14
Période 2 - 02/2015-02/2016	76,19	20,15	3,49	0,18
Période 3 - 02/2016-05/2017	82,82	15,14	1,94	0,10

Tableau VI.1 Fréquence (%) des hauteurs significatives par période

En accord avec les observations de vent, les périodes 1 et 3 sont relativement similaires en termes de distribution des hauteurs de vagues et donc d'agitation avec des fréquences de hauteur de vagues inférieures à 1 m de 81,91% et 82,92 % respectivement. Les vagues comprises entre 1 et 2 m représentent 15 % des enregistrements pour ces deux périodes et les vagues supérieures ou égales à 2 m restent assez faibles. La période 2, entre le 03/2015 et le 02/2016, se distingue quant à elle avec une fréquence de vagues < 1m de 76,19%. La catégorie de vagues comprise entre 1 et 2 m s'élève à 20% et celle comprise entre 2 et 3 m à 3,5%, ce qui est sensiblement supérieur aux fréquences observées pendant les deux autres périodes. Les vagues les plus hautes ≥ 3 m sont encore une fois quasiment absentes des séries de données avec 0,18 %.

Dans le détail, certaines sous-périodes et certains mois sont marqués par des hauteurs significatives plus importantes que les moyennes par année (Figure VI.15). Pour la période 1 deux sous-périodes se distinguent assez nettement : la première de mars à septembre 2014, et la seconde d'octobre 2014 à février 2015 (Figure VI.15). Ces deux régimes de vagues coïncident avec l'analyse des vents au large effectuée précédemment. Du 10/2014 au 02/2015, les valeurs moyennes des hauteurs significatives oscillent entre 0,60 m en octobre à 1,04 m pour le mois de décembre. Au cours de cette période hivernale, la proportion de vagues supérieures à 1 m est de 18% en novembre 2014 pour atteindre au maximum 41,5% en décembre 2014 (Figure VI.15-A). C'est également au cours du mois de décembre 2014 que les vagues supérieures à 2 m (9,85%) et à 3 m (0,96%) sont les plus fréquentes. Ces observations sont cohérentes avec des épisodes venteux au large, avec de multiples coups de vent survenus du 18 au 22 décembre et la tempête des 27-28 décembre 2014.

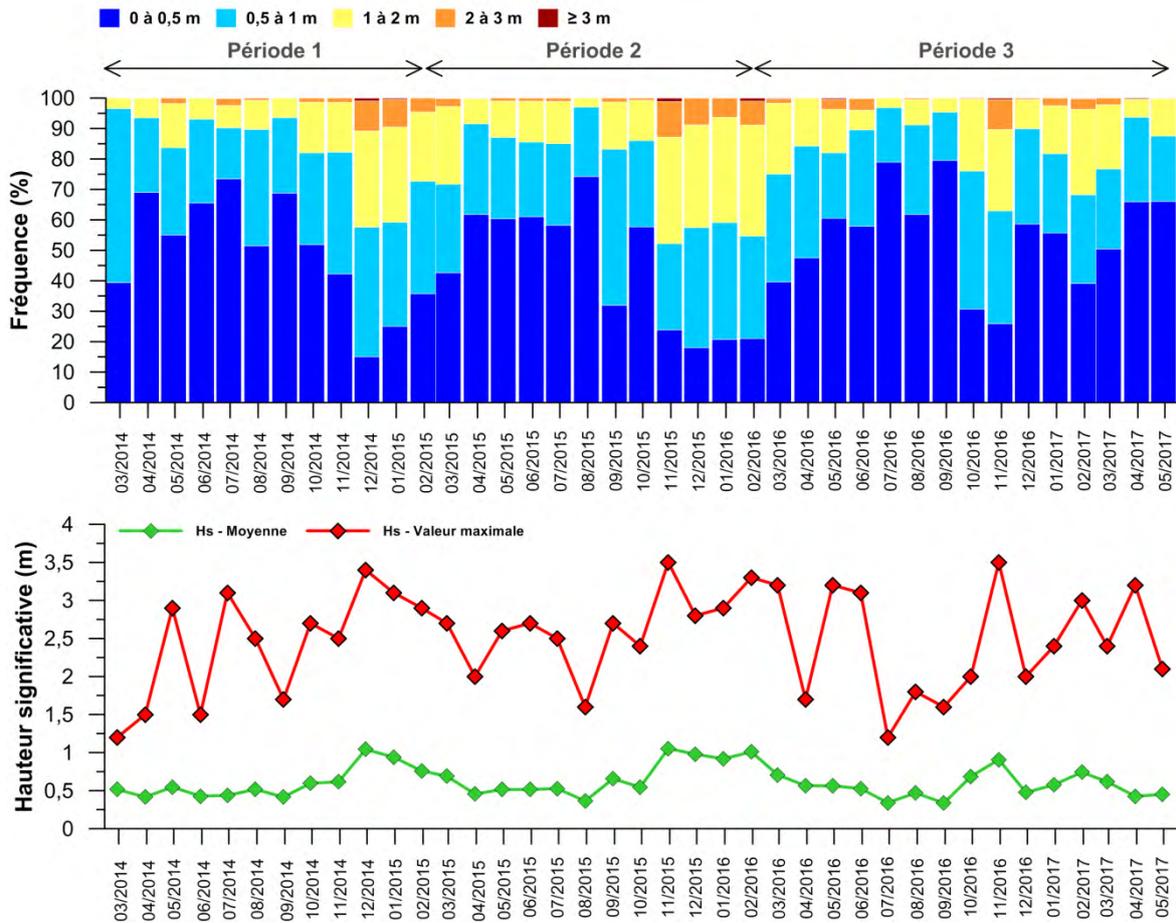


Figure VI.15 Distribution des hauteurs de vagues au large enregistrées à la station Sandtette pour les trois périodes de suivi et variabilité des moyennes mensuelles de hauteurs de vagues et des valeurs maximales mensuelles enregistrées

Concernant la période 2 (Figure VI.15-B), la distribution des hauteurs de houles montre encore une fois deux tendances coïncidant avec les saisons, comme observé également avec les vents au large. La période d'avril à octobre 2015 se caractérise effectivement un régime de vagues plutôt calme avec une fréquence mensuelle maximale de vagues ≥ 1 m de 15% seulement en juillet 2015. Sur cette période, les moyennes mensuelles des hauteurs significatives oscillant entre 0,36 m et 0,66 m sont inférieures à la moyenne annuelle de 0,68 m (Figure VI.15). La période hivernale de novembre à mi-février 2016 (le mois de février est partagé sur deux grandes périodes d'analyses afin de concorder avec les dates des MNT topographiques) est plus agitée. Les moyennes mensuelles sont comprises entre 0,92 m en janvier 2016 et 1,16 m pour la première moitié du mois de février 2016. Les mois de novembre 2015 et février 2016 se distinguent également avec leur fréquence de vagues ≥ 3 m de 1,13% et 1,84 % respectivement. Ces pics de hautes vagues coïncident avec le passage de deux tempêtes les 17-18 et les 20 - 22 novembre 2015. En février 2016, la tempête Ruzica ainsi qu'un coup de vent de secteur NNE expliquent l'enregistrement de telles vagues.

Au cours de la période 3 (Figure VI.15-C), on constate une tendance générale à la diminution progressive des hauteurs de vagues de mi-février 2016 à juillet 2016. Entre ces deux mois, la fréquence des vagues inférieures à 1 m est passée de 67% à 97 %. Des épisodes énergétiques se sont néanmoins produits au cours des mois de mars, mai et juin. La tempête Jeanne du 28/03 est à l'origine de hauteurs de vagues ≥ 3 m pendant 2h consécutives. Le 31 mai 2016, un coup de vent de

secteur nord entraîne la formation de vagues de plus de 3 m pendant 2h. Le 2 juin, un autre épisode venteux de secteur N génère de fortes houles avec un pic à 3,1m. Les trois mois estivaux sont caractérisés par des conditions très calmes. À partir d'octobre 2016, la fréquence des vagues comprises entre 1 et 2 m a commencé à sensiblement augmenter. Deux mois se démarquent au cours de l'hiver 2016-2017 à savoir novembre 2016 et février 2017. La tempête Nannette des 19-20 novembre coïncide avec les enregistrements de vagues les plus hautes. Pour le mois de février 2017, la tempête Thomas, le 23 février, est responsable des fortes vagues enregistrées.

2.4. Variabilité des niveaux d'eau à Dunkerque entre mars 2014 et mai 2017

Les données horaires de niveaux d'eau sont issues du marégraphe de Dunkerque et sont mises à disposition par le SHOM via le site <http://maree.shom.fr/>. Bien que cela reste assez rare sur la période étudiée, quelques périodes de lacunes ont pu être décelées (Figure VI.16). Seuls trois mois présentent un pourcentage de lacunes supérieur à 5% (avril, mai et août 2014).

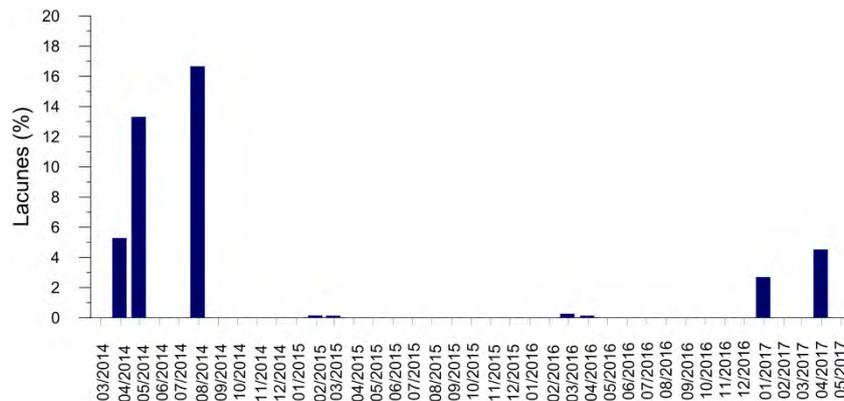


Figure VI.16 : Fréquence mensuelle des lacunes dans les séries de données marégraphiques de Dunkerque de mars 2014 à mai 2017

Les fréquences de hauts niveaux d'eau observés sont légèrement supérieures à celles des niveaux d'eau théoriques. En effet, selon les données prédites de niveaux d'eau, 19 % des niveaux d'eau auraient théoriquement dû être compris entre le niveau PMME et PMVE et 1,51 % entre le PMVE et le PHMA. Or les hauts niveaux d'eau observés de ces deux catégories représentent 20,39% et 2,43 % des enregistrements respectivement, 0,18 % des niveaux d'eau (soit 51 enregistrements) ayant atteint, voire dépassé, le niveau des PHMA. Le niveau maximal enregistré par le marégraphe atteint 6,93 m contre 6,09 m théoriquement prévu, soit une surcote de + 0,84 m, lors de la tempête Egon le 14/01/2017 à 01 :00.

Catégorie	Fréquence des niveaux d'eau observés (%)	Fréquence des niveaux d'eau théoriques (%)
Niv ≥ PHMA	0,18	0,00
PHMA > Niv ≥ PMVE	2,43	1,51
PMVE > Niv ≥ PMME	20,39	19,16
PMME > Niv ≥ NM	26,58	27,95
NM > Niv ≥ BMME	32,47	31,76
BMME > Niv ≥ BMVE	16,18	17,97
BMVE > Niv ≥ PBMA	1,77	1,65
Niv < PBMA	0,00	0,00

Tableau VI.2 Fréquence des niveaux d'eau observés et théoriques entre mars 2014 et mai 2017

Outre de hauts niveaux d'eau de tempête, de nombreuses autres surcotes se sont produites au cours de la période d'étude. L'analyse de ces surcotes, qui peuvent induire de hauts niveaux d'eau lorsqu'elles se produisent à marée haute, fait l'objet de la section suivante.

2.4.1. Analyse des surcotes

Entre mars 2014 et mai 2017, 17 994 mesures horaires de niveau d'eau correspondant à des conditions de surcote ont été observées pour une valeur moyenne de 0,17 m. Les hauteurs de surcote sont comprises entre 0,01 m et 1,92 m. A noter que cette surcote de près de 2 m est survenue lors d'une basse mer le 13/01/2017 à 20:00 lors de la tempête Egon. Les trois périodes d'analyse ont été reprises afin de mettre en évidence d'éventuelles variations interannuelles (Tableau VI.3).

A Fréquence (%) des hauteurs de surcote à tout moment de la marée confondu	Période			B Fréquence (%) des hauteurs de surcote lors de marée haute	Période		
	1	2	3		1	2	3
Surcote < 0,25 m	79,1	73,2	78,5	Surcote < 0,25 m	82,8	77,1	81,9
0,25 m ≤ Surcote < 0,5 m	17,1	20,9	17,8	0,25 m ≤ Surcote < 0,5 m	15,4	19,9	16,0
0,5 m ≤ Surcote < 0,75 m	2,8	4,8	2,9	0,5 m ≤ Surcote < 0,75 m	1,3	2,7	1,7
0,75 m ≤ Surcote < 1 m	0,5	0,8	0,7	0,75 m ≤ Surcote < 1 m	0,4	0,3	0,4
1 m ≤ Surcote < 1,25 m	0,2	0,2	0,1	1 m ≤ Surcote < 1,25 m	0,2	0,0	0,0
1,25 m ≤ Surcote < 1,5 m	0,2	0,1	0,0	1,25 m ≤ Surcote < 1,5 m	0,0	0,0	0,0
Surcote ≥ 1,5 m	0,0	0,0	0,0	Surcote ≥ 1,5 m	0,0	0,0	0,0

Tableau VI.3 Fréquence des hauteurs de surcote enregistrées lors des 3 périodes, A) à tout moment de la marée confondu – B) à marée haute uniquement

La majorité des surcotes observées sont inférieures à 0,25 m quelle que soit la période (Tableau VI.3-A). La période 2 est néanmoins celle qui présente la plus grande fréquence de surcotes comprises entre 0,25 m et 0,5 m avec 20,9 %. On constate également que c'est durant cette période que se sont produites le plus de surcotes comprises entre 0,5 et 1 m. C'est au cours de la période 1 que ce sont produites le plus de surcotes supérieures à 1 m avec 0,4 % soit 22 cas contre 15 cas lors de la période 2 et 13 cas au cours de la période 3. Les surcotes > 1,5 m au cours de la période 1 et 3 se sont produites lors de marées basses.

Les cas de surcotes coïncidant avec marée haute sont toujours les plus préoccupants étant donné leur plus forte probabilité d'engendrer de hauts niveaux d'eau exceptionnels. La majorité des surcotes combinées à des marées hautes sont inférieures à 0,25 m (Tableau VI.4), comme cela avait déjà été observé par Haigh *et al.* (2011) à Dunkerque. La fréquence des surcotes comprises entre 0,25 et 0,5 m est légèrement plus importante au cours de la période 2. Au-delà de 0,5 m, les

fréquences diminuent fortement. Le détail des surcotes supérieures ou égales à 0,75 m est récapitulé dans le Tableau VI.4. Certaines d'entre elles ont entraîné des niveaux d'eau supérieurs au PHMA. Les surcotes les plus fortes se sont produites lors d'événements en provenance du secteur OSO à NO, comme cela avait déjà été observé dans des études antérieures effectuées à Dunkerque (Chaverot, 2006).

Date de la surcote ≥ 0,75 m	Valeur de la surcote enregistrée (m)	Niveau théorique (m)	Niveau observé (m)	Événement associé à la côte
21/10/2014 22:00	0,94	5,57	6,51	Tempête de secteur Ouest
21/10/2014 23:00	1,02	5,65	6,67	Tempête de secteur Ouest
22/10/2014 00:00	1,14	5,23	6,37	Tempête de secteur Ouest
11/01/2015 02:00	0,77	5,08	5,85	Coup de vent de secteur OSO
11/01/2015 03:00	0,82	5,52	6,34	Coup de vent de secteur OSO
13/01/2015 04:00	0,77	5,09	5,86	Coup de vent de secteur OSO
30/11/2015 01:00	0,78	5,16	5,94	Coup de vent de secteur OSO
30/11/2015 03:00	0,78	5,76	6,54	Coup de vent de secteur OSO
15/01/2016 02:00	0,76	5,38	6,14	Tempête de secteur NO
04/01/2017 16:00	0,82	5,51	6,33	Tempête de secteur NO
11/01/2017 22:00	0,76	5,41	6,17	Tempête Egon de secteur NO
11/01/2017 23:00	0,76	5,93	6,69	Tempête Egon de secteur NO
14/01/2017 00:00	0,9	5,93	6,83	Tempête Egon de secteur NO
14/01/2017 01:00	0,84	6,09	6,93	Tempête Egon de secteur NO
23/02/2017 23:00	0,82	5,05	5,87	Tempête Thomas de secteur SO

Tableau VI.4 Liste des surcotes ≥ 0,75 m. Avec en rouge les niveaux d'eau observés ≥ PHMA

2.4.2. Analyse des hauts niveaux d'eau

L'analyse des distributions par périodes des hauts niveaux d'eau (Figure VI.17) montre que la période 3 (du 02/2016 au 05/2017) est celle qui présente le plus grand nombre d'enregistrements de niveaux d'eau ≥ 6,05 m (PMVE) avec un total de 312 cas, contre 211 pour la période 2 (02/2015-02/2016) et 202 pour la période 1 (03/2014-02/2015). Cependant, la période trois étant plus longue que les autres périodes, les valeurs exprimées en pourcentage montrent que c'est au cours de la seconde période qu'il s'est produit le plus de hauts niveaux d'eau ≥ 6,48 m CM (PHMA) avec 10,4 %, contre 5,9 % et 5,4 % au cours de la période 1 et 3 respectivement.

Les niveaux d'eau compris entre 6,05 m (PMVE - coefficient 95) et 6,48 (PHMA - coefficient 120) restent relativement fréquents. Au-dessus du PHMA, un nombre non négligeable de hauts niveaux d'eau a été observé : 12 cas pour la période 1, 22 pour la période 2 ce qui est en adéquation avec les conditions plus énergétiques de cette période et 17 pour la période 3. Aucune de ces surcotes n'a cependant atteint les niveaux extrêmes calculés par le SHOM à Dunkerque (niveau décennal : 7,00 m CM - niveau centennal : 7,39 m CM) (SHOM, 2012). Les trois plus hauts niveaux d'eau au cours de la période 3 ont été enregistrés pendant la tempête Egon :

- 6,93 m CM le 14/01/2017 à 01 :00
- 6,83 m CM le 14/01/2017 à 00 :00
- 6,74 m CM le 13/01/2017 à 00 :00

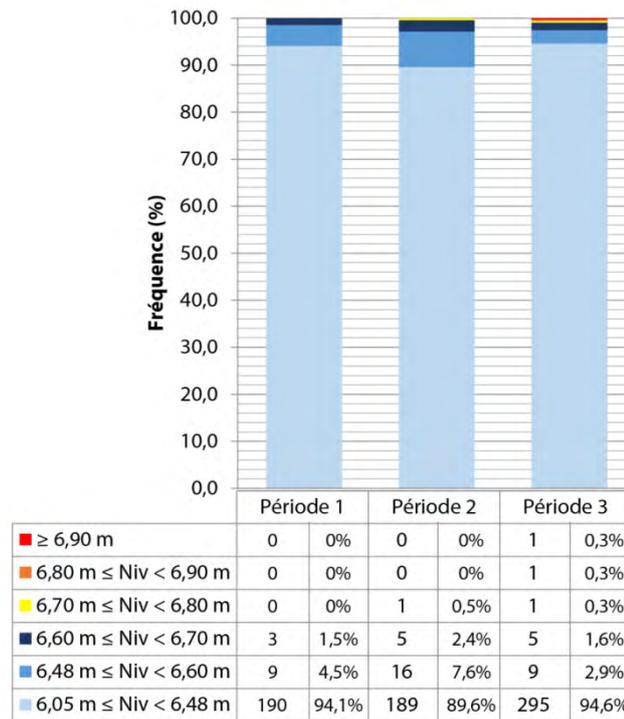


Figure VI.17 Fréquence et nombre d'observations de hauts niveaux d'eaux par catégories de hauteurs par périodes

2.5. Analyse de la conjonction des différents forçages

Dans le cas du rechargement de plage au droit de la digue des Alliés, un événement tempétueux sera toujours potentiellement érosif peu importe le niveau d'eau atteint. Effectivement, même à basse mer, la partie inférieure du rechargement sera impactée par l'action d'une forte houle (Figure VI.18). Le cas le plus critique reste néanmoins la conjonction d'un événement de forte intensité et d'une marée haute. En effet, à marée haute l'ensemble de l'estran peut être potentiellement affecté par une érosion importante. La plateforme supratidale peut également subir un recul plus ou moins important en fonction de l'énergie de la houle lors de l'événement. Ce recul de la limite extérieure de la plateforme provoque alors une diminution de la distance qui sépare la digue des hauts niveaux d'eau, augmentant ainsi le risque de fragilisation de l'ouvrage en rendant possible les assauts de la mer. En revanche lors de basses mers, une portion plus restreinte de l'estran peut être érodée. C'est pourquoi l'identification de ces cas potentiellement érosifs a été menée par l'analyse de leur action conjointe.

Les hauteurs significatives des vagues au large enregistrées à la bouée Sandettie (Figure VI.19-B) ont été filtrées en fonction des moments de la marée pendant lesquels les niveaux d'eau à Dunkerque étaient supérieurs ou égaux au niveau des PMVE soit 6,05 m CM (Figure VI.19-C). Le choix s'est porté sur ce niveau plutôt que celui de 5,00 m CM associé au PMME afin de cibler uniquement les événements recouvrant la portion la plus étendue possible de l'estran et les plus susceptibles d'atteindre la bordure de la plateforme supratidale. Pour que les enregistrements de houle au large coïncident avec les enregistrements de niveau d'eaux à la côte pour cette analyse, un décalage d'une heure a été appliqué entre les deux séries de données afin de prendre en compte le temps de propagation des vagues du large à la côte. Une fois les houles filtrées, la puissance des

vagues par unité de longueur de crête a été calculée puis les résultats ont été regroupés par mois et par classes d'intensité (Figure VI.19-D).

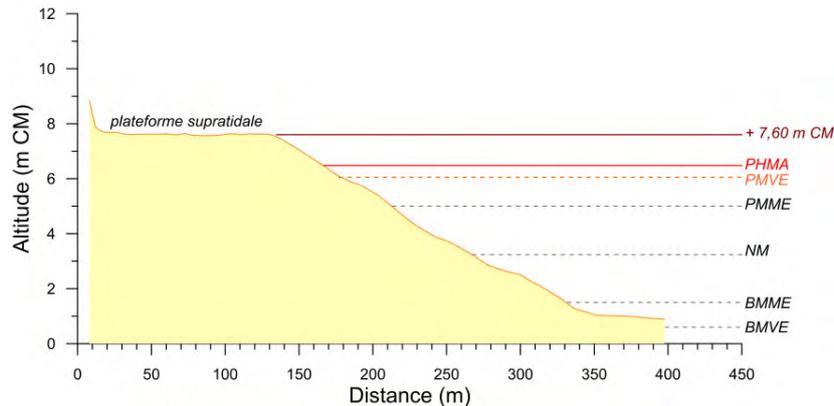


Figure VI.18 Hauteurs des niveaux d'eau superposés à un profil topographique transversal (P4) dans la partie centrale du rechargement

Le niveau des PMVE étant atteint assez fréquemment, de potentiels événements érosifs se sont donc produits presque chaque mois (excepté en mai 2015) pour totaliser 675 cas entre mars 2014 et mai 2017. Toutefois, tous ne sont pas associés à des houles puissantes. La majorité des observations (82%) correspond en effet à des vagues d'une puissance relativement faible $< 10 \text{ kW.m}^{-1}$. Les puissances de houles comprises entre 10 et 20 kW.m^{-1} représentent 9 % des observations tandis que les vagues d'une puissance supérieure à 20 kW.m^{-1} ont une fréquence inférieure à 5% (Tableau VI.5-A). Les houles les plus puissantes $\geq 50 \text{ kW.m}^{-1}$ ne représentent que 13 enregistrements sur les trois ans soit une fréquence de 2 %. La puissance maximale atteinte lors d'une marée haute est de 62 kW.m^{-1} et a eu lieu à deux reprises : la première fois lors d'un coup de vent de secteur NE le 10 janvier 2015, et la seconde fois lors d'un coup de vent les 29 et 30 novembre 2015.

En comparant les trois années post-rechargement, les fréquences de vagues par catégories de puissances sont assez similaires (Tableau VI.5-B). Dans le détail, la Figure VI.19-D montre clairement que les périodes hivernales se distinguent nettement de la période globale, notamment les hivers 2014-2015 et 2015-2016, que ce soit en nombre d'observations mensuelles de hauts niveaux d'eau $\geq 6,05 \text{ m CM}$ ou en catégories de puissances de vagues atteintes. En adéquation avec ce qui avait été analysé précédemment, l'hiver 2016-2017 est moins énergétique que les deux premiers.

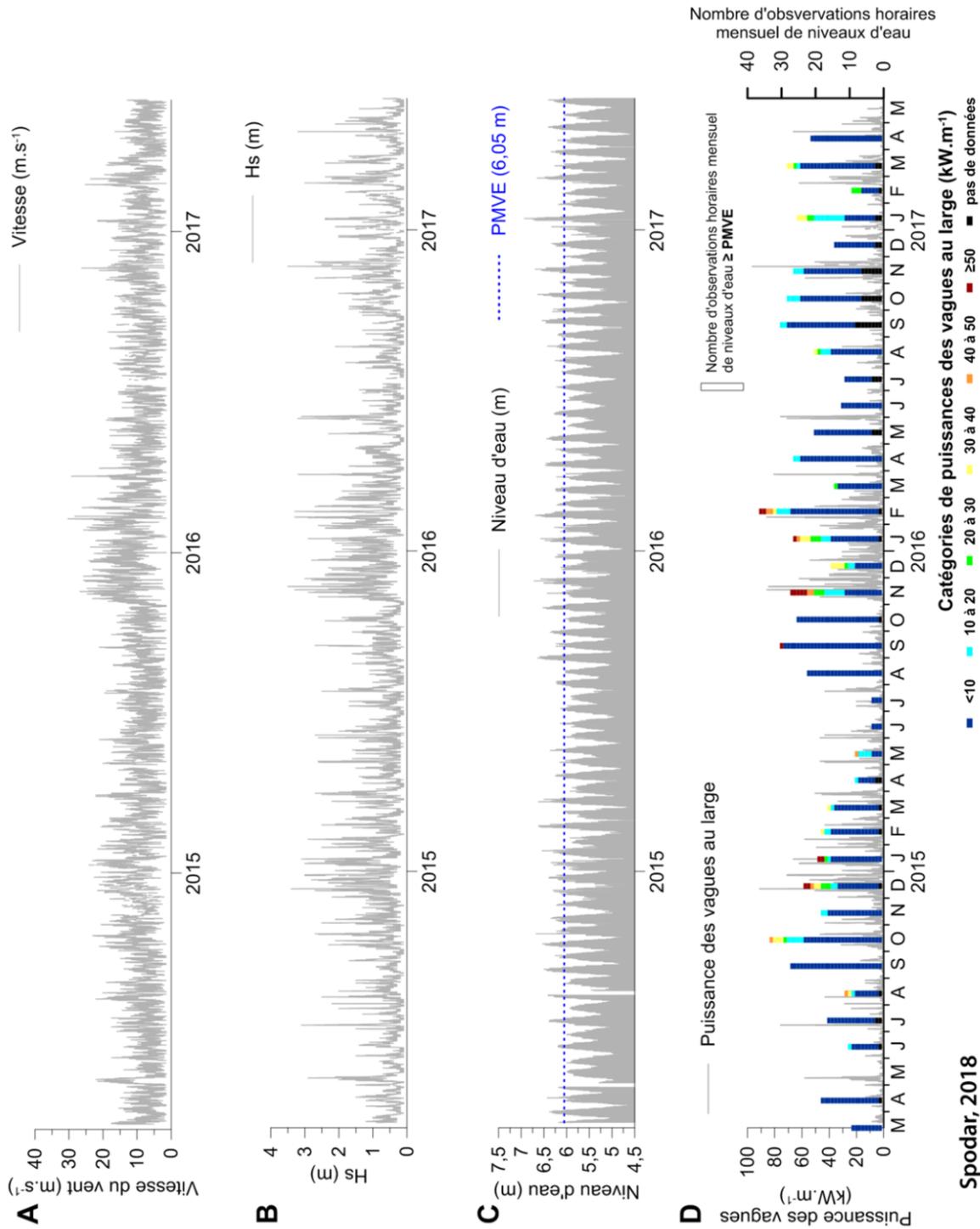


Figure VI.19 Conditions météo-marines enregistrées entre mars 2014 et mai 2017 : A) vitesses du vent enregistrées au large à la station Sandettie, B) hauteurs significatives des houles enregistrées au large à la station Sandettie, C) niveaux d'eau mesurés à Dunkerque et D) puissances des vagues calculées à partir des données de houles enregistrées à la station Sandettie

A)		Puissance de vague (kW.m ⁻¹)					
		< 10	10 à 20	20 à 30	30 à 40	40 à 50	≥ 50
Mars 2014 - mai 2017	<i>Nombre de cas</i>	552	59	20	22	9	13
	<i>Pourcentage</i>	82	9	3	3	1	2
B)		Puissance de vague (kW.m ⁻¹)					
		< 10	10 à 20	20 à 30	30 à 40	40 à 50	≥ 50
Mars 2014 - février 2015	<i>Nombre de cas</i>	162	14	5	7	3	4
	<i>Pourcentage</i>	83	7	3	4	2	2
Mars 2015 - mi-février 2016	<i>Nombre de cas</i>	161	21	7	9	6	9
	<i>Pourcentage</i>	76	10	3	4	3	4
Mi-février 2016 - mai 2017	<i>Nombre de cas</i>	229	24	8	6	0	0
	<i>Pourcentage</i>	86	9	3	2	0	0

Tableau VI.5 Fréquence des marées hautes ≥ 6,05 m CM combinées aux puissances de vagues par catégorie d'intensité A) pour l'ensemble de la période d'étude mars 2014 – mai 2017 et B) par années du rechargement

Au cours de la première année post-rechargement, c'est pendant les mois d'octobre 2014 à janvier 2015 que se sont produits le plus grand nombre d'événements combinant marée haute et vagues puissantes. Le nombre maximal d'observations mensuelles atteint 33 pendant le mois d'octobre 2014, dont 4 présentent des puissances ≥ 30 kW.m-1. Les vagues les plus puissantes ont été enregistrées au cours du mois de décembre 2014. Pendant la deuxième année du rechargement, le nombre d'observations mensuelles présentant des hauts niveaux d'eau ≥ 6,05 m a très nettement augmenté à partir d'août 2015, mais les puissances de houles associées sont restées faibles jusqu'octobre 2015. Les quatre mois suivants, de novembre 2015 à février 2016, se démarquent très nettement, la quasi-totalité des puissances de houles calculées supérieures à 20 kW.m-1 ayant été enregistrée au cours de ces quatre mois. Sept enregistrements de vagues puissantes ≥ 40 kW.m-1, dont cinq ≥ 50 kW.m-1 se sont produits lors d'un coup de vent les 29 et 30 novembre 2015. En février 2016, c'est la tempête Ruzica qui a engendré la formation de telles vagues.

Lors de la troisième année du rechargement de mars 2016 à mai 2017, les vagues survenues à marée haute sont dans l'ensemble moins puissantes que lors des deux premières années. C'est d'ailleurs au cours de cette année que la fréquence de puissances de vagues < 10 kW.m-1 la plus importante a été enregistrée avec 86 % (Tableau VI.5-B). Aucune vague lors de marée haute n'a d'ailleurs atteint une puissance supérieure à 40 kW.m-1.

Cette analyse met en évidence les périodes qui ont été potentiellement les plus érosives. Les hivers 2014-2015 et 2015-2016 se démarquent encore une fois clairement et leur impact ainsi que la réponse morphologique du rechargement de plage seront abordés dans la section 4 de ce chapitre. Mais avant cela, le rôle des vagues souvent évoqué mérite d'être détaillé plus précisément. Pour cela, les résultats de la campagne de mesures hydrodynamiques vont permettre d'apporter des éléments de compréhension du fonctionnement hydrodynamique du site.

3. Caractéristique hydrodynamique du site après rechargement

L'objectif de cette sous-partie est de comprendre quand et comment les différents forçages hydrodynamiques peuvent affecter le rechargement de plage au droit de la digue des Alliés. Pour cela une campagne de mesures hydrodynamiques a été effectuée en février 2016, soit deux ans après la mise en œuvre du rechargement. Pour la localisation des appareils, il conviendra de se référer à la Figure V.14 du Chapitre IV.

3.1. Conditions météorologiques et marégraphiques à Dunkerque du 10 au 17 février 2016

La campagne hydrodynamique a duré 7,5 jours, du 10 au 17 (mi-journée) février 2016. Des conditions météorologiques assez variées ont pu être enregistrées à Dunkerque. La moyenne des vitesses de vents à la côte au cours de cette campagne a été de 5,9 m/s. Des phases agitées et calmes se sont succédées au fil des jours (Figure VI.20-A). Le début de la campagne de mesures se caractérise par des vents moyens de secteur O, mais ces derniers faiblissent au cours de la journée du 10 février pour passer de 11 m/s à 4,7 m/s le 11 février. Du 12 au 13 février, les vitesses de vents sont plutôt variables mais ne dépassent pas les 9,3 m/s. La campagne est surtout marquée par un coup de vent du secteur NE les 14-15 février. Au cours de cet événement, une moyenne de vents à 8,6 m/s a pu être calculée avec un pic de vitesse à 12,9 m/s le 15 février à 03 :00. Les vagues associées à ces vents de NE sont donc venues frapper frontalement le rechargement de plage qui est orienté ONO-ESE. La fin de la campagne de mesure (à partir du 16 février) est associée à des vents faibles. Les vents moyens ≥ 8 m/s représentent une part significative des enregistrements avec 27,91 % (dont 65 % ce sont produits pendant le coup de vent des 14 et 15 février).

La période du 10 au 17 février couvre 14 cycles de marée (Figure VI.20-B). Les coefficients de marée diminuent tout au long de la campagne pour passer d'un marnage de vives-eaux de 108 le 11/02/2016 à un marnage de mortes-eaux de 50 le 17/02/2016. La période d'agitation moyenne en début de campagne (le 10 et en début de journée le 11 février) coïncide donc avec de forts coefficients. Les deux phases de périodes calmes, du 11 au 13 et du 16 au 17, sont associées à des marées de vives-eaux (coefficient 108 à 94) et mortes-eaux (coefficient 59 à 50) respectivement. La période agitée des 14 et 15 février a eu lieu au cours de coefficients de marées passant de 88 à 66.

Plusieurs surcotes relativement conséquentes ont été observées (Figure VI.20-C). Au début de la campagne de mesures notamment, pendant la période assez agitée avec des vents moyens de secteur O le 10 février, des surcotes jusqu'à 0,75 m ont été enregistrées. Ces surcotes ont engendré de hauts niveaux d'eau avec un maximum à 6,69 m CM, contre les 6,23 m CM prédits, soit une surcote de 0,46m. Les autres enregistrements de surcotes assez importantes ont eu lieu pendant le coup de vent de secteur NE les 14-15 février, avec une valeur maximale de 0,59 m pendant une basse mer.

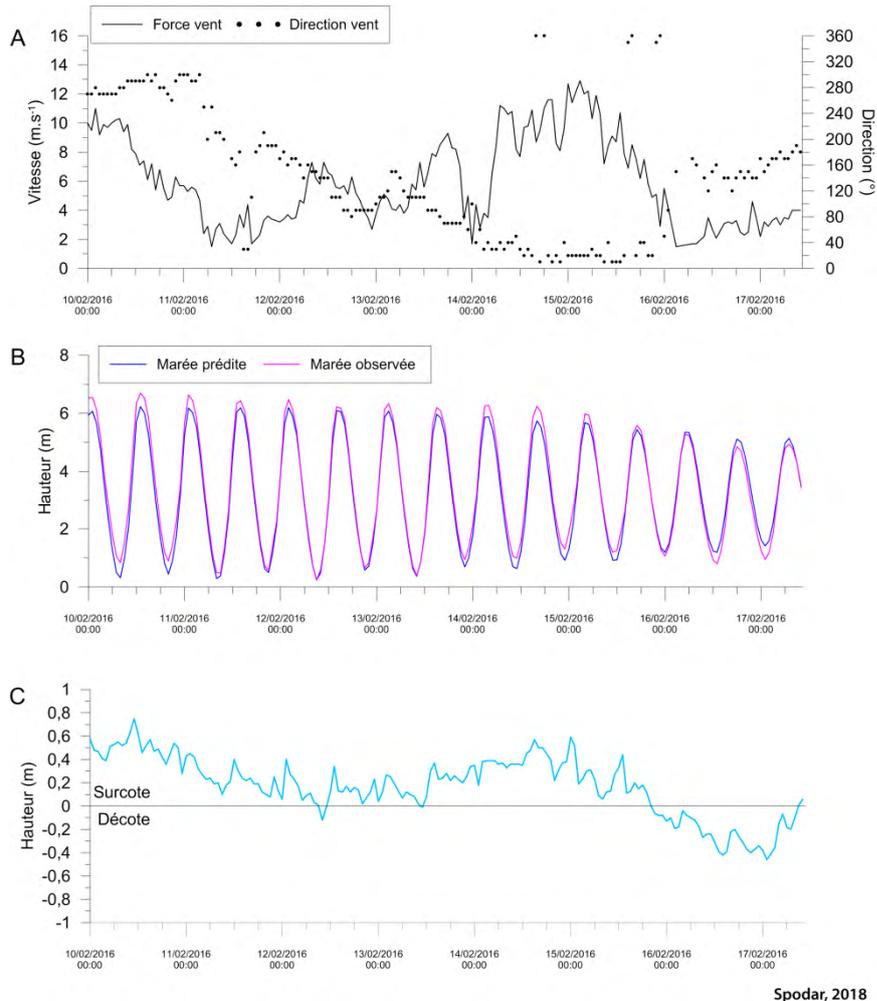


Figure VI.20 Caractéristiques météorologiques et marégraphiques enregistrées au cours de la campagne hydrodynamique à Dunkerque du 10 au 17 février 2017 avec A) les vitesses et directions de vent enregistrées à Dunkerque, B) les niveaux d'eau théoriques et observés et C) les surcotes et décotes associées

3.2. Conditions hydrodynamiques au large et à la côte

3.2.1. La houle

Les variations de hauteurs de houles coïncident avec la variabilité des conditions météorologiques précédemment décrites (Figure VI.21 A-B). Plusieurs périodes peuvent être mises en évidence. Du 10 au 11 (à 10:00), des hauteurs significatives de vagues modérées ($H_s < 0,9$ m) ont pu être enregistrées que ce soit au large ou dans les petits-fonds (Tableau VI.6). Les enregistrements de houles réalisés par la station Sandettie permettent en effet d'avoir un aperçu de la situation au large. Sur le bas de plage, les vagues se caractérisent par des hauteurs modestes ($H_s < 0,5$ m). Cette agitation modérée coïncide avec les conditions météorologiques où les vents moyens de secteur ouest en début de journée le 10 février ont perdu en puissance jusqu'à la mi-journée du 11.

Intervalle de temps	Hs large (m)		Hs petits-fonds (m)		Hs estran ouest (m)		Hs estran est (m)	
du 10 au 11 février (10 :00)	0,82	1,60	0,53	1,00	0,28	0,52	0,23	0,52
du 11 (11 :00) au 13 février	0,48	1,20	0,27	0,72	0,17	0,47	0,06	0,26
du 14 au 15 février	1,87	3,30	0,99	1,92	0,58	1,78	0,57	1,50
du 16 au 17 février	0,43	0,90	0,27	0,66	0,05	0,21	0,10	0,33

Tableau VI.6 Moyennes des hauteurs significatives des vagues au large et à la côte selon différentes périodes de la campagne hydrodynamique (avec en noir les hauteurs moyennes et en rouge les hauteurs maximales)

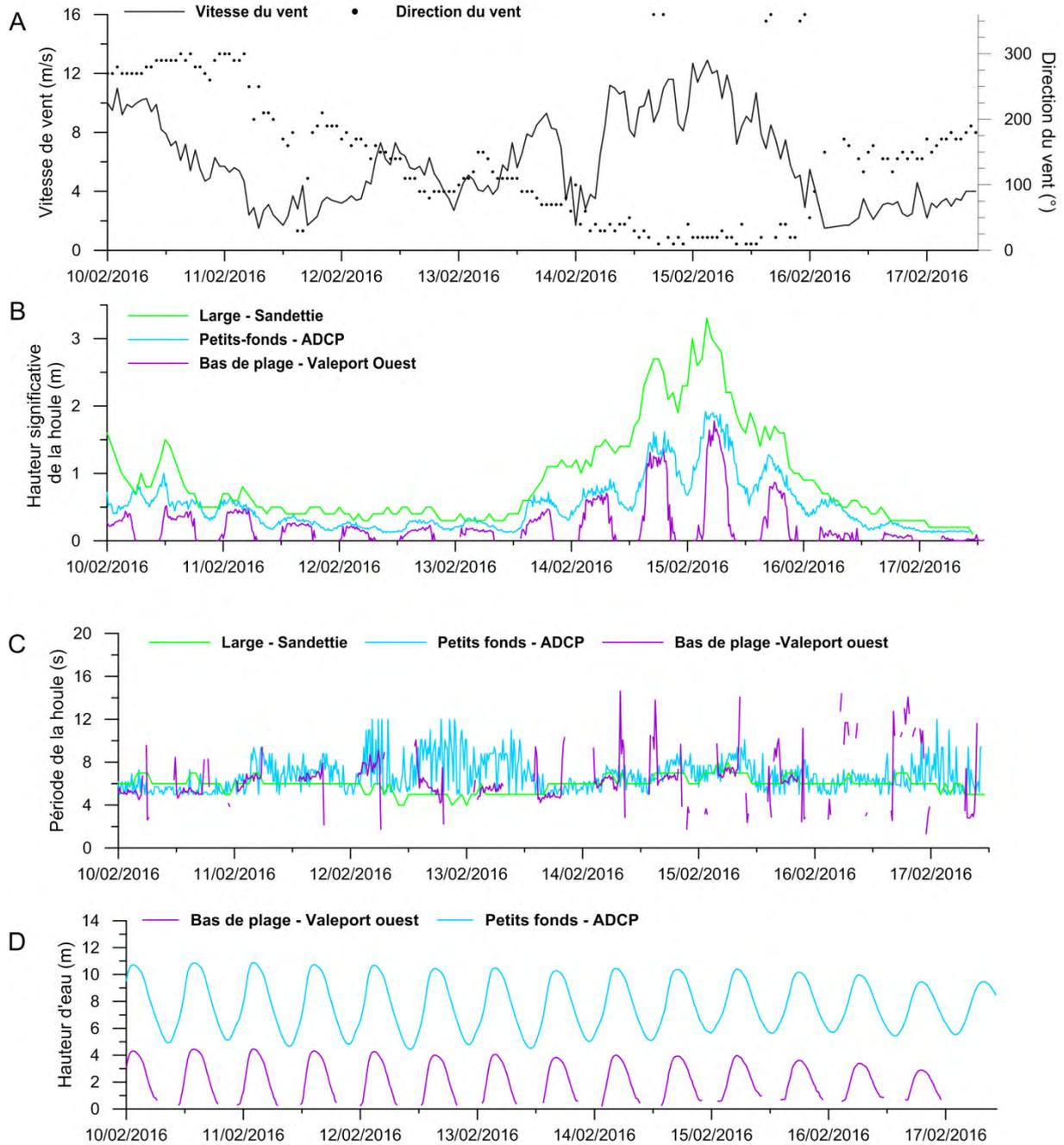
Entre le 11 et le 13 février, les hauteurs de vagues peu élevées du large à la côte coïncident avec des vents relativement faibles. C'est lors du coup de vent de secteur NE des 14 et 15 février que les vagues les plus fortes ont été enregistrées pour atteindre une moyenne de 1,87 m au large, 0,99 m dans les petits-fonds et dépasser 0,5 m en bas de plage. Les pics de hauteurs ont été enregistrés au cours de cet événement et ont atteint 3,3 m pour le large, 1,92 m dans les petits-fonds et 1,72 m et 1,50 m sur le bas de plage dans les secteurs ouest et est respectivement. Les deux derniers jours de la campagne de mesures qui ont succédé au coup de vent ont été les plus calmes, avec des vents de sud/sud-est inférieurs à 4m/s, ce qui s'est traduit par les moyennes de hauteurs significatives de vagues les plus faibles.

Bien qu'il existe un lien évident entre les conditions météorologiques et les hauteurs de vagues enregistrées à la côte, les hauteurs de vagues sont également dépendantes du niveau d'eau et par conséquent de la marée. Ceci est visible sur la Figure VI.21 B-D où les enregistrements de l'ADCP et du courantomètre Valeport Ouest révèlent que l'augmentation des hauteurs de vagues coïncide avec celle du niveau d'eau. Ainsi les plus hautes vagues ont été enregistrées à marée haute. Il convient donc de faire remarquer qu'au pic d'intensité du coup de vent le 15 février, des vagues de 1,70 m au maximum enregistrées en bas de plage lors de la marée haute sont venues frapper le rechargement.

En comparant les mesures de hauteurs significatives de vagues entre la bouée Sandettie et les appareils déployés sur le site, il est possible de constater une diminution des hauteurs de vagues entre le large et la côte, ainsi qu'entre les petits-fonds et le bas de plage (Figure VI.21-B). Cette diminution des hauteurs de vagues est valable quelle que soit la période d'agitation comme l'illustre le Tableau VI.6. En effet, que ce soit pendant le coup de vent ou lors de périodes plus calmes, les hauteurs de vagues au large sont systématiquement supérieures à celles dans les petits-fonds, elles-mêmes toujours supérieures à celles du bas de plage. Il convient également de remarquer que lors de périodes de fortes agitations (14-15 février) les hauteurs de vagues sont beaucoup plus atténuées entre le large et la côte que lors de périodes plus calmes (11 au 13 février).

Globalement les vagues au large sont caractérisées par une Hs moyenne de 0,91 m tandis que cette moyenne atteint 0,51 m seulement pour les petits-fonds ainsi que 0,28 m et 0,25 m sur le bas de plage dans les secteurs ouest et est du rechargement respectivement. Les valeurs maximales de vagues précédemment mentionnées illustrent également cette diminution de hauteurs de vagues. Cette diminution de la hauteur des vagues est en grande partie due à la dissipation de l'énergie des vagues sur les bancs sableux subtidaux présents dans la région entre le large et la côte. La faible

penne dans les petits-fonds engendre également la dissipation de l'énergie des vagues entre les petits fonds et le bas de plage.



Spodar, 2018

Figure VI.21 Conditions météorologiques à Dunkerque (A), hauteurs significatives des vagues au large et à la côte (B), périodes pic de la houle au large et à la côte (C) et niveau d'eau à la côte (D). Voir Chapitre IV Figure V.14 pour la localisation des appareils

Une légère différence de hauteurs de vagues est notable entre les deux appareils du bas de plage (Tableau VI.6). Les hauteurs dans la partie est du rechargement sont légèrement plus basses de manière générale que celles dans le secteur ouest comme le montrent les moyennes sur l'ensemble de la campagne de mesures (0,28 m pour le secteur ouest et 0,25 m pour le secteur est) ainsi que les moyennes en fonction des intervalles de temps (Tableau VI.6).

La Figure VI.22 illustre visuellement ces différences. Du 10 au 16 février, il est ainsi possible de constater que c'est au cours des marées hautes que les vagues dans le secteur ouest sont plus élevées. Lors de la marée montante et descendante, ce sont au contraire les vagues enregistrées par le Valeport Est qui sont les plus hautes. La tendance change en fin de campagne, avec des vagues plus hautes dans le secteur est (premier cycle tidal du 16 février) ou de hauteur égale à celles du secteur ouest (deux derniers cycles tidaux de la campagne).

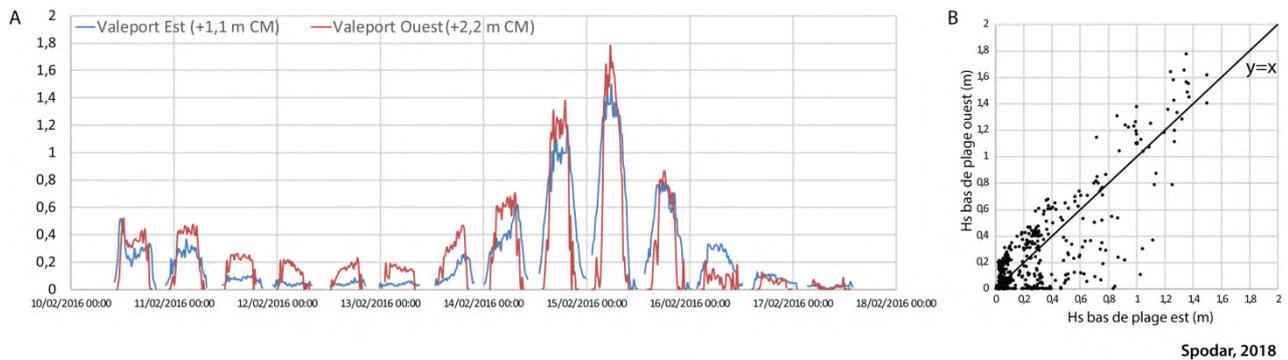


Figure VI.22 Série temporelle des hauteurs significatives de vagues en bas de plage dans le secteur ouest (Valeport Ouest) et est (Valeport Est) (A) et comparaisons des hauteurs de vagues entre les deux secteurs (B)

L'explication de ce phénomène est vraisemblablement liée à l'altitude à laquelle ont été déployés les appareils sur le bas de plage. Le courantomètre Valeport dans le secteur est ayant été placé à +1,1 m CM alors que l'appareil du secteur ouest avait été déployé à +2,2 m CM, les appareils ne se trouvaient pas sous la même hauteur de tranche d'eau au même moment du cycle de marée.

3.2.2. Les courants

L'analyse des courants moyens enregistrés à 0,2 m au-dessus du fond montre clairement la dominance de deux directions parallèles à la côte sur l'ensemble de la campagne de mesures, que ce soit dans les petits-fonds ou dans la zone intertidale (Figure VI.23-A). Ces deux directions reflètent essentiellement la direction des courants de marée. Lors de la marée montante, le courant est dirigé vers l'est ($\sim 85^\circ$ - 95°), puis vers l'ouest ($\sim 280^\circ$) au cours de la marée descendante. Les courants de flot et de jusant sont entrecoupés par la renverse des courants caractérisée par des vitesses très faibles, bien visibles sur les enregistrements de l'ADCP où l'ensemble des phases du cycle tidal a pu être enregistré (Figure VI.24-A). En effet, les courantomètres Valeport déployés en bas de plage se retrouvent hors d'eau lors des basses mers. Par conséquent ce manque de données ne permet pas d'avoir un aperçu du comportement des courants lors de ces moments du cycle de marée.

Sur l'ensemble du site, les courants les plus intenses ont été enregistrés pendant le flot, comme l'illustrent les roses des courants (Figure VI.23-A) ou encore les séries temporelles (Figure VI.24-A). Dans les petits-fonds, la vitesse du courant de flot peut atteindre plus de 0,6 m/s tandis qu'elle ne dépasse pas les 0,3 m/s au cours du jusant. Sur le bas de plage, c'est le flot qui domine

également en termes d'intensité avec des vitesses qui peuvent atteindre 0,43 m/s, tandis que des vitesses du jusant ne dépassent pas les 0,1 m/s. Ce point illustre un autre phénomène notable concernant la différence de vitesses le long du profil côtier. En effet, les vitesses de courants moyens sont beaucoup plus élevées dans les petits-fonds que dans la zone intertidale. La moyenne des enregistrements de courants au niveau de l'ADCP est de 0,53 m/s tandis qu'elle n'est que de 0,12 m/s que ce soit dans la partie ouest ou est du bas de plage.

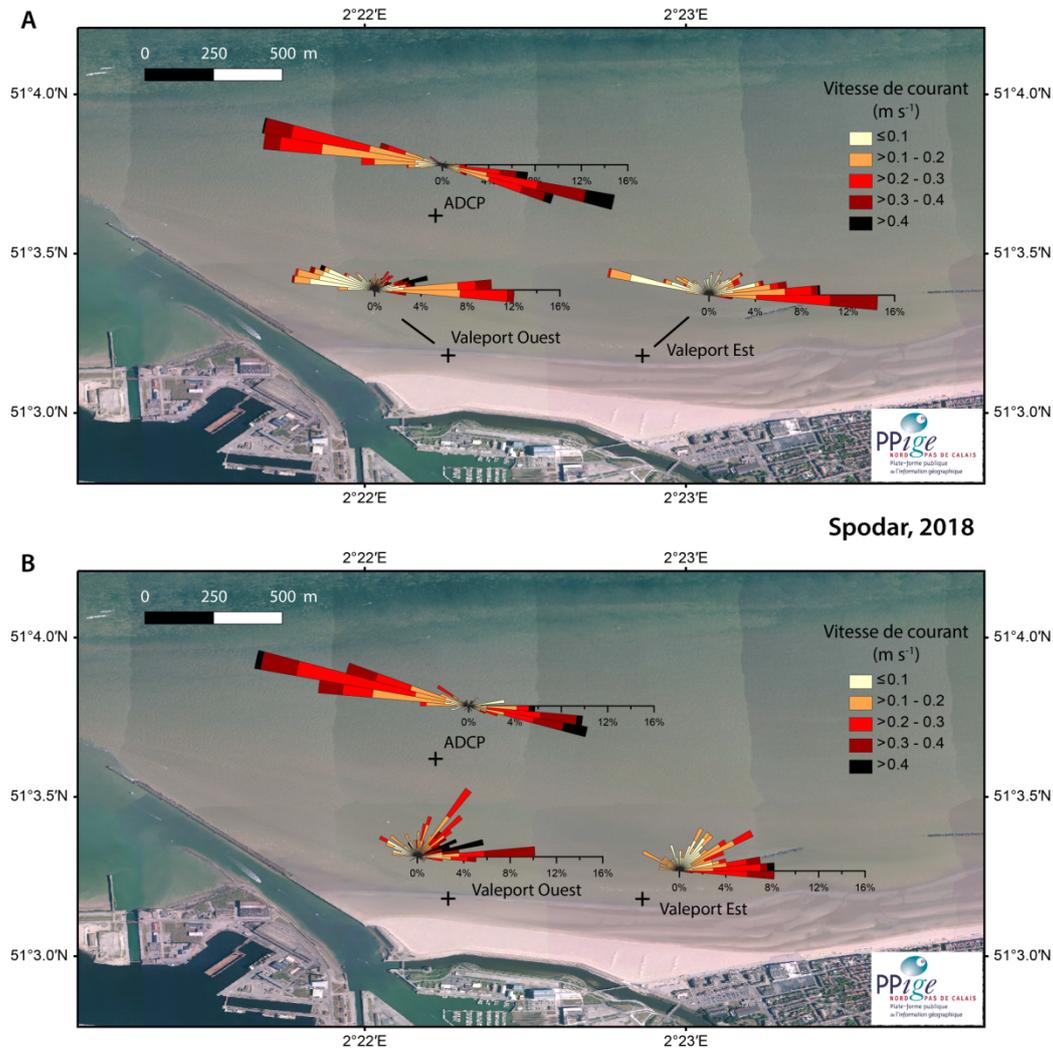
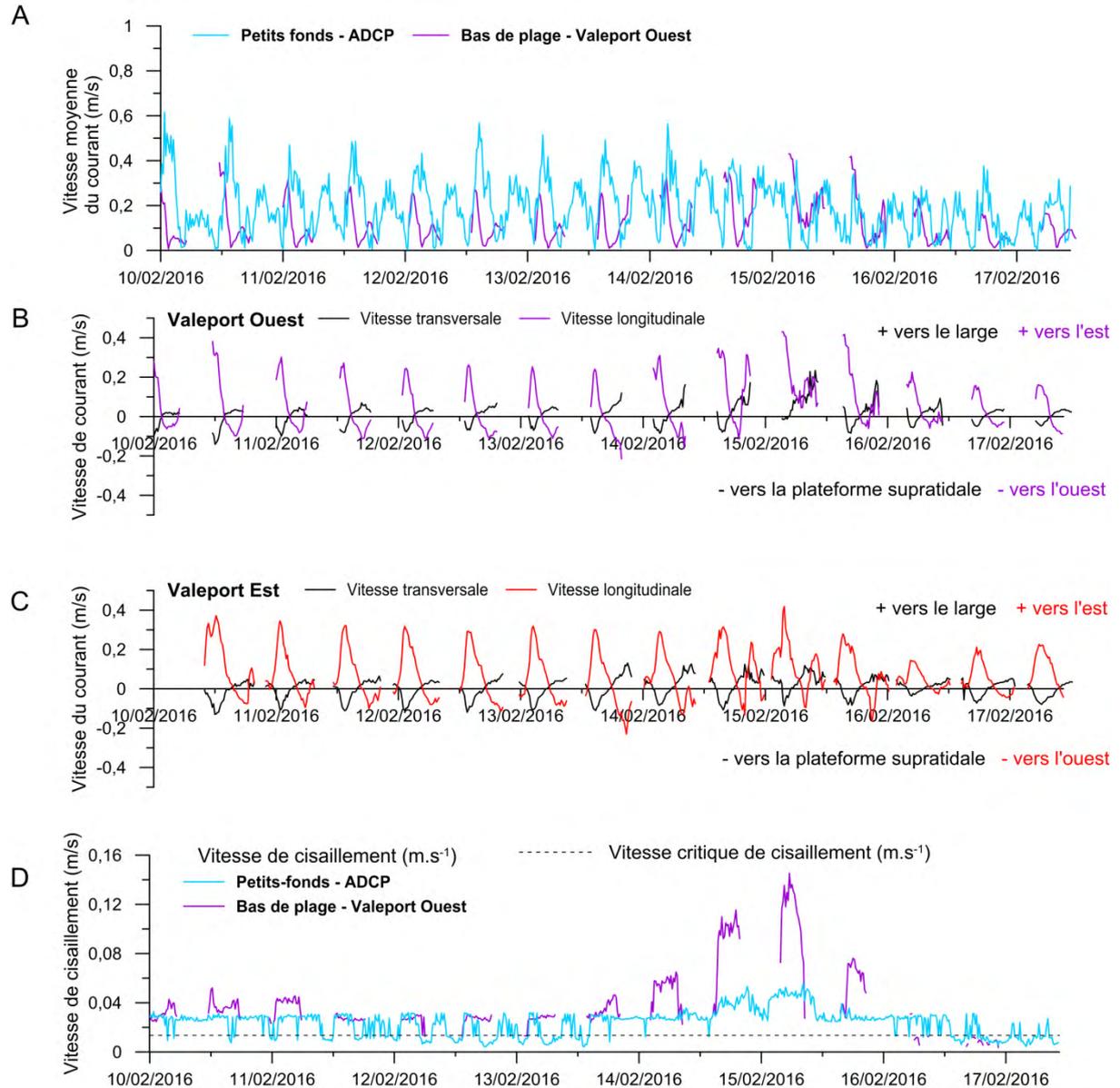


Figure VI.23 Rose des courants moyens enregistrés à 0,2 m au-dessus du fond pendant A) toute la campagne de mesure (10 au 17 février 2016) et B) lors du coup de vent de secteur NE des 14 et 15 février.

Une autre différence peut être faite entre les petits fonds et l'estran concernant les forçages impactant ces deux secteurs. En effet, les fluctuations semi-diurnes très nettes des vitesses de courants dans les petits fonds laissent supposer une influence majeure de la marée (Figure VI.24-A). Les vitesses de courants enregistrées par l'ADCP montrent de plus une bonne corrélation avec l'amplitude de la marée. Le début de la campagne est associé à des marées de vives eaux et c'est à ce moment que les vitesses de courants sont les plus importantes, tandis qu'en fin de campagne avec des marées de mortes-eaux, les vitesses sont beaucoup plus faibles. Pendant des périodes agitées comme lors du coup de vent de secteur NE les 14 et 15 février, les courants moyens dans les petits fonds conservent cette dissymétrie avec néanmoins une différence de vitesse entre le flot et le jusant

moins marquée pour deux cycles tidaux (Figure VI.24-A). Aucun changement d'orientation de courants n'est néanmoins constaté (Figure VI.23-B).



Spodar, 2018

Figure VI.24 Synthèse des paramètres courantologiques mesurés pendant la campagne du 10 au 17 février 2016 : courants moyens dans les petits fonds et le bas de plage(A), courants longitudinaux et transversaux en bas de plage pour le Valeport ouest (B) et le Valeport est (C) et vitesses de cisaillements dans les petits fonds (ADCP) et le bas de l'estran (Valeport Ouest) (D)

Sur l'estran, la dissymétrie des courants de marée est également observable lors de périodes calmes (Figure VI.24-A). Comme dans les petits fonds, les vitesses des courants moyens en bas de plage sont corrélées au marnage, avec des vitesses qui diminuent entre le début et la fin de la campagne. En lien avec l'amplitude de la marée, dans le secteur ouest les vitesses du courant moyen atteignent 0,39 m/s le 11 février lors des plus grands coefficients (108) pour passer à 0,17 m/s au maximum le 17 février, journée caractérisée par un plus faible coefficient de marée (50) (Figure VI.24-A). Dans le secteur est du rechargement, la même constatation peut être faite, avec la même

valeur maximale le 11 février, mais une vitesse légèrement plus importante le 17 février lors des mortes eaux avec 0,23 m/s.

Cependant, lors du coup de vent du 14-15 février, cette circulation tidale est perturbée avec des vitesses de courant moyen qui ne correspondent plus au schéma de circulation décrit précédemment. C'est d'ailleurs pendant cet épisode venteux que les vitesses de courant maximales ont été atteintes avec 0,43 m/s et non en début de campagne lors des marées de vives-eaux, témoignant de la perturbation et de l'influence du vent accompagné de vagues de plus forte énergie. En plus d'une intensification des vitesses, les directions des courants changent également d'orientation au cours de cet épisode venteux comme le montrent les roses des courants mesurés par les appareils en bas de plage (Figure VI.23-B). Les mesures des deux courantomètres situés en bas de plage permettent de constater que pendant cet événement, les courants moyens étaient principalement dirigés vers l'est et vers le large et non plus seulement parallèlement à la côte.

Sur la Figure VI.24-B, la série temporelle des courants transversaux et longitudinaux enregistrés par le courantomètre Valeport dans la partie ouest souligne les variations d'orientation par rapport au schéma habituel par temps calme. Du 10 au 13 février ou du 16 au 17 février, il est en effet possible de constater une alternance régulière des courants vers le large et vers l'ouest lors du jusant, et vers le haut de plage et l'est lors du flot. A noter néanmoins que les courants sur la composante transversale sont très faibles de l'ordre de 0,14 m/s au maximum, orientés vers le haut de plage par temps calme. Pendant le coup de vent de secteur NE, des vitesses de courants transversaux plus élevées ont été enregistrées, avec un pic à 0,23 m/s dirigé vers le large. Une dominance de courants vers le large se distingue d'ailleurs assez nettement (Figure VI.24-B). Lors du 15 février, l'ensemble des courants sont d'ailleurs dirigés vers le large et vers l'est. Il est probable que ce renforcement des courants vers le large soit dû au forçage météorologique et à l'influence des plus fortes vagues. Il a été démontré dans plusieurs études dans la région (Reichmüth & Anthony, 2007; Sedrati & Anthony, 2007; Cartier & Héquette, 2015) que ces deux facteurs pouvaient avoir un impact sur les faibles tranches d'eau du bas de plage. Les hautes vagues qui se propagent sur le rechargement entraîneraient alors un apport d'eau vers la côte, compensé par des courants de retour (*bed return flow*).

3.2.3. Seuil de mise en mouvement du sédiment

Une analyse de la vitesse des courants nécessaires à la mise en mouvement du sédiment a été réalisée afin de déterminer les périodes pendant lesquelles du transport sédimentaire a pu se produire, et induire des variations morphologiques.

Pour cela, les vitesses de cisaillement au niveau du fond engendrées par l'action combinée de la houle et des courants ont été analysées et comparées aux vitesses critiques de cisaillement pour la mise en mouvement du sédiment. La vitesse critique de cisaillement est de 0,013 m/s que ce soit dans les petits fonds au niveau de l'ADCP ou sur le bas de plage au niveau du Valeport Ouest, en raison d'une granulométrie similaire ($D_{50} = 0,24$ à $0,25$ mm). Encore une fois, le Valeport Ouest ayant été placé à + 2,2 m CM n'a pas pu enregistrer de données lors des marées basses puisqu'il se retrouve hors d'eau à ces moments de la marée. La Figure VI.24-D montre que les vitesses de cisaillement sur le bas de plage sont systématiquement au-dessus de la contrainte de cisaillement critique du 10 au 15 février. Dès que le bas de plage est submergé au cours de ces six jours, le sédiment est donc mis en

mouvement. Plusieurs phases d'intensités différentes peuvent néanmoins être mises en évidence, corrélées à l'impact plus ou moins important des différents forçages.

Au cours des trois premiers cycles de marées, qui se caractérisent par de forts coefficients conjugués à des houles modérées (Tableau VI.6), les vitesses de cisaillement sont légèrement supérieures à la vitesse critique du 11 au 13 février alors que la marée était le seul forçage. Les 14 et 15 février, l'impact prépondérant de la houle est cette fois clairement mis en évidence avec les vitesses de cisaillement les plus élevées de toute la campagne de mesure avec un pic à 0,15 m/s sur le bas de plage (Figure 22D). Sur l'estran, une importante remobilisation du sédiment s'est vraisemblablement produite due à l'action des mouvements oscillatoires des vagues plus intenses, mais aussi en raison du déferlement des vagues. Cette forte augmentation probable du transport sédimentaire a cependant été limitée dans le temps, car à partir du 16 février les vitesses de cisaillement en bas de plage n'étaient plus suffisantes pour entraîner la mise en mouvement des sédiments en raison d'une forte diminution de la hauteur de la houle (Figure 19B) et des vitesses de courants (Figure 22).

Ces mesures montrent que sous l'influence de la houle et des courants de marée, les sédiments mis en mouvement dans la zone intertidale et dans les petits fonds ont tendance à être transportés parallèlement au rivage, avec un transport net vers l'est, lors de conditions modérées d'agitation. Nos observations lors d'un coup de vent de NE montrent en outre que sous l'influence de houles plus fortes avec une direction incidente quasi-perpendiculaire à la côte, le sédiment est non seulement transporté vers l'est, vraisemblablement en plus grande quantité, mais aussi vers le large en raison de la présence de courants de retour.

L'analyse des vitesses de cisaillement au niveau de l'ADCP dans les petits fonds démontre qu'une mise en mouvement des sédiments a lieu quasiment continuellement du 10 au 11 février (à la mi-journée) sous l'effet des courants de marée, avec une vitesse de cisaillement ne dépassant néanmoins pas un palier de 0,03 m/s. Au cours de brefs moments une absence de mise en mouvement est observable correspondant aux renverses de courant. Du 11 au 13, la même tendance est observable avec néanmoins des périodes plus longues pendant lesquelles les particules ne peuvent pas être mises en mouvement, faute d'une vitesse de cisaillement suffisante. C'est encore une fois au cours du coup de vent que les vitesses de cisaillement les plus élevées sont atteintes, vraisemblablement responsables d'un plus fort transport au cours de cet événement. Les vitesses atteignent 0,06 m/s au maximum, ce qui est nettement supérieur à la vitesse minimale requise pour la mise en mouvement des particules, mais inférieur aux vitesses calculées sur le bas de l'estran. Dans les petits fonds, l'action limitée des vagues, que ce soit par les mouvements oscillatoires réduits et l'absence de déferlement, résulte en des contraintes de cisaillement plus faibles. Pendant la période suivante de temps calme avec des marées de mortes-eaux, la mise en mouvement des particules se produit beaucoup moins fréquemment. Pendant ces périodes de temps moins agitées, le transport sédimentaire dans les petits fonds est essentiellement dirigé vers l'est en raison de la dissymétrie des courants de marée.

3.3. Bilan du comportement hydro-sédimentaire au droit du rechargement

Par temps calme avec de faibles hauteurs de vagues, la marée est le forçage principal sur le site, que ce soit dans les petits-fonds ou l'estran. Les deux directions de courants engendrés par la marée dirigées vers l'est lors du flot et l'ouest lors du jusant sont bien marquées. La composante longitudinale des courants domine avec une asymétrie vers l'est que ce soit sur l'estran ou les petits fonds. L'impact de la marée s'est manifesté également avec les vitesses de courants corrélés à l'amplitude du marnage. Lors de coefficients de vives-eaux, une mise en mouvement des sédiments se produit sur l'estran dès sa submersion tandis que dans les petits-fonds, on observe une alternance de phases de mise en suspension et de contraintes de cisaillement trop faibles pour provoquer le transport qui résulte en un transport net vers l'est. Lors de marées de mortes-eaux en revanche, une absence de remobilisation du sédiment se produit sur l'estran, tandis que le transport semble très limité dans les petits fonds.

L'expérimentation de terrain a permis de mettre en évidence le comportement des courants au droit du rechargement lors d'un coup de vent de secteur NE. La circulation « normale » par temps calme au droit du site de rechargement est modifiée lors de conditions de houle plus forte et ce particulièrement sur l'estran. Le coup de vent et les plus fortes vagues associées ont engendré une nette augmentation des vitesses de courants sur l'estran ainsi que leur changement d'orientation. L'intensité des courants transversaux relativement faibles par temps calme a augmenté au cours de cet épisode venteux. Sur le bas de plage, les courants vers l'est et le large se sont en effet renforcés. Il a été possible de constater que des cycles de marée entiers ont été perturbés avec des courants exclusivement dirigés vers le large. Ces courants vers le large correspondant probablement à des courants de retours associés à un apport d'eau à la côte par les vagues incidentes. En outre, l'action intense des vagues au cours de l'événement a vraisemblablement entraîné une forte remise en suspension des sédiments sur l'estran et donc un transport sédimentaire plus important dirigé vers le large et l'est. Le forçage des vagues ne s'est pas fait autant ressentir dans les petits fonds. A noter qu'à l'avant côte, la mise en suspension des sédiments a néanmoins été un peu plus importante au cours du coup de vent. L'orientation des courants n'a en revanche pas changé dans la zone subtidale. Il est donc possible de supposer que les sédiments du bas de plage exportés vers le large sont repris par les courants dans les petits fonds pour être transportés vers l'est.

4. Evolution de la partie supra et intertidale du site

Pour comprendre l'évolution du site, une analyse de la topographie et de la granulométrie de surface a été effectuée durant les trois premières années qui ont suivi la mise en œuvre du rechargement, de mars 2014 à mai 2017. L'analyse va être menée de manière chronologique par périodes d'un an depuis l'opération de rechargement de plage.

4.1. Première année du rechargement : Mars 2014 – Février 2015

4.1.1. Réponse morphologique du profil de plage

Peu de profils topographiques sont disponibles pour cette première année. En effet, ce travail doctoral n'a débuté qu'en novembre 2014, soit sept mois et demi après les travaux de rechargement. Dans le but d'avoir un aperçu de l'évolution du site depuis la fin des travaux de rechargement, des profils ont été extraits de MNT réalisés le 21 mars 2014 et le 1^{er} octobre 2014. L'analyse des

variations morphologiques des profils (Figure VI.25) a été couplée à celle des variations volumétriques nettes et totales calculées sur des portions communes de ces profils (Figure VI.26). Pour comprendre l'origine de l'évolution du site, il conviendra également de s'appuyer sur la Figure VI.28 (p. 148) qui compile certaines analyses des conditions météo-marines.

Il est possible de constater une variabilité dans l'évolution morphologique des profils de plage (Figure VI.25). De la digue vers le large, des secteurs plus ou moins stables peuvent en effet être mis en évidence. Du P1 au P8, il est possible de constater une grande stabilité de la plateforme supratidale. Les seules variations qui peuvent être mentionnées concernent la très légère érosion due à la déflation éolienne ainsi que les zones d'engraissement à proximité de la digue (du P4 au P7) résultant du piégeage des envols éoliens dans les filets brise-vents. Il est également possible de noter le recul du rebord de la plateforme le long du profil P1.

La zone intertidale peut être découpée en deux zones bien distinctes étant donné les variations morphologiques qui peuvent être observées. En effet, la portion d'estran comprise entre le rebord de la plateforme et un niveau situé entre celui des BMME et des BMVE présente une pente assez prononcée (de l'ordre de 2,1% le long du P7 à 3,1% sur le P1) et d'importantes variations morphologiques sur l'ensemble des profils (Figure VI.25). La seconde portion de l'estran est délimitée par une nette rupture de pente qui, sur les neufs profils, se situe à environ 0,50 m sous le niveau des BMME. Au-delà de ce niveau et jusqu'au niveau des BMVE, l'absence de variations morphologiques est notable et la pente de l'estran est beaucoup plus faible. En février 2015, cette pente oscille entre 0,36 % (secteur ouest) à 0,50 % (secteur est). Sur le terrain, la transition est visuellement bien identifiable, la partie supérieure de l'estran se caractérisant par une surface ridée alors que qu'au niveau des BMME, l'estran est très lisse sans figures sédimentaires. Pour simplifier l'analyse, il conviendra d'appeler cette rupture de pente **BMME-0,5m**. L'analyse des profils va se concentrer sur la première portion de l'estran comprise entre le rebord de la plateforme et la rupture de pente correspondant au niveau BMME-0,5m.

Bien que la distance entre les profils P1 et P9 ne soit que d'environ 1,2 km, on observe une variabilité spatiale marquée sur cette longueur de plage. Le profil P1 le plus à l'ouest est le seul à avoir subi une érosion se traduisant par un abaissement constant de l'estran entre mars 2014 et février 2015 (Figure VI.25). La diminution altitudinale du haut de plage a d'ailleurs engendré un recul du rebord de la plateforme supratidale de l'ordre d'une dizaine de mètres. Cette érosion s'exprime quantitativement par des variations volumétriques nettes de $-56 \text{ m}^3/\text{ml}$ entre le 21/03/2014 et le 01/10/2014 et atteint $-167 \text{ m}^3/\text{ml}$ entre le 01/10/2014 et le 20/02/2015 (Figure VI.26-A). D'un point de vue de son évolution morphologique, le profil P2 marque une certaine transition entre les profils 1 et 3. L'érosion constatée au-dessus du PMME est compensée par une accumulation au milieu de l'estran entre le PMME et le BMME. Un gain de $+22 \text{ m}^3/\text{ml}$ a pu être calculé entre le 21/03/2014 et le 01/10/2014 (Figure VI.26-A), mais les mouvements sédimentaires se sont surtout traduits par des variations volumétriques totales qui ont atteint $78 \text{ m}^3/\text{ml}$ (Figure VI.26-B). L'évolution de ce profil change entre le 01/10/2014 et le 20/02/2015, avec une érosion générale de tout l'estran de l'ordre de $-81 \text{ m}^3/\text{ml}$.

Plus à l'est, une réorganisation sédimentaire semble s'initier au cours de cette première année. Cette tendance est observable du P3 au P7, où un transfert du stock sableux semble se produire de la partie supérieure de l'estran vers le milieu et le bas de plage (Figure VI.25). Dans le détail, l'évolution des profils présente néanmoins des particularités. L'érosion de la partie supérieure de l'estran est en effet plus marquée sur les profils P3 à P6, tandis qu'elle s'atténue sur le profil P7.

Sur ce même profil, l'accrétion est plus forte dans la partie inférieure de l'estran que pour les quatre autres (P3 à P6). A partir du profil P6, il est possible de constater que les variations volumétriques nettes sont positives sur les deux périodes de suivi. Plus on approche de la partie est du secteur d'étude, plus les volumes positifs sont importants. Sur les profils P8 et P9 les plus à l'est, une élévation du niveau de la plage s'est produite (Figure VI.25).

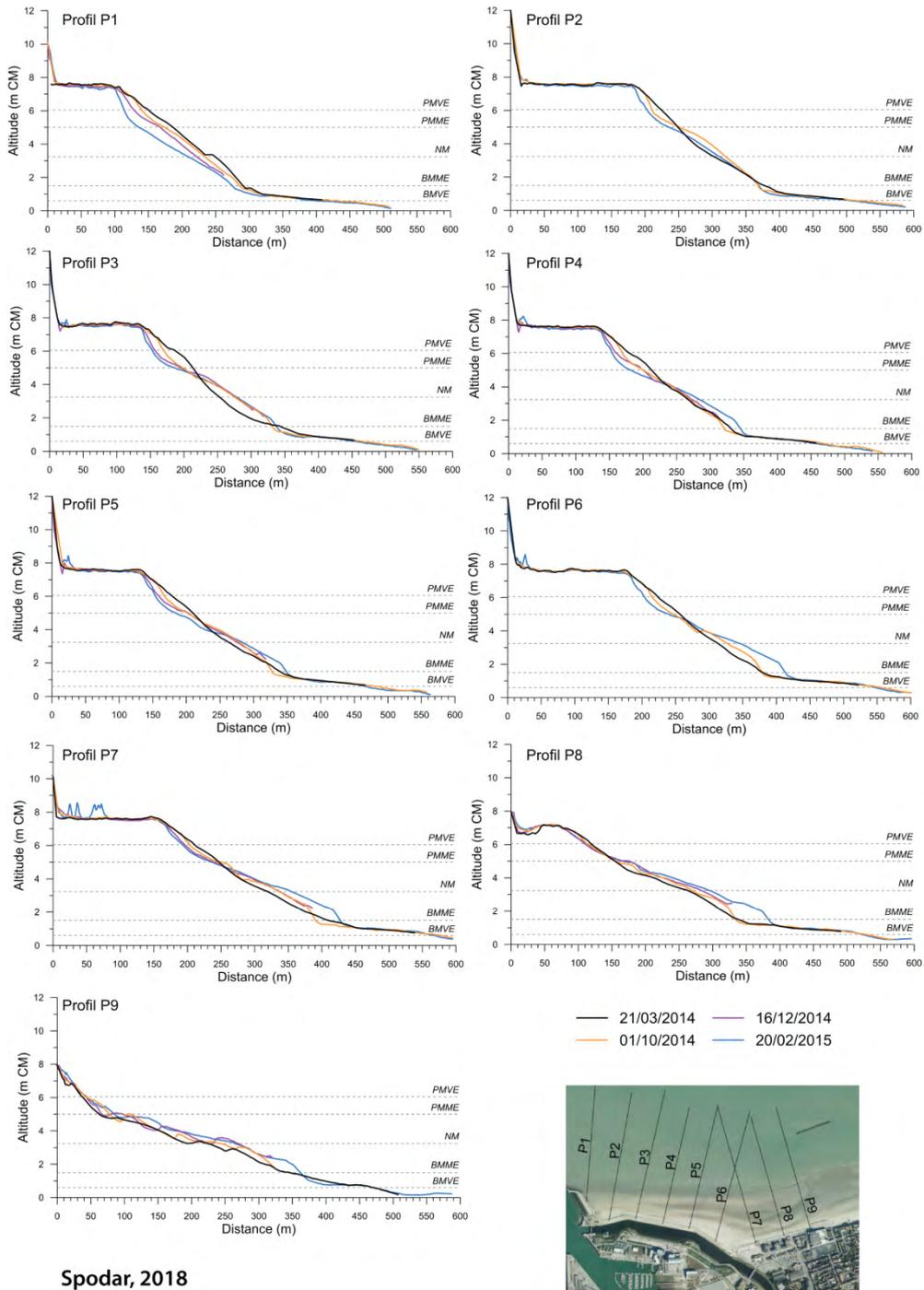


Figure VI.25 Evolution des profils transversaux de la partie supra et intertidale au cours de la première année du rechargement de plage (mars 2014-février 2015)

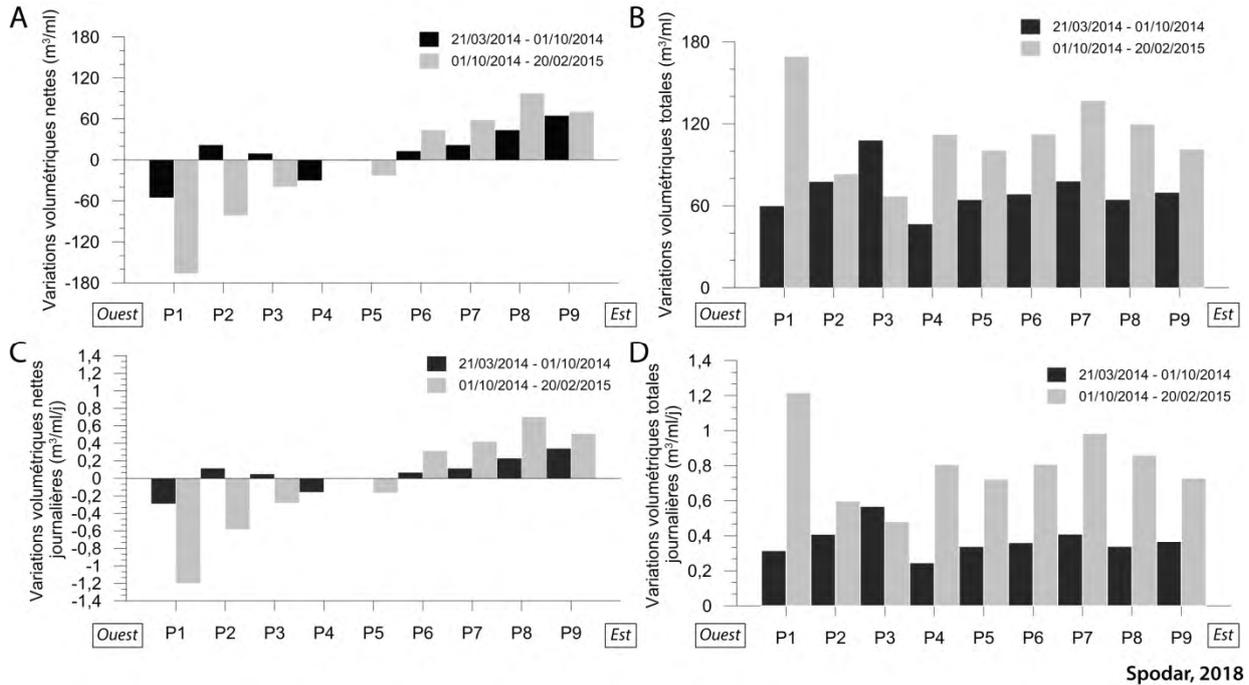


Figure VI.26 Variations volumétriques nettes (A) et totales (B) par profils et standardisation par le nombre de jours entre deux périodes (C et D) au cours de la première année du rechargement de plage

Cette réorganisation sédimentaire sur le site entraîne une modification de la pente de plage. Le calcul a été effectué sur la partie de l'estran comprise entre les niveaux du PHMA et des BMME-0,5m, qui est la portion du profil présentant le plus de variations morphologiques (Figure VI.27). La pente d'équilibre a été estimée selon DHI (2012) à 1,42 %. Avec l'action des houles et des courants et après une redistribution sédimentaire, les profils de plage devraient donc théoriquement tendre vers cette pente d'équilibre.

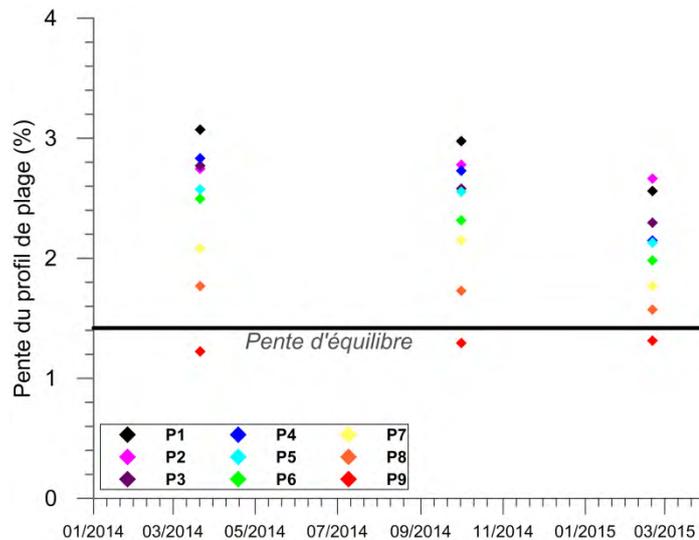


Figure VI.27 Evolution de la pente de la partie active de l'estran le long des neuf profils entre mars 2014 et février 2015

En mars 2014, les profils les plus raides sont localisés dans le secteur ouest puis une diminution de la pente vers l'est est mesurée. En mars 2014, la pente varie de 3,1 % à l'ouest à 1,8 % à l'est sur le P8 et 1,2 % sur le P9. Bien que peu de points soient disponibles pour cette première année de suivi, une tendance à l'adoucissement progressif de la pente de l'estran se dessine entre mars 2014 et février 2015 sur les profils P1 à P8. Ce phénomène s'explique par l'ajustement des profils se traduisant soit par une érosion soit par une redistribution sédimentaire le long des profils. Seuls les profils les plus à l'est (P7, P8 et P9) ont une pente proche de la pente d'équilibre théorique.

4.1.2. Analyse des MNT entre mars 2014 et février 2015 et bilans sédimentaires

Trois grands levés topographiques recouvrant une large emprise ont été effectués le 21 mars et le 1^{er} octobre 2014 (dans lesquels ont été extraits les profils précédemment décrits) ainsi que le 28 février 2015. Les dates des MNT coïncident donc avec celles des profils pour cette première année d'analyse. L'analyse des MNT différentiels va néanmoins apporter une vision plus générale de l'évolution du site. Le calcul des bilans volumétriques entre deux MNT va permettre de quantifier la perte ou le gain de sable sur le site du rechargement. A noter que l'emprise a été découpée en deux secteurs afin de calculer les bilans sédimentaires sur chacun d'entre eux et de mettre en évidence certaines variabilités spatiales.

4.1.2.1 Période 1 : 21 Mars 2014 – 1 octobre 2014

La première période du 21/03/2014 au 01/10/2014 correspond à la période printanière et estivale. Il a été montré que cette période se caractérise par un temps assez calme proche des normales de saison. La carte de différentiel altimétrique entre mars 2014 et fin septembre 2014 montre des évolutions d'altitudes qui varient entre -1 m et + 0,90 m (Figure VI.28-A). L'érosion de la zone intertidale constatée le long du profil P1 concerne en réalité tout le secteur ouest compris entre la jetée Est et l'abscisse 1655750 (secteur 1). Cette zone d'érosion s'étend du bas de plage jusqu'au rebord de la plateforme et se caractérise par une baisse du niveau de la plage de -1 m. De l'abscisse 1655750 et jusqu'à la limite est de l'emprise, il est possible de constater la présence d'une zone d'érosion au niveau de la partie supérieure de l'estran et une large zone d'accumulation sableuse en milieu de plage. Cette observation vient donc étayer ce qui avait été mis en évidence avec la redistribution sédimentaire sur certains profils topographiques. Les variations volumétriques qui ont pu être calculées à partir des deux MNT de mars et octobre 2014 mettent en évidence une perte de -10 000 m³ de sable sur l'emprise totale. L'érosion à ouest (secteur 1) se solde par une perte de -27 000 m³ tandis que le bilan s'élève à + 17 000 m³ dans le secteur 2 (Figure VI.28-A).

4.1.2.2 Période 2 : Octobre 2014 – Février 2015

Cette seconde période s'étend sur l'automne 2014 et une grande partie de l'hiver 2014-2015. L'intensification des conditions météo-marines a été mise en évidence précédemment (section 2 de ce chapitre). Dans le détail, les vents à Dunkerque se sont renforcés au cours de cette période avec 21,4 % d'enregistrements ≥ 8 m/s dont 3,3 % ≥ 12 m/s. La composante sud prédomine largement dans l'orientation générale des vents. Les vents moyens et forts confondus (≥ 8 m/s) proviennent majoritairement de ce même secteur sud, mais la seconde origine de ces vents provient du NO. Les enregistrements ≥ 12 m/s proviennent en revanche à 49 % du secteur NO et 37 % du secteur NE (Figure VI.28-B). De puissantes vagues ont également été enregistrées sur l'ensemble de la période et particulièrement en décembre et janvier (Figure VI.28-C et D).

La carte de différentiel altimétrique met en évidence une accentuation des phénomènes observés au cours de la période précédente entre mars 2014 et septembre 2015. Avec un temps plus

agité, les variations morphologiques se sont accentuées se traduisant par un bilan sédimentaire négatif de l'ordre de $-65\,000\text{ m}^3$ ($-13\,800\text{ m}^3/\text{mois}$) sur l'ensemble du secteur rechargé. La zone d'érosion à l'ouest est plus marquée, avec une baisse significative du niveau de la plage qui atteint localement jusque -2 m , mais également une extension de la zone touchée par l'érosion (Figure VI.28-B). Cela se confirme avec le bilan volumétrique qui fait état de $-79\,000\text{ m}^3$ ($-15\,800\text{ m}^3/\text{mois}$) dans ce secteur. L'érosion du haut de plage en bordure de plateforme est également plus marquée et atteint parfois près de $-1,5\text{ m}$ provoquant alors un recul de la plateforme. La portion de l'estran caractérisée par un engraissement dans le secteur 1 s'est considérablement rétrécie.

L'engraissement en bas d'estran dans le secteur 2 est toujours visible et atteint $+1,2\text{ m}$. Des variations longitudinales commencent à apparaître en milieu d'estran dans le secteur 2, laissant supposer l'émergence d'une autre forme de réorganisation dans cette zone. Le bilan volumétrique dans le secteur 2 est légèrement négatif, atteignant $-14\,000\text{ m}^3$ ($-2\,800\text{ m}^3/\text{mois}$). Le renforcement des vents au cours de cette période a favorisé la déflation éolienne sur la plateforme supratidale ce qui explique la légère érosion de l'ordre de $-0,20\text{ m}$. Des zones d'accumulation sont visibles le long de la digue, à environ une vingtaine de mètres de celle-ci, ainsi qu'au niveau de trois épis, correspondant à des accumulations éoliennes piégées dans les filets brise-vents installés en décembre 2014. En l'espace de deux mois et demi, ces structures ont piégé assez de sable pour former des accumulations de l'ordre de $+0,70\text{ m}$.

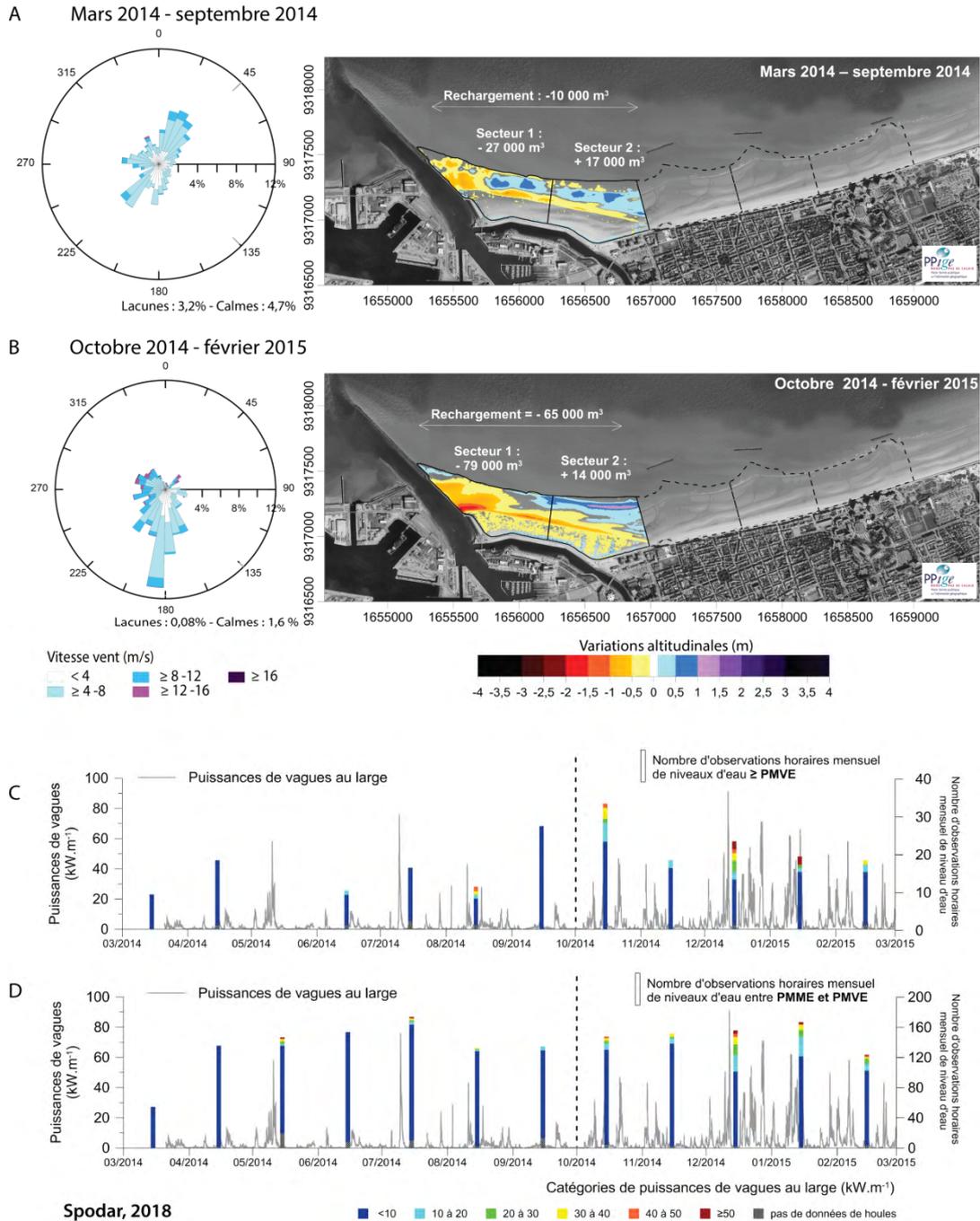


Figure VI.28 Variations d'altitude et roses des vents à la côte au cours de la première année du rechargement pour les périodes comprises entre mars et septembre 2014 (A) et entre octobre 2014 et février 2015 (B) et puissances de vagues au large combinées aux marées hautes à la côte dont les niveaux d'eau sont ≥ à 6,05 m CM (C) ou compris entre 5,00 m et 6,05 m CM (D)

4.1.3. Analyse de la granulométrie de surface en mars 2015

En sachant que lors du rechargement, le sable a été refoulé devant la digue de manière indifférenciée, l'ensemble du stock sableux sur site après travaux présente des caractéristiques granulométriques assez homogènes. Pour rappel, la taille du grain moyen rechargé était de 0,47 mm.

Un échantillonnage des sables de surface a été réalisé le 06/03/2015. L'analyse de la taille du grain moyen montre une variabilité spatiale sur la composante transversale, avec un affinement des particules vers le bas de plage (Figure VI.29-A). Effectivement cette partie de l'estran (< BMME, soit

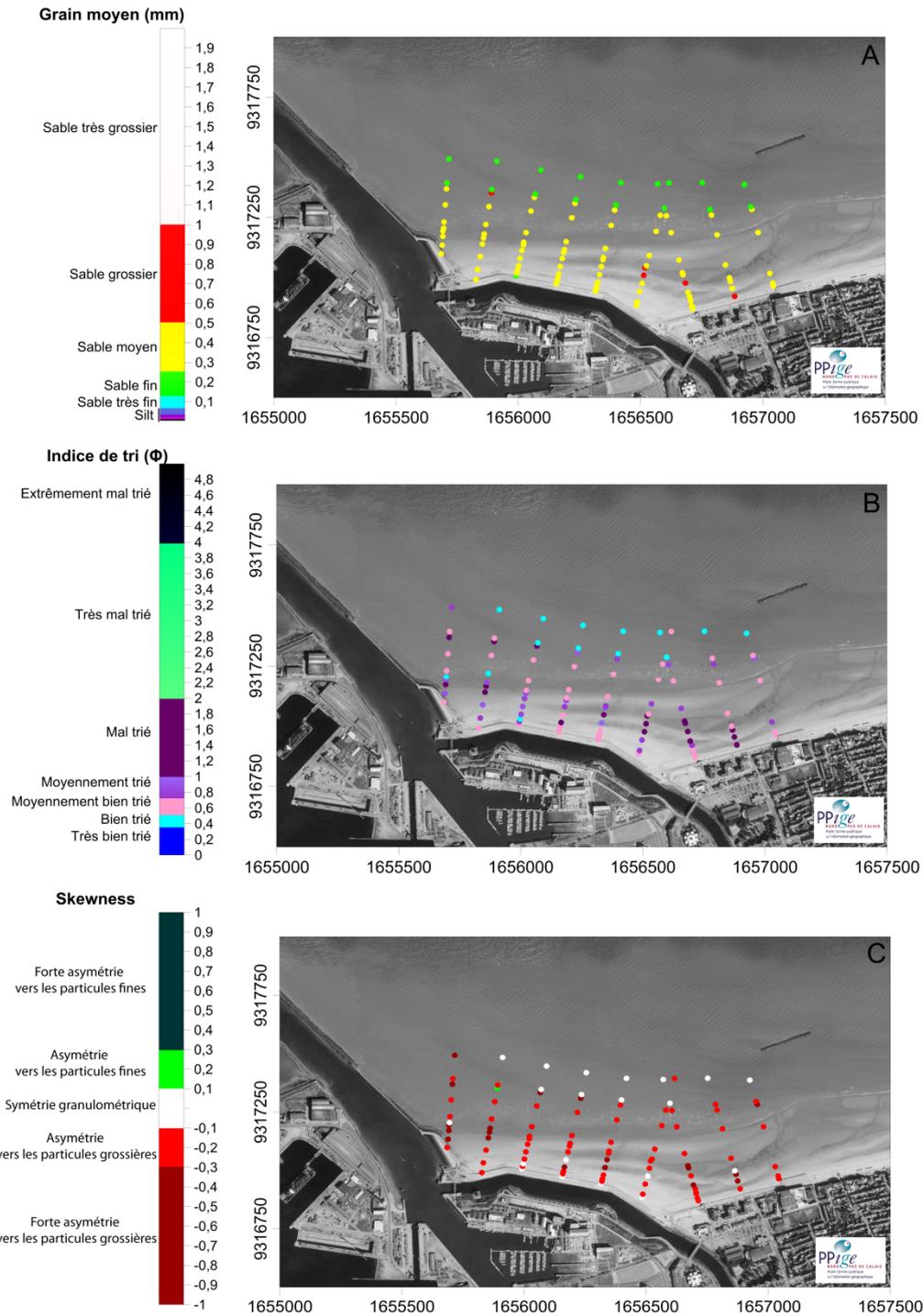
1,50 m CM) se caractérise par des sables fins, dont le grain moyen oscille entre 0,18 mm à 0,22 mm, (Tableau VI.7). Ce sont de plus les échantillons du bas de plage qui présentent le meilleur classement avec un indice de tri de 0,49 Φ (Tableau VI.7 & Figure VI.29-B). L'analyse de l'indice d'asymétrie met également en évidence une dominance des distributions symétriques dans les échantillons du bas de plage (Figure VI.29-C). Il convient de faire remarquer que lors de forts coefficients de marée lorsque le bas de plage au-delà du BMVE est découvert, il est possible de remarquer de nombreux secteurs vaseux. Cette partie du bas de plage est également fortement bioturbée, avec une présence abondante de colonies de vers à tubes (photo). La présence de ces particules fines en bas de plage suggère une plus faible énergie à ce niveau en raison vraisemblablement d'une plus forte dissipation de l'énergie de la houle sur les faibles tranches d'eau de l'avant plage à marée basse.

Secteurs	Grain moyen (mm)	Indice de tri (Φ)	Skewness
Accumulations éoliennes (<i>Filets et bordure de digue</i>)	0,31	0,58	-0,13
Plateforme supratidale	0,37	0,89	-0,23
Haut de plage	0,37	0,85	-0,24
Milieu de plage	0,36	0,73	-0,21
Bas de plage	0,20	0,49	-0,09

Tableau VI.7 Récapitulatif des paramètres granulométriques par secteurs

Le reste du site se caractérise par des particules rentrant dans la catégorie des sables moyens selon la classification de Wentworth (1922). Sur le milieu de plage (portion comprise entre les niveaux BMME et PMME) et la plateforme supratidale, la taille du grain moyen est de 0,36-0,37 mm en moyenne (Tableau VI.7). Cette taille plus importante résulte probablement de l'évacuation des particules fines du fait des conditions d'agitation plus importantes dans le milieu et haut de l'estran et de la déflation éolienne sur la plateforme supratidale. Les échantillons prélevés le long de la digue et dans les filets brise-vent sont des sables un peu plus fins dont le grain moyen est de 0,31 mm, avec des valeurs comprises entre 0,24 et 0,41 mm. Entre l'installation des filets brise-vent en décembre 2014 et l'échantillonnage des sédiments de surface début mars 2015, les structures ont eu le temps de piéger des sables mobilisés par le vent.

Les sédiments sont globalement moyennement bien triés sur le milieu de plage avec un indice de tri moyen de 0,73 Φ (Tableau VI.7). Les échantillons sont de moins en moins bien triés du milieu de plage vers le haut de plage. A noter que les indices de tri des échantillons sont beaucoup plus hétérogènes sur la plateforme supratidale, avec des zones plus ou moins bien triées selon les zones de déflation éoliennes. Excepté en bas de plage, le site se caractérise par un indice d'asymétrie inférieur à -0,1 Φ ce qui indique une légère prépondérance des particules grossières dans les courbes de distribution.



Spodar, 2018

Figure VI.29 Caractérisation du grain moyen (A), de l'indice de tri (B) et de l'indice d'asymétrie (C) sur le secteur du rechargement en mars 2015

4.1.4. Bilan de l'évolution du rechargement au cours de cette première année

Plusieurs points importants sont à retenir de l'analyse de cette première année de suivi. Dans un premier temps, il est à noter que des variations morphologiques affectent l'ensemble du rechargement dès les premiers mois qui suivent sa mise en œuvre entre mars et octobre 2014. Bien que modérés, ces mouvements sédimentaires mettent en évidence un début de remaniement sédimentaire malgré les conditions météo-marines relativement calmes pendant cette période. En

effet, entre mars et octobre 2014, la période se caractérise par une dominance de vents faibles avec 40% des enregistrements < 4 m/s et 42 % compris entre 4 et 8 m/s à Dunkerque. Les vents de secteur NE sont prédominants, suivis par le secteur SO. L'absence de fortes houles au large combinées à des marées hautes (Figure VI.28 C et D) est notable et les enregistrements de hauteurs de vagues au large montrent la prédominance des vagues inférieures à 1 m.

L'un des autres éléments importants à mentionner concerne des variations morphologiques (perte/gain de sable ou simple redistribution le long du profil) plus marquées entre octobre 2014 et février 2015 (Figure VI.28). Comme l'illustre la Figure VI.28, cette période se distingue en effet comme étant particulièrement morphogène d'un point de vue des puissances de vagues qui sont vraisemblablement venues frapper le site à marée haute.

Enfin, le dernier élément à souligner au cours de cette première année de suivi est relatif aux différents comportements morphologiques des profils selon leur localisation avec:

- une tendance à l'érosion et à l'abaissement du niveau de la plage dans le secteur ouest (P2 et surtout P1)
- une réorganisation transversale du profil qui passe par une érosion du haut de plage et un engraissement en milieu et bas de plage (P3 à P7)
- une hausse du niveau de l'estran (P8 et P9)
- l'absence de variation morphologique des profils au-delà du niveau BMME

La réorganisation transversale au niveau des profils centraux semble couplée à un transfert longitudinal au vu des variations nettes positives ou négatives de certains d'entre eux. Le lien qui se dessine entre érosion à l'ouest et engraissement à l'est laissent supposer un transport longitudinal vers l'est.

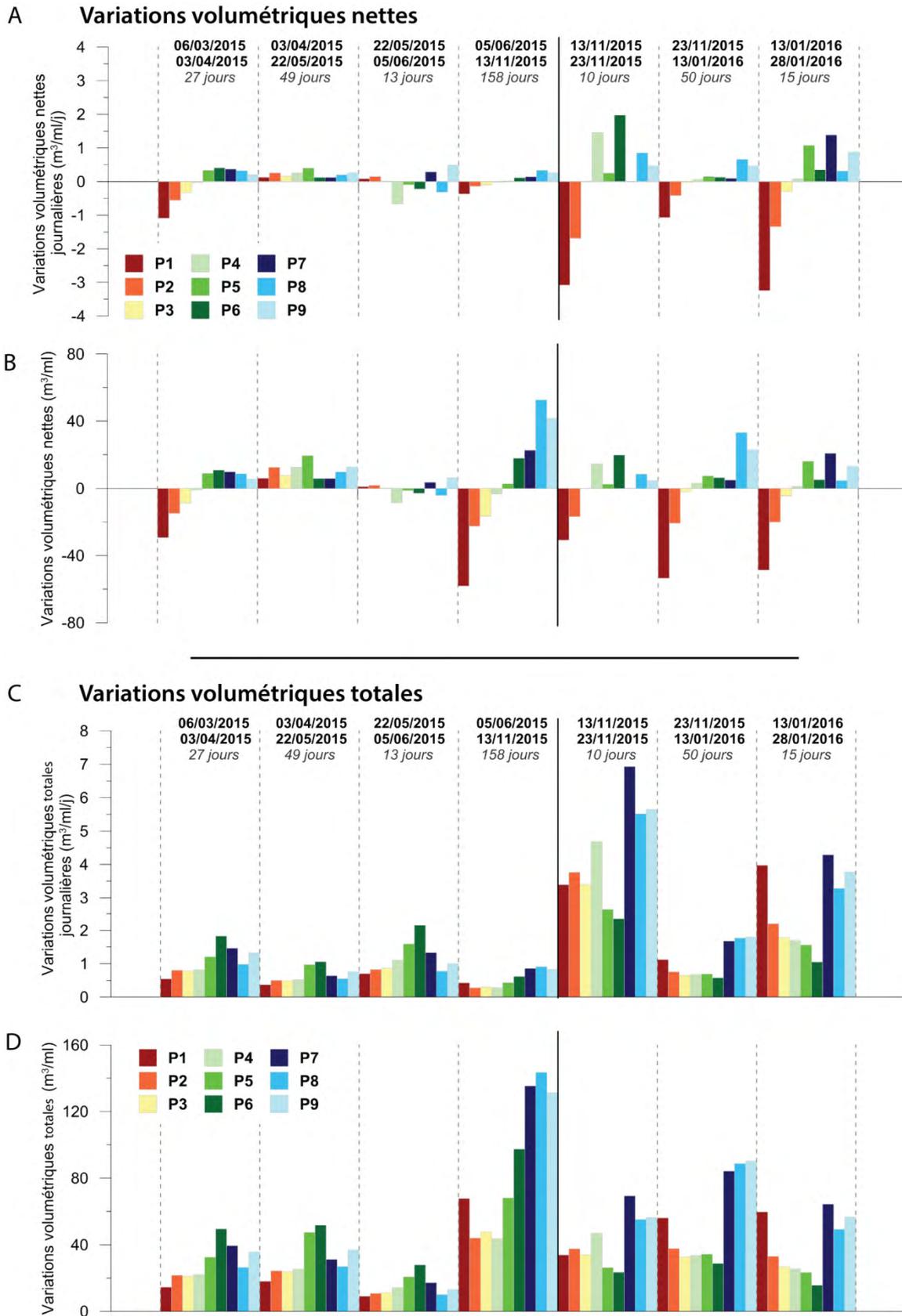
4.2. Deuxième année du rechargement : Mars 2015 – mi-février 2016

4.2.1. Réponse morphologique des profils de plage

Cette deuxième année de suivi topographique post-rechargement bénéficie d'un nombre plus important de levés topographiques des profils de plage. La période de suivi topographique au cours de l'année 2015 - 2016 a été découpée selon plusieurs sous-périodes distinctes afin de distinguer les périodes les plus morphogènes. En analysant les variations volumétriques nettes par jour (Figure VI.30 A), on remarque que globalement deux sous-périodes peuvent être mises en évidence. La première s'étend de mars à mi-novembre 2015 et se caractérise par des variations volumétriques relativement modestes. En revanche, la seconde période, de mi-novembre 2015 à fin janvier 2016, montre d'importantes variations volumétriques nettes par jour le long des profils (Figure VI.30 A).

4.2.1.1 Evolution des profils entre mars et mi-novembre 2015

L'évolution morphologique des profils de plage se révèle être variable d'ouest en est. En effet, dans le secteur le plus à l'ouest représenté par le P1, on constate un abaissement de l'estran associé à un recul de la plateforme supratidale (Figure VI.31-A). On remarque également une érosion plus marquée de la portion de l'estran au contact du niveau BMME-0,5m. En se décalant vers l'est, c'est globalement une stabilité morphologique qui caractérise l'estran le long des profils P2 à P4, excepté au point de contact entre l'estran et le niveau BMME-0,5 où la rupture de pente devient comme sur le P1 plus marquée au fil de temps (Figure VI.31-B à D).



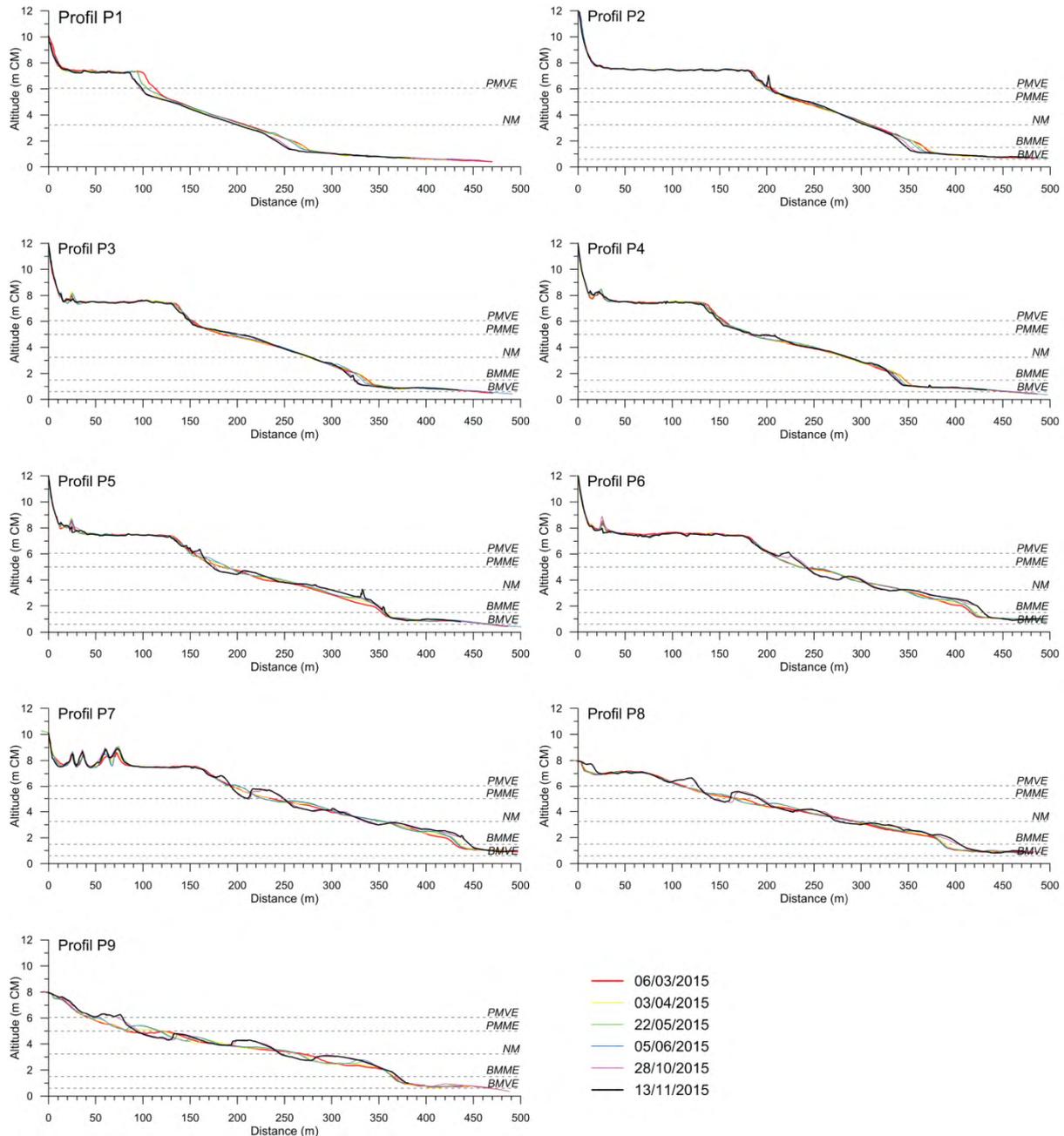
Spodar, 2018

Figure VI.30 Variations volumétriques nettes par jours (A) et sur toute la sous-période (B) et variations volumétriques totales par jours (C) et sur toute la sous-période (D) au cours de la deuxième année du rechargement (2015-2016)

Plus à l'est, l'évolution de l'estran au niveau des profils P5 à P8 se caractérise par la formation d'ondulations plus ou moins marquées dès avril 2015. Ces formes se développent progressivement pour finalement former un système de barres et bâches. De un à quatre couples de barres et bâches peuvent être dénombrés à la mi-novembre 2015. Les barres dans la partie supérieure de l'estran (>NM) sont particulièrement bien développées et volumineuses en fin de période, tandis que celles présentes entre les niveaux NM et BMME-0,5 m sont beaucoup plus planes. Sur le profil le plus à l'est (P9) en bordure du rechargement, les barres déjà présentes et partiellement aplanies au cours de l'hiver 2014-2015 se reforment et migrent vers le haut de plage.

L'analyse des variations volumétriques permet de mettre en évidence certaines tendances. Entre la fin de l'hiver et le début du printemps (06.03.2015-03.04.2015), des variations volumétriques nettes par jours oscillant entre -1,09 m³/ml/j et +0,41 m³/ml/j ont été calculées (Figure VI.30-A). Cette période a été plus morphogène comme en témoignent les variations morphologiques, particulièrement bien observables le long du profil P1 (Figure VI.31-A). Un recul de la plateforme y a été mesuré associé à un abaissement de l'estran assez marqué au haut de plage (-0,70m) se soldant par une perte de près de -30 m³/ml en un mois. Cette tendance à l'érosion a touché l'ensemble des profils à l'ouest du site (P1 à P4), alors qu'à l'est, au niveau des profils P5 à P9, le bilan volumétrique est positif (Figure VI.30 - A et B). Dans ce secteur est, les variations volumétriques totales sont bien supérieures aux volumes nets témoignant d'un remaniement sédimentaire important en plus du gain en sable. Trois événements venteux (orientation) les 22, 29 et 31 mars sont responsables de la formation de fortes houles. Quinze observations horaires de houles ≥ 30 kW.m⁻¹ ont pu être calculées dont trois ont coïncidées avec des niveaux d'eau à la côte ≥ 5 m CM (Figure VI.36 C & D). Ces épisodes peuvent donc être à l'origine des pertes de sable constatées dans le secteur ouest.

Entre avril et mi-novembre 2015, les variations volumétriques nettes montrent des tendances variables avec des phases de légères accrétions généralisées sur le site, comme entre le 03.04.2015 et le 22.05.2015 ; des périodes caractérisées par une alternance de pertes ou de gains en sable, comme entre le 22.05.2015 et le 05.06.2015, ou encore des intervalles de temps avec une tendance à l'érosion dans le secteur ouest et à l'engraissement dans le secteur est pendant la période estivale et le début de l'automne, entre début juin et mi-novembre 2015. A l'issue de cette dernière période de 158 jours, d'importantes variations volumétriques nettes, comprises entre près de -60 m³/ml (P1) et +42 m³/ml (P8), ont pu être mesurées (Figure VI.30-B). Du point de vue de l'évolution morphologique on observe clairement au cours de cette sous-période le développement et la migration vers le haut de plage des barres et bâches sur ces profils. Le profil P1 a subi un abaissement de -0,90 m en haut de plage près du rebord de la plateforme, de -0,10 à -0,20 m sur le milieu de plage et de -0,50 m au niveau du BMME-0,5 m. La forte érosion en haut de plage a provoqué un recul du rebord de la plateforme supratidale de 10 m (Figure VI.31-A). Sur les autres profils P2 à P4, l'érosion est principalement localisée en haut du profil et au contact du niveau BMME-0,5m.



Spodar, 2018

Figure VI.31 Evolution des profils transversaux de la partie supra et intertidale entre mars et mi-novembre 2015

4.2.1.2 Evolution des profils entre mi-novembre 2015 et fin janvier 2016

- Succession d'épisodes venteux entre le 13 et le 23 novembre 2015

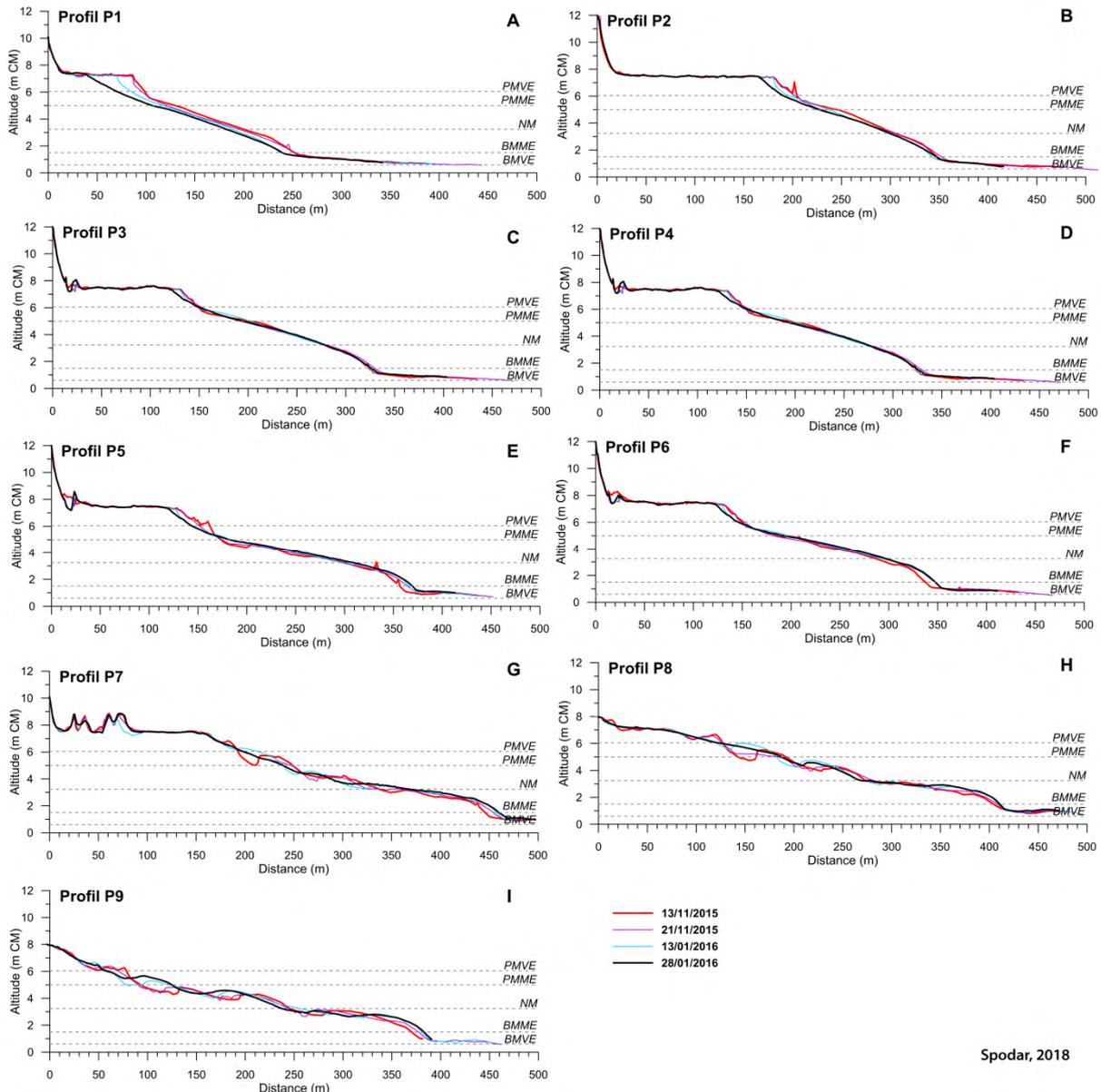
La très courte période de 10 jours comprise entre le 13.11.2015 et le 23.11.2015 se caractérise par des conditions météorologiques très agitées. Trois événements d'intensité variable se sont succédé au cours de ces 10 jours, dont un coup de vent les 14 et 15 novembre suivi de la tempête Barney les 17 et 18 novembre qui a frôlé la côte, tous deux de secteur ouest. Le troisième événement est un coup de vent de secteur NE survenu le 21 novembre. Au cours de ces 10 jours, les houles au large ont toutes été \geq à 0,5 m avec 74 % \geq à 1 m et 20 % \geq 2 m. Les hauteurs significatives maximales ont atteint 3,5 m le 21 novembre. Les vagues les plus puissantes (jusque 84,48 kW.m⁻¹)

ont été identifiées au cours du coup de vent du 21 novembre en provenance du NE. Au total, 45 observations horaires de puissances de houles $\geq 30 \text{ kW.m}^{-1}$ ont été mises en évidence entre le 13/11/2015 et le 23/11/2015. Parmi ces 45 observations horaires, 18 sont combinées à des marées hautes à la côte à savoir 17 lors de niveaux d'eau compris entre 5,00 et 6,05 m CM et une observation lors de niveau d'eau $\geq 6,05 \text{ m}$ (Figure VI.36-C et D).

L'analyse des profils topographiques montre une variabilité spatiale dans l'évolution du site suite au passage de ces trois coups de vent. C'est pendant cette très courte période de 10 jours que le plus de changements morphologiques ont été mesurés pendant cette deuxième année de suivi (Figure VI.30). Dans le secteur ouest, l'estran a subi une érosion majeure se soldant par une perte de $-31 \text{ m}^3/\text{ml}$ sur de P1 et $-17 \text{ m}^3/\text{ml}$ sur le P2, ce qui correspond à une perte journalière $-3,08 \text{ m}^3/\text{ml}/\text{j}$ et $-1,69 \text{ m}^3/\text{ml}/\text{j}$. Le long du P1, l'abaissement du niveau de l'estran atteint $-0,20 \text{ m}$. Autre fait notable, les hauts niveaux d'eau couplés aux houles puissantes qui se sont propagées depuis le large ont entaillé le rebord de la plateforme supratidale. Une microfalaise de $0,70 \text{ m}$ sur le P1 a été mesurée le 23.11.2015. Sur le P2, c'est sur la portion d'estran comprise entre les niveaux PMME et NM que la perte de sable la plus conséquente s'est produite avec une baisse du niveau de la plage de $-0,40 \text{ m}$ au maximum. Vers la partie centrale du site, les profils P3 et P4, sont plus stables, mis à part une légère érosion en bas de plage. D'importants mouvements sédimentaires se sont produits à l'est, du P5 au P9, les variations totales étant supérieures aux valeurs des variations nettes. Les mesures topographiques montrent un lissage du système de barres et bâches en réponse aux conditions météo-marines énergétiques. Dans la partie supérieure du profil P7 ($> \text{PMME}$), les barres ont été complètement aplanies et les bâches comblées. Dans la partie inférieure de l'estran c'est un engraissement qui s'est produit entre les niveaux NM et BMME-1m. Sur le P8 en revanche, bien qu'aplanies, les barres sur l'ensemble de l'estran sont toujours présentes et bien identifiables. Au niveau du Profil P9 les barres ont été globalement moins aplanies que sur les autres profils et ont la particularité d'avoir migré de 15 à 20 m vers le haut de plage.

- *Période d'accalmie entre le 23/11/2015 et le 13/01/2016*

A cheval sur la fin de l'automne et le début de l'hiver, cette période comprise entre le 23/11/2015 et le 13/01/2016 est caractérisée par des conditions météo-marines moins énergétiques que lors de la période précédente. Quelques épisodes venteux se sont succédé au large, avec 56% de vents $\geq 12 \text{ m/s}$ et jusqu'à 24% $\geq 16 \text{ m/s}$, en provenance globalement du quart SO. Les vitesses des vents enregistrées à Dunkerque sont beaucoup moins fortes, avec des vents $\geq 12 \text{ m/s}$ ne représentant que 2% des enregistrements tandis que les vents $\geq 16 \text{ m/s}$ sont quasi inexistantes avec une seule donnée horaire le 7 janvier 2016. Les vents moyens et forts ($\geq 8 \text{ m/s}$) proviennent majoritairement des secteurs sud-ouest et ouest. L'analyse des puissances de houles montre que 74 observations horaires sont $\geq 30 \text{ kW.m}^{-1}$ sur l'ensemble de la période, dont 25 coïncident avec des niveaux de la marée compris entre 5,00 et 6,05 m CM et 10 avec des niveaux $\geq 6,05 \text{ m CM}$.



Spodar, 2018

Figure VI.32 Evolution des profils transversaux de la partie supra et intertidale entre mi-novembre 2015 et fin janvier 2016

L'analyse des variations volumétriques nettes à l'issue de cette sous-période montre qu'une perte conséquente de sable s'est produite dans le secteur ouest, avec $-54 \text{ m}^3/\text{ml}$ sur le profil P1 et $-21 \text{ m}^3/\text{ml}$ sur le profil P2 (Figure VI.30). Sur le P1, la portion de l'estran la plus touchée se localise au-dessus du niveau des PMME où un abaissement de -1 m a pu être mesuré, entraînant un recul de la plateforme supratidale de 15 m . Aucune zone d'accrétion pouvant laisser penser à une redistribution transversale du sable n'est visible. Au contraire, malgré un niveau de plage stable entre les niveaux PMME et NM, la partie inférieure du profil a également été érodée avec une baisse de $-0,20 \text{ m}$ à $-0,60 \text{ m}$. Sur le P2, le haut de plage ($> \text{PMVE}$) et la partie entre les niveaux NM et BMME- $0,5 \text{ m}$ a subi une érosion tandis que la partie centrale du profil s'est légèrement engraisée. Les mêmes variations morphologiques sont observables sur les profils P3, P4 et P5, le long de ces profils le bilan volumétrique est quasi-nul. L'analyse des profils les plus à l'est, du P7 au P9, montre que cette période a été propice à la reformation de certaines barres intertidales partiellement détruites lors de la période précédente du 13 au 23 novembre 2015 ainsi qu'à leur migration vers le haut de plage. Les

deux profils les plus à l'est, P8 et P9, enregistrent d'un gain en sable de + 33 m³/ml et +23 m³/ml. A noter que les volumes perdus au niveau des profils du secteur ouest (P1 à P3) correspondent au gain en sable des profils du secteur est (P4 à P9) ce qui pourrait indiquer une redistribution longitudinale du sable vers l'est (Figure VI.30).

- *Episodes tempétueux de janvier 2016*

Deux événements particuliers sont à retenir à la fin de cette deuxième année post-rechargement. Le premier s'est produit les 14 et 15 janvier 2016. Au cours de cette tempête du NO, les vents à la côte ont atteint une vitesse maximale de 17,3 m/s et les vents ≥ 8 m/s ont soufflé pendant 40h consécutives et ceux ≥ 12 m/s pendant 17h consécutives. Au plus fort de la tempête, des vagues de près de 3 m et d'une puissance maximale de 58 kW.m-1 ont été enregistrées au large. Ce pic de la tempête a coïncidé avec une marée haute (coefficient 87), le niveau d'eau a alors atteint + 6,57 m CM, en raison d'une surcote de 0,76 m. Douze jours plus tard, les 26 et 27 janvier 2016, un second événement venteux de secteur SSO s'est produit. Quoique notable, cet événement s'est révélé être moins intense. A la côte, bien que des vents moyens compris entre 8 et 12 m/s aient persisté pendant 34h consécutives, leur vitesse n'a pas dépassé 12 m/s. Quelques enregistrements de houles comprises entre 2,00 et 2,40 m ont pu être observées, avec une puissance de près de 40 kW.m-1. A deux reprises, ces vents modérés, conjugués à de fortes houles au large, ont coïncidé avec des hautes mers dont les niveaux ont atteint 5,56 m CM (décote de 0,32 m dû aux vents de SSO) et 6,17 m CM (surcote de 0,27 m).

Les variations volumétriques nettes relèvent que cette période a été particulièrement morphogène (Figure VI.30). Dans le secteur ouest, les profils P1 à P3 enregistrent une évolution volumétrique négative, qui s'atténue vers l'est pour passer de -49 m³/ml à -4 m³/ml. La sévère érosion constatée dans ce secteur se traduit par une baisse importante du niveau de sable principalement dans la partie supérieure de l'estran. Sur le P1, l'abaissement du niveau de la plage atteint -1,1 m sur la portion entre le rebord de la plateforme et le niveau PMVE, entraînant un recul significatif de la plateforme de 30 m sur ce profil P1. La largeur de la plateforme supratidale dans ce secteur se trouve de ce fait considérablement réduite.

Du P4 au P9, on observe au contraire des gains en sable qui atteignent +21 m³/ml sur le P7 (Figure VI.30). Les variations volumétriques totales mettent en évidence que beaucoup plus de mètres cube de sable se sont déplacés dans le secteur est avec des valeurs qui atteignent 64 m³/ml sur le P7. Une stabilité morphologique caractérise les profils P4 et P5. Seul le rebord de la plateforme a été légèrement raboté. Le système de barres et de bâches des profils P6 à P9 a été fortement lissé en réponse à l'impact des deux tempêtes (Figure VI.32). Dans le détail, sur les profils P6 et P7, les barres et bâches ont pratiquement disparues et l'estran est redevenu très lisse. Au niveau du profil P8 seules les barres dans la partie inférieure de l'estran sont encore légèrement perceptibles, tandis que celles le long du P9 sont encore visibles, bien que très aplanies.

4.2.1.3 Bilan de l'évolution des profils au cours de la deuxième année

Le bilan volumétrique à l'issue de cette deuxième année se solde par trois profils en érosion, et six profils en accrétion (Figure VI.33). Les trois profils dans la partie la plus occidentale du site d'étude présentent des pertes qui tendent à diminuer d'ouest et est. Sur le profil P1 marqué par la perte de sable la plus significative on note un important abaissement du niveau de l'estran ainsi qu'un recul de 60 m de la plateforme supratidale (Figure VI.34). Sur le P2, les mêmes observations morphologiques peuvent être faites mais avec une intensité beaucoup plus modeste. Du secteur

central vers l'est du site, le bilan volumétrique positif est de plus en plus important, en passant de + 19 m³/ml sur le P4 à + 107 m³/ml sur le P9 (Figure VI.33). A noter que dans la partie centrale du site (P5, P6, P7) et dans une moindre mesure au niveau du P8, l'accumulation la plus importante est au niveau des BMME, en bas d'estran alors que le niveau des BMVE est resté très stable. A l'extrémité est du site (P9), les gains en sable sont répartis sur l'ensemble du profil. On peut supposer que le sable érodé dans le secteur ouest se retrouve dans le secteur central et est du site du fait des courants dominants dirigés vers l'est comme montré lors de la campagne hydrodynamique (Figure VI.23).

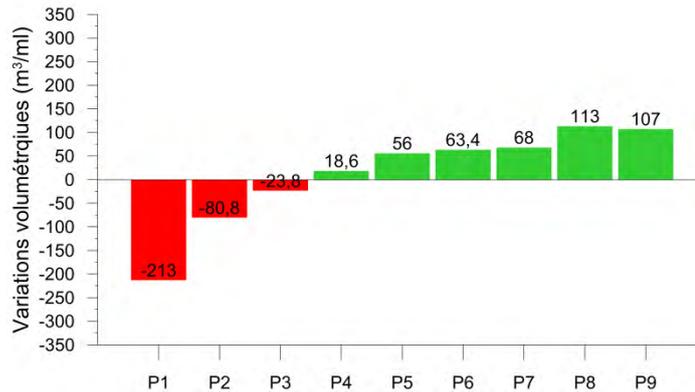
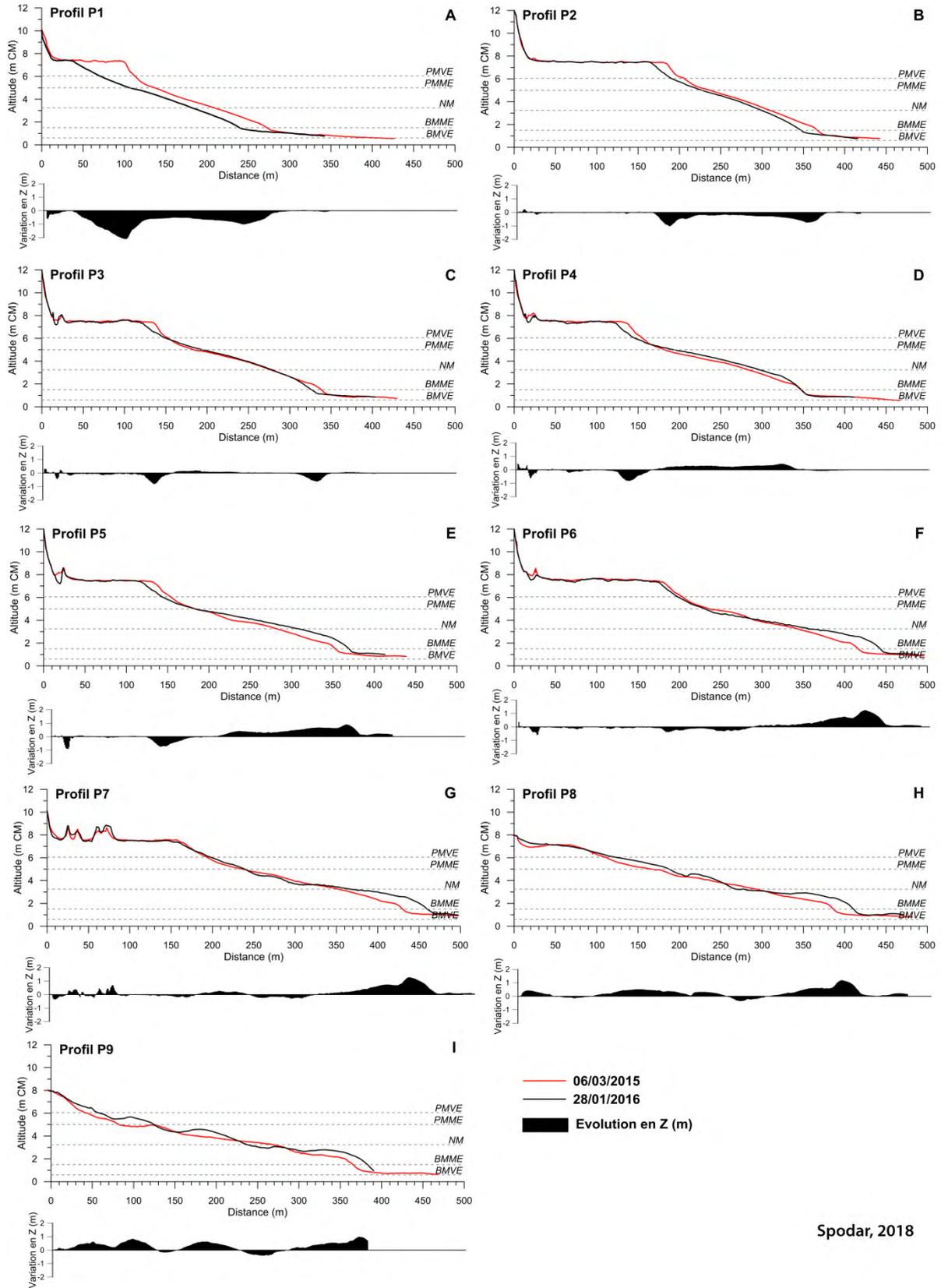


Figure VI.33 Bilan de l'évolution des profils au cours de la deuxième année du rechargement

Au cours de cette deuxième année de suivi, on constate que, bien que la plateforme supratidale ait reculé dans le secteur ouest, son niveau altitudinal est resté plutôt stable. Seule la déflation éolienne est responsable de la très légère érosion qui s'est produite au fil du temps. Au niveau des filets brise-vents il est également possible de voir des variations de hauteurs au fil des dates traduisant les variations du stock sableux piégés par ces structures.

Dans la zone intertidale, les deux portions d'estran précédemment identifiées au cours de la première année se démarquent encore une fois. Entre le rebord de la plateforme et le niveau BMME-0,5m l'estran est caractérisé par une variabilité morphologique importante (Figure VI.34). Lors d'épisodes morphogènes, dans le secteur ouest (P1 à P3) on constate par un abaissement du niveau de la plage et un recul du rebord de la plateforme, de plus en plus prononcés vers l'ouest. Dans le secteur plus central et à l'est du site, on observe un lissage des profils, un aplanissement des barres et un comblement des bâches. Lors de périodes peu agitées à calmes, un remaniement sédimentaire s'opère dans ce secteur est avec le développement de barres intertidales de plus en plus volumineuse du P5 au P9 (réf), ce qui n'est pas le cas dans le secteur ouest, les périodes de temps calmes ne se soldant pas par un engraissement. Au-delà du niveau BMME-0,5m, le bas de plage se caractérise par une grande stabilité et une pente très faible.

Les pentes de plages sont synthétisées dans la Figure VI.35. Les profils les plus à l'ouest (P1 à P3) ont une pente qui reste forte. Ces profils restent effectivement très raides, avec une pente comprise entre 2,3% et 2,7% en mars 2015 et entre 2,4% et 2,75 % fin janvier 2016. La pente des profils plus centraux, P4 et P5, s'est progressivement adoucie pour passer de 2,10 % en mars 2015 à 2 % et 1,82 % fin janvier 2016. En revanche, les profils P6 et P7 du fait de l'engraissement progressif de la partie inférieure de l'estran, ont atteint une pente proche de la pente d'équilibre de 1,42%.



Spodar, 2018

Figure VI.34 Evolution morphologique à l'issue de la deuxième année de suivi des neuf profils de plage (06/03/2015 - 28/01/2016)

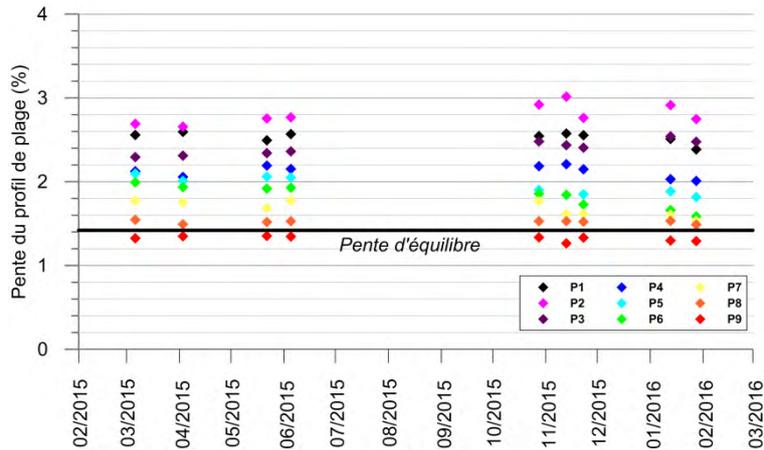


Figure VI.35 Evolution de la pente de la partie active de l'estran le long des neuf profils entre mars 2015 et fin janvier 2016

4.2.2. Analyse des MNT et bilans sédimentaires

A partir de l'année 2015, les levés topographiques effectués dans le cadre d'une convention entre le GPMD et l'ULCO couvrent une emprise beaucoup plus large et s'étendent sur deux kilomètres vers l'est. En plus de la zone de rechargement, toute la plage de Malo-les-Bains a par conséquent fait l'objet de relevés topographiques, ce qui permet d'avoir un aperçu de l'impact du réensablement sur les secteurs de plage plus en aval-dérive. Trois levés complets de cette zone ont été réalisés fin février 2015, mi-septembre 2015 et mi-février 2016.

4.2.2.1 Mars 2015 – mi-septembre 2015

L'analyse des deux levés réalisés en 2015 rend compte de l'évolution du site sur une période qui s'étend de la fin de l'hiver jusqu'à la fin de la période estivale. Cette période s'est révélée être relativement calme avec une prédominance des vents faibles à la côte (83% des enregistrements < 8m/s), les vents ≥ 12 m/s ne représentant que 1,3% des observations. Aucun vent de plus de 16 m/s n'a été enregistré. Leur direction montre une nette dominance du secteur SO, suivi par le secteur NE (Figure VI.36-A). Les conditions météorologiques pendant cette période correspondent aux normales de saisons (Maspataud, 2011). Le nombre d'enregistrements de hauts niveaux d'eau $\geq 6,05$ m CM reste relativement modeste les premiers mois puis une tendance à la hausse à partir d'août est observable (Figure VI.36-A). L'action combinée de houles puissantes et de ces hauts niveaux d'eau $\geq 6,05$ m CM est quasiment inexistante pendant ces sept mois et demi.

En réponse à ces conditions météo-marines plutôt calmes, deux comportements morphologiques bien distincts sont visibles sur le site du rechargement. L'estran dans la partie ouest du secteur 1 est toujours en érosion malgré une atténuation du phénomène (Figure VI.36-A). La plus forte érosion, qui peut aller jusqu'à un abaissement du niveau de la plage de -2,8 m, est à nouveau observée au point de jonction entre la jetée Est et la plateforme supratidale. Cette érosion marquée entraîne d'autre part un recul du rebord de la plateforme supratidale de l'ordre d'une dizaine de mètres.

Dans le secteur 2, l'estran se caractérise par une succession de zones longitudinales d'accrétion et d'érosion correspondant aux déplacements des barres et des bâches précédemment mis en évidence dans l'analyse des profils topographiques (Figure VI.36 A). La carte de différentiel altimétrique illustre bien ce phénomène et la présence de deux à trois couples de barres et bâches.

Excepté le recul de son rebord, le niveau altitudinal de la plateforme supratidale est resté globalement stable au cours de cette période. Seules les zones d'accumulations sur les filets brise-vents sont notables.

D'un point de vue des bilans sédimentaires, la perte de sable dans le secteur 1 atteint $-31\ 000\ \text{m}^3$ ($-4\ 130\ \text{m}^3/\text{mois}$). L'érosion s'est donc atténuée en comparaison de la période précédente, entre octobre 2014 et février 2015. A l'inverse, le secteur 2 bénéficie d'un gain de sable de $+30\ 000\ \text{m}^3$ ($+4\ 000\ \text{m}^3/\text{mois}$). Cela correspond donc pratiquement au volume perdu dans la partie ouest, impliquant un bilan sédimentaire équilibré dans la zone du rechargement, ce qui tend à confirmer l'hypothèse d'un transfert sédimentaire vers l'est.

Un déplacement de sable de la partie est du rechargement vers le secteur 3 est détectable avec les zones d'accumulation qui s'étendent vers l'est. En septembre 2015, des zones d'accrétion de près de 1 m ont été enregistrées dans ce secteur 3. Le différentiel altimétrique (Figure VI.36-A) montre donc que le sable issu du rechargement a atteint le troisième secteur au bout d'un an et demi après sa mise en œuvre. Ce secteur a en effet gagné au total $+18\ 000\ \text{m}^3$ ($+2\ 400\ \text{m}^3/\text{mois}$). Il est probable qu'une partie du sable érodé avait atteint le secteur 3 dès la période octobre 2014 – février 2015, comme l'a suggéré l'analyse des profils, mais l'absence de levé topographique dans cette zone en octobre 2014 ne permet pas de l'affirmer.

Sur les secteurs 4 et 5 plus en aval, les bilans sédimentaires sont quasiment à l'équilibre avec des volumes nets de $+1\ 000\ \text{m}^3$. Le sable en provenance du rechargement ne semble pas encore avoir atteint ces zones.

Sur l'ensemble du site, un bilan sédimentaire de $+19\ 000\ \text{m}^3$ a pu être calculé, ce qui traduit un apport extérieur de sable. Ce bilan sédimentaire légèrement positif ($+0,01\ \text{m}^3/\text{m}^2$) a pu être favorisé par les conditions météo-marines relativement calmes qui ont caractérisé cette période. Se surimpose à cette phase globalement favorable à l'engraissement, la redistribution longitudinale du sédiment en provenance du rechargement.

4.2.2.2 Mi-septembre 2015 - mi-février 2016

Les conditions météo-marines ont été plus morphogènes au cours de cette période qui s'étend sur l'automne et une partie de l'hiver. Evoqués dans la section 2 de ce chapitre, les vents enregistrés au large à la station Sandettie ont été particulièrement violents avec par exemple des fréquences mensuelles d'enregistrements $\geq 16\ \text{m/s}$ qui atteignent 30 % en novembre 2015. Ces vents forts au large proviennent principalement du secteur SO. Les vents à la côte sont moins intenses, les vitesses moyennes entre 8 et 12 m/s représentant 22% des observations, les vents $\geq 12\ \text{m/s}$ ne soufflent que 2% du temps. Les vents en provenance du secteur sud prédominent. Les vents $\geq 12\ \text{m/s}$ proviennent en revanche du quart NO, suivis par l'OSO (Figure VI.36 B).

Une augmentation des hauteurs significatives de houle au large a également été observée au cours de cette période (Figure VI.36 D). Les hauteurs les plus importantes $\geq 1,5\ \text{m}$ (17% des mesures) sont principalement associées à des vents de secteur SO (81 %) suivis par des vents de secteur NO (12%). Corrélées à l'augmentation des hauteurs de vagues, les puissances deviennent également globalement plus élevées au cours de cette période et se démarquent nettement du reste de cette deuxième année. A la côte, le nombre d'enregistrements de hauts niveaux d'eau $\geq 6,05\ \text{m CM}$ est également notable avec, à titre d'exemple, 27 observations horaires en novembre 2015 ou encore 35 en février 2016. Sur la Figure VI.36-C, on peut noter le nombre important de houles puissantes qui ont coïncidé avec des marées hautes, que les niveaux d'eau soient compris entre 5,00 et 6,05 m CM (72 observations horaires), ou supérieurs à 6,05 m CM (21 observations horaires).

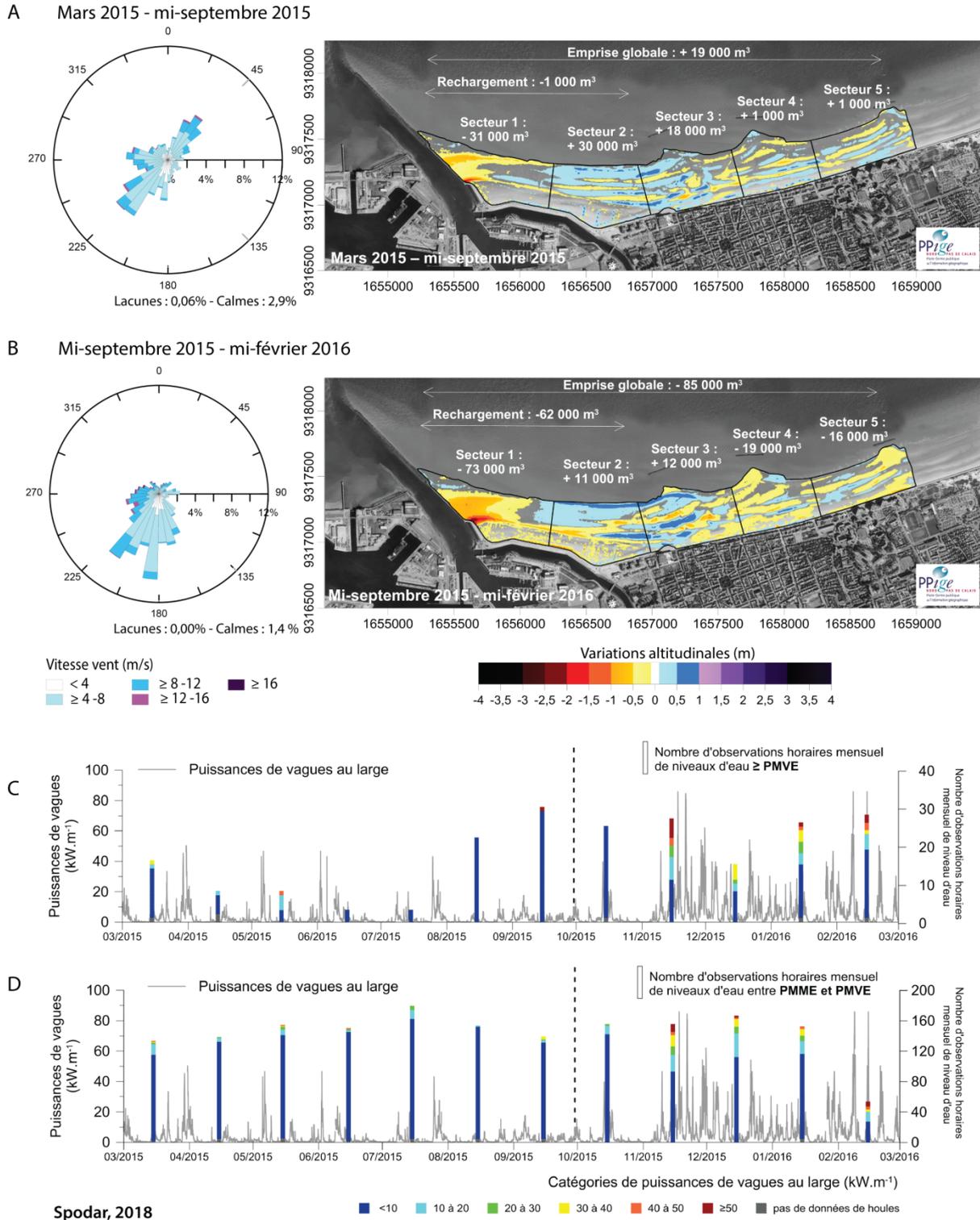


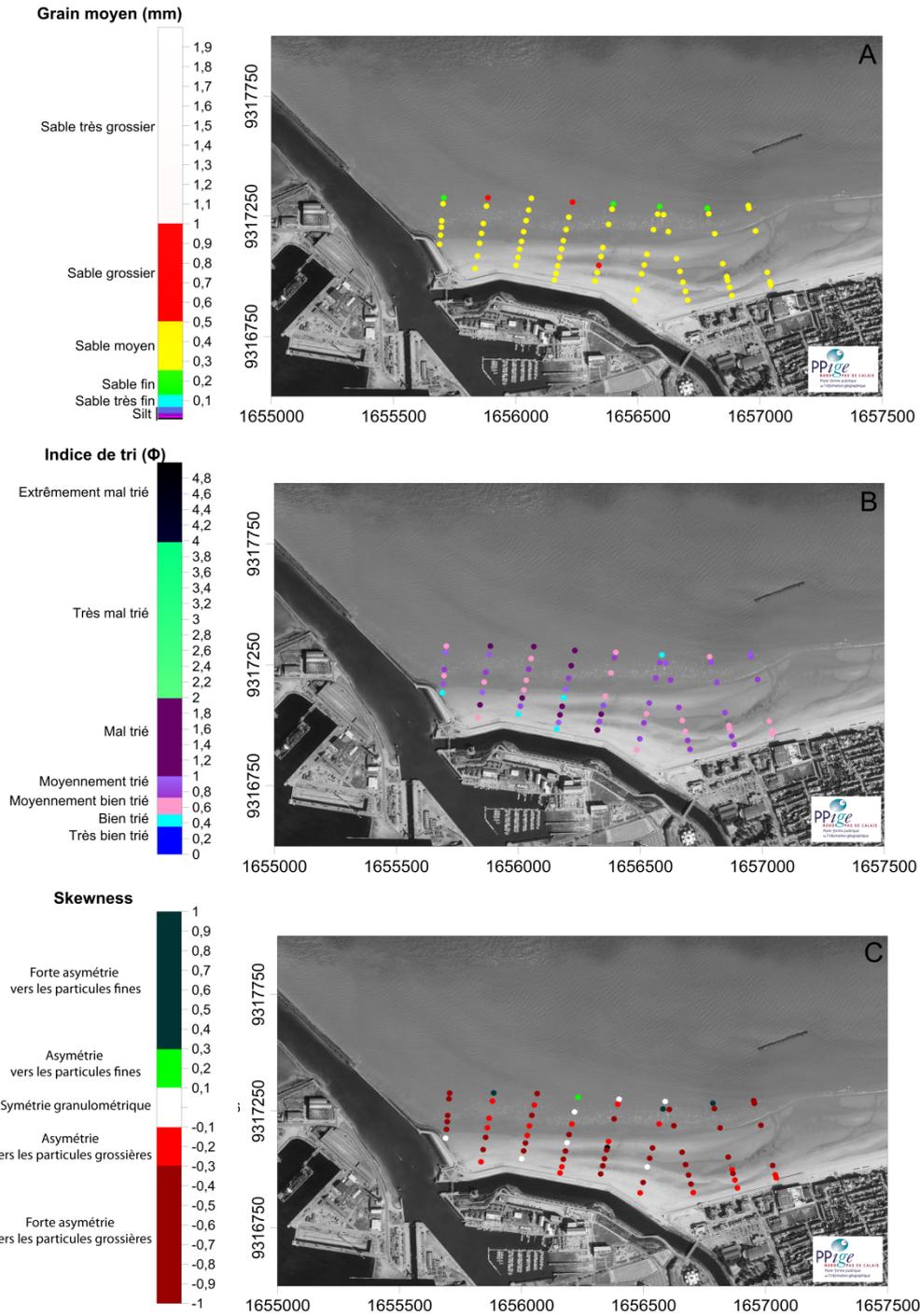
Figure VI.36 Variations morphologiques et roses des vents à la côte associées au cours de la deuxième année du rechargement pour les périodes comprises entre mars et mi-septembre 2015 (A) et entre mi-septembre 2015 et mi-février 2016 (B) et puissances de vagues au large combinées aux marées hautes à la côte dont les niveaux d'eau sont ≥ à 6,05 m CM (C) ou compris entre 5,00 m et 6,05 m CM (D)

En réponse à ces conditions météo-marines agitées, des variations morphologiques plus significatives ont été observées au niveau du rechargement. Les vents plus forts sont à l'origine d'une déflation éolienne sur la plateforme supratidale avec un abaissement du niveau de certains secteurs de l'ordre de -0,20 m. Les zones d'érosion localisées sur une partie des rangées de filets brise-vents ainsi que sur deux des trois épis correspondent à un nettoyage des filets qui ont été vidés en novembre 2015. L'analyse de l'évolution de la zone intertidale montre que la situation dans le secteur 1 reste assez similaire à ce qui a été mis en évidence au cours des périodes précédentes (Figure VI.36 B). L'érosion la plus sévère est encore une fois localisée sur la portion de plage à la jonction entre la plateforme supratidale et la jetée Est. L'érosion s'est soldée par une baisse du niveau de la plage de -2,5 m. Ce phénomène a entraîné un recul du rebord de la plateforme de 65 m. Plus bas sur l'estran, un abaissement du niveau de la plage de -0,5 m à -1 m a été mesuré. Cette érosion du secteur 1 représente une perte de $-73\,000\text{ m}^3$ ($-14\,600\text{ m}^3/\text{mois}$). Dans le secteur 2, les zones d'accrétion et d'érosion longitudinales sont moins nombreuses que lors de la période 3. L'analyse des profils a montré que les barres ont en effet été lissées et les bâches comblées au cours de l'hiver 2015-2016, ce qui explique la grande zone homogène d'accrétion due à l'étalement du sable sur l'estran. Sur la partie la plus à l'est du secteur 2 ainsi que sur le secteur 3, des successions de zones d'accrétion et d'érosion sont encore bien visibles, traduisant les mouvements des barres au cours de cette période agitée. En plus de ces mouvements sédimentaires, le secteur 2 bénéficie d'un bilan volumétrique positif de $+11\,000\text{ m}^3$ ($+2\,200\text{ m}^3/\text{mois}$) tout comme le secteur 3 où l'engraissement atteint $+12\,000\text{ m}^3$ ($+2\,400\text{ m}^3/\text{mois}$). Dans les secteurs 4 et 5 en aval les zones d'érosion restent dominantes en superficie, ce qui explique les bilans sédimentaires négatifs. L'emprise totale présente un bilan négatif de $-85\,000\text{ m}^3$ ($-17\,000\text{ m}^3/\text{mois}$) (Figure VI.36 B).

4.2.3. Analyse de la granulométrie de surface en juin 2016

Le levé granulométrique n'a pas pu être effectué dès la fin de la deuxième année, mais en début de troisième en juin 2016 exactement. Ce levé présente de plus l'inconvénient d'avoir été effectué lors d'une marée de mortes-eaux d'où la surface échantillonnée restreinte.

D'un point de vue général, c'est un sable moyen qui caractérise le site comme en mars 2015, que ce soit sur l'estran ou sur la plateforme (Figure VI.37 A). L'indice de tri des échantillons de l'estran en juin 2016 ne révèle pas de tendance générale et présente des sables moyennement bien triés à mal triés. Concernant l'indice d'asymétrie, la majorité des sables échantillonnés se caractérise par une asymétrie vers les particules grossières.



Spodar, 2018

Figure VI.37 Caractérisation du grain moyen (A), de l'indice de tri (B) et de l'indice d'asymétrie (C) sur le secteur du rechargement en juin 2016

4.2.4. Bilan de l'évolution de la deuxième année du rechargement de plage

Les variations morphologiques qui ont caractérisé le site entre mars 2014 et février 2015 ont de nouveau été observées au cours de cette deuxième année. En effet, une variabilité spatiale dans l'évolution du rechargement de plage est clairement identifiable, avec un secteur ouest soumis à l'érosion, tandis que le secteur est se distingue par une zone d'accumulation conséquente dans la partie inférieure de l'estran. Il convient de préciser que ce secteur est également impacté par

l'érosion mais uniquement sur le haut de plage comme l'a montré l'analyse des profils ou des MNT. Ce comportement des profils, avec une érosion en haut de plage et un engraissement en bas de plage entraîne un adoucissement progressif de la pente dans le secteur est. De plus, la formation de barres et de bâches a été observé dans ce secteur est, témoin d'une adaptation aux conditions hydrodynamiques de la région, contrairement au secteur ouest où l'estran reste très rectiligne et en érosion constante.

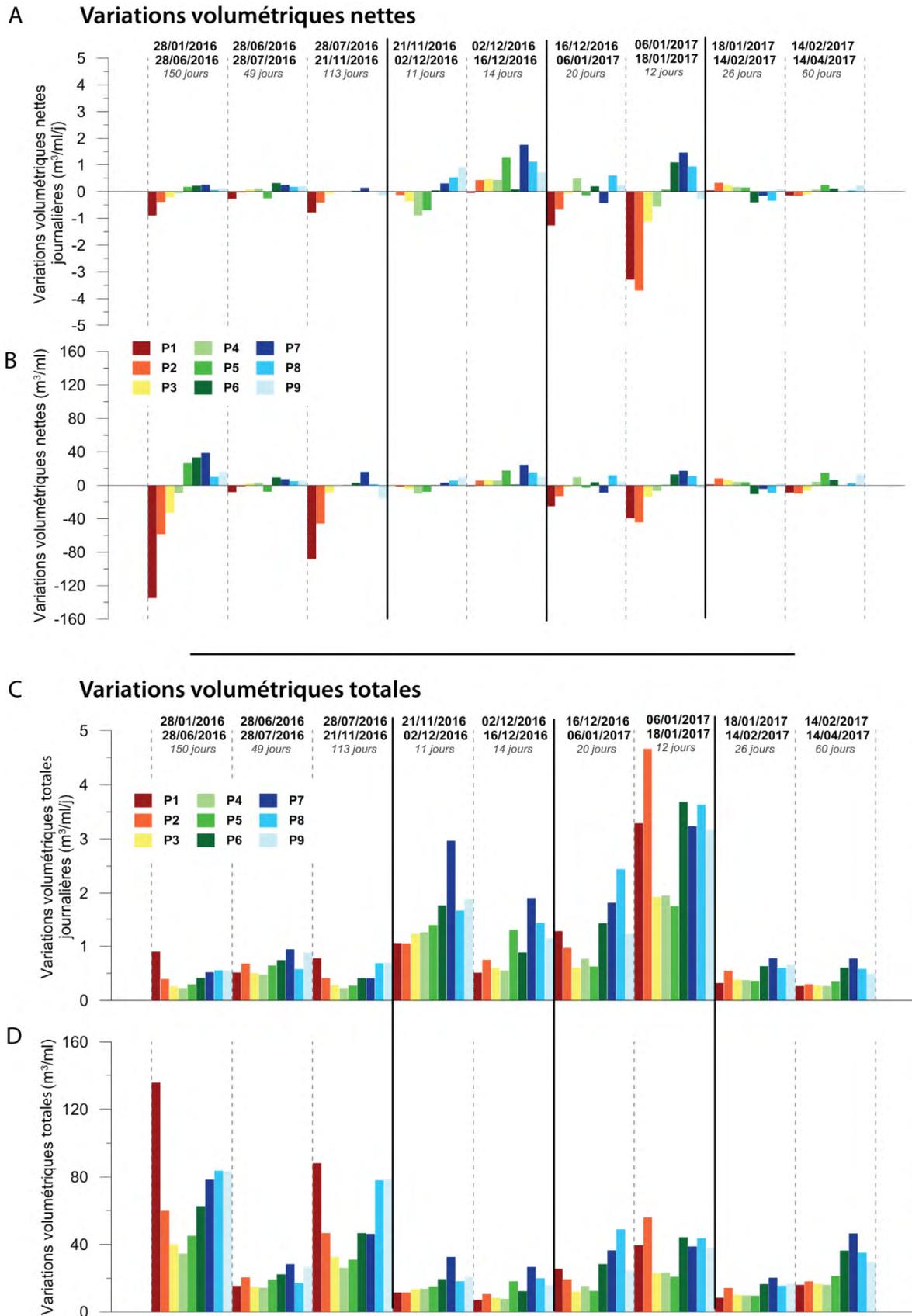
Autre point notable à retenir de l'analyse des profils topographiques, la réponse plus marquée de l'estran lors de périodes énergétiques a pu être mesurée (notamment entre le 13/11/2015 et le 23/11/2015, ainsi qu'entre le 13/01/2016 et le 28/01/2016). Cette réponse se solde par un abaissement de l'estran dans le secteur ouest et un lissage du système barres-bâches dans le secteur est.

Cette deuxième année a également permis, grâce à des levés topographiques plus étendus, de constater une redistribution du sable au-delà de la zone rechargée. Le premier secteur en aval (secteur 3 dans l'analyse) se solde par un bilan volumétrique positif quelle que soit la période. De larges zones d'accumulation caractérisent également le site, laissant supposer un transfert progressif du sable en provenance du rechargement. En revanche, les secteurs les plus en aval présentent une perte de sable. Il est possible que le sable issu du rechargement n'ait pas encore atteint ces secteurs de plage situés à environ 1,5 km du rechargement.

4.3. Troisième année du rechargement de plage

4.3.1. Réponse morphologique du profil de plage

Le suivi topographique s'étend au-delà de la troisième année du rechargement, jusque mi-avril 2017 exactement. Encore une fois, un découpage par sous-périodes a été choisi en fonction de la réponse morphologique des profils. On distingue en effet quatre sous-périodes caractérisées par des variations volumétriques différentes (Figure VI.38).



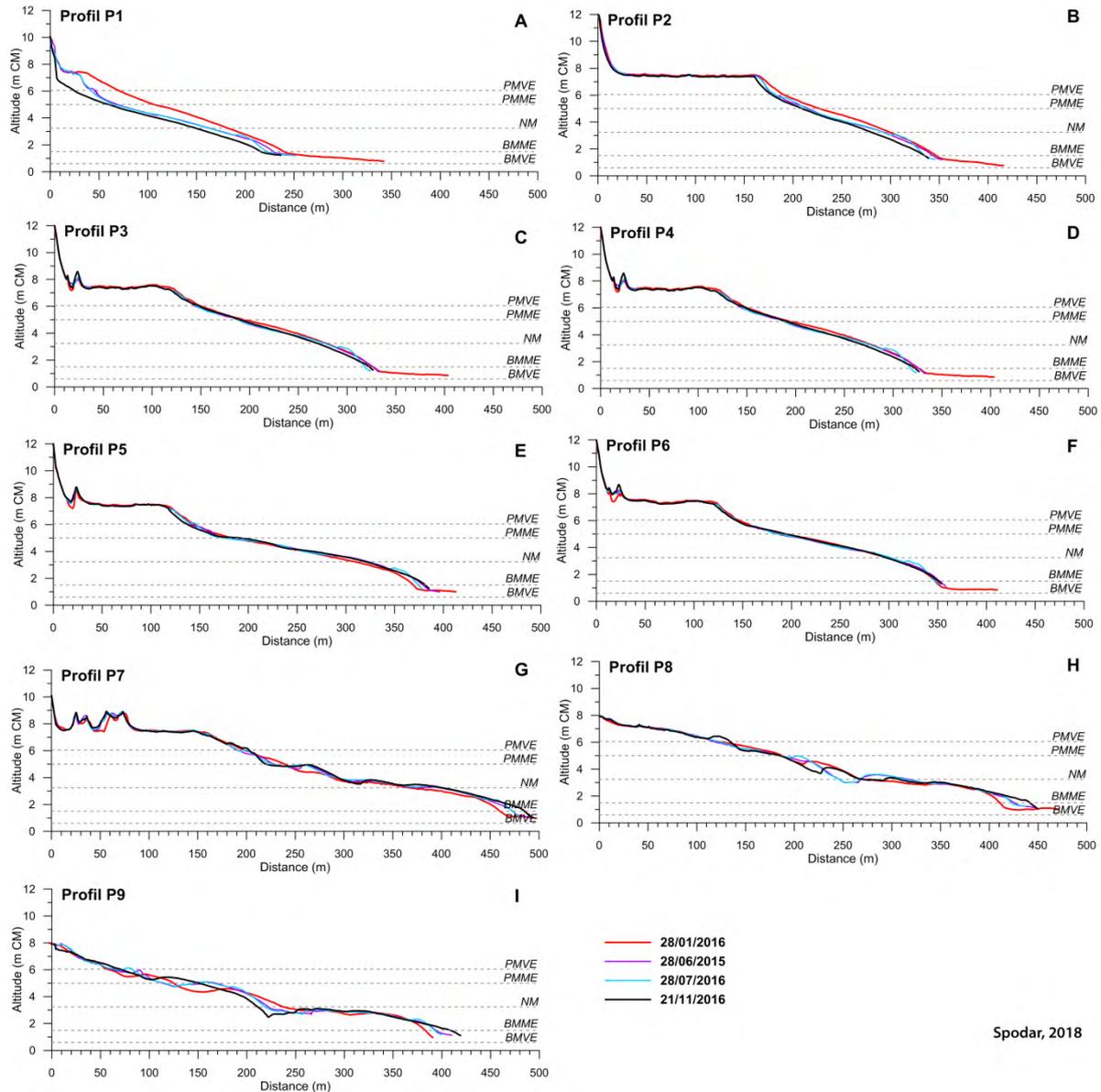
Spodar, 2018

Figure VI.38 Variations volumétriques nettes par jours (A) et sur toute la sous-période (B) et variations volumétriques totales par jours (C) et sur toute la sous-période (D) au cours de la troisième année du rechargement (2016-2017)

4.3.1.1 Fin janvier à mi-novembre 2016

Entre fin janvier et mi-novembre 2016, les trois levés topographiques disponibles peuvent être traités conjointement étant donné que les mêmes évolutions morphologiques ont pu être observées, à savoir une érosion dans le secteur ouest et un engraissement dans le secteur est (Figure VI.39).

Entre le 28.01.2016 et le 28.06.2016, une érosion caractérise les profils P1 et P2, avec des pertes de $-135 \text{ m}^3/\text{ml}$ et $-59 \text{ m}^3/\text{ml}$ respectivement. Par jour, ce rythme d'évolution correspond à $-0,90 \text{ m}^3/\text{ml}/\text{j}$ pour le P1 et $-0,39 \text{ m}^3/\text{ml}/\text{j}$ pour le P2.



Spodar, 2018

Figure VI.39 Evolution des profils transversaux de la partie supra et intertidale entre fin janvier et mi-novembre 2016

Sur le plan morphologique, ces pertes se traduisent sur le P1 par un abaissement du haut de plage qui atteint $-1,20 \text{ m}$. La largeur de la plateforme supratidale, déjà bien amincie à l'issue de la deuxième année, a encore diminué, avec un recul de 15 m . L'ensemble de l'estran a subi un démaigrissement, mais l'érosion s'atténue vers le bas de plage, pour atteindre $-0,20 \text{ m}$ au niveau des BMME. Sur le

profil P2, le rebord de la plateforme n'a pas reculé, mais l'ensemble de l'estran a subi un abaissement qui varie entre -0,20 m à -0,50 m. L'estran au niveau des profils P3 et P4 est beaucoup plus stable. A partir du P5 et jusqu'au P9, c'est un bilan volumétrique positif qui a pu être calculé, oscillant entre +10,35 m³/ml et +38,64 m³/ml. A noter que ce ne sont pas les profils les plus à l'est qui présentent le bilan positif le plus important mais les profils P6 et P7. Sur le plan morphologique, du P5 au P7, il est possible de constater un engraissement sur la partie de l'estran comprise entre les niveaux NM et BMME-0,5m de +0,40 m sur le P5, +0,80 m sur le P6 et +0,70 m sur le P7. Dans la partie la plus à l'est du site (P8 et P9), les barres déjà présentes fin janvier 2016 au-dessus du niveau moyen se sont développées et ont migré vers le haut de plage.

Entre le 28.06.2016-28.07.2016, les variations volumétriques sont minimales (de -0,27 m³/ml/j pour le P1 et -0,04 m³/ml/j pour le P2), en réponse à des conditions météo-marines très calmes, avec 94% de vents à la côte < 8m/s et 5% seulement de vagues ≥ 1m.

Au cours du long intervalle de temps suivant, de fin juillet à mi-novembre 2016, l'érosion dans le secteur ouest (P1 et P2), est proche de celle du début d'année avec -0,78 m³/ml/j et -0,41 m³/ml/j respectivement. Le P1 a perdu -88 m³/ml, se traduisant par un abaissement du niveau de l'estran particulièrement notable en haut de plage. La plateforme supratidale a complètement disparu et le niveau des PMVE atteint quasiment la jetée Est sur laquelle se localise le point d'origine de ce profil (Figure VI.39-A). Le reste de l'estran a subi un abaissement compris entre -0,20 m en milieu de plage pour atteindre -0,50 m au niveau des BMME. Le profil P2 avec -46 m³/ml présente un abaissement de son estran de -0,30 m en haut de plage et de -0,60 m au maximum en bas de plage. Aucun recul du rebord de la plateforme supratidale n'a néanmoins été constaté (Figure 39-B). La partie centrale du site, du P3 au P5, est restée très stable. A l'est en revanche, les variations morphologiques se caractérisent par un important remaniement sédimentaire comme le montrent les variations volumétriques totales qui atteignent 79 m³/ml (Figure 38).

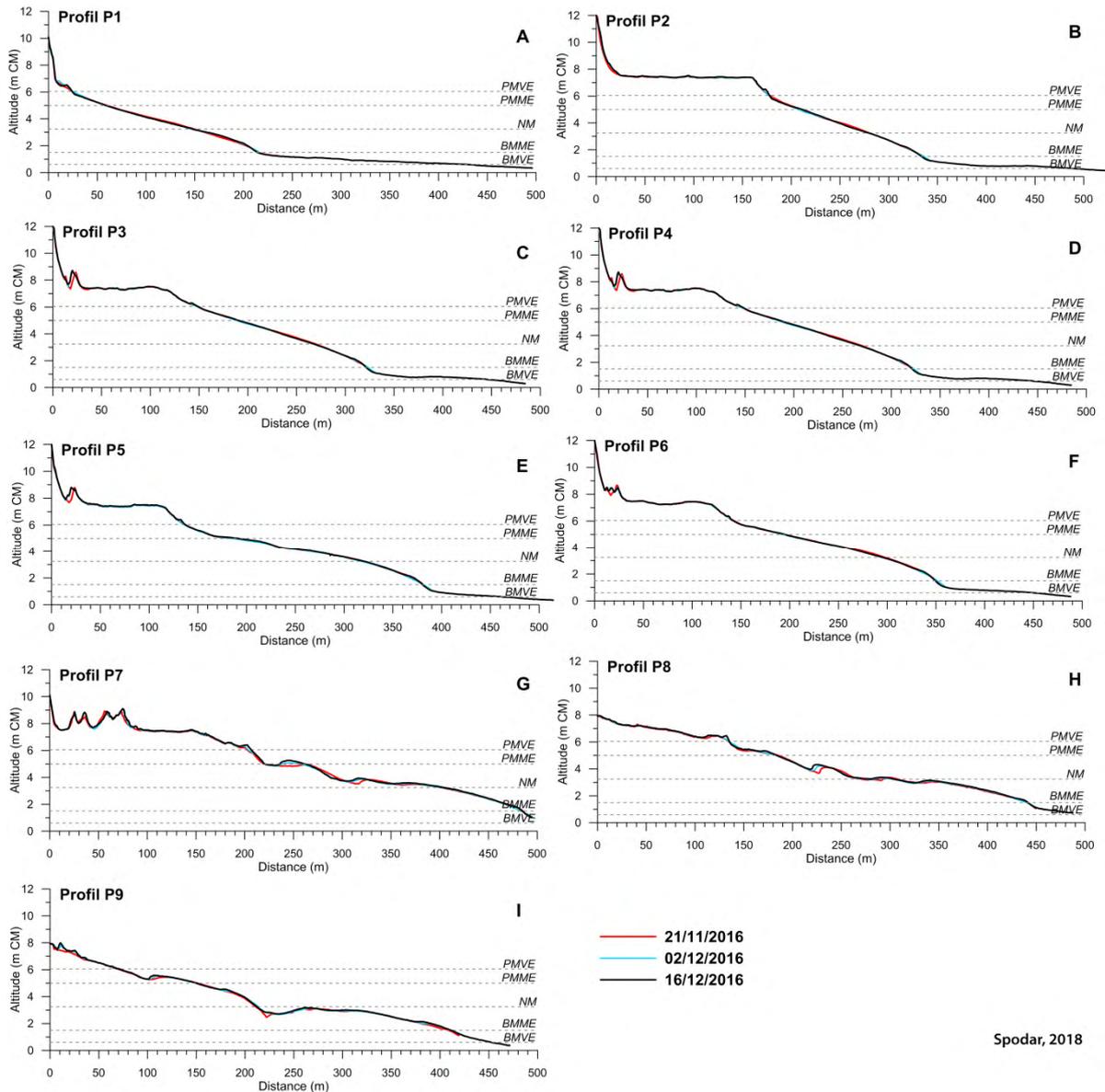
4.3.1.2 Mi-novembre à mi-décembre 2016

De mi-novembre à mi-décembre 2016, une grande stabilité caractérise l'estran dans le secteur ouest et central du site. Dans le détail, entre le 21.11.2016 et le 02.12.2016, un coup de vent de secteur NE s'est produit les 24 et 25 novembre 2016. Néanmoins on constate une absence de variations morphologiques notables sur les profils de plage quelle que soit leur localisation suite à cet événement (Figure VI.40). Les zones d'érosion ou d'accrétion restent infimes. A noter que ces petites périodes d'à peine quinze jours donnent une impression de variations volumétriques positives importantes une fois pondérées par le nombre de jours alors que les volumes à l'issue des sous-périodes en question sont infimes (Figure VI.38 A).

4.3.1.3 Mi-décembre 2016 à mi-janvier 2017

A partir de mi-décembre, on retrouve l'évolution du site la plus couramment observée avec le secteur ouest caractérisé par une érosion notable.

Au cours de la sous-période comprise entre le 16.12.2016 et le 06.01.2017, les calculs de volumes montrent des bilans volumétriques négatifs du P1 au P3, avec des valeurs qui s'atténuent d'ouest en est avec -25,39 m³/ml sur le P1 à -1,43 m³/ml sur le P3 (Figure VI.41).



Spodar, 2018

Figure VI.40 Evolution des profils transversaux de la partie supra et intertidale entre mi-novembre et mi-décembre 2016

Une érosion verticale de -0,10 m en moyenne a été mesurée et de -0,50 m au maximum en haut de plage sur le P1. Sur le P2, seule la portion de plage au-dessus du niveau des PMVE a été érodée (-0,40 m), le reste de l'estran ne présente pas de variations. L'estran sur les profils P3 à P5 est également resté très stable (Figure VI.41 C à E). Du P4 au P9, les variations volumétriques nettes oscillent entre des bilans positifs et négatifs compris entre -8,65 m³/ml à + 12,07 m³/ml. Sur les profils le plus à l'est, du P6 au P9 (Figure VI.41 F à I), les variations volumétriques totales sont assez notables (de 28,52 m³/ml à 48,95 m³/m) et reflètent bien les changements qui se sont produits avec un important aplanissement des barres dans la partie supérieure de l'estran sur le P6 et P7, tandis qu'un lissage de l'estran s'est produit sur le P8. L'analyse des conditions météorologiques permet cependant de caractériser la période comme étant assez calme (86 % de vents à la côte < 8 m/s, pas de vents ≥ 12 m/s).

La période comprise entre le 06/01/2017 et le 18/01/2017 englobe le passage de la tempête Egon. Cette tempête a traversé le nord de la France les 12 et 13 janvier 2017. A la côte, les vents ont fortement forcé en fin de journée le 12/01/2017 pour passer en l'espace de 3 h de 4,1 m/s à 20h à 20,4 m/s à 22 :00. Les vents ≥ 8 m/s ont persisté jusqu'au 14/01/2017 à 6 :00. La moyenne des vents sur cette période s'élève à 12,45 m/s. La vitesse maximale atteint 20,4 m/s le 12/01/2017 à 22 :00 et les vitesses de vent sont restées ≥ 16 m/s pendant trois heures. Lors de cet événement les vents provenaient du secteur NO.

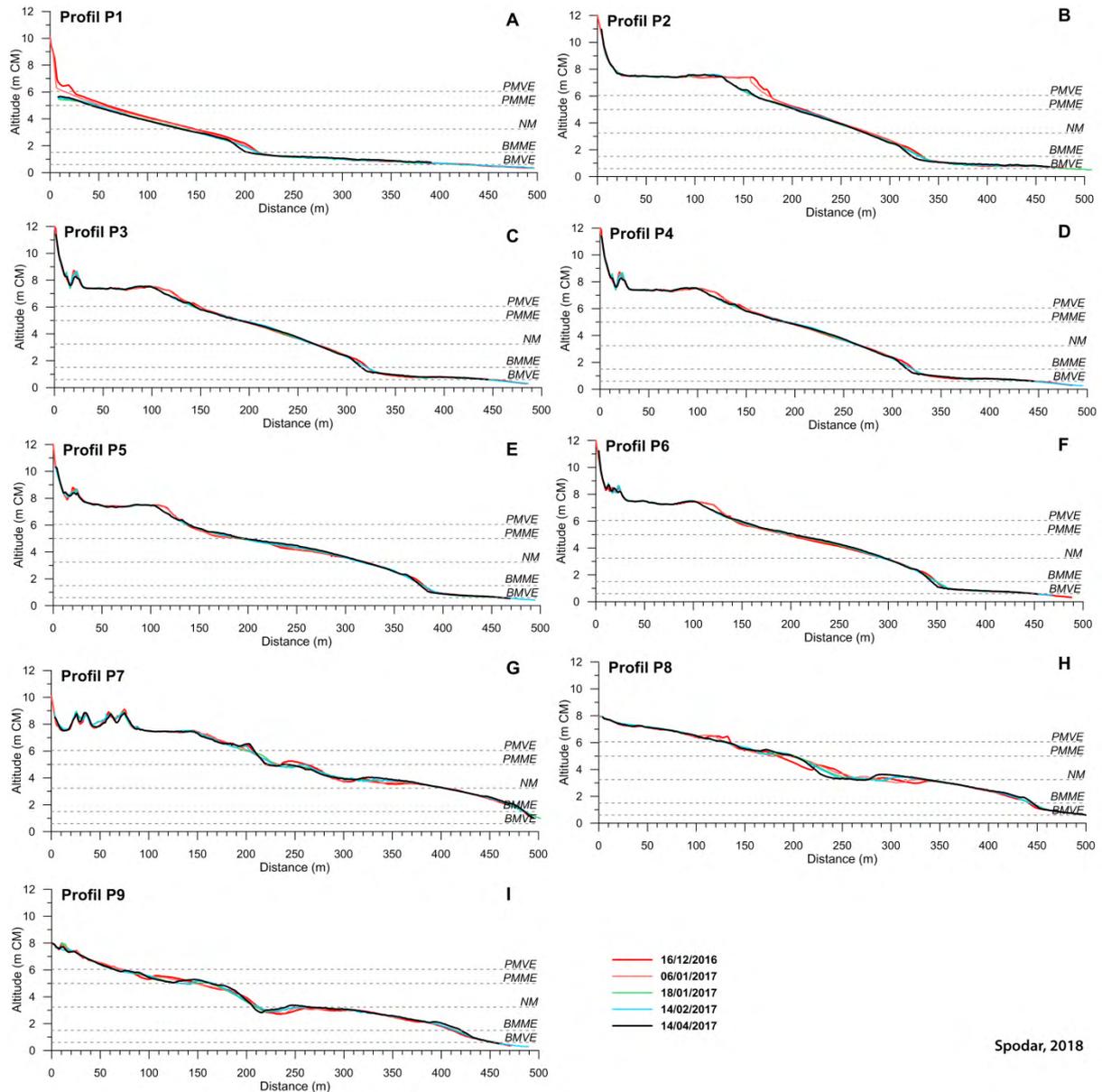


Figure VI.41 Evolution des profils transversaux de la partie supra et intertidale entre mi-décembre 2016 et mi-février 2017

Associées à cette tempête, d'importantes surcotes ont pu être enregistrées. Le pic de l'événement dans la nuit du 12 au 13 coïncide de plus avec une marée haute de vives-eaux (coefficient 99), d'où un niveau d'eau qui a atteint + 6,74 m CM contre les + 6,06 m CM théoriques, soit une surcote de 0,68 m. Dans la nuit du 13 au 14, des niveaux d'eau encore plus élevés ont été atteints avec des enregistrements de +6,83 m CM le 14/01/2017 à 00 :00 et même 6,93 m CM une

heure après. Des surcotes de 0,9 m et 0,84 m respectivement se sont produites. Les photos prises à marée haute à 13h35 le 13/01/2017 (niveau d'eau mesuré de 6,40 m CM) illustrent l'action de la houle avec le run-up visible sur la plateforme supratidale (Figure VI.42). A noter que les vagues au large n'ont pas dépassé les 2,5 m. Des vagues au large dont la puissance a frôlé $35 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ coïncident de plus avec le plus haut niveau d'eau atteint soit +6,83 m CM. En réponse à cette tempête, les variations volumétriques montrent une sévère perte de sable le long des profils P1 et P2 (de $-39,53 \text{ m}^3/\text{ml}$ et $-44,42 \text{ m}^3/\text{ml}$ respectivement) (Figure VI.38). Le bilan négatif s'atténue sur les P3 et P4. L'ensemble du site n'a pas réagi de la même façon face à cet événement comme le montrent les variations volumétriques des profils les plus à l'est qui deviennent positives et atteignent jusque $+17,57 \text{ m}^3/\text{ml}$ (P7). Seul le P9 ne suit pas cette tendance avec une perte de sable de $-3,24 \text{ m}^3/\text{ml}$ comprise dans la marge d'erreur. A noter que l'analyse des variations volumétriques journalières montre que cette période a été la plus érosive pour les profils à l'ouest (P1 à P3) avec des pertes qui ont atteint $-3,70 \text{ m}^3/\text{j}$ sur le P2.



Figure VI.42 Photographies réalisées pendant la tempête Egon à marée haute à 13h35 le 13/01/2017 sur le site de la digue des Alliés (secteur ouest ~P1 et P2)

Cette tempête s'est soldée par un abaissement du niveau de l'estran d'environ $-0,15 \text{ m}$ entre les PMME et les BMME- $0,5 \text{ m}$ au niveau du P1. Au-dessus du niveau des PMME, le haut de plage a subi un abaissement plus prononcé qui atteint $-0,70 \text{ m}$ (Figure VI.41 A).

Plus à l'est, le rebord de la plateforme a reculé sous l'action des vagues et des hauts niveaux d'eau sur une grande partie de son linéaire (du P2 au P6). Un recul marqué de 30 m a été observé le long du profil P2 puis s'est atténué vers l'est. Sur le P6, ce recul de la plateforme ne représente qu'une dizaine de mètres à peine. La portion de plage comprise entre le rebord de la plateforme et le niveau des PMVE le long de ces profils a été érodée, avec encore une fois une perte de sable qui diminue du P2, où l'érosion atteint $-1,20 \text{ m}$, au P6, avec une baisse de $-0,50 \text{ m}$ du niveau de sable. Plus à l'est, du P6 au P9, l'estran a subi un important lissage avec un aplanissement des barres et un comblement des baches (Figure VI.41 F à I). Sur les deux profils les plus à l'est, les barres dans la partie supérieure de l'estran restent identifiables.

4.3.1.4 Mi-janvier à mi-avril 2017

La période calme qui a suivi le passage de la tempête Egon a fait l'objet de deux suivis topographiques effectués le 14/02/2017 et le 14/04/2017. Globalement assez peu de variations morphologiques se sont produites au cours de cette période comme l'illustre la Figure VI.38.

Entre le 18/01/2017 et le 14/02/2017, les profils dans la partie ouest du site (P1 à P5) sont caractérisés par une grande stabilité morphologique sur l'ensemble de l'estran et de la partie supratidale (Figure VI.41). Plus à l'est, du P6 au P8, la partie inférieure de l'estran entre les niveaux NM et BMME-0,5m est restée très stable, tandis que dans la partie supérieure (> NM), il est possible de constater que les barres ont pris une forme plus saillante (P6 et P7) et/ou ont migré vers le haut de plage (P7 et P8) (Figure VI.41 G et H). Ces évolutions morphologiques se soldent néanmoins par des variations volumétriques négatives de -10,44 m³/ml à -4,23 m³/ml. Une tendance inhabituelle se dégage alors avec une perte de sable principalement localisée sur le secteur est, du P6 au P8, tandis que les profils à l'ouest se caractérisent par des volumes positifs. Cette évolution est à relier à des vents à la côte, comme au large, de secteur SE et E.

Du 14/02/2017 au 14/04/2017, peu de remarques peuvent être faites à l'issue de cette sous-période. Les variations volumétriques restent minimales. Sur le plan morphologique on note une grande stabilité de l'ensemble du site (Figure VI.41).

4.3.1.5 Bilan de l'évolution des profils au cours de la troisième année

La synthèse des variations volumétriques par profils au cours de cette troisième année met en évidence la baisse de l'intensité de l'érosion d'ouest en est pour passer de -304 m³/ml le long du P1 à -52 m³/ml le long du P3. La tendance s'inverse complètement à partir du P4 où les volumes deviennent positifs et atteignent au maximum + 96 m³/ml sur le P7 (Figure VI.43). Sur les deux profils les plus à l'ouest, un abaissement du haut de plage supérieur à 2 m pu être mesuré à l'issue de cette année (Figure VI.44 A -B). Une érosion totale de toute la plateforme le long du P1 a également été observée. Les niveaux d'eau lors des marées hautes peuvent désormais atteindre l'ouvrage. A partir du profil P3 on observe progressivement une modification des variations morphologiques, avec une érosion moins intense comme pour le P4. A partir du P5 et P6, malgré l'érosion du haut de plage, on remarque que l'accumulation est de plus en plus importante sur le reste de l'estran (Figure VI.44 E-F). Le long des profils P7 à P9 les zones d'accumulation sableuse dans la partie inférieure de l'estran sont de plus en plus nettes.

Au cours de cette troisième année, la formation de barres et de bâches dans le secteur est du rechargement a de nouveau été observée, avec un développement des barres lors de périodes calmes ainsi que leur migration vers le haut de page tandis qu'un lissage de ces dernières a été constaté lors de période agitée. Ce remaniement du stock sableux dans le secteur est du rechargement tend à renforcer l'opposition avec le secteur ouest.

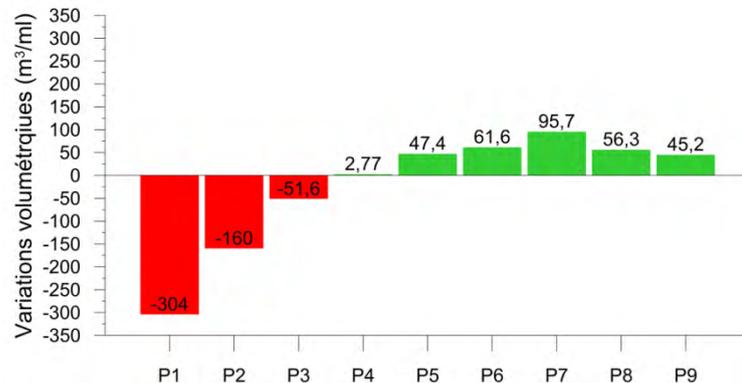
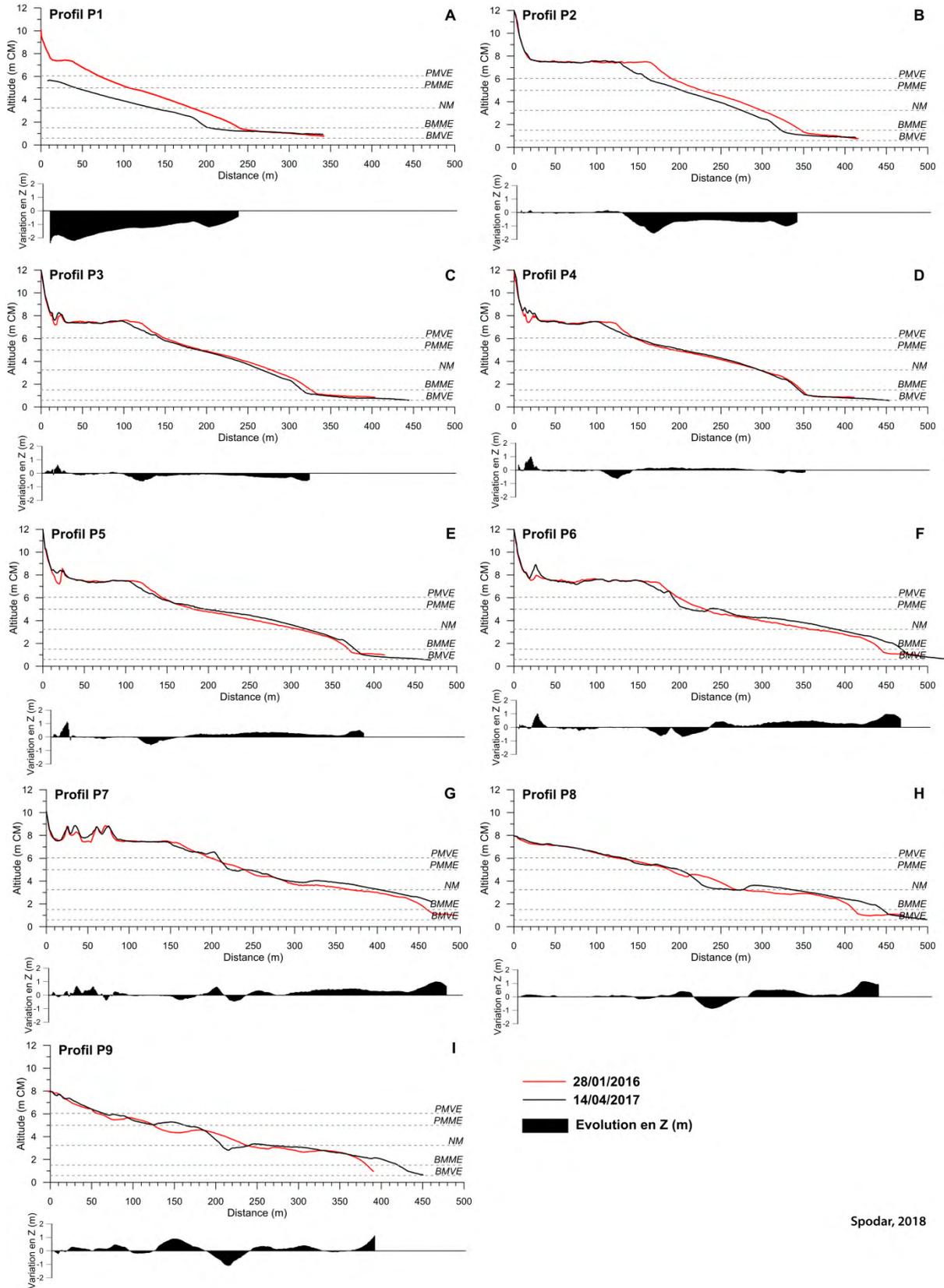


Figure VI.43 Bilan de l'évolution des profils au cours de la troisième année du rechargement entre les deux dates extrêmes, fin janvier 2016 et mi-avril 2017



Spodar, 2018

Figure VI.44 Evolution morphologique à l'issue de la troisième année de suivi des neuf profils de plage (28/01/2016 - 14/04/2017)

4.3.2. Analyse des MNT et bilans sédimentaires

4.3.2.1 Mi-février à mi-novembre 2016

Cette période a la particularité de s'étendre sur neuf mois, ce qui en fait la période la plus longue entre deux levés topographiques effectués sur une large couverture surfacique. Les variations morphologiques au niveau de la zone du rechargement restent sensiblement les mêmes que ce qui a pu être observé précédemment (Figure VI.45 A). Le secteur ouest est néanmoins marqué par une érosion relativement forte qui atteint $- 50\,000\text{ m}^3$ ($-5\,600/\text{mois}$). Une partie de l'estran encore une fois très étendue est touchée par cette baisse du niveau de la plage. Au cours de cette période, la surface de la plateforme supratidale n'a pas bougé. Dans le secteur 2, la tendance est toujours à l'engraissement avec un bilan sédimentaire positif de $+ 21\,000\text{ m}^3$ ($+ 2\,300\text{ m}^3/\text{mois}$). L'estran présente encore une fois les variations morphologiques liées au déplacement de barres et bâches. Les secteurs 3, 4 et 5 enregistrent également un bilan sédimentaire positif mais décroissant d'ouest en est. Ces trois secteurs se caractérisent par une migration des barres sur l'estran. L'emprise complète se caractérise par un bilan sédimentaire positif de $+13\,000\text{ m}^3$ ($+ 1\,400\text{ m}^3/\text{m}^2$).

L'analyse des vents à Dunkerque (Figure VI.45 A) montre un pourcentage non négligeable de vents moyens et forts $\geq 8\text{ m/s}$ avec 12,9% des mesures, mais seulement 0,75% des vents sont $\geq 12\text{ m/s}$. Les vents proviennent majoritairement du secteur SO avec 37% des observations. En sélectionnant uniquement les vents moyens et forts $\geq 8\text{ m/s}$, c'est la composante NE qui domine avec 37 % des enregistrements suivie par la composante NO avec une fréquence de 32%. Les vents les plus forts ($>12\text{ m/s}$), proviennent majoritairement du secteur NO (39,6 %) puis NE (35,4%).

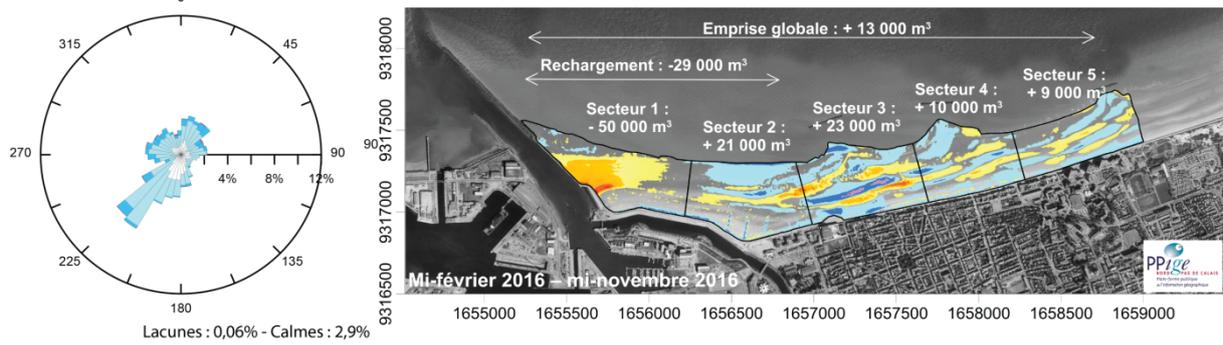
4.3.2.2 Mi-novembre 2016 à mai 2017

Cette période s'étend de l'automne 2016 jusqu'au printemps 2017 et couvre six mois et demi. L'analyse des conditions météo-marines montre qu'à la côte les vents moyens et forts $\geq 8\text{ m/s}$ représentent 13,5 % des enregistrements, les vents supérieurs à 12 m/s, représentent quant à eux 1,6 % des observations (Figure VI.45 B). La rose des vents sur la Figure VI.45 B montre que les vents de secteur sud sont prédominants durant cette période, les vents $\geq 12\text{ m/s}$ provenant principalement du secteur NO. La conjonction de houles puissantes au large et de hauts niveaux d'eau supérieurs à 6,05 m CM est peu fréquente. Seuls des enregistrements entre 30 et 40 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ combinées à de tels niveaux d'eau ont pu être mesurés lors des mois de janvier et mars 2017.

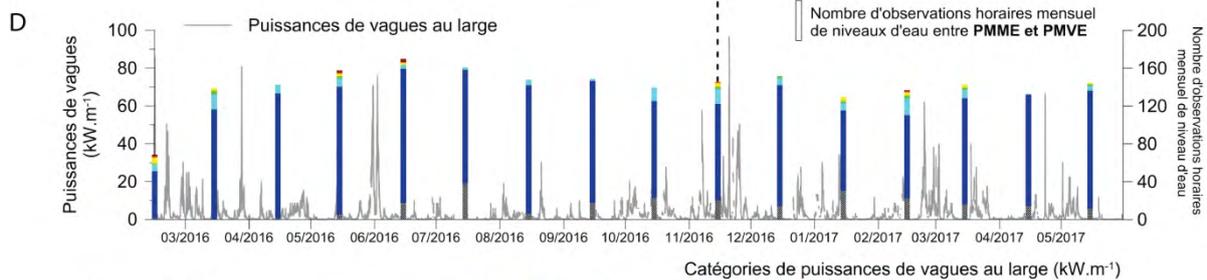
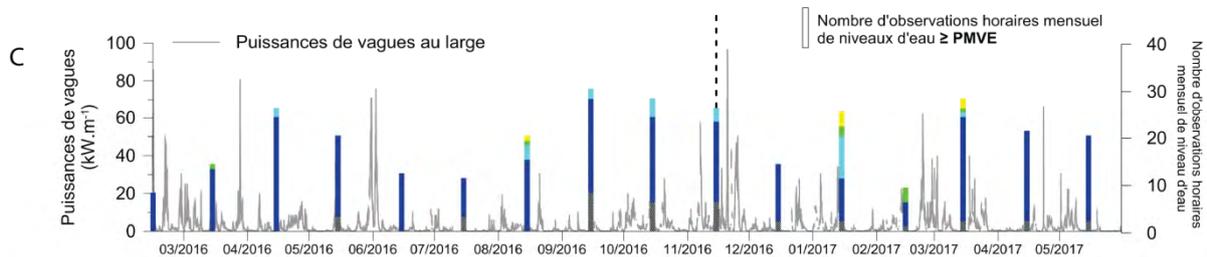
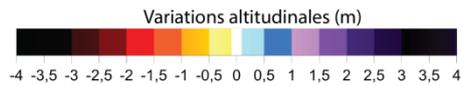
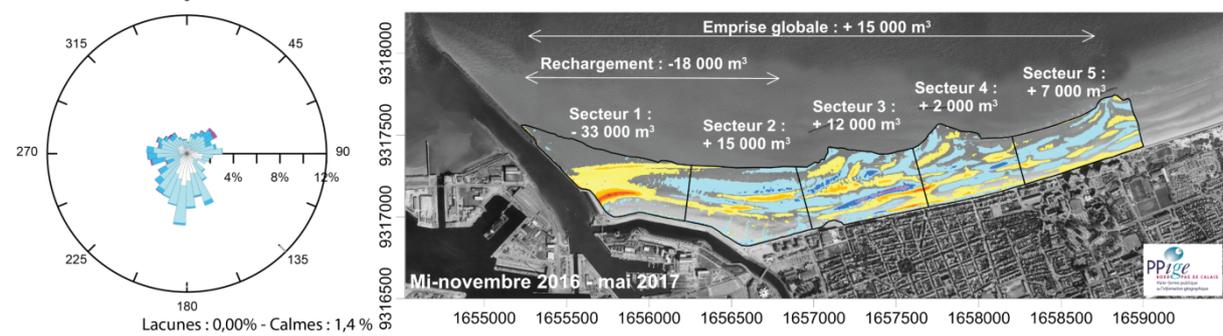
Les mêmes variations morphologiques décrites lors des périodes précédentes peuvent être mentionnées. L'altitude de la plateforme supratidale est restée stable. Seul un recul de son rebord a pu être mesuré. L'érosion la plus sévère se concentre dans le secteur ouest au contact entre la plateforme et la partie intertidale et atteint près de - 2m. Le reste de l'estran a subi un abaissement assez homogène de -0,50 m, ce qui se solde par une perte de $-33\,000\text{ m}^3$ dans ce secteur 1 (Figure VI.45 B). Dans le secteur 2, c'est un remaniement de l'estran qui peut être constaté avec une succession de zones longitudinales d'accrétion de +1 m au maximum et d'érosion d'environ -1 m également. Des variations morphologiques semblent correspondre aux migrations de barres et de bâches précédemment analysées le long des profils transversaux. Le secteur 2 conserve un bilan sédimentaire positif de $+15\,000\text{ m}^3$. Malgré ce bilan positif, la zone du rechargement (secteur 1 et 2) reste en déficit sédimentaire au cours de cette période.

L'analyse des secteurs en aval du rechargement montre qu'un engraissement caractérise les secteurs 3, 4 et 5. Le secteur 3 a gagné environ $+ 12\,000\text{ m}^3$ et dans les secteurs 4 et 5 des bilans sédimentaires positifs de $+2\,000\text{ m}^3$ et $+ 7\,000\text{ m}^3$ ont été calculés.

A Mi-février 2016 - mi-novembre 2016



B Mi-novembre 2016 - mai 2017



Spodar, 2018



Figure VI.45 Variations morphologiques au cours de la troisième (et début de la quatrième) année du rechargement selon deux périodes (mi-février 2016 à mi-novembre 2016 et mi-novembre 2016 à mai 2017), roses des vents à la côte et puissances de vagues associées

4.3.3. Analyse de la granulométrie de surface en février 2017

L'échantillonnage de la granulométrie de surface en février 2017 (Figure VI.46) met en évidence que le bas de plage (< BMME) se caractérise par un sable fin et bien trié. L'indice d'asymétrie indique également que la distribution des échantillons est symétrique. Le bas de plage se distingue très nettement du reste du site, dont la répartition des différents paramètres est beaucoup moins homogène.

La granulo-décroissance observable du haut vers le bas de plage est caractéristique des plages macrotidales (Stépanian, 2002). En effet, l'action des vagues varient selon le cycle de marée. L'énergie des vagues diminuent avec la marée descendante, d'où une baisse de l'agitation lors des basses mers et un dépôt des particules en suspension. Le milieu de plage en février 2017, entre les niveaux PMME et BMME, se caractérise par un sable moyen, comme en mars 2015. Les échantillons montrent une prépondérance des particules fines et donc une asymétrie vers les particules grossières mais l'analyse de la répartition de l'indice de tri démontre que les sables sont moyennement à mal triés (Figure VI.46). Il est possible que l'agitation auquel est soumis ce secteur de l'estran, engendre un export des particules les plus fines. La plateforme supratidale se caractérise également un sable moyen. L'indice de tri très variable, oscillant entre des sables bien triés à mal triés ne permet pas de dégager clairement une tendance générale. L'indice d'asymétrie est également très variable. Ces observations peuvent s'expliquer par le vannage éolien qui a probablement exporté les particules les plus fines pour laisser les particules les plus grossières et les débris coquillers. Des zones d'accumulation éolienne peuvent être également présentes.

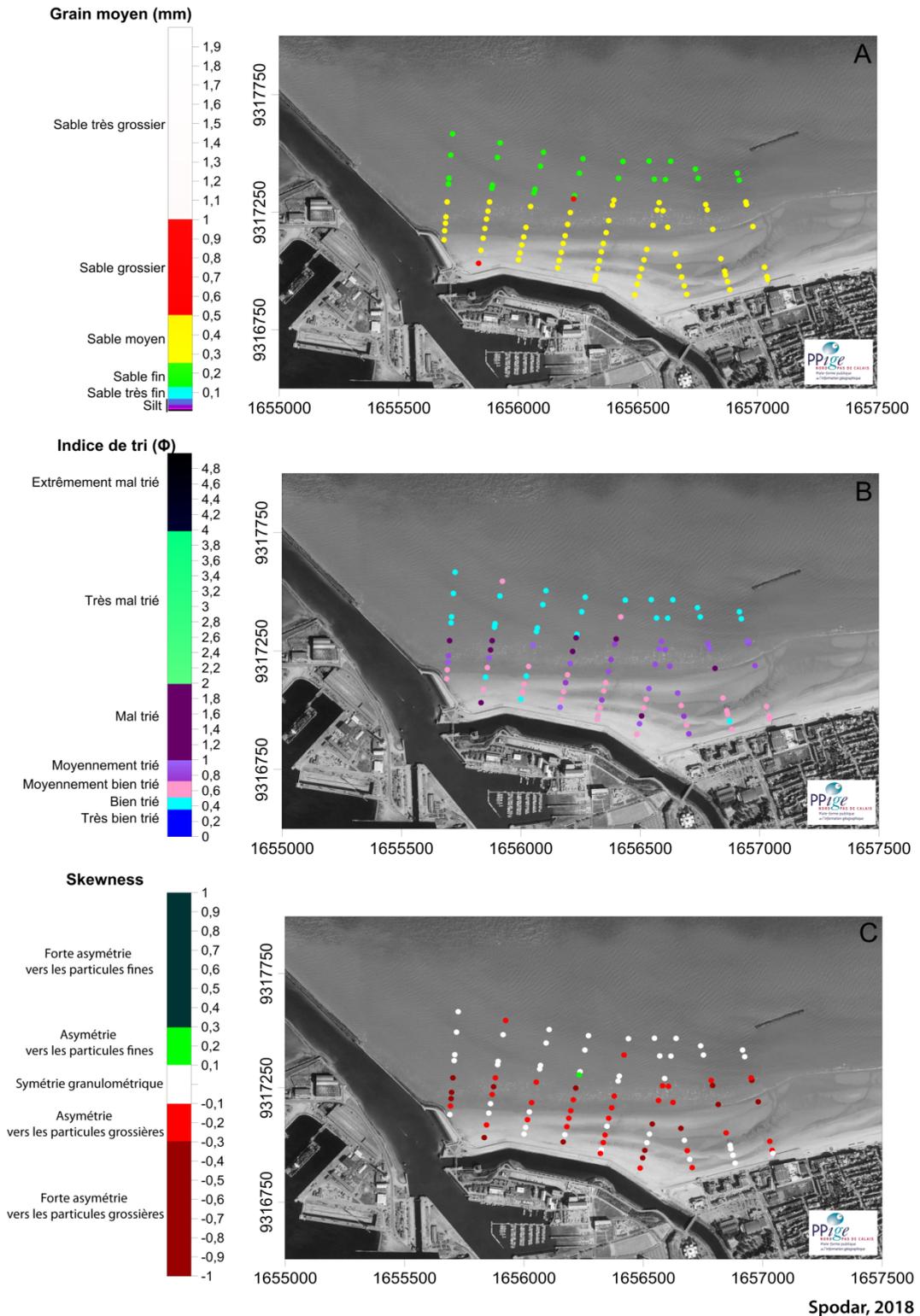


Figure VI.46 Caractérisation du grain moyen (A), de l'indice de tri (B) et de l'indice d'asymétrie (C) sur le secteur du rechargement en février 2017

4.3.4. Bilan de l'évolution de la troisième année du rechargement de plage

L'évolution du rechargement de plage suit les mêmes tendances d'évolutions morphologiques que lors de deux premières années. Une sévère zone d'érosion a de nouveau été observée dans le secteur le plus à l'ouest. La plateforme a même été complètement érodée comme l'a

montré l'évolution du profil P1. Dans le secteur est, de larges zones d'engraissement sont encore une fois observables. La variabilité spatiale se traduit également par un estran qui reste très rectiligne dans le secteur ouest, tandis qu'à l'est, le remaniement du stock sableux avec le développement des barres et bâches et leur migration le long de l'estran atteste d'une tendance à la régularisation de la pente de l'estran et vraisemblablement un ajustement aux conditions hydrodynamiques locales.

Cette année a également permis de mettre en évidence que le transfert longitudinal de sable vers l'est se poursuit. En effet les secteurs les plus en aval se caractérisent par un bilan sédimentaire positif. En revanche, la zone rechargée subit toujours une perte de sable. Des périodes tempétueuses comme lors du passage de la tempête Egon, ont mis en évidence encore une fois une réponse marquée des profils de plage notamment dans le secteur ouest, avec un abaissement du haut de plage associée à un recul de la plateforme supratidale. Ces épisodes tempétueux n'affectent pas cependant le bas de plage, sous le niveau des BMMVE, qui est resté très stable.

5. Analyse des variations morphologiques et volumétriques subtidales

5.1. Analyse des MNT bathymétriques

Le rechargement de plage au droit de la digue des Alliés a été limité à la zone intertidale. Néanmoins d'éventuels échanges sédimentaires entre la zone rechargée et la partie subtidale ont pu s'effectuer avec le transfert progressif vers l'avant-plage des sédiments en provenance du rechargement. C'est pourquoi une analyse de l'évolution bathymétrique sur le site a été menée afin d'évaluer les possibles impacts du rechargement sur les petits-fonds.

Deux levés bathymétriques sont disponibles depuis la mise en œuvre du rechargement : le premier levé a été effectué en février 2016 (Figure VI.47-B) et le second en janvier 2017 (Figure VI.47-C). Aucun levé n'a été réalisé dès la fin des travaux ce qui aurait permis de connaître la morphologie initiale de la zone subtidale juste avant le rechargement. Un levé a été effectué avant le début des travaux en février 2014 (Figure VI.47-A) mais l'emprise de celui-ci ne couvre malheureusement pas l'ensemble de la zone subtidale au droit du rechargement. Seule la zone dans le secteur ouest est concernée par ce levé, ainsi que la zone de dragage.

Le MNT différentiel entre février 2014 et février 2016 rend compte de l'évolution du site deux ans après la mise en œuvre du rechargement (Figure VI.48-A). Il convient d'insister sur le fait que le levé de février 2014 ne fait état que de la situation avant travaux et non de la situation initiale juste après la fin des travaux. L'emprise commune ne concerne qu'une petite superficie de 1,15 km² et ne recouvre que le secteur ouest du site d'étude (Figure VI.48-A). Il est possible de constater globalement l'absence de variations morphologiques majeures. En effet les variations d'altitude entre les deux dates sont comprises entre -2,00 m et +1,36 m. Ces deux valeurs extrêmes sont d'ailleurs limitées à des zones très réduites. Les zones d'érosion dominent majoritairement le secteur étudié. Les plus fortes érosions sont localisées dans le secteur ouest de l'emprise à proximité de l'avant-port est. Le quart nord-est de l'emprise du MNT différentiel se caractérise par une succession de fines bandes d'érosion et d'accrétion d'orientation N-S qui sont vraisemblablement dues à la migration de mégarides. Ces dernières sont bien observables sur les zooms effectués sur les MNT de février 2014

et février 2016. Ces mégarides orientées perpendiculairement au courant dominant indiquent bien un déplacement sédimentaire vers l'est. A l'approche de la zone intertidale dans le sud-est de l'emprise, la zone d'érosion d'environ - 0,20 m voire localement de -0,40 m est beaucoup plus uniforme (Figure VI.48 A). Au total, sur l'emprise étudiée, le volume négatif représente 86 000 m³. Concernant les zones d'accumulation, en plus de celles dues aux déplacements des mégarides dans le quart nord-est, une grande zone d'engraissement est visible dans le secteur ouest près du bas de l'estran pouvant atteindre +0,20 à + 0,25 m. Cette large zone d'environ 0,21 km² s'étend du bout de la jetée Est jusqu'à la cordonnée X de 1656000 (Figure VI.48). L'extrémité ouest de l'emprise laisse deviner également une autre zone d'accrétion au niveau de l'entrée de l'avant-port est. L'ensemble des zones d'accumulation comptabilisent un volume positif de 31 000 m³.

Ainsi au total, ce sont 117 000 m³ qui se sont déplacés sur toute l'emprise soit 0,10 m³/m². Le bilan volumétrique net fait état de -55 000 m³. Il n'est pas pertinent de tirer de grandes conclusions quant à l'évolution du rechargement étant donné que ce bilan sédimentaire négatif n'est pas représentatif de l'ensemble du site. Les éventuels déplacements de sable vers l'est et les accumulations sableuses observées, n'ont donc pas pu être comptabilisés dans le bilan sédimentaire général.

Le dernier levé bathymétrique disponible date de janvier 2017 et reprend la même emprise que celui de février 2016. Le différentiel altimétrique entre février 2016 et janvier 2017 permet donc d'avoir une emprise spatiale beaucoup plus importante qui s'étend sur 3,5 km² (Figure VI.48-B). Cette période correspond à la troisième année du rechargement de plage. L'ensemble du secteur est recouvert de rides et mégarides présentant des orientations différentes. Effectivement au-delà de -2 m CM au droit du rechargement et -4,5 m CM dans le tout le secteur est, les mégarides sont orientées perpendiculairement à la plage et au courant dominant. Leur taille est assez variable et les plus grandes sont localisées dans le nord est de l'emprise. A la différence des grandes mégarides assez rectilignes, les petites mégarides du centre de l'emprise sont beaucoup plus sinueuses. A noter que leur crête vers l'est est un autre indice de la direction du courant dominant vers l'est. A l'approche de la zone intertidale, un changement d'orientation de ces rides s'opère. Entre cette limite variable située à environ de -2 m CM et -4,5 m CM et la zone intertidale, les mégarides sont en effet parallèles au courant dominant et à la plage.

Le bilan sédimentaire est de + 205 000 m³, soit 0,06 m³/m² (Figure VI.48 B), ce qui est compris dans la marge d'erreur. Un apport de sable, modeste si l'on considère la superficie concernée, a donc eu lieu et plusieurs origines peuvent être supposées. Il est possible qu'une partie du sable du rechargement soit transporté dans les petits-fonds lors de certains événements induisant des courants de retour comme il l'a été démontré lors de la campagne hydrodynamique. Dans les petits-fonds, les courants dominants étant longitudinaux avec une asymétrie vers l'est, les sédiments qui arrivent dans ce secteur sont alors repris par les courants pour être déplacés principalement vers l'est. Les sédiments transférés dans la zone subtidale restent donc dans le secteur des petits-fonds sans être exportés vers le large. Ces observations peuvent donc expliquer en partie le bilan légèrement positif de 0,06 m³/m² dans la zone subtidale. Mais la dispersion du sable en provenance du rechargement ne peut pas être la seule explication.

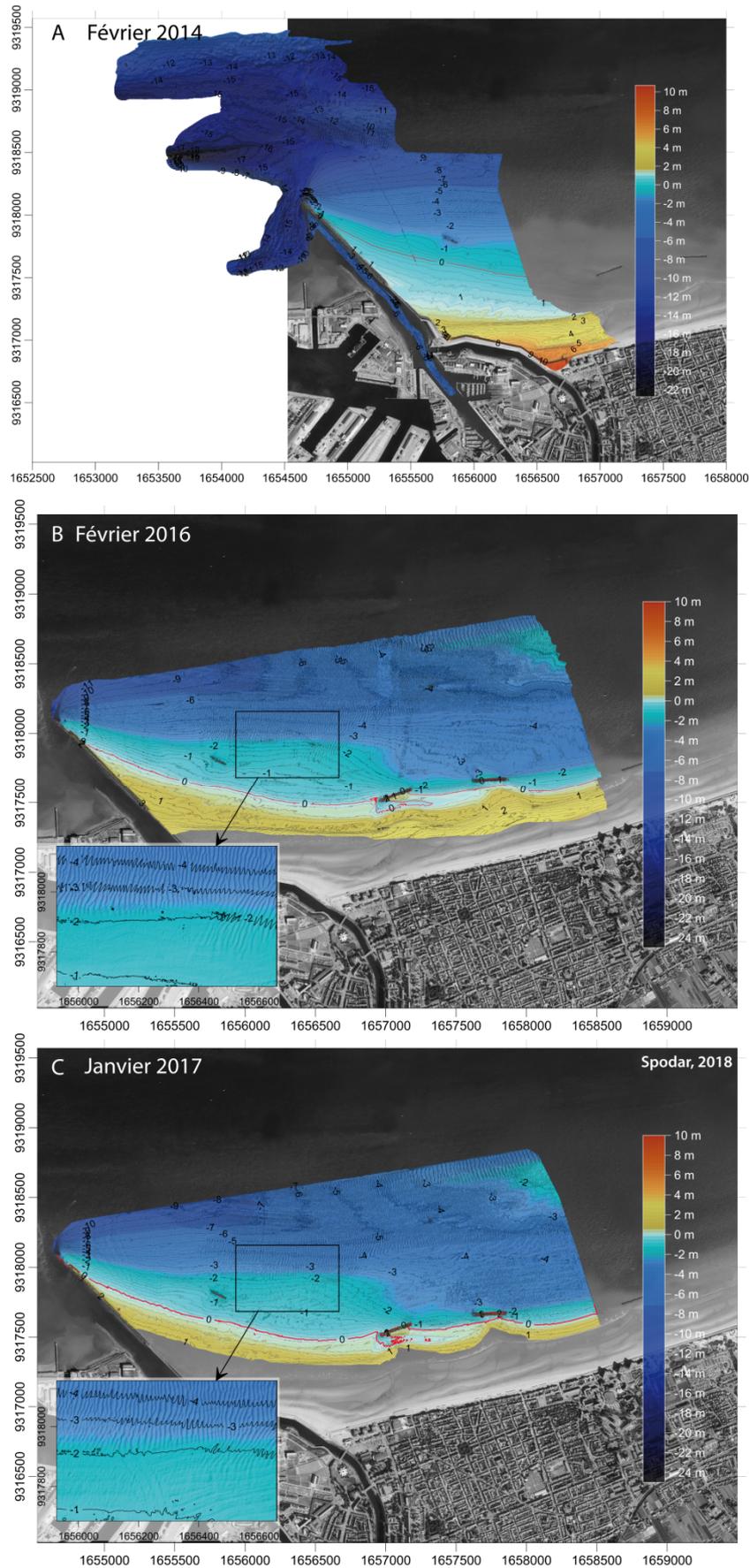


Figure VI.47 Levé bathymétrique effectué sur le site de Malo-les-Bains en A) Février 2014, B) Février 2016 et C) Janvier 2017

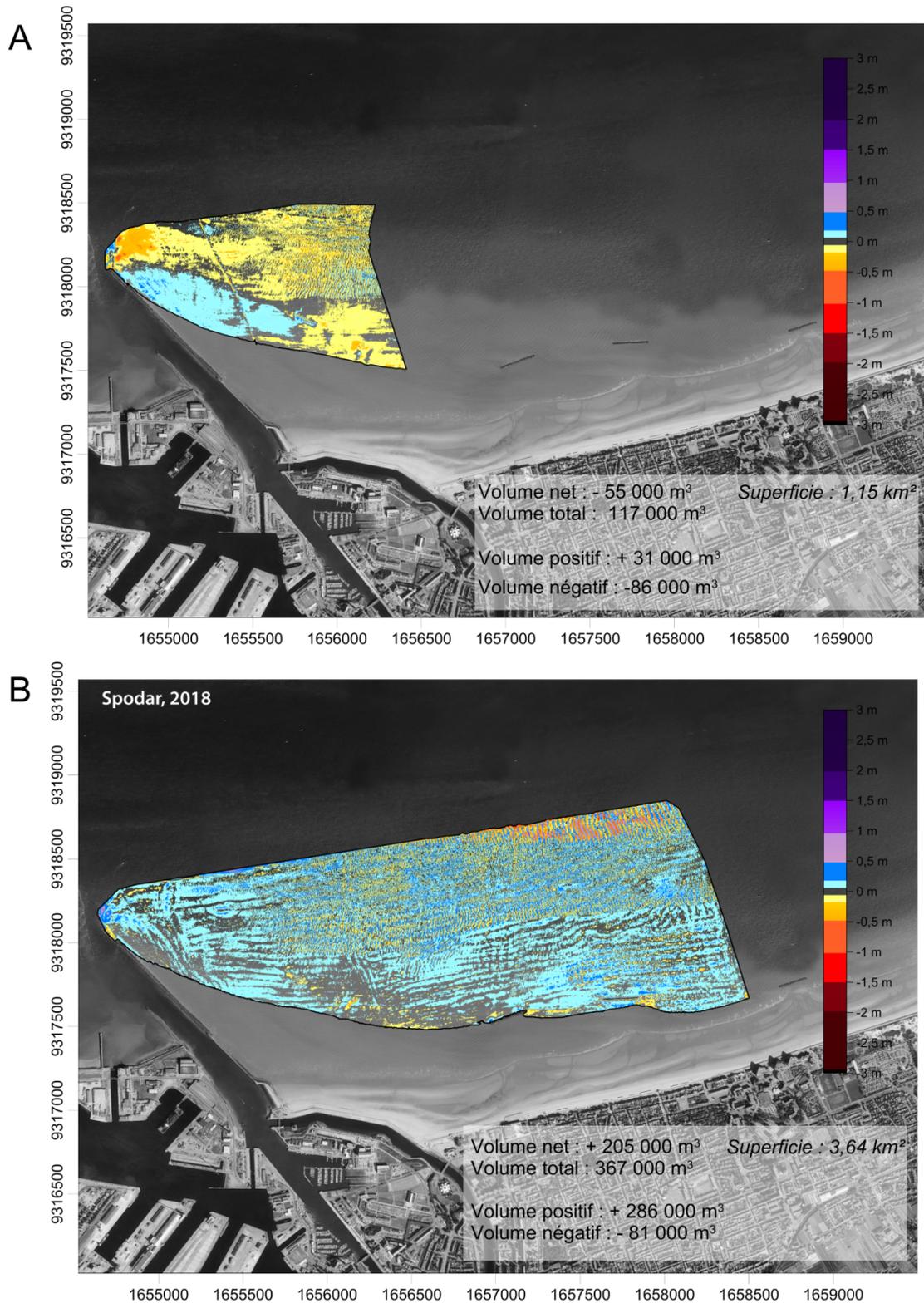


Figure VI.48 Evolution morphologique dans la zone subtidale A) sur la période février 2014 (avant-travaux) et février 2016 (deux ans après la mise en œuvre du rechargement) et B) sur la période février 2016 et janvier 2017 (trois ans après la mise en œuvre du rechargement)

En effet si l'on examine ce qu'il s'est passé à peu près sur la même période sur la partie intertidale et supratidale, un bilan sédimentaire de + 16 000 m³ avait été mis en évidence entre mi-février 2016 et mai 2017 (+ 13 000 m³ entre mi-février 2016 et mi-novembre 2016 et +3 000 m³ entre mi-novembre 2016 et mai 2017). Dans le secteur ouest néanmoins un bilan négatif de -84 000 m³ a été mis en évidence entre mi-février 2016 et mai 2017.

Une partie du sable de ce secteur aurait donc pu se déplacer vers l'est sur l'estran et une partie dans les petits fonds. Mais cela n'explique pas le bilan très légèrement positif de 205 000 m³ de la zone subtidale. On peut supposer que ce bilan résulte d'un transfert du sable du secteur 1 vers les petits fonds.

5.2. Analyse des profils bathymétriques

Des profils bathymétriques ont été extraits des MNT de 2014, 2016 et 2017 afin de visualiser les évolutions d'un point de vue transversal. Pour cela, les profils P2, P4 et P9 ont été sélectionnés et prolongés dans les petits-fonds (Figure VI.49). Seul le profil P2 a pu être extrait du MNT de février 2014, l'emprise de celui-ci étant restreinte au secteur ouest.

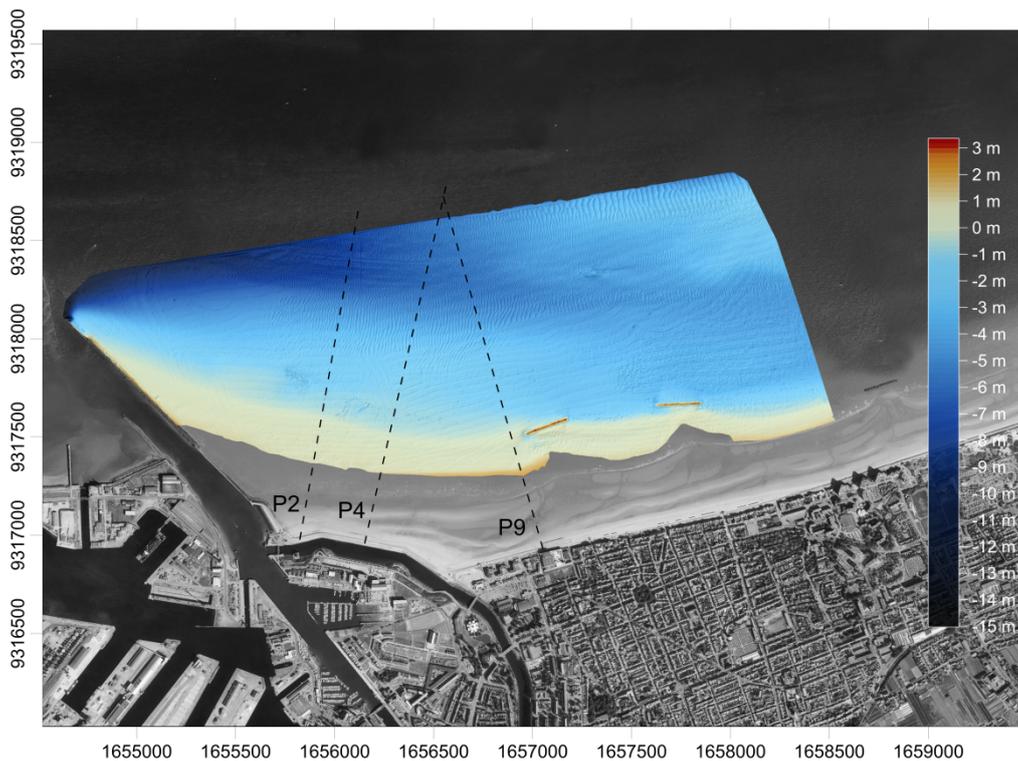


Figure VI.49 Localisation des profils P2, P4 et P9 superposés au levé bathymétrique de janvier 2017

Il est possible de constater qu'entre 2014 et 2017 aucune variation morphologique majeure n'est observable sur le profil P2 (Figure VI.50-A). Le profil est resté très stable au cours de ces 3 ans et la pente de 0,52 % n'a pas changé. Les variations altimétriques sont restées très faibles comprises entre -0,32 m et +0,24 m entre février 2014 et février 2016 (Figure VI.50-B) et -0,24 m et +0,33 m entre février 2016 et janvier 2017 (Figure VI.50-C).

Entre février 2014 et février 2016 un volume net de $-43,5 \text{ m}^3/\text{ml}$ a pu être calculé. En divisant ce volume par la longueur du profil étudié (910 m), on obtient $-0,05 \text{ m}^3/\text{m}$. Une très légère érosion s'est donc produite entre les deux dates. Concernant le volume total englobant l'ensemble des variations du profil celui-ci représente $76 \text{ m}^3/\text{ml}$ soit $0,08 \text{ m}^3/\text{m}$ une fois divisé par la longueur du profil. Entre février 2016 et janvier 2017, le profil P2 est caractérisé par légère accrétion de $+30 \text{ m}^3/\text{ml}$ (soit $+0,03 \text{ m}^3/\text{m}$). Les variations totales représentent néanmoins un volume de $77 \text{ m}^3/\text{ml}$ ($0,08 \text{ m}^3/\text{m}$) (Figure VI.50).

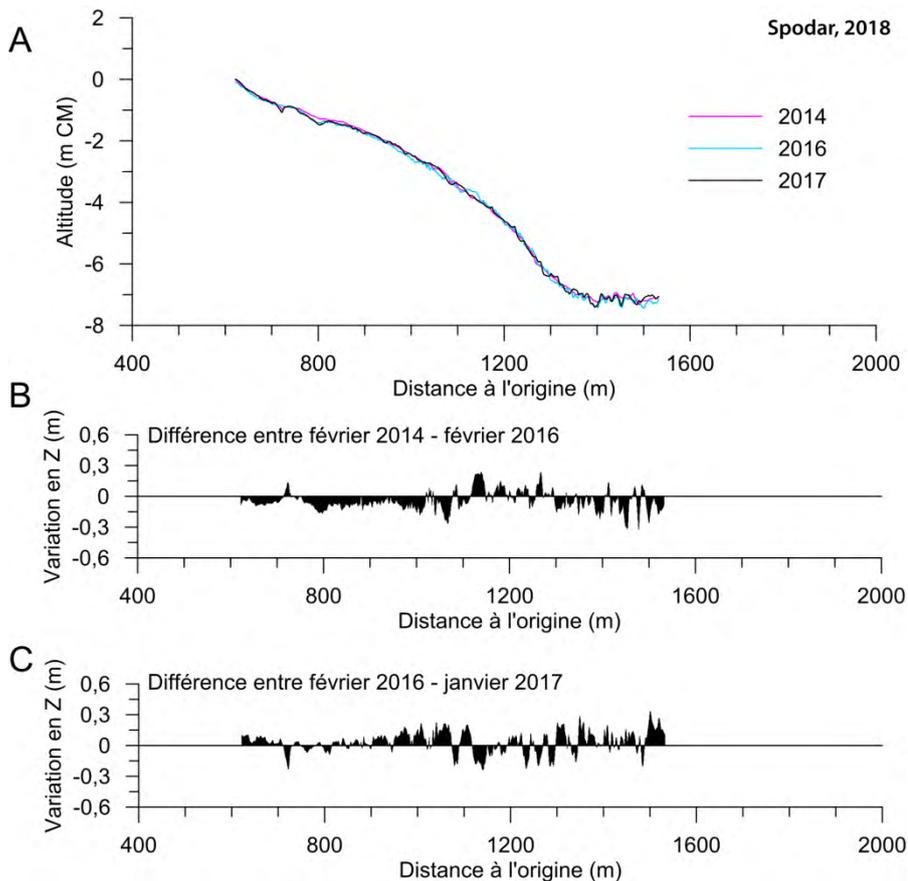


Figure VI.50 Profil P2 extrait de levés bathymétriques effectués en février 2014, février 2016 et janvier 2017 (A) et variations altimétriques associées entre février 2014 et février 2016 (B) et février 2016 et janvier 2017 (C)

Sur le profil P4 (Figure VI.51), seules les dates de février 2016 et janvier 2017 sont disponibles. Les mêmes observations que précédemment peuvent être faites avec un profil qui n'a subi aucune variation morphologique majeure (Figure VI.51-A). De faibles variations altimétriques comprises entre $-0,46 \text{ m}$ et $+0,37 \text{ m}$ n'ont pas modifié l'allure du profil qui a gardé une pente de $0,61 \%$. Au total un volume net de $+37 \text{ m}^3/\text{ml}$ a pu être calculé ($+0,03 \text{ m}^3/\text{m}$). Quant aux variations totales, elles s'élèvent à $105 \text{ m}^3/\text{ml}$ soit $0,09 \text{ m}^3/\text{m}$. Les différences altimétriques semblent un peu plus importantes au-delà de 1200 m (Figure VI.51-B).

Pour le profil P9 le plus à l'ouest, encore une fois aucune variation majeure ne s'est produite dans ce secteur (Figure VI.52-A). Comme pour les deux premiers profils, il est néanmoins possible de constater qu'une très légère accrétion sur toute la longueur du profil a eu lieu entre février 2016 et janvier 2017, impliquant un volume net de $+70 \text{ m}^3/\text{ml}$ ($+0,06 \text{ m}^3/\text{m}$ rapporté à la longueur du profil)

(Figure VI.52-B). Du fait de la grande stabilité du profil, la pente de 0,52 % n'a pas changé entre les deux dates.

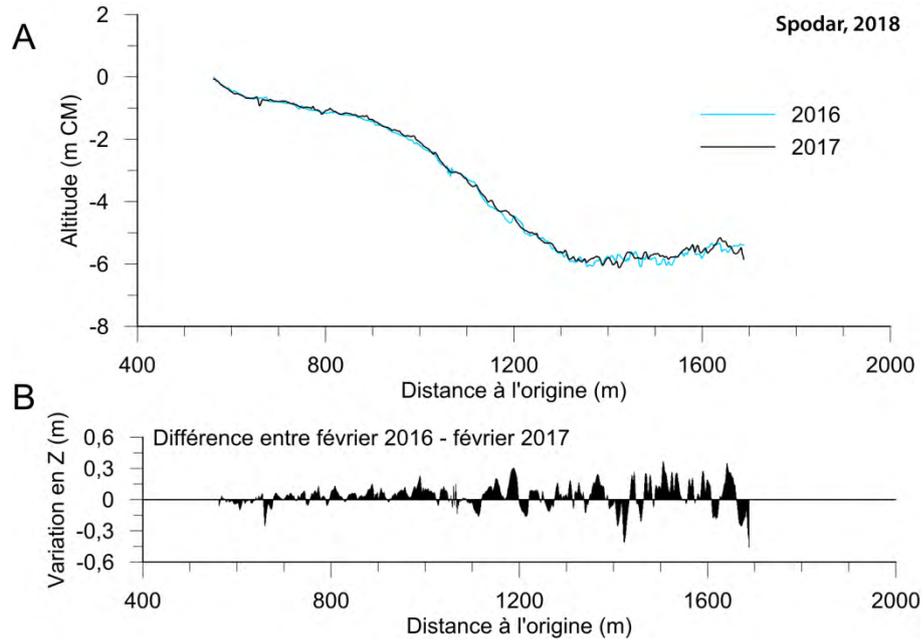


Figure VI.51 Profil P4 extrait des levés bathymétriques effectués en février 2016 et janvier 2017 (A) et variations altimétriques associées (B)

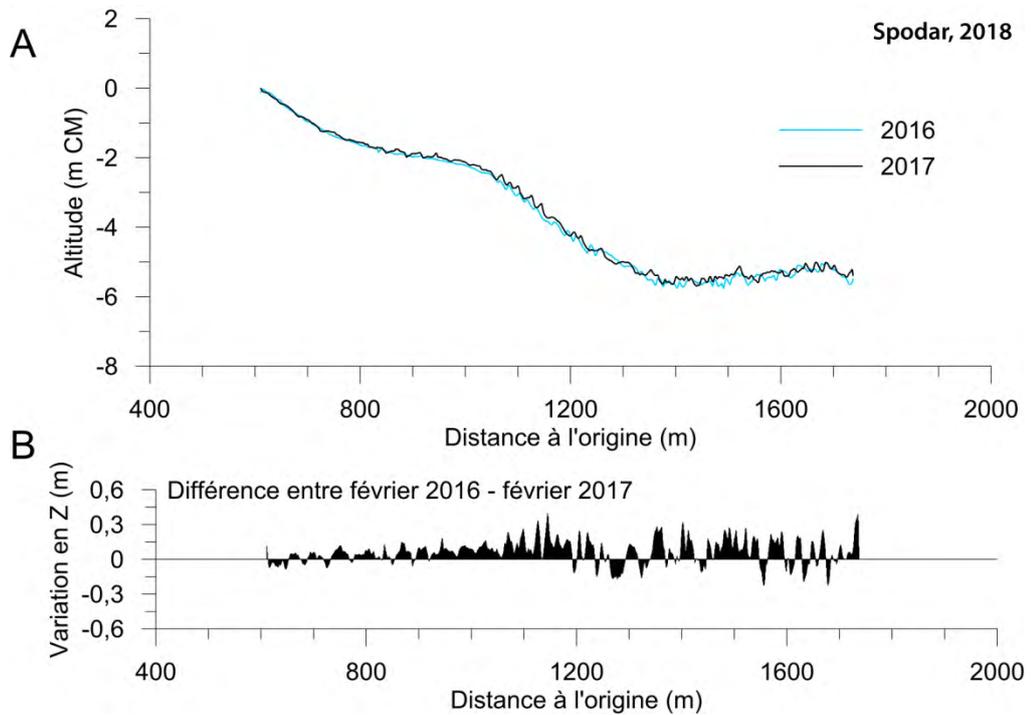


Figure VI.52 Profil P9 extrait de levés bathymétriques effectués en février 2016 et janvier 2017 (A) et variations altimétriques associées (B)

Sur la période février 2016 – janvier 2017, bien que les volumes nets soient très faibles par rapport à la longueur du profil bathymétrique concernée, une tendance à l'engraissement se distingue, en accord avec les observations effectuées à partir des MNT. D'ouest en est, une tendance à l'augmentation du volume net a été calculée (de + 30 m³/ml sur le P2 à + 70 m³/ml sur le P9), ce qui coïncide avec l'augmentation des volumes sur la partie intertidale des profils qui avait été précédemment analysée.

6. Lien entre les variations volumétriques et les puissances de vagues

Le rôle majeur des vagues sur la remobilisation et le transport des sédiments dans la zone intertidale a été mis en évidence dans l'analyse des données hydrodynamiques acquises pendant l'expérimentation de terrain (voir section 3). Afin d'analyser le rôle des vagues et de leurs impacts sur l'évolution de l'estran depuis l'implantation du rechargement, les variations des volumes sédimentaires sur le site du rechargement ont été comparées à la puissance de la houle au large pendant chaque période séparant deux levés topographiques successifs. Pour cela, les variations volumétriques nettes absolues (V_n) et totales (V_t) ont été calculées sur la partie intertidale et supratidale de chaque profil pour chaque période entre deux dates de levés topographiques successifs :

$$V_n = |V_a - V_e| \quad (\text{Eq. VI.1})$$

$$V_t = |V_a| + |V_e| \quad (\text{Eq. VI.2})$$

avec V_e le volume négatif et V_a le volume positif.

Les neuf volumes obtenus ont été divisés par la longueur des neuf profils respectifs afin d'exprimer les volumes par mètre linéaire. Puis, la moyenne de ces neuf volumes a été calculée afin d'obtenir une valeur moyenne représentative de l'évolution de l'ensemble du site pour chaque intervalle de temps entre deux levés successifs. La Figure VI.53-A récapitule pour chaque intervalle de temps les variations volumétriques nettes et totales ainsi calculées pour chaque période. Des intervalles de temps plus ou moins importants (de 9 à 214 jours) caractérisent les périodes ce qui explique les grands écarts entre certaines valeurs. Les variations nettes sont comprises entre 0,01 m³/ml (entre le 18/01/2017 et le 14/02/2017) et 0,12 m³/ml (entre le 28/01/2016 et le 28/06/2016) tandis que les variations totales sont comprises entre 0,03 m³/ml (entre le 13/05/2015 et le 22/05/2015) et 0,20 m³/ml (entre le 28/01/2016 et le 28/06/2016).

Ces valeurs ont été comparées aux puissances de vagues moyennes et cumulées à partir des enregistrements de vagues de la station Sandettie (Figure VI.53-B). Les puissances de vagues ont été calculées sur les intervalles de temps entre deux levés topographiques. Etant donné que les intervalles de temps entre les levés topographiques sont variables, les puissances de vagues cumulées peuvent atteindre des valeurs très différentes allant de 0,33 x 10³ kW.m⁻¹ (entre le 02/12/2016 et le 16/12/2016) à 20,6 x 10³ kW.m⁻¹ (entre le 01/10/2014 et le 20/02/2015). Quant aux puissances moyennes, elles sont également très variables comprises entre 1,06 kW.m⁻¹ (entre le 02/12/2016 et le 16/12/2016) et 16,67 kW.m⁻¹ (entre le 13/11/2015 et le 23/11/2015).

Les variations nettes et totales ont ensuite été comparées aux puissances de vagues cumulées et moyennes formant quatre combinaisons possibles d'analyses (Figure VI.54). Les relations entre les puissances de vagues moyennes et les variations volumétriques nettes (Figure VI.54-A) ou totales (Figure VI.54-B) ne montrent aucune relation significative au vue des coefficients de détermination R^2 de 0,01 et 0,07 respectivement. Cette absence de relation s'explique en partie par les différences de durée des différentes périodes entre deux levés topographiques successifs. Pour une énergie moyenne similaire pendant deux périodes de longueur différentes, des variations morphologiques plus importantes peuvent en effet se produire pendant la période la plus longue en raison de la plus longue durée d'action des vagues, et inversement pendant la période la plus courte. En outre, les moyennes effectuées sur les puissances de vague au cours d'une période tendent potentiellement à gommer les variabilités d'agitation qui ont pu se produire pendant l'intervalle de temps concerné. En observant la Figure VI.53-B, les courbes de puissance de vague cumulée montrent parfois des phases d'augmentations brèves et rapides témoignant d'événement de forte intensité. Ces épisodes sont gommés lors du calcul des moyennes et les puissances de vagues moyennes ne sont donc pas représentatives des éventuelles variabilités au cours d'une période.

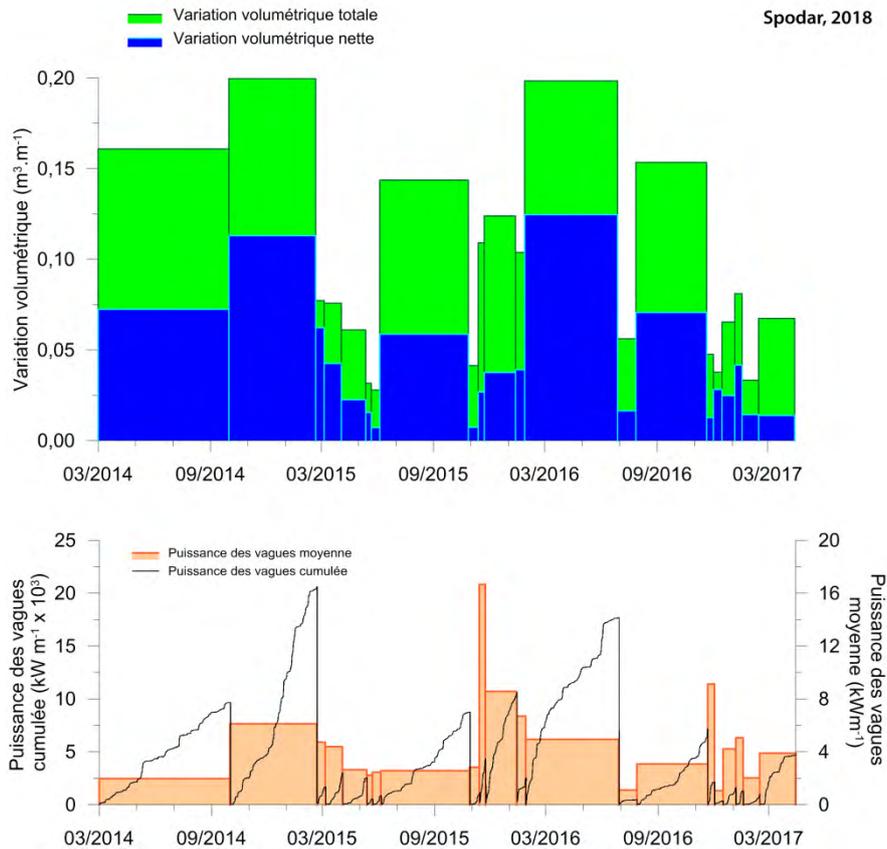


Figure VI.53 Variations volumétriques nette et totales (A) et puissance des vagues moyenne et cumulée (B) entre deux levés topographiques consécutifs

En comparant les puissances de vagues cumulées avec les variations volumétriques nettes et totales, des relations significatives découlent des analyses avec des coefficients de détermination qui atteignent 0,75 et 0,84 respectivement (Figure VI.54 C-D). Ces bonnes relations avec les puissances de vagues cumulées peuvent s'expliquer par le fait que l'ensemble des conditions énergétiques sont totalisées. Pendant les longues périodes notamment, les puissances cumulées reflètent mieux le

forçage réel qui a impacté la côte et le rechargement de plage comparativement aux puissances moyennes. En prenant l'exemple de la période comprise entre le 01/10/2014 et le 20/02/2015 (Figure VI.53-B), le calcul de puissance moyenne fait état de 6,12 kW.m⁻¹ et reflète donc beaucoup moins bien la période agitée qui s'est produite. Les puissances cumulées totalisent 20,6 x 10³ kW.m⁻¹ ce qui explique beaucoup mieux les variations morphologiques et volumétriques qui atteignent 0,11 m³/ml et 0,20 m³/ml sur l'ensemble du site rechargé pour les variations nettes et totales.

La meilleure relation est observée entre les puissances de vagues cumulées et les variations volumétriques totales. Les variations totales sont plus représentatives de l'ensemble des mouvements sédimentaires sur la plage du fait qu'elles englobent à la fois les variations positives et négatives. Même sans bilan négatif ou positif, des mouvements de sable peuvent se produire sur l'emprise d'étude, ce que traduisent les variations volumétriques totales.

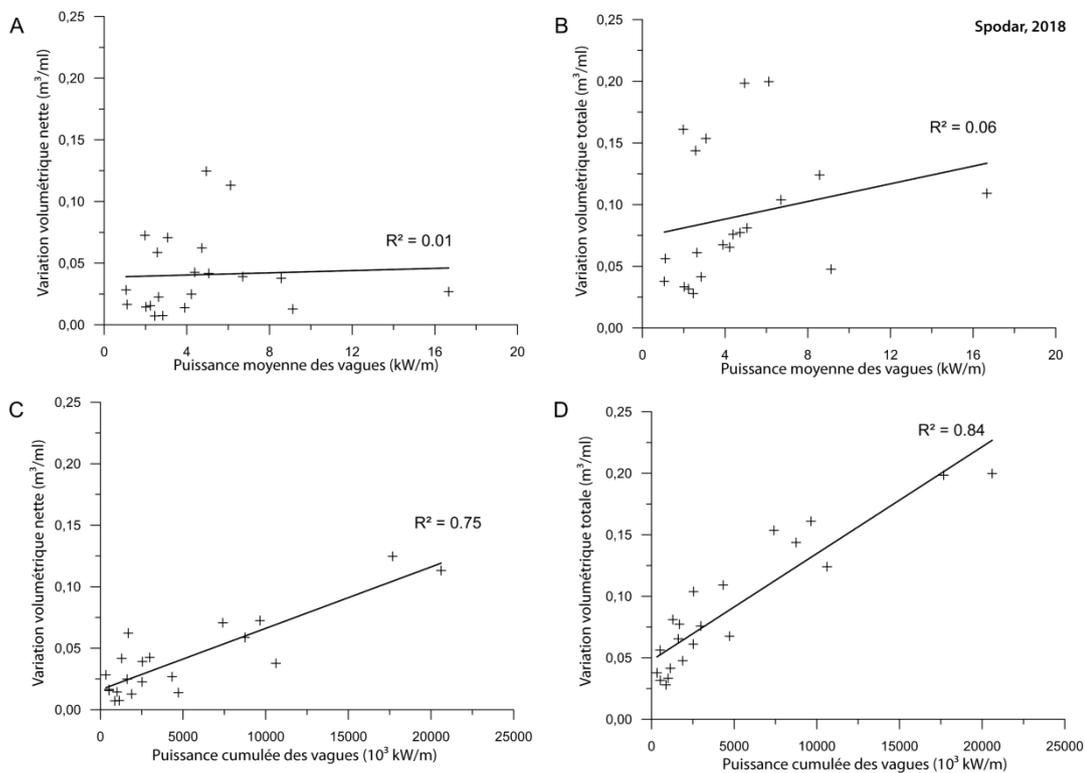


Figure VI.54 Relation entre les puissances moyennes des vagues et les variations volumétriques nettes (A) et totales (B) et relation entre les puissances cumulées des vagues et les variations volumétriques nettes (C) et totales (D)

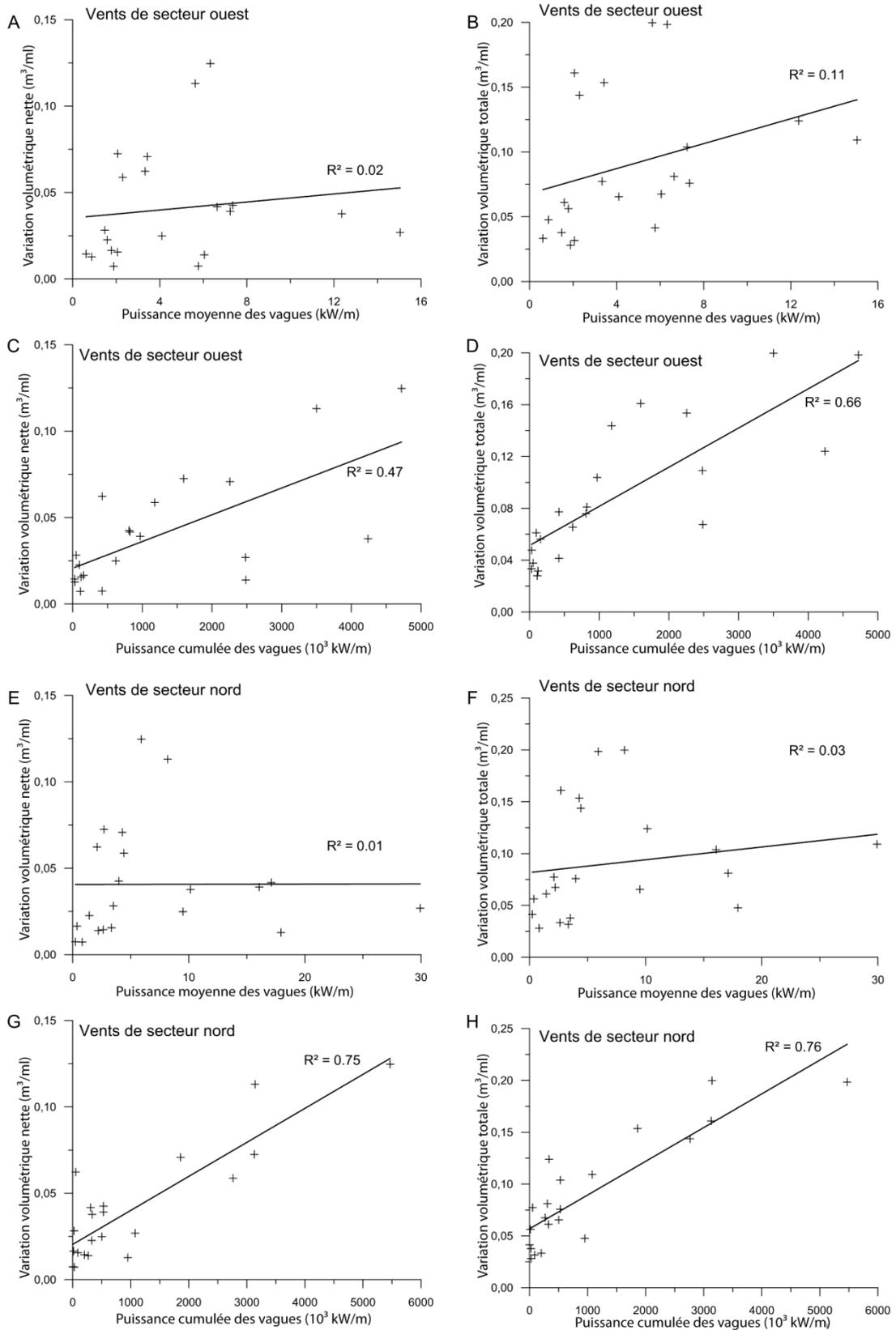
Le rôle prépondérant de la houle est par conséquent mis en évidence dans cette analyse. En effet lors de période calme avec des puissances cumulées relativement moyennes à basses, les variations morphologiques sont dans l'ensemble restreintes (Figure VI.54 C-D). L'action seule de la marée qui représente l'autre forçage important sur le site ne semble pas suffisant pour engendrer autant de variations morphologiques que lors de périodes avec une forte houle. Lors de périodes avec une puissance de vague cumulée importante, que ce soit dû à l'intensité au cours d'un intervalle de temps assez court ou l'accumulation de puissances au cours d'une période plutôt longue, le site répond en effet par des mouvements sédimentaires importants. En prenant l'exemple de la période

relativement courte entre le 23/11/2015 et le 13/01/2016 avec une puissance de vagues cumulée de $10,6 \times 10^3 \text{ kW.m}^{-1}$, les variations volumétriques totales ont atteint $0,12 \text{ m}^3/\text{ml}$. Au cours d'une période plus longue, comme entre le 28/01/2016 et le 28/06/2016 une puissance cumulée de $17,7 \times 10^3 \text{ kW.m}^{-1}$ a pu être calculée et des variations totales de $0,20 \text{ m}^3/\text{ml}$ se sont produites.

L'analyse a été affinée en étudiant l'influence potentielle de la direction des vagues incidentes. Les données de vagues au large enregistrées à Sandettie ne sont malheureusement pas directionnelles. Pour pallier à ce manque d'information, les directions des vents également enregistrées à la station Sandettie ont été utilisées comme indicateur de la direction des vagues. Ainsi les puissances de vagues associées à des vents en provenance du secteur ouest dont les directions sont comprises entre 225° et 315° ont été filtrées et analysées. La même chose a été effectuée pour les vagues associées à des vents en provenance du large secteur nord (nord-ouest à nord-est) avec des directions comprises entre 315° et 45° . Ces deux secteurs ont été sélectionnés par rapport à la configuration du site. En effet la plage au droit de la digue des Alliés est localisée potentiellement en zone d'abri par rapport aux vagues de secteur ouest mais le site est ouvert et vulnérable aux vagues en provenance du secteur nord.

Encore une fois, que ce soit avec les vagues liées aux vents de secteur ouest (Figure VI.55 A-B) ou nord-est (Figure VI.55 E-F), les résultats ne montrent aucune relation significative entre les variations volumétriques nettes ou totales et les puissances de vagues moyennes. Ces relations ne seront donc pas plus abordées. Une corrélation moyenne est obtenue entre les puissances de vagues cumulées pendant des épisodes de vents de secteur ouest et les variations de volume nettes comme le montre le coefficient de détermination de 0,47 (Figure VI.55 C). La relation est légèrement plus significative avec les variations volumétriques totales avec un coefficient de détermination de 0,66 (Figure VI.55-D).

Les puissances de vagues cumulées enregistrées pendant des périodes de vents de secteur nord présentent une meilleure relation avec les variations volumétriques nettes et totales (Figure VI.55 G-F). En effet, les coefficients de détermination s'élèvent à 0,75 avec les variations nettes et 0,76 pour les variations totales. L'évolution du rechargement de plage démontre ainsi une meilleure corrélation avec les vagues en provenance de secteur nord qu'avec celles du secteur ouest. Il est donc possible d'en conclure que le site répond plus fortement aux houles de secteur nord auxquelles il est directement exposé. Bien qu'il soit possible de se fier à l'indicateur des directions de vents pour filtrer les données de houles, l'obtention de données de houles directionnelles au large permettrait d'affiner et renforcer les tendances qui découlent de cette analyse.



Spodar, 2018

Figure VI.55 Relation entre les puissances de vagues moyennes et cumulées de secteur ouest (A, B, C et D) et nord (E, F, G et H) et les variations volumétriques nettes et totales

7. Synthèse de l'évolution morpho-sédimentologique

7.1. Evolution granulométrique

La Figure VI.56 illustre l'évolution de la répartition des différents paramètres granulométriques entre mars 2015 (l'échantillonnage de juin 2016 ne recouvrant qu'une superficie restreinte du site) et février 2017.

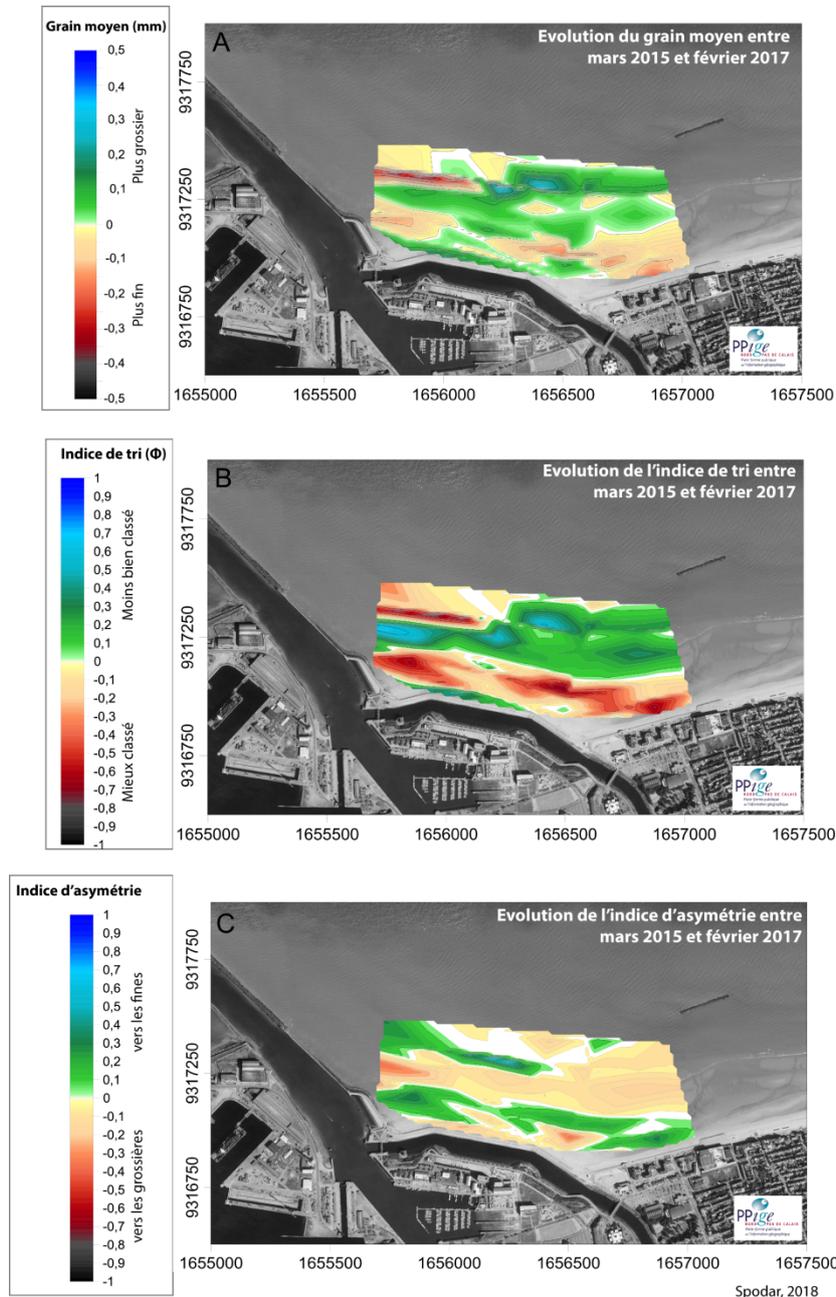


Figure VI.56 Evolution des paramètres granulométriques, grain moyen (A), indice de tri (B) et indice d'asymétrie (C), entre mars 2015 et février 2017

Concernant l'évolution du bas de plage (< BMME) entre mars 2015 et mai 2017 (Figure VI.56-A), on observe deux tendances avec un grain moyen qui tend à s'affiner à l'est (-0,2 mm) et devenir mieux trié tandis qu'à l'ouest, le grain moyen tend à devenir légèrement plus grossier (+0,2

mm) et moins bien classé. Dans le secteur ouest, l'asymétrie des particules tend vers les fines, tandis que sur le bas de plage dans le secteur est, c'est une évolution de l'asymétrie vers les particules grossières qui caractérise le site. Comme il l'a été indiqué, ces modifications de la granulométrie de surface se soldent en février 2017 par une nette distinction du bas de plage par rapport au reste du site, avec un sable fin, bien trié et dont la distribution est symétrique. A l'issue de ces deux ans, on observe sur la partie centrale de l'estran, entre les niveaux BMME et PMME, une légère augmentation de la taille du grain moyen. Il est possible de remarquer que les sables tendent à devenir moins bien classé qu'en mars 2015. L'évolution de l'indice d'asymétrie montre que la distribution granulométrique se rapproche progressivement d'une asymétrie vers les particules grossières.

L'évolution des paramètres granulométriques sur la plateforme supratidale montre des zones très hétérogènes sans réelle tendance générale. En effet, entre mars 2015 et février 2017, certains secteurs de la plateforme se caractérisent par un affinement des particules tandis que d'autres au contraire se caractérisent une augmentation de la taille des sédiments. Il est possible de remarquer que les secteurs de la plateforme où une diminution des particules est observée se caractérisent également par une distribution des particules qui évolue vers une asymétrie vers les particules grossières. Inversement, les secteurs où le grain moyen devient plus grossier montrent un indice de tri qui devient positif témoignant d'une évolution en faveur d'une asymétrie vers les particules grossières. On observe en revanche clairement que le classement des échantillons se dégrade et devient plus hétérogène.

En conclusion, quelle que soit la date de l'échantillonnage, la granulo-décroissance observée du haut vers le bas de plage est en adéquation avec les caractéristiques des plages macrotidales (Stépanian, 2002). En effet, l'action des vagues varie selon le cycle de la marée. L'énergie des vagues diminue avec la marée descendante, d'où une baisse de l'agitation lors des basses mers et un dépôt des particules en suspension dans la partie inférieure de l'estran. En revanche, le reste de l'estran est soumis à des conditions d'agitation plus importante, d'où probablement une tendance à l'augmentation de la taille des particules avec un export des particules les plus fines. Le stock de sable rechargé de manière indifférenciée sur le site montre un remaniement important en lien avec les conditions hydrodynamiques locales. La plateforme supratidale, soumise uniquement à l'activité éolienne, présente une certaine hétérogénéité d'un point de vue granulométrique avec une succession de secteurs se composant de particules grossières probablement dû au vannage éolien. D'autres secteurs en revanche semblent correspondre à des surfaces de dépôts de sable.

7.2. Evolution morphologique du rechargement entre fin mars 2014 et mi-avril 2017

L'étude de l'évolution morphologique des trois premières années du rechargement de plage au droit de la digue des Alliés montre un important remaniement sédimentaire. Ce remaniement s'est initié dès les premiers mois après la mise en œuvre du rechargement de plage. Au total, la zone rechargée (Secteur 1 et 2) se caractérise par un déficit sédimentaire qui s'élève - 186 000 m³ soit - 0,33 m³/m² (Figure VI.57).

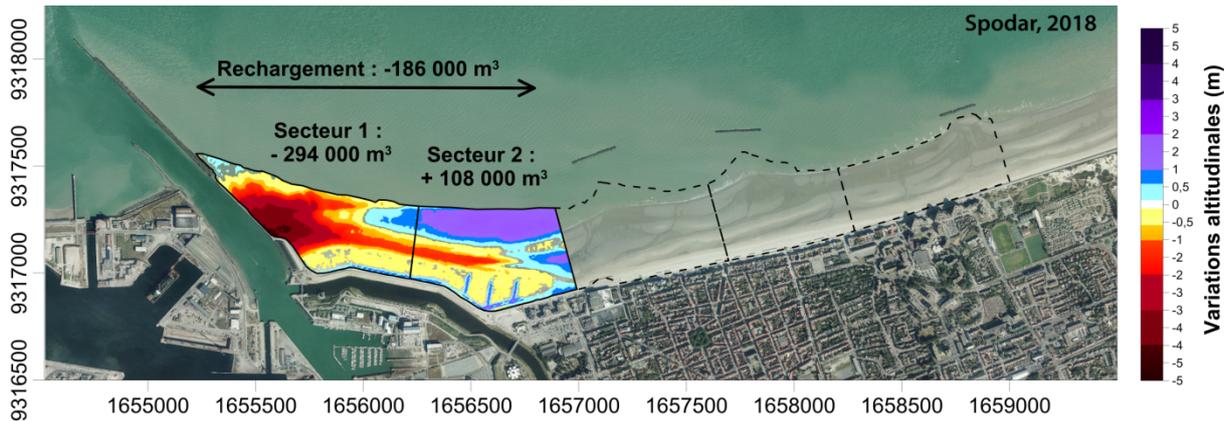


Figure VI.57 Bilan général de l'évolution du secteur rechargé entre mars 2014 et mai 2017

Les caractéristiques de l'évolution du rechargement de plage qui ont été effectuées précédemment peuvent être synthétisées selon les points à retenir suivants :

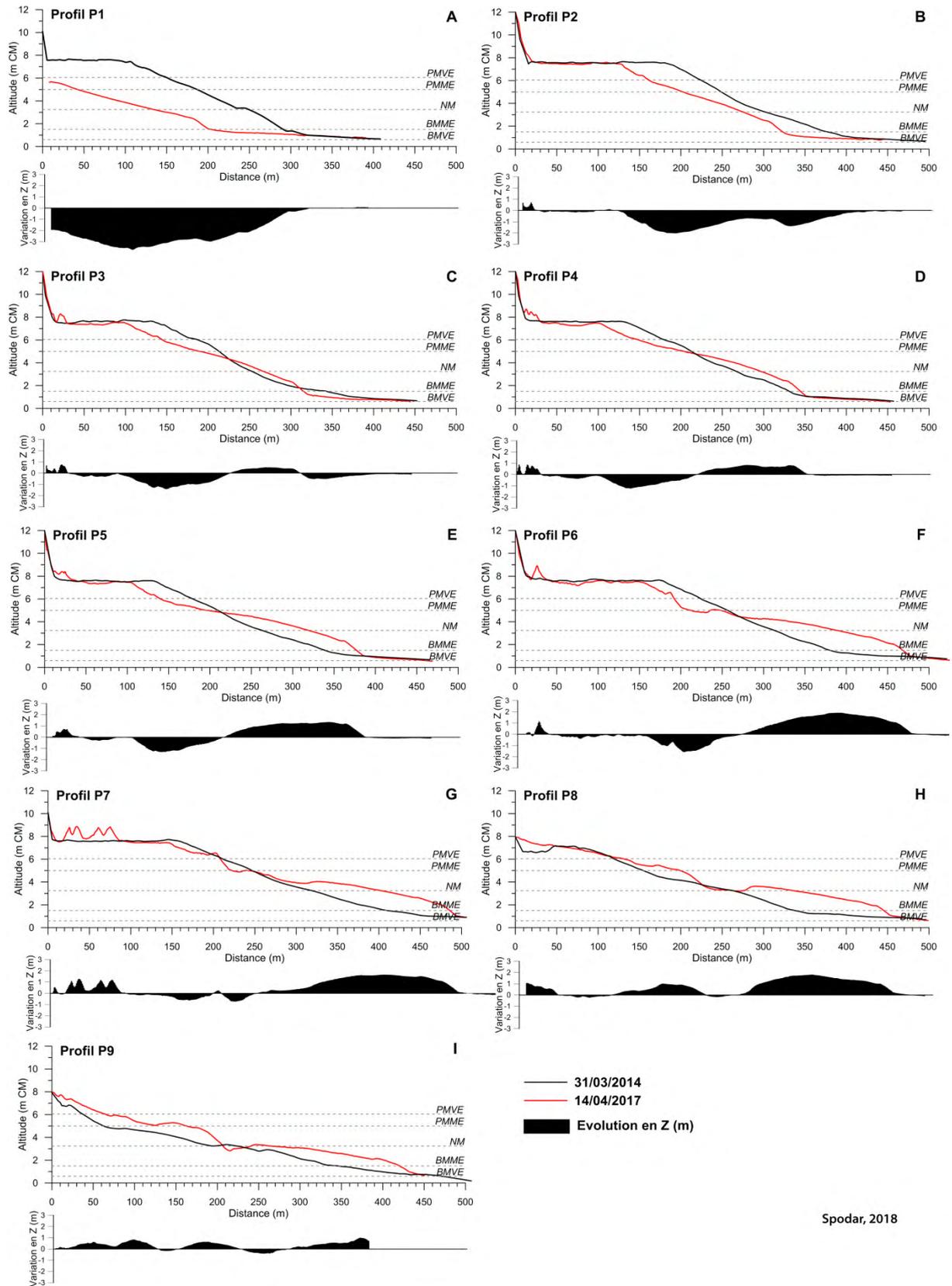
- **Evolution de la plateforme supratidale**

De manière générale, une relative stabilité caractérise la plateforme supratidale entre mars 2017 et mai 2017. Relative, car sa stabilité a été légèrement altérée au fil du temps. Son rebord se caractérise en effet par un recul, associé à l'érosion du haut de plage de manière générale (Figure VI.57). On note que cette érosion est de plus en plus intense d'est en ouest. Effectivement dans le secteur ouest, une large zone d'érosion que ce soit au niveau de la plateforme ou de l'estran a été identifiée, et cela dès la première année et même dès les premiers mois post-rechargement. La plateforme a complètement disparu à l'extrémité ouest du rechargement comme l'illustre l'évolution du profil P1 (Figure VI.58-A) où une perte de plus de 700 m³/ml s'est produite (Figure VI.59). La jetée Est est donc atteinte par la mer à chaque marée haute peu importe le coefficient de marée. Autre point à noter sur l'évolution de la plateforme, son niveau altitudinale arasé à environ + 7,6 m CM lors des travaux a subi une légère baisse due aux envols éoliens. Cette large surface de sable sec a probablement engendré une augmentation de la déflation éolienne d'où le remplissage des filets brise-vent très rapidement après leur mise en œuvre.

Néanmoins après un peu plus de trois ans après la mise en œuvre du rechargement de plage, la plateforme supratidale s'est globalement bien maintenue et assure toujours un rôle de zone tampon, à l'exception de la partie la plus à l'ouest au niveau de la jonction avec la jetée Est.

- **Deux portions de l'estran avec des variations morphologiques différentes**

Second point à noter, il a été mis en évidence une évolution morphologique différente de la partie supérieure et inférieure de l'estran. En effet, entre le rebord de la plateforme et un niveau déterminé à 0,5 m sous le niveau des BMME, le profil de plage est très actif avec d'importantes variations morphologiques. En revanche, sur la portion d'estran au-delà de ce niveau BMME-0,5 m, plus aucune variation morphologique n'est constatée. La Figure VI.58 qui synthétise l'évolution des profils sur toute la période de suivi montre très clairement qu'aucun changement n'est observable. Cette portion d'estran garde une très faible pente de 0,40 à 0,50 %. Les analyses ont montré que quelles que soient les conditions énergétiques, aucune modification morphologique n'a été mesurée. Toutes les variations se concentrent dans la partie supérieure de l'estran, entre le niveau BMME-0,5 m et le rebord de la plateforme.



Spodar, 2018

Figure VI.58 Bilan de l'évolution des profils de plage entre le 21.03.2014 et le 14.04.2017

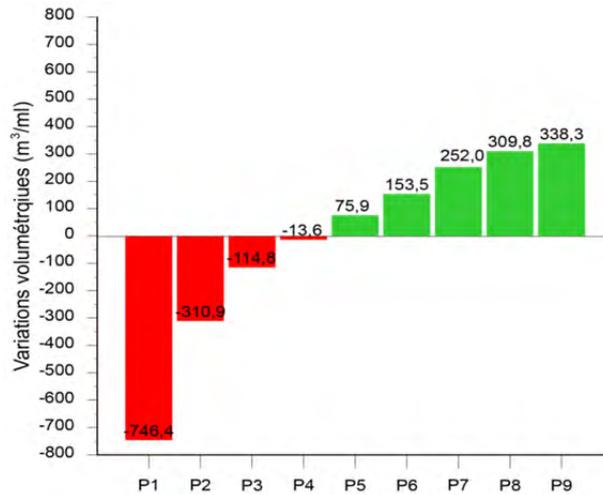


Figure VI.59 Bilan des variations volumétriques par profils entre le 31.03.2014 et le 14.04.2017

- **Une variabilité spatiale observable sur la portion active de l'estran (entre rebord de la plateforme et le niveau BMME-0,5m)**

C'est sur cette portion de profil actif qu'une variabilité spatiale a clairement été mise en évidence d'ouest en est, identifiable dès la première année et qui s'est poursuivie au fil des années (Figure VI.58). Comme évoqué dans la section précédente, le secteur ouest se caractérise par une importante érosion qui a provoqué un abaissement conséquent (jusqu'à 3 m) de l'estran à l'issue des trois ans de suivis (Figure VI.57). L'ensemble du profil de plage P1 (Figure VI.58-A) a souffert d'une perte importante de sable, quelles que soient les conditions météo-marines. On observe tout de même une diminution de l'intensité de l'érosion du haut vers le bas du profil. Situé à l'abri des houles dominantes du sud-ouest par la jetée Est, ce secteur ne peut être alimenté par la dérive littorale dominante orientée ouest-sud-ouest et est-nord-est. Il est par contre exposé aux vagues du nord et du nord-est. On peut supposer que ce secteur constitue une zone source alimentant la partie est en aval-dérive. Des phénomènes de réflexion des vagues sur la jetée à haute mer pourraient également expliquer le net déficit sédimentaire constaté dans ce secteur. Sur une image satellite prise le 27 septembre 2015 (Figure VI.60), on remarque en effet une forte réflexion des vagues au niveau de la jetée. Lors de cette prise de vue à marée haute, le coefficient de marée était de 98 et les vents au large étaient originaires du NE, tout comme les vents à la côte. Au large la vitesse moyenne des vents était de 10 m/s alors qu'à la côte les vents soufflaient en moyenne à 7 m/s. Les vagues réfléchies se combinent aux vagues incidentes, parallèles à la plage ce qui accentue leur hauteur et très vraisemblablement la remise en suspension des sédiments qui sont ensuite exportés vers l'est ou vers le large.



Figure VI.60 Image satellite, prise le 27/09/2015 montrant l'effet de la jetée Est sur les vagues à haute mer. (Source : Google Earth).

Une atténuation de l'érosion est identifiable à l'approche de la zone centrale du rechargement comme l'indiquent l'évolution des profils (Figure VI.58-B-C-D) ainsi que les bilans sédimentaires associées (Figure VI.59). Dans le secteur est (secteur 2 sur les Figure VI.57 et Figure VI.61), le haut de plage en bordure de plateforme se caractérise également par une érosion, tandis qu'une large zone d'accrétion se distingue clairement entre les niveaux PMME et BMME-0,5 m (Figure VI.58 E à H). En plus d'un engraissement, le stock de sable est remanié par les agents hydrodynamiques et la formation de barres et de bâches a été identifiée dès la deuxième année.

- **Engraissement dans les secteurs en aval du rechargement de plage**

Dès l'extension vers l'est de la zone de suivi à partir de la deuxième année, on observe que les accumulations sableuses du secteur 2 s'étendent vers l'est le long du perré de Malo-les-Bains (Figure VI.61). A l'issue de la troisième année, c'est l'ensemble des trois secteurs en aval qui présentent des bilans sédimentaires positifs. En recoupant l'ensemble des analyses, il est possible de conclure que les courants dominants vers l'est en accord avec la dérive littorale sont à l'origine de ce transport longitudinal vers l'est. On note que le premier secteur a bénéficié de ce sable érodé en provenance du rechargement dès la deuxième année, mais les accumulations s'étendent vraisemblablement également dès la première année dans ce secteur. En revanche, il aura fallu trois ans pour que le sable du rechargement atteigne les zones les plus en aval.

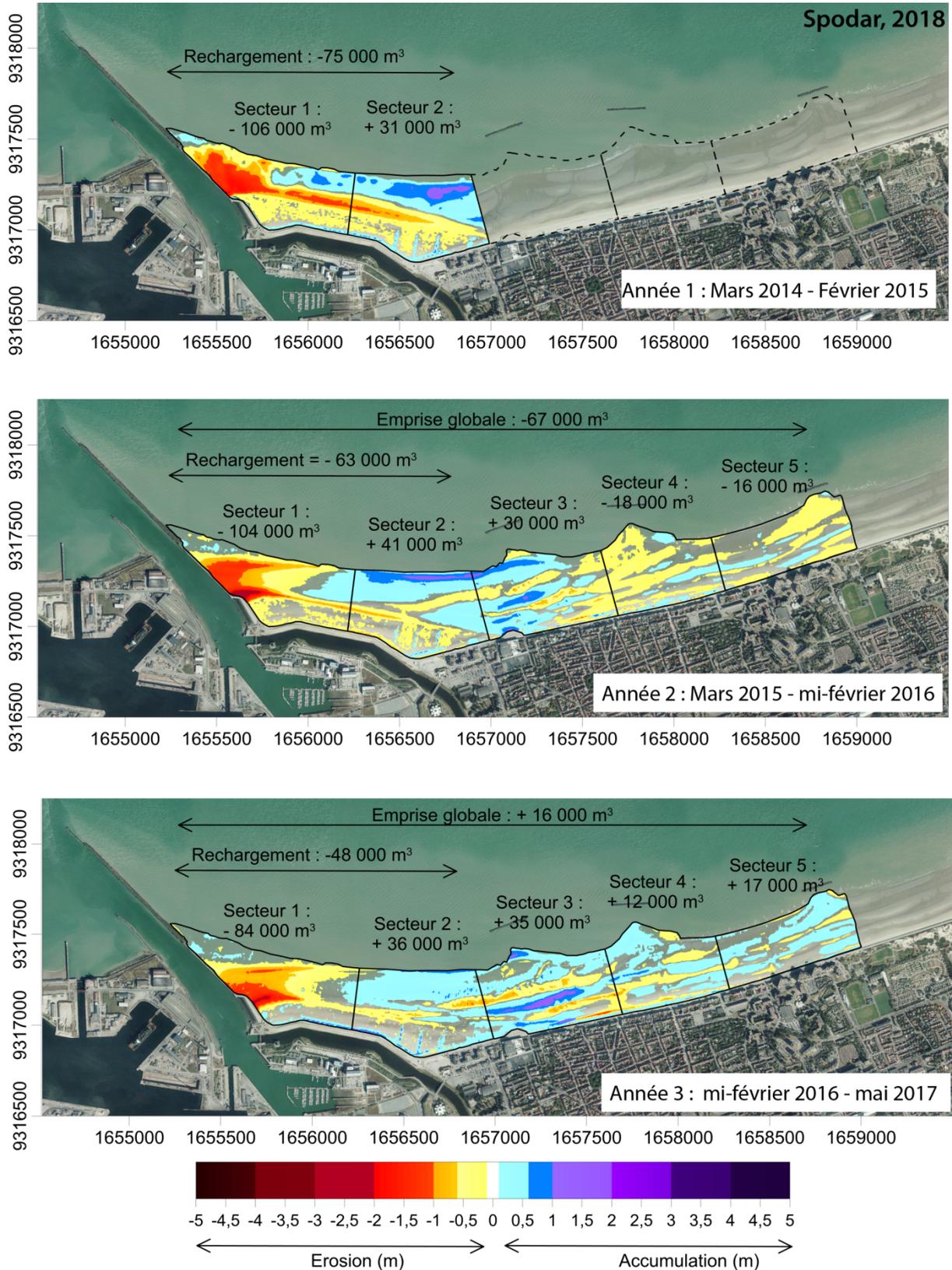


Figure VI.61 Evolution morphologique et volumétrique par année sur l'ensemble du site et par secteurs

Chapitre VII. Analyse de l'évolution d'un rechargement subtidal

1. Du projet à la mise en œuvre du rechargement

1.1. Origine du projet

Les travaux de dragage dans le cadre du creusement de la darse du nouveau terminal méthanier ont libéré un stock considérable de sédiments qui s'élève au total à 7,25 Mm³ dont 4,25 Mm³ de sables et 3 Mm³ de vases (IDRA environnement, 2009). Les vases ont été clappées dans différents sites d'immersion du GPMD tandis que les sables ont été valorisés en partie par un rechargement au droit de la digue du Ruytingen (voir Chapitre IV - Figure IV.19). Ce site est très exposé aux houles d'un large secteur nord. En position plus avancée par rapport au reste de la façade portuaire, l'avant-port Ouest se trouve aussi globalement plus exposé aux houles de secteur ouest que le site de la digue des Alliés. La réalisation d'un rechargement subtidal dans ce secteur représente donc une mesure de protection d'un ouvrage portuaire, comme c'était le cas à Malo-les-Bains. Le contexte ici est différent puisqu'il s'agit de protéger une installation classée SEVESO, un terminal méthanier construit sur la période 2012-2016.

1.2. Mise en œuvre et évolution morphologique du site

Le site de prélèvement étant à proximité (1,1 km au maximum), le sable a été refoulé via des conduites de refoulement entre la drague aspiratrice stationnaire et l'avant-plage. Les conduites ont été déplacées au fil des travaux afin de répartir le sable le long de la digue (Figure VII.1). Le refoulement s'est déroulé de janvier 2012 à mars 2013 de manière discontinue, du pied de digue jusque dans les petits-fonds.



Figure VII.1 Photographies des travaux de rechargement à différentes dates, en mai 2012 (soit 5 mois après le lancement des travaux) (A), en octobre 2012 (soit 10 mois après le lancement des travaux) (B) et en juin 2013 (soit 4 mois après la fin des travaux) (Cartier, 2014)

La Figure VII.2-A donne un aperçu du site avant les travaux de refoulement. Comme évoqué dans la présentation du site d'étude, la plage était inexistante en pied d'ouvrage début 2012. Avant les travaux (Figure 2-A), des profondeurs importantes de l'ordre de -5 m CM caractérisaient la « fosse » du Ruytingen localisée à proximité de la digue. Le premier levé bathymétrique effectué juste après les travaux date de mars 2013. Ce levé bathymétrique est malheureusement d'une emprise restreinte de l'ordre de 0,74 km², il ne couvre en effet que le bas de plage et une portion limitée de la zone subtidale. Il est néanmoins possible de se rendre compte que la fosse du Ruytingen a été entièrement comblée et qu'une plage a été créée en pied de digue (Figure 2-B). Le MNT différentiel entre janvier 2012 et mars 2013 met en évidence les zones caractérisées par un exhaussement qui peut atteindre jusqu'à + 8 m (Figure VII.2-D). Sur cette emprise restreinte, la variation de volume s'élève à + 810 000 m³. Ce chiffre est considérablement sous-estimé vu la surface qui n'a pas été levée.

Le second levé effectué après la fin des travaux date de mai 2013 (Figure 2C). L'emprise de ce levé est un peu plus importante et couvre une superficie de 1,25 km². Néanmoins l'ensemble de la partie intertidale n'a toujours pas été levé. Le MNT différentiel entre janvier 2012 et mai 2013 permet de mettre en évidence un gain de + 1 190 000 m³ (Figure 1E). Ce volume est encore loin du volume total de sable qui a été refoulé à l'avant-plage et sur la plage, volume qui, selon le GPMD, approcherait les 3 Mm³ (source interne GPMD).

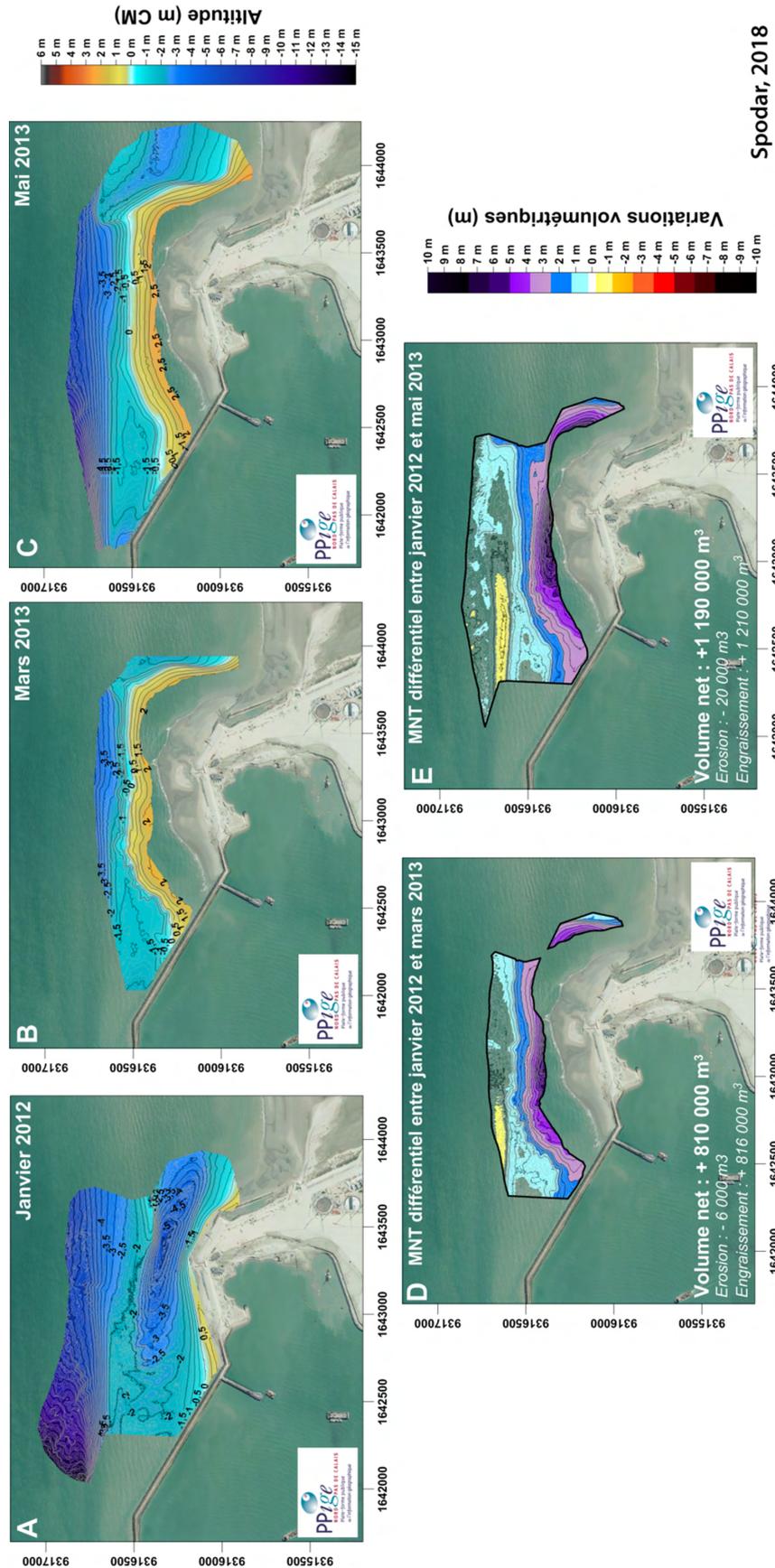


Figure VII.2 Morphologie du site avant travaux (A) et après les travaux de rechargement en mars 2013 (B) et en mai 2013 (C), MNT différentiel entre janvier 2012 et mars 2013 (D) et entre janvier 2012 et mai 2013 (E)

Le premier levé topo-bathymétrique complet disponible incluant la zone intertidale date de mars 2014, soit un an après la fin des travaux. L'apport massif de sable est bien visible sur la Figure VII.3 avec des secteurs ayant gagné plus de 9 m de sable. Le volume net sur cette emprise atteint +2,94 Mm³. L'évolution du site entre janvier 2012 et mars 2014 illustre donc les changements morphologiques importants liés au rechargement mais également la première année de l'évolution de celui-ci qu'il sera donc impossible de différencier.

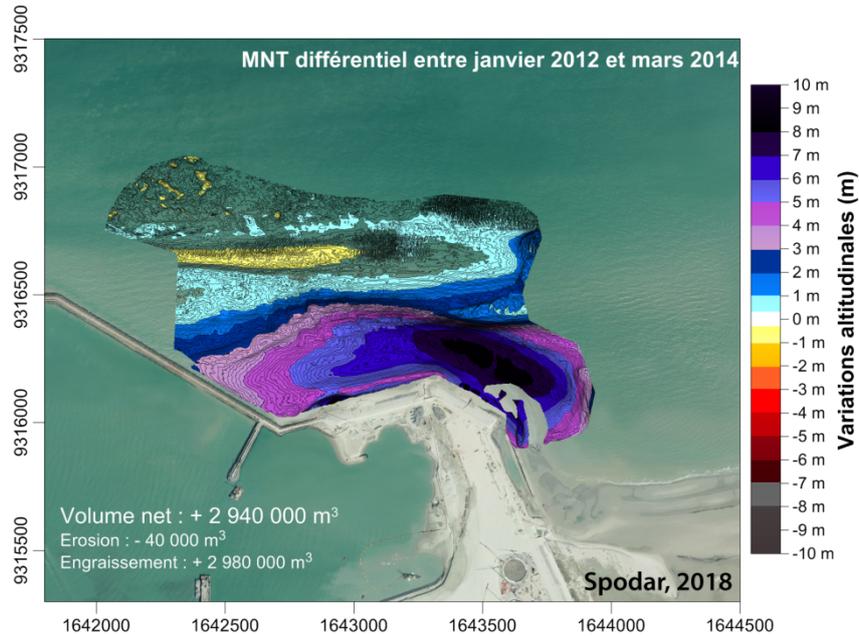


Figure VII.3 MNT différentiel entre janvier 2012 et mars 2014

2. Analyse des conditions météo-marines

L'analyse des conditions météo-marines de mars 2013 à avril 2017 va permettre d'examiner les réponses du rechargement subtidal au droit de la digue du Ruytingen aux forçages hydro-météorologiques. Une partie des données (vents et houles au large enregistrées à la station Sandettie, vents à la côte) a déjà été analysée dans le chapitre précédent consacré au rechargement de la digue des Alliés pour la période mars 2014 à mai 2017. Ici, une année supplémentaire, de mars 2013 à février 2014, va être analysée et le découpage qui va être effectué afin d'affiner l'analyse ne sera pas le même que pour le chapitre précédent. L'analyse des conditions météo-marines va être menée par périodes correspondant aux dates des levés bathymétriques, à savoir :

- Période 1 : 10 mars 2013 – 23 octobre 2013
- Période 2 : 24 octobre 2013 – 26 mars 2014
- Période 3 : 27 mars 2014 – 14 octobre 2014
- Période 4 : 15 octobre 2014 – 20 avril 2016
- Période 5 : 21 avril 2016 – 14 avril 2017

2.1. Analyse des conditions anémométriques au large

L'analyse des conditions anémométriques au large se base sur des données enregistrées à la station Sandettie. Globalement, pendant la période comprise entre mars 2013 et avril 2017, la rose des vents correspond au schéma classique régional avec une prédominance des vents de secteur SO

en provenance de la Manche, suivis par les vents de NE en provenance de la mer du Nord (Figure VII.4). Les vitesses de vents sur cette période globale se répartissent de la manière suivante :

- < 4 m/s : 8,9 % des enregistrements
- Entre 4 et 8 m/s : 34,2% des enregistrements
- Entre 8 et 12 m/s : 34,1 m/s des enregistrements
- Entre 12 et 16 m/s : 16,1 % des enregistrements
- ≥ 16 m/s : 6,6 % des enregistrements

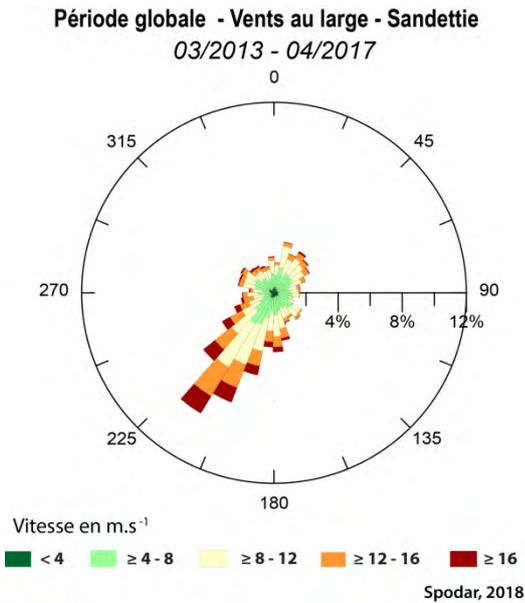


Figure VII.4 Rose des vents au large sur la période globale de suivi

La distribution mensuelle des vitesses de vents permet de mettre en évidence des variabilités d'intensités au fil du temps (Figure VII.5). Au cours du mois de mars 2013, le premier mois post-recharge, une fréquence plus importante de vents ≥ 8 m/s a pu être enregistrée. Sur la période globale ce sont surtout les périodes automnales et hivernales qui se distinguent dans les enregistrements. D'octobre 2013 à février 2014, les vents moyens et forts deviennent de plus en plus fréquents avec 27,9 % de vents soufflant entre 12 et 16 m/s et 23,0 % de vents ≥ 16 m/s. C'est pendant la fin de l'automne 2013 et le début de l'hiver 2013 - 2014 que de nombreuses tempêtes ont frappé la Côte d'Opale et plus généralement l'Europe de l'ouest et du nord (Castelle *et al.*, 2015; Masselink *et al.*, 2016; Scott *et al.*, 2016). L'événement marquant d'octobre 2013 est le passage de la tempête Christian le 28 octobre, avec des vents forts en provenance du SO. C'est lors de cette tempête que les vitesses de vent les plus fortes de toute la période de suivi ont été enregistrées, avec des vents soufflant à plus de 32 m/s (32,4 m/s). Au cours du mois de décembre 2013 les tempêtes Xaver et Dirk ont frappé le nord de l'Europe, les vents forts ≥ 16 m/s représentant 16,4 % des enregistrements pendant ce mois de décembre. La tempête Xaver des 5 et 6 décembre est particulièrement notable car elle est associée à une importante surélévation du niveau d'eau (Daubord, 2014). En début d'année 2014 ce sont les tempêtes Petra et surtout Ulla qui sont les événements particulièrement marquants, d'où des fréquences mensuelles de vents forts élevées (Figure VII.5). Les périodes hivernales 2014-2015 et 2015-2016 se distinguent également par une fréquence plus élevée de vents

forts alors que, comme montré dans le chapitre précédent section 2 , l'hiver 2016-2017 est caractérisé par des conditions de vent plus modérées.

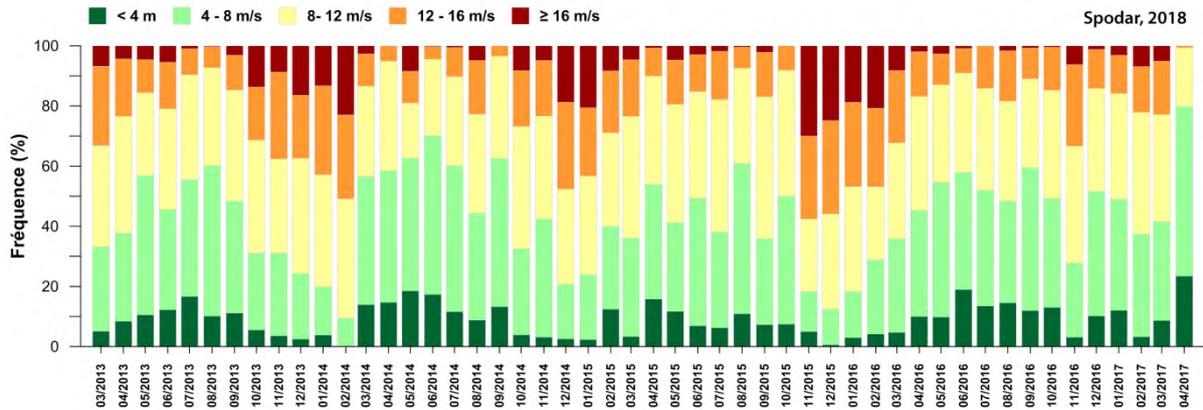


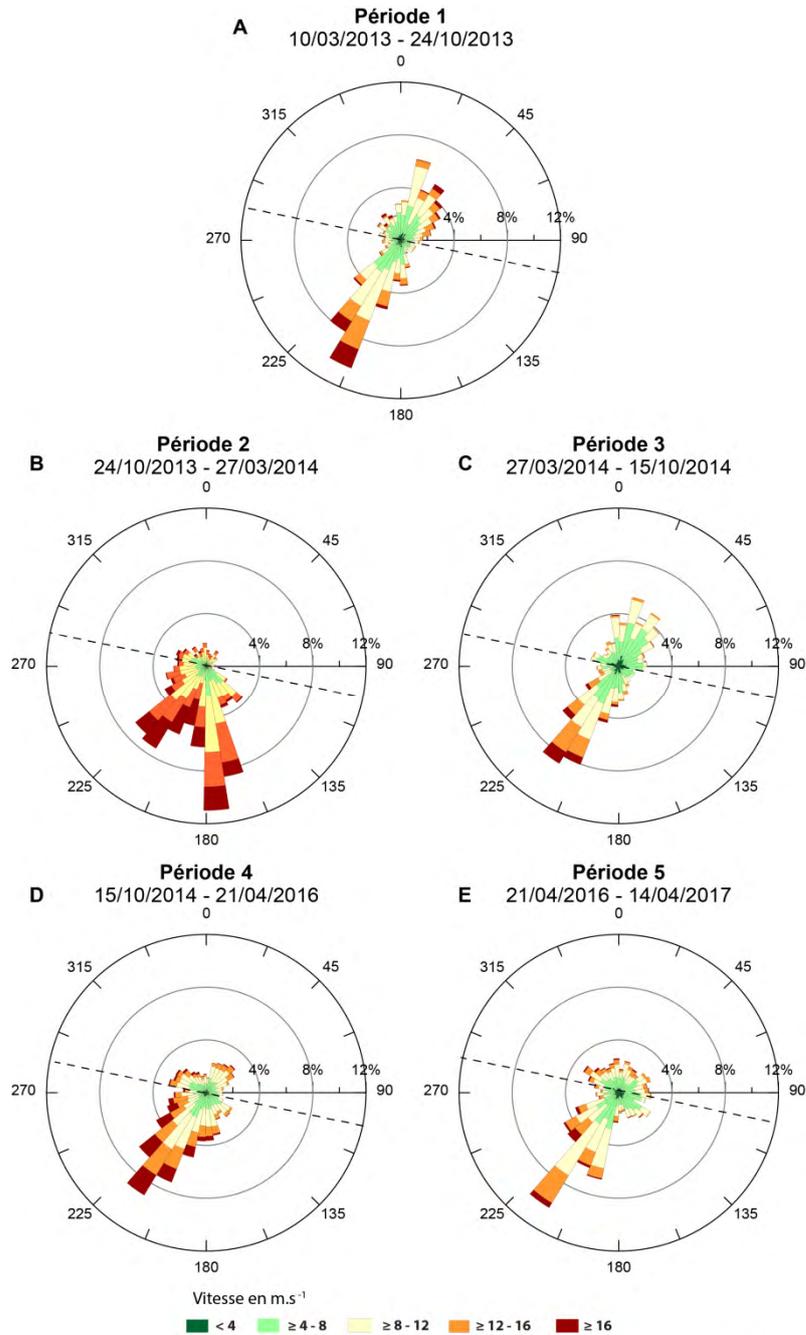
Figure VII.5 Fréquences mensuelles des données de vents horaires au large ≥ 8 m/s et ≥ 16 m/s entre mars 2013 et avril 2017

La période globale a été divisée en cinq sous-périodes correspondant aux intervalles de temps entre deux levés bathymétriques afin d'affiner l'analyse et de comprendre quelles conditions énergétiques se sont produites entre deux levés successifs:

- La période 1 (du 10 mars 2013 au 24 octobre 2013) est marquée par une nette prédominance des vents de secteur SO et NE (Figure VII.6-A). Cette période printanière et estivale se caractérise par des vents assez modérés, avec une fréquence de vents compris entre 12 et 16 m/s de 13,6 % et de vents forts ≥ 16 m/s de 4,0% (Figure VII.7)
- La période 2 (du 24 octobre 2013 au 27 mars 2014) se démarque avec une prédominance des vents de secteur sud (SE à SO) (Figure VII.6-B - Figure VII.7-B). Les vents compris entre 8 et 12 m/s sont les plus fréquents mais on note une part importante de vents compris entre 12 et 16 m/s (24,5%) et ≥ 16 m/s (14,0 %) (Figure VII.7-A). Pour rappel, c'est cette période qui englobe le passage des tempêtes hivernales de 2013-2014.
- La période 3 (du 27 mars 2014 au 15 octobre 2014), se caractérise par un schéma « classique » avec des vents de provenance des secteurs NE et SO (Figure VII.6-C). Les vents faibles, compris entre 4 et 8 m/s sont prédominants pendant cette période, avec près de 45% des enregistrements (Figure VII.7-A). Les vents moyens entre 12 et 16 m/s (9,21%) et les vents forts ≥ 16 m/s (2,8 %), dont la fréquence est relativement faible, proviennent principalement du secteur SO.
- La période 4 (du 15 octobre 2014 au 21 avril 2016), la plus longue des cinq périodes analysées, se caractérise par une prédominance des vents de secteur SO (Figure VII.6-D). Durant cette période, les vents moyens entre 12 et 16 m/s et les vents forts

≥ 16 m/s sont assez fréquents avec respectivement 18,9% et 9,8% des enregistrements

- La période 5 (du 21 avril 2016 au 14 avril 2017) qui s'étend sur une année complète est caractérisée par des vents faibles (entre 4 et 8 m/s) et très faibles (< 4 m/s) avec 67,7 % et 11,2 % des mesures. On note une prédominance des vents originaires du SO (Figure VII.6-E)



Spodar, 2018

Figure VII.6 Roses des vents au large enregistrés à la station Sandettie par périodes. Le trait en pointillé noir correspond à l'orientation générale du site étudié.

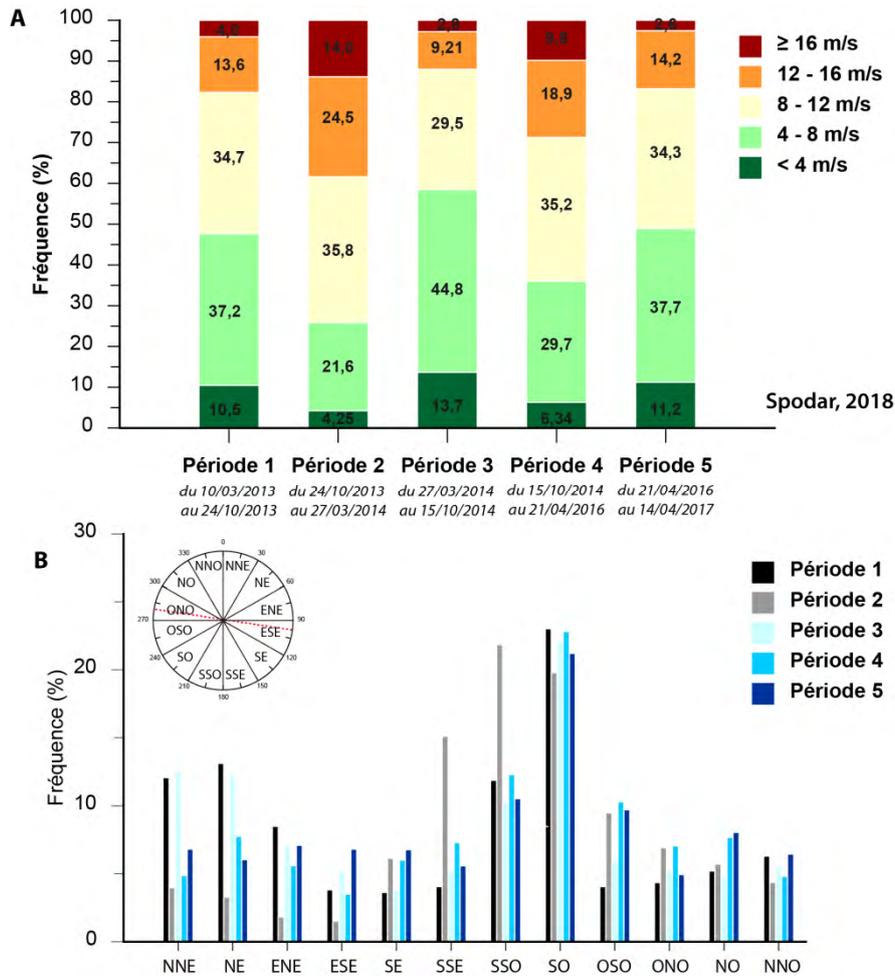


Figure VII.7 Distribution des vents au large par catégories de vitesses (A) et de provenances (B) pendant les cinq périodes de suivi

2.2. Conditions anémométriques à la côte

Pour l'analyse des vents à la côte, les données enregistrées à la station Météo-France à Dunkerque ont été sélectionnées. La Figure VII.8 synthétise les roses des vents à Dunkerque pour l'ensemble de la période de suivi ainsi que pour les cinq sous-périodes permettant ainsi de constater que les vents sont globalement plus faibles à la côte en comparaison des enregistrements de vents au large. Une prédominance des vents compris entre 4 et 8 m/s est observable quelle que soit la période (Tableau VII.1).

	1,5 à 4 m/s	4 à 8 m/s	8 à 12 m/s	12 à 16 m/s	≥ 16 m/s
Période 1	27,8	56,6	14,3	1,2	0,1
Période 2	20,4	59,0	18,6	2,0	0,0
Période 3	39,6	52,6	7,5	0,2	0,0
Période 4	25,7	53,3	18,7	2,3	0,1
Période 5	33,6	54,4	10,9	1,0	0,0

Tableau VII.1 Fréquences des vents à la côte par catégories de vitesses par périodes d'analyse

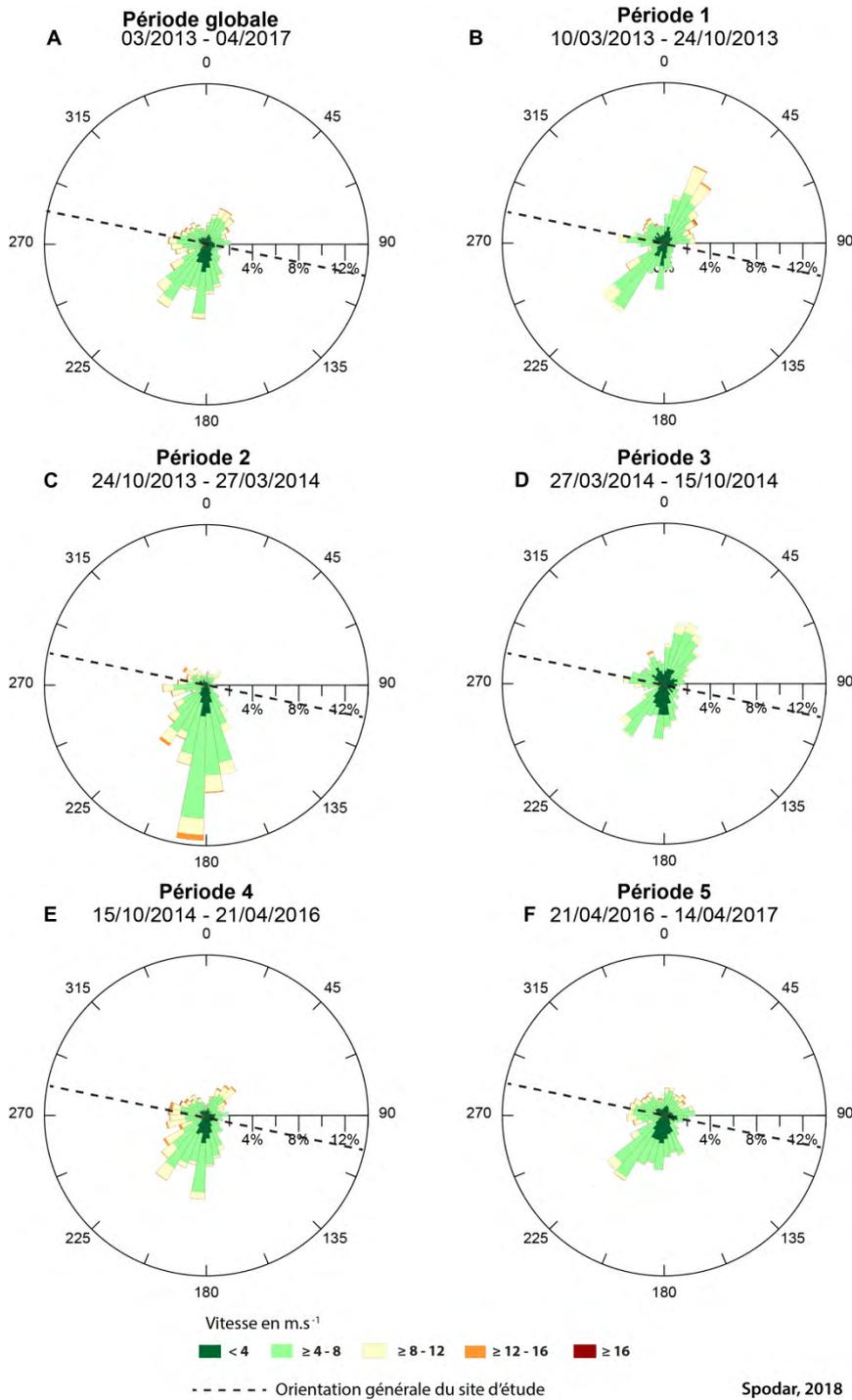


Figure VII.8 Roses des vents à Dunkerque au cours de la période globale de suivi et des sous-périodes d'analyse

Les fréquences de vents entre 12 et 16 m/s varient entre 0,2 % (période 3) et 2,3% (période 4) tandis que les vents les plus forts ≥ 16 m/s représentent une part infime des enregistrements $\leq 0,1$ % quelle que soit la période.

Concernant la provenance des vents, il est possible d'observer lors de la période 1 et 3 (Figure VII.8-B et D), une prédominance des vents de secteurs NE, soufflant donc perpendiculairement au site d'étude. Le secteur SO est la seconde origine des vents. On note

cependant que les vents moyens et forts proviennent principalement du NE. Au cours de la période 2, ce sont des vents de terre qui ont prévalu. Des vents moyens en provenance de l'ouest ont également été enregistrés. Pour la longue période d'octobre 2014 à avril 2016, on remarque que le secteur SO domine légèrement. En revanche les vents moyens et forts viennent principalement des secteurs O et NE. Les mêmes observations peuvent être faites pour la période 5.

2.3. Analyse des houles au large

Entre mars 2013 et avril 2017, les distributions des hauteurs significatives des vagues au large se répartissent de la manière suivante :

- < 0,5 m : 48,0 % des enregistrements
- Entre 0,5 et 1 m : 31,5 % des enregistrements
- Entre 1 et 1,5 m : 12,5 m/s des enregistrements
- Entre 1,5 et 2 m : 4,8 % des enregistrements
- Entre 2 et 2,5 m : 2,2 % des enregistrements
- Entre 2 et 2,5 m : 0,8 % des enregistrements
- ≥ 3 m : 0,2 % des enregistrements

Près de la moitié des enregistrements se caractérisent par des hauteurs inférieures à 0,5 m. Les vagues les plus hautes $\geq 1,5$ m représentent une part non négligeable des mesures avec une fréquence de 8%. Leur fréquence entre mars 2013 et avril 2017 fluctue avec une plus forte fréquence pendant les périodes automnales et hivernales (Figure VII.9). Cette observation est donc en adéquation avec l'analyse des vents au large où les périodes les plus venteuses ont principalement été identifiées d'octobre à mars. Au cours de la première année de suivi, les mois de mars 2013 ainsi que les mois compris entre octobre 2013 et février 2014 se différencient avec des vagues $\geq 1,5$ m dont la fréquence est comprise entre 14% (novembre 2013) et 21,65 % (mars 2013). L'impact des tempêtes de l'hiver 2013 - 2014 est clairement mis en évidence. Au cours de la tempête Christian le 28 octobre 2013, les hauteurs significatives des vagues ont atteint 3,8 m, correspondant à la valeur la plus élevée de l'ensemble de la série de données. Les tempêtes Godehart, Dirk et Ulla ont engendré des hauteurs de vagues dépassant les 3 m en novembre 2013, décembre 2013 et février 2014 respectivement.

On remarque une diminution générale de la hauteur des vagues à partir de mars 2014 pour ré-augmenter en décembre 2014 comme le montrent les fréquences par catégories de hauteurs ou la moyenne mensuelle des enregistrements (Figure VII.9). La description du climat de houle pour l'hiver 2014-2015 ainsi que pour les deux hivers suivants a déjà été réalisée dans le chapitre précédent dans la section 2.

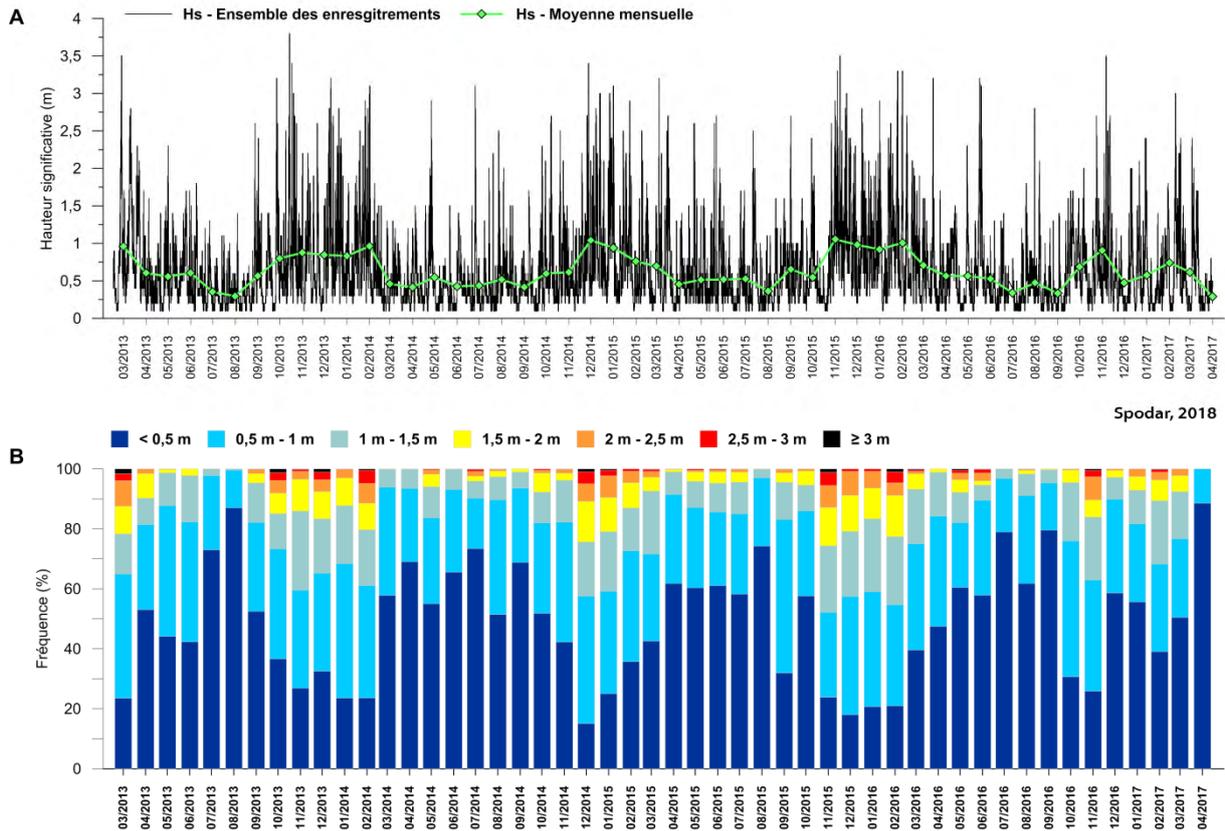


Figure VII.9 Hauteur significative (m) des vagues enregistrées à la station Sandettie (A) et fréquences mensuelles des vagues classées par hauteur (B) entre mars 2013 et avril 2017

La distribution des vagues par catégories de hauteurs a été étudiée en fonction des différents intervalles de temps entre les levés bathymétriques (Figure VII.10).

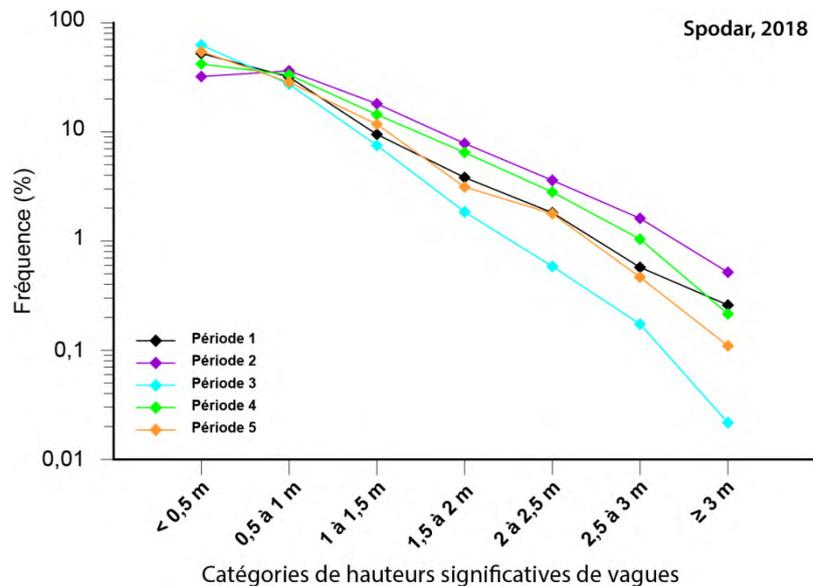


Figure VII.10 Fréquence de hauteurs de vagues par catégories pour les cinq périodes de suivi du rechargement

On remarque notamment que la période 2 se distingue avec une plus faible fréquence de houles < 0,5 m (32,1%) et une plus forte fréquence des autres catégories de houles dont les fréquences sont systématiquement supérieures aux autres périodes. Les vagues les plus hautes, comprises entre 2,5 et 3 m et ≥ 3 m représentent respectivement 1,6 % et 0,5 % des mesures. Cette deuxième période correspond à la période plus tempétueuse de la fin de l'automne 2013 et d'une partie de l'hiver 2013-2014. La période 4, entre octobre 2014 et avril 2016 se caractérise également par de plus fortes vagues. La période 3 quant à elle se distingue par les fréquences les plus faibles dans les catégories de hauteurs de vagues de plus de 0,5 m, les hauteurs de vagues $\geq 2,5$ m ne représentant que 0,2 % des mesures.

La provenance des vagues les plus hautes $\geq 1,5$ m a été analysée. Pour rappel, les données de vagues issues de la bouée Sandettie ne sont pas directionnelles. Les enregistrements de hauteurs de vagues ont donc été associés aux directions de vents au large enregistrés à Sandettie (Tableau VII.2).

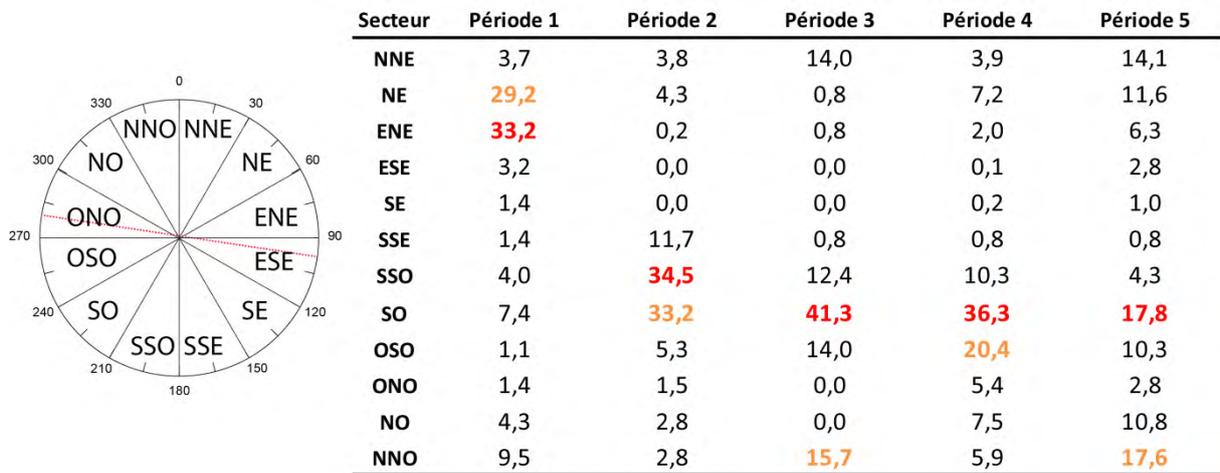


Tableau VII.2 Distribution (en %) par période des enregistrements de vagues $\geq 1,5$ m au large associés aux directions de vents au large

Au cours de la première période, les fortes houles sont principalement associées à des vents de NE et NNE (Tableau VII.2). Entre octobre 2013 et mars 2014, correspondant à la seconde période, on observe des vagues en provenance majoritairement des secteurs SSO et SO en se basant sur les directions de vents. Pour les deux périodes suivantes, c'est le secteur SO qui domine. Enfin au cours de la période 5, les vagues $\geq 1,5$ m associées aux directions de vents proviennent de manière quasiment égale des secteurs SO et NNO.

2.4. Analyse des niveaux d'eau

Par soucis de fiabilité, les données de niveaux d'eau du SHOM enregistrés à l'avant-port Est de Dunkerque ont été privilégiées par rapport à celles de l'avant-port Ouest non corrigées par le SHOM et qui concentraient une proportion élevée de valeurs aberrantes. La distribution des niveaux d'eau par périodes est synthétisée dans le Tableau VII.3 et la Figure VII.11 illustre la distribution mensuelles des hauts niveaux d'eau sur la période de suivi.

	Période 1	Période 2	Période 3	Période 4	Période 5
≥ PHMA	0,02	0,32	0,07	0,23	0,20
PMVE - PHMA	2,39	2,54	2,33	2,36	2,51
PMME - PMVE	19,65	20,27	21,08	20,28	20,42
NM - PMME	26,73	27,52	26,05	26,88	26,29
BMME - NM	29,72	30,41	29,41	30,18	30,38
BMVE - BMME	19,95	17,10	19,21	18,14	18,67
PBMA - BMVE	1,55	1,76	1,85	1,90	1,54
< PBMA	0,00	0,08	0,00	0,03	0,00

Tableau VII.3 Distribution des niveaux d'eaux par périodes de suivi

La période 2 se différencie avec une fréquence un peu plus importante de niveaux d'eau ≥ PMVE (2,86 %), ce pourcentage correspondant à 94 enregistrements compris entre les niveaux PMVE et PHMA ainsi que 12 observations ≥ PHMA. C'est lors de cette période que la tempête Xaver des 5 et 6 décembre 2013, qui coïncidait avec des marées de vives-eaux (coefficient de 98 à 103), a engendré un haut niveau d'eau exceptionnel. Le niveau d'eau a en effet atteint 7,43 m CM le 6 décembre à 1 :30 au lieu des 6,17 m CM prédits soit une surcote de 1,26 m à haute mer (Figure VII.11). Ce haut niveau d'eau a donc dépassé le niveau de période de retour de 100 ans estimé à 7,39 m CM (Daubord, 2014). A partir de mars 2014, les hauts niveaux d'eau ont déjà été analysés dans la section 2 du chapitre précédent. On peut cependant rappeler que de nombreux hauts niveaux d'eau ont été enregistrés lors des périodes automnales et hivernales 3 et particulièrement en janvier 2017.

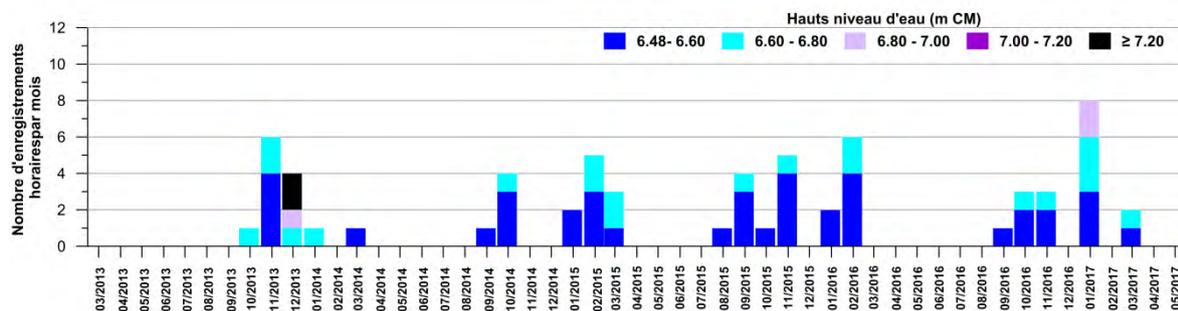


Figure VII.11 Distribution mensuelle des hauts niveaux d'eau (m CM) par catégories de hauteurs

2.5. Analyse de la conjonction de différents forçages

Le rechargement au droit de la digue du Ruytingen étant en grande partie subtidal, une recherche d'événements combinant bas niveaux d'eau et houles puissantes a été menée. En effet, c'est lors de bas niveaux d'eau que les vagues seront potentiellement les plus efficaces pour mettre en mouvements les sédiments et initier des changements morphologiques sur le bas de plage et dans les petits fonds. Les données de vagues au large ont donc été filtrées afin de coïncider avec des niveaux d'eau < BMME à la côte. Le choix s'est porté sur ce niveau des BMME afin d'englober l'action de la houle sur tout le bas de plage. A noter qu'afin de prendre en compte le temps de propagation de la houle du large à la côte, un décalage d'une heure a été appliqué à la série de données des niveaux d'eaux enregistrés à Dunkerque par rapport aux données de vagues au large. Les puissances ont ensuite été calculées et catégorisées par intensité. Le nombre d'enregistrements de niveaux d'eau < BMME fluctue au cours de la période de suivi avec un plus faible nombre d'observations pendant les mois de novembre ou décembre. De décembre 2013 à février 2014 on remarque cependant que

quelques houles puissantes ont coïncidé avec de bas niveaux d'eau (Figure 12). Les puissances de vagues atteignent des valeurs dépassant à plusieurs reprises 20 kW.m^{-1} pour atteindre jusqu'à près de 55 kW.m^{-1} en décembre 2013. Les mois de décembre 2014 à février 2015 se distinguent également (Figure 12) avec des puissances de houles élevées lors de basses mers. On remarque également qu'entre novembre 2015 et février 2016, les puissances dépassent à plusieurs reprises 20 kW.m^{-1} .

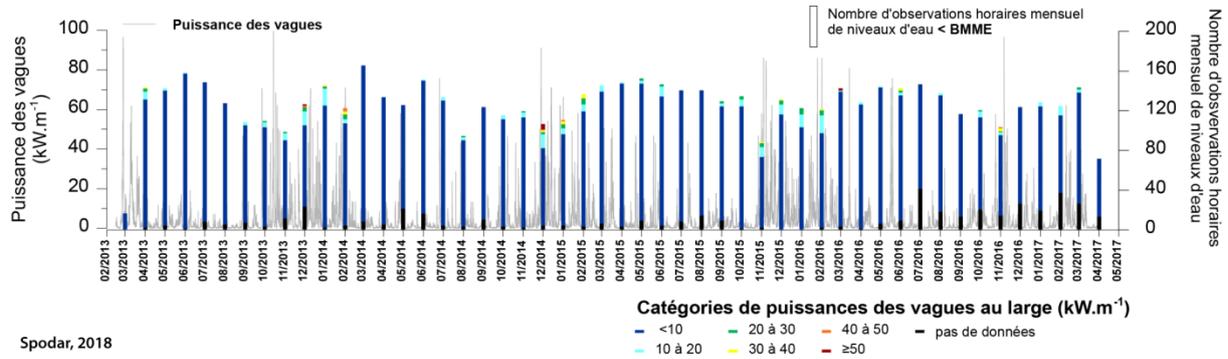


Figure VII.12 Puissances des vagues calculées à partir des données de houles enregistrées à la station Sandettie et puissances des vagues coïncidant avec de bas niveaux d'eau < BMME

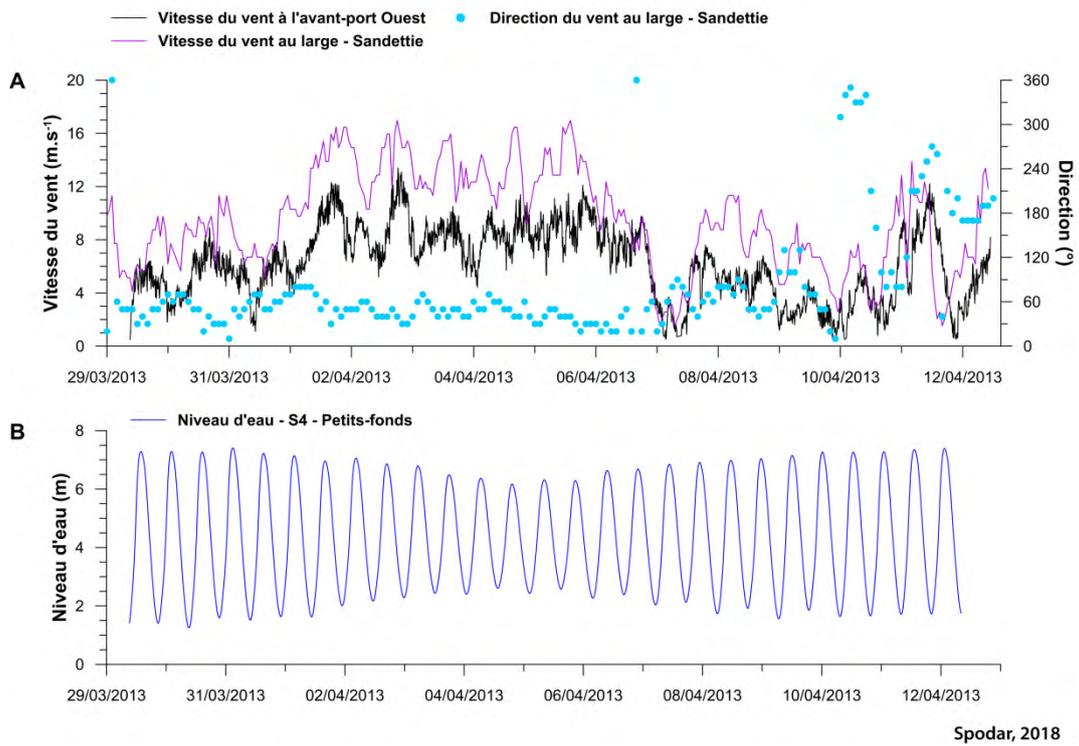
Bien que le nombre d'enregistrements de houles puissantes soit relativement peu nombreux lors de basses mers, cette analyse permet de mettre en évidence que certaines périodes sont plus propices à une action plus intense des vagues en bas de plage et dans les petits fonds. Ce sont en effet les périodes automnales et hivernales qui se différencient du reste de l'année, que ce soit en termes de nombre d'enregistrements de puissances de vagues plutôt moyennes (autour de 20 à 30 kW.m^{-1}) ou de valeurs de puissances atteintes (jusqu'à 55 kW.m^{-1}).

3. Caractéristiques hydrodynamiques du site après rechargement

Une campagne de mesures hydrodynamiques a été effectuée par le LOG en mars 2013 après les travaux de rechargement (Héquette *et al.*, 2013). Les données de cette expérimentation de terrain ont été mises à disposition de ce travail doctoral. L'objectif de cette section est de mettre en évidence le comportement hydrodynamique du site juste après le rechargement.

3.1. Caractéristiques météorologiques et marégraphiques pendant la campagne de mesures

La période de déploiement des appareils s'étend du 29.03.2013 au 12.04.2013 (voir Chapitre V pour la localisation des appareils – section 2.4.2.1). Ces quinze jours recouvrent 27 cycles de marée, soit deux périodes de vives-eaux et une période de mortes-eaux (Figure VII.13-B). Les coefficients de marée de 105 en début de campagne (le 29 mars) diminuent pour passer à des coefficients de 50 le 05 avril avant de ré-augmenter en fin de campagne de mesures et atteindre 95 le 12 avril. Lors de cette expérimentation de terrain les conditions météorologiques ont varié en termes d'intensité et de direction des vents (Figure 13 A).



Spodar, 2018

Figure VII.13 Vitesses et directions du vent au large enregistrées à la station Sandettie et vitesse de vent à Dunkerque (avant-port Ouest) (A) et niveaux d'eau mesurés dans les petits-fonds (B) entre le 29.03.2013 et le 12.04.2013

Pendant la majeure partie de la campagne de mesures, des vents de secteur NE à ENE ont été prédominants au large et à la côte (Figure VII.13-A – Figure 14-A), sauf en fin de campagne où les directions ont été très variables. La force du vent au large et à la côte a cependant été variable au fil de ces quinze jours avec notamment du 29.03 au 01.04 (marée de vives-eaux) un temps relativement calme pendant laquelle la vitesse des vents au large est restée inférieure à 11 m/s , tandis qu'à la côte les vitesses sont globalement restées inférieures à 8 m/s . Du 01.04 au 06.04, un coup de vent de secteur NE à NNE a été enregistré avec des vitesses atteignant 14,9 m/s à la côte et 17 m/s au large (Figure VII.13-A). A noter que ce coup de vent coïncide avec des coefficients de marée qui décroissent de 89 à 50. Entre le 06.04 et le 11.04, une période assez calme est constatée avec des vents inférieurs à 8 m/s à Dunkerque. Un bref coup de vent le 11.04 vient perturber cette période d'accalmie. L'événement de quelques heures seulement provient du secteur SO avec des vitesses atteignant 12 m/s à la côte et 13,9 m/s au large.

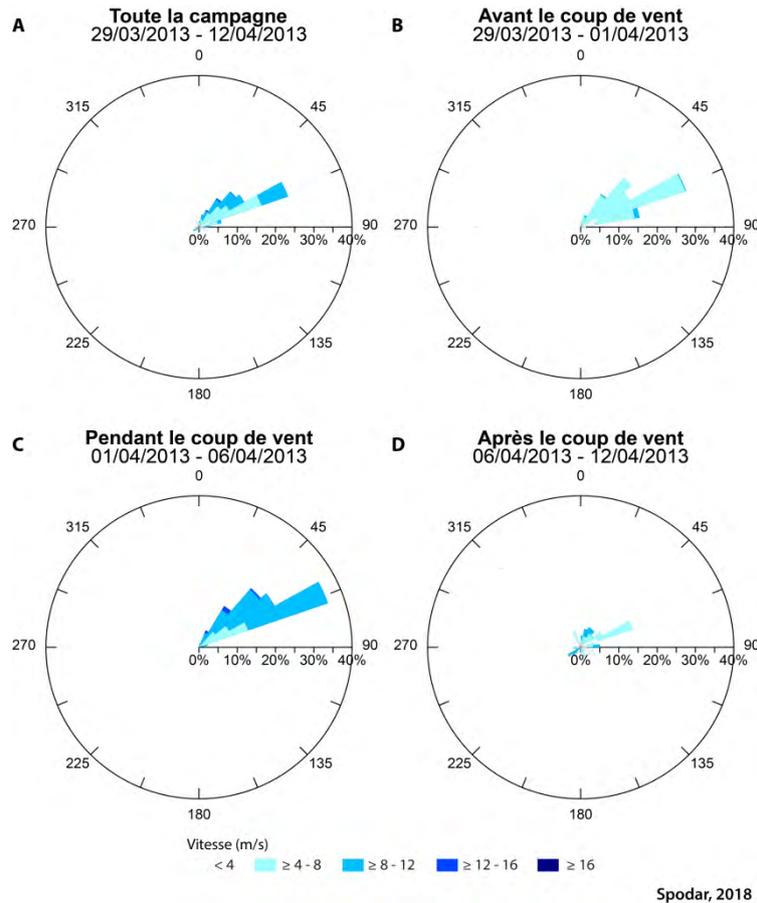


Figure VII.14 Roses des vents enregistrés à Dunkerque (avant-port Ouest) pendant toute la campagne de mesure (A), avant le coup de vent (B), pendant le coup de vent (C) et après le coup de vent (D)

3.2. Conditions hydrodynamiques au large et à la côte

3.2.1. Analyse de la houle

La série temporelle présentant les hauteurs significatives au large et à la côte (Figure VII.15-B) permet de distinguer plusieurs sous-périodes corrélées aux conditions anémométriques. En début de campagne de mesures, du 29.03 au 01.04, on constate que les hauteurs de vagues restent assez modérées que ce soit au large ou à la côte. Dans les petits-fonds, les hauteurs significatives restent inférieures à 1 m avec une moyenne de 0,30 m. Sur la partie intertidale, les hauteurs de vagues sont également inférieures à 1 m. On remarque néanmoins la présence de vagues un peu plus hautes en haut de plage avec une moyenne de 0,49 m contre 0,32 m dans les petits-fonds.

Le coup de vent de secteur NE, du 01.04 au 06.04, entraîne une augmentation de la hauteur des vagues (Figure VII.15-B). A noter que cet événement s'est produit pendant des marées moyennes et de mortes-eaux. C'est au cours de cet épisode que les plus hautes vagues ont été enregistrées. Au large, les houles ont atteint une hauteur de 2,30 m, pour une période pic de 7 s. La hauteur moyenne des vagues au cours de ce coup de vent atteint 1,45 m. Bien que moins élevées à la côte, les hauteurs de vagues restent néanmoins significatives. Dans les petits-fonds par exemple, la moyenne atteint 0,79 m pour une valeur maximale de 1,63 m.

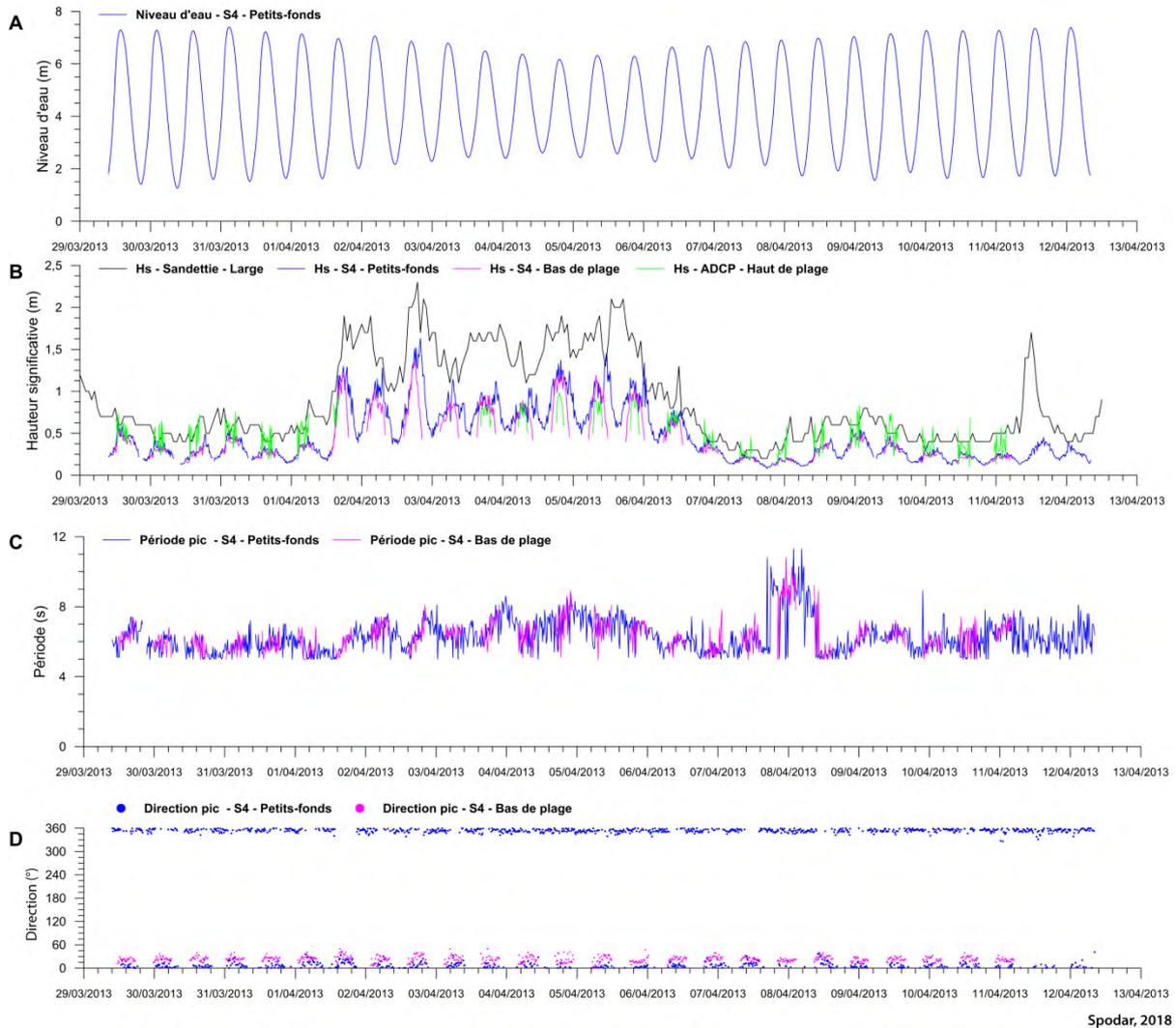


Figure VII.15 Caractéristiques hydrodynamiques pendant la campagne de mesures avec le niveau d'eau dans les petits-fonds (A), les hauteurs significatives au large et à la côte (B), les périodes pic de la houle dans les petits-fonds et en bas de plage (C) et direction de la houle dans les petits-fonds et en bas de plage (D)

Sur l'estran, on constate également une augmentation notable de la hauteur des vagues, qui atteignent une valeur maximale de 1,35 m en bas de plage et 0,98 m en haut de plage pendant cet événement.

Au cours de la période d'accalmie qui s'étend du 06.04 au 11.04, que ce soit au large ou à la côte, les hauteurs de vagues ont nettement diminué (Figure VII.15-B), avec des hauteurs de vagues au large comprises entre 0,20 m et 0,80 m. A la côte dans les petits-fonds, le S4 1 a enregistré des vagues de 0,55 m au maximum pour une moyenne de 0,26 m. Sur la plage, les moyennes sont de 0,26 m en bas de plage et 0,38 m en haut de plage.

Les enregistrements de deux des trois appareils (ADCP et S4 bas de plage) s'arrêtent en tout début de journée le 11 avril, ne permettant pas d'avoir un aperçu du comportement de la houle sur la plage lors de ce bref coup de vent (5h environ). Les enregistrements dans les petits-fonds suggèrent néanmoins que l'impact de ce coup de vent a été plus faible que lors du coup de vent du 1^{er} au 6 avril avec des hauteurs de vagues qui restent inférieures à 1 m à la côte et des hauteurs de vagues de 1,70 m enregistrées au large. Cet événement permet de souligner que c'est la durée pendant laquelle le

vent a soufflé qui explique que les hauteurs des vagues au large aient été moins élevées que lors du coup de vent du 01/04 au 06/04 (Figure VII.13).

Outre ces variations de hauteurs de vagues liées aux conditions de vent, on observe des variations de hauteurs associées aux fluctuations de hauteur d'eau liées à la marée, avec les Hs les plus élevées enregistrées à haute mer ce qui est classique sur ce type de plage (Anthony *et al.*, 2004; Reichmüth & Anthony, 2007; Cartier & Héquette, 2013).

En plus de la variabilité temporelle dans les hauteurs de houles qui a pu être mise en évidence, il est possible d'observer une variabilité de la hauteur des vagues entre le large et la côte d'une part, due à la dissipation de l'énergie de la houle dans les plus faibles profondeurs (Figure VII.15), mais également entre les petits-fonds et la zone d'intertidale d'autre part.

En mettant en relation les hauteurs de vagues enregistrées simultanément dans les petits fonds et en milieu de plage (Figure VII.16), on constate que deux groupes de points se distinguent. Un premier groupe caractérisé par des vagues de temps calme à faiblement agité ($H_s < 0,8$ m) montre que ces dernières sont légèrement plus hautes en milieu de plage. Ce phénomène est probablement dû au gonflement et déferlement des vagues qui s'effectue plutôt en milieu de plage que dans les petits-fonds par temps calme. En revanche, pendant le coup de vent de NE du 01.04 au 06.04, c'est au contraire dans les petits-fonds que les hauteurs de vagues sont plus hautes plutôt que sur la zone intertidale. Ceci s'explique par une plus forte dissipation de l'énergie des vagues et une diminution de leurs hauteurs dans les faibles profondeurs de l'avant-plage et dans la zone intertidale pour ces vagues de taille plus importante qui interagissent plus tôt avec le fond que les vagues de plus faible amplitude.

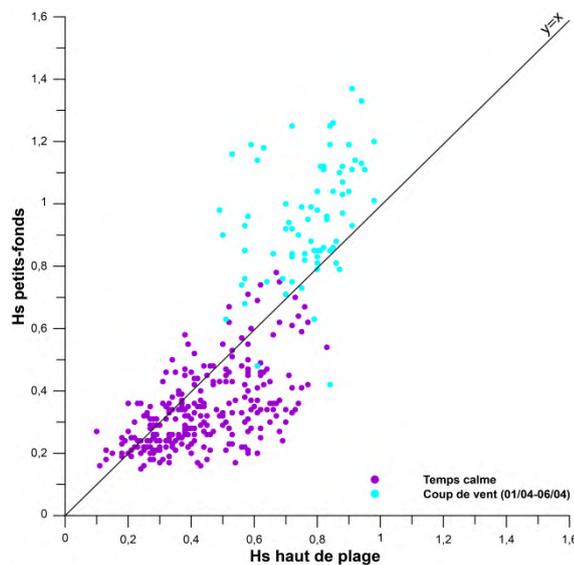
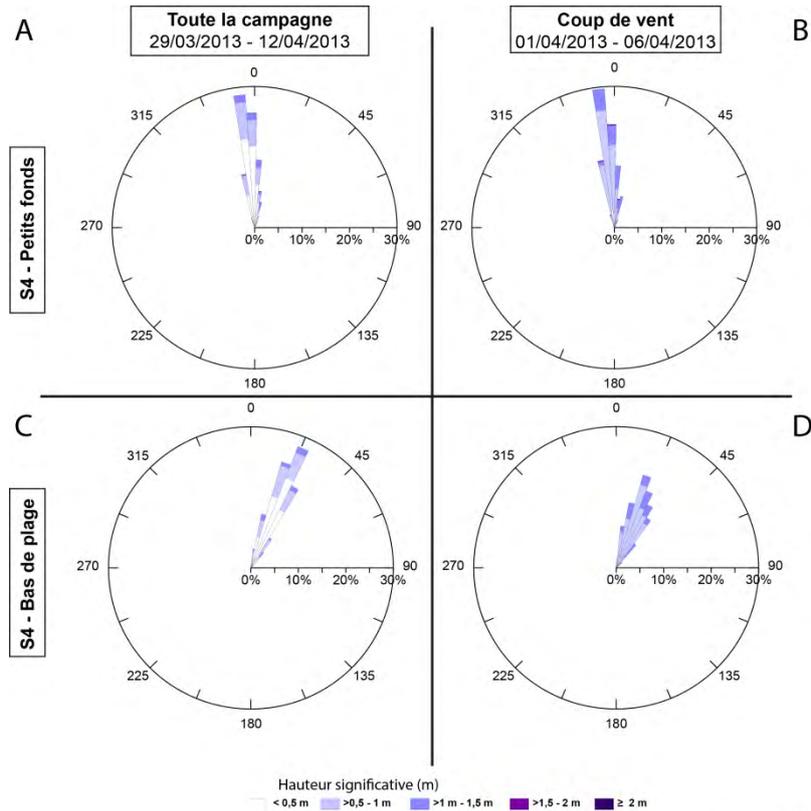


Figure VII.16 Comparaison entre les hauteurs significatives enregistrées dans les petits-fonds (S4 n°1) et celles enregistrées en milieu de plage (ADCP)

Que ce soit au cours de toute la campagne hydrodynamique ou uniquement pendant le coup de vent (Figure VII.17A-B), le faisceau des directions des vagues enregistrées dans les petits-fonds est très restreint, celles-ci provenant principalement du secteur N. On observe qu'en bas de plage, la direction est différente avec une provenance du secteur NNE (Figure VII.17 C-D).



Spodar, 2018

Figure VII.17 Rose des houles enregistrées dans les petits-fonds (S4 n°1) et en bas de plage (S4 n°2) pendant toute la campagne de mesures et pendant le coup de vent

Ces observations sont liées à une réfraction de la houle entre le large et les petits-fonds qui entraîne un changement de direction des vagues de NE à N. Effectivement, les isobathes sont plutôt disposées selon une direction est-ouest dans les petits-fonds où a été déployé le S4 et l'alignement des crêtes de houles est à l'origine de cette direction nord. Puis, entre les petits-fonds et le bas de plage, on observe un changement d'orientation des isobathes qui prennent un alignement plutôt ONO-ESE (voir section 1.2 –Figure VII.2 C). Cela explique pourquoi les vagues enregistrées en bas de plage ont une direction différente, pour arriver perpendiculairement à la côte et donc du secteur NNE.

3.2.2. Analyse des courants

Par temps calme, en début et fin de campagne, on observe dans les petits-fonds une alternance de deux directions principales du courant : vers le SE pendant le flot et vers le NO pendant le jusant (Figure VII.18-A et Figure VII.19-B). Les fluctuations semi-diurnes des directions mais également des vitesses de courants laissent deviner l'influence de la marée par temps calme. La vitesse maximale atteinte dans les faibles profondeurs par temps calme est de 0,44 m/s et a été enregistrée à marée montante. Effectivement, de manière générale, c'est lors du flot que les vitesses les plus élevées ont été enregistrées par le S4 par temps calme. Cette dissymétrie est typique du contexte régional. Lors de période agitée, coïncidant dans notre cas d'étude avec des marées moyennes et de mortes-eaux, on remarque dans un premier temps une nette augmentation des vitesses de courants dans les petits-fonds (Figure VII.19-B) atteignant au maximum 0,87 m/s. Cette vitesse maximale a été atteinte une heure après l'étalement de haute mer. Une modification de la circulation des courants a également été enregistrée avec une direction dominante orientée vers

l'est. On note également des courants dirigés vers le nord et nord-est d'intensité plus élevée (Figure VII.18-B - Figure VII.19-C).

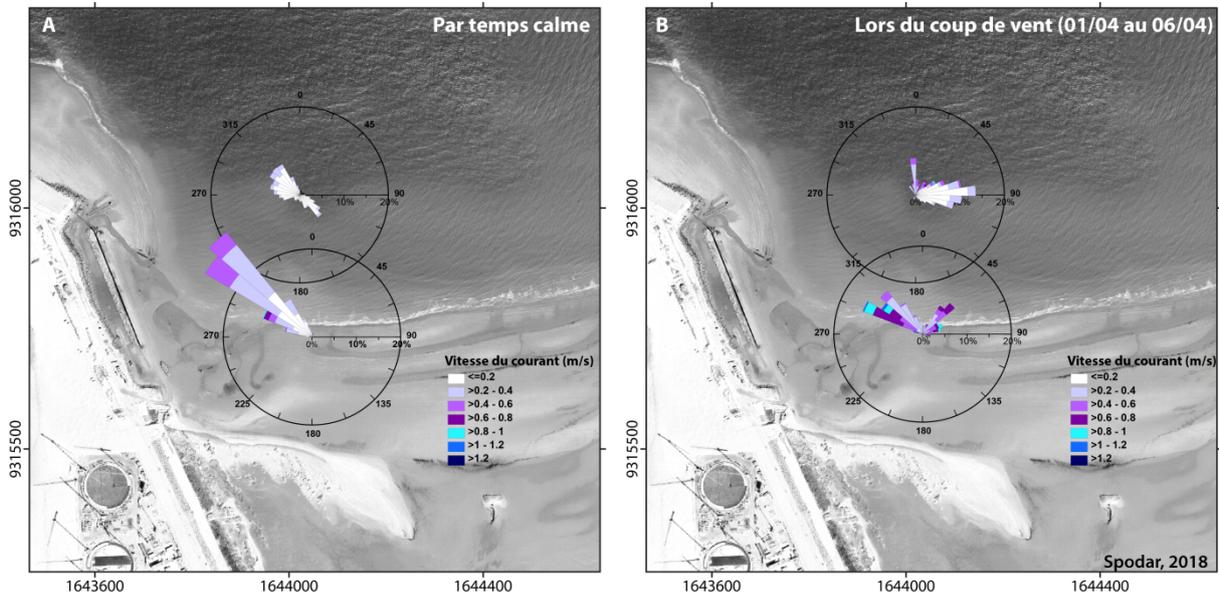


Figure VII.18 Roses des courants dans les petits-fonds et en bas de plage à différents moments de la campagne de terrain : pendant la période calme en début et fin de campagne de mesures (A) et pendant le coup de vent du 01/04 au 06/04 (B)

Sur le bas de plage, les courants enregistrés sont globalement plus forts que ceux mesurés dans les petits-fonds, que ce soit par temps calme ou agité (Figure VII.19-B). Dans le détail on observe des vitesses plus faibles en période calme avec des valeurs qui atteignent tout de même 0,93 m/s lors du flot, tandis que les valeurs s'élèvent à 1,20 m/s pendant le coup de vent. Cette observation met en évidence, comme pour les petits-fonds, que les courants les plus forts en bas de plage n'ont pas été enregistrés au cours des marées de vives-eaux mais lors du coup de vent coïncidant avec des marées moyennes et de mortes-eaux. Par temps calme, une unique direction vers le NO caractérise le courant moyen (Figure VII.19-C et Figure VII.18-A), tandis que pendant le coup de vent en revanche, deux directions sont notables, vers le NO et vers le NE (Figure VII.18-B). L'unique direction de courant vers le NO observé par temps calme est vraisemblablement liée à un contre-courant lié à la présence de l'ouvrage, ce qui est couramment observé à l'arrière de tels ouvrages (Costa & Davidson, 2004).

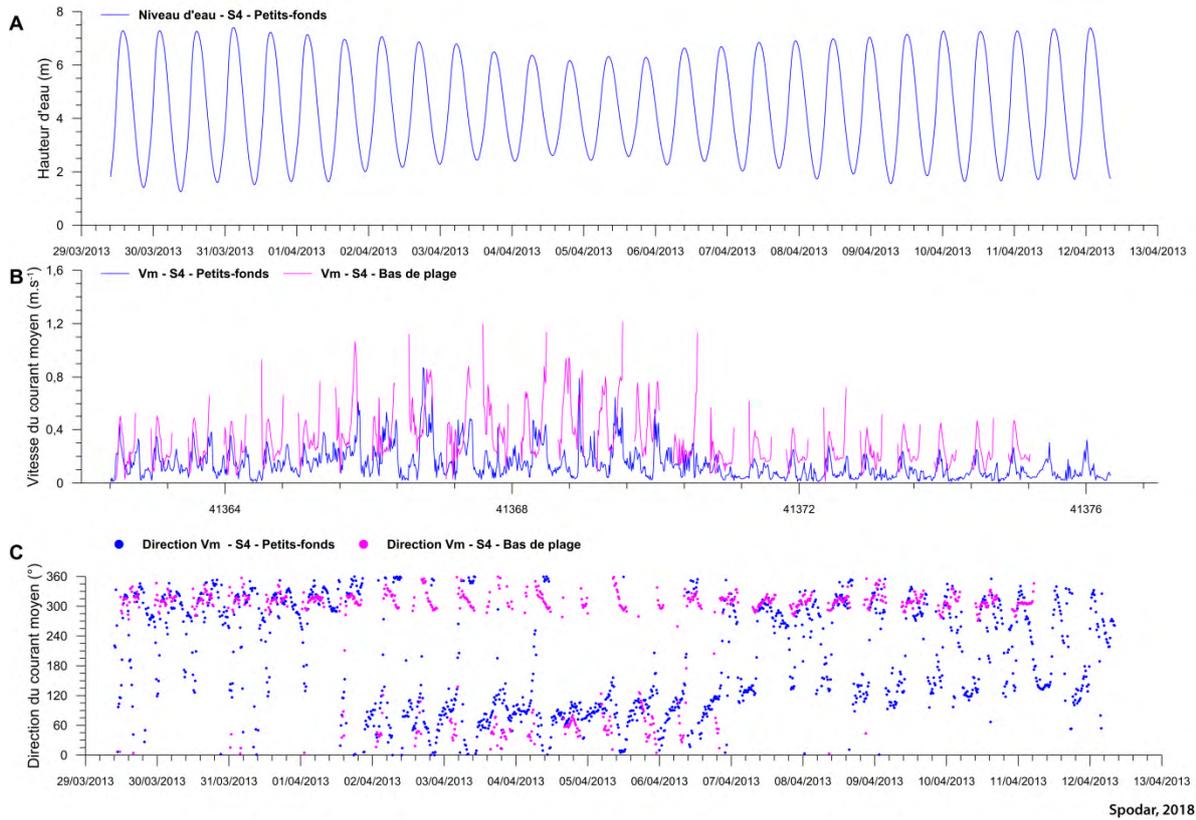


Figure VII.19 Synthèse des caractéristiques des courants moyens enregistrés dans les petits-fonds et en bas de plage avec : les hauteurs d'eau dans les petits-fonds (A), les vitesses (B) et directions (C) des courants moyens

Les courants sur la composante est-ouest en fonction de la hauteur relative des vagues (H_s/h) dans les petits-fonds sont synthétisés dans la Figure VII.21-A. C'est par temps calme que les vitesses de courants sont les plus faibles n'excédant pas 0,4 m/s vers l'ouest et dépassant très rarement 0,3 m/s vers l'est (Figure VII.20-A). Lors du coup de vent une nette prédominance des courants vers l'est est enregistrée avec une légère augmentation des vitesses, associée à des hauteurs relatives plus importantes. Le contraste entre temps calme et agité est plus notable sur le bas de plage, où par temps calme les courants sont exclusivement dirigés vers l'ouest. Leurs vitesses ne dépassent pas un seuil d'environ 0,4 m/s. En revanche, dès l'augmentation des hauteurs relatives pendant le coup de vent, on observe des courants dirigés vers l'est ainsi qu'une nette augmentation des vitesses de courants qui atteignent 1,14 m/s vers l'ouest et 0,93 m/s vers l'est. On considère généralement que la hauteur relative des vagues au déferlement est comprise entre 0,3 et 0,5 sur les plages macrotidales à barres et à bâches (Masselink *et al.*, 2006 ; Sedrati & Anthony, 2007). Des mesures récentes sur une plage à l'est de Dunkerque ont montré que le déferlement des vagues se produit à des hauteurs relatives qui oscillent entre 0,2 et 0,45 (Héquette et Cartier 2016). Dans nos mesures, un seuil de hauteur relative de vague de 0,25 est effectivement identifiable, en-dessous duquel les courants sur la composante est-ouest, enregistrés en zone de levé, ne sont pas très intenses. Au-delà de ce seuil, et donc probablement à l'approche de la zone de déferlement, une modification de la circulation des courants est observée, que ce soit dans les petits-fonds ou en bas de plage, ainsi qu'une intensification des vitesses.

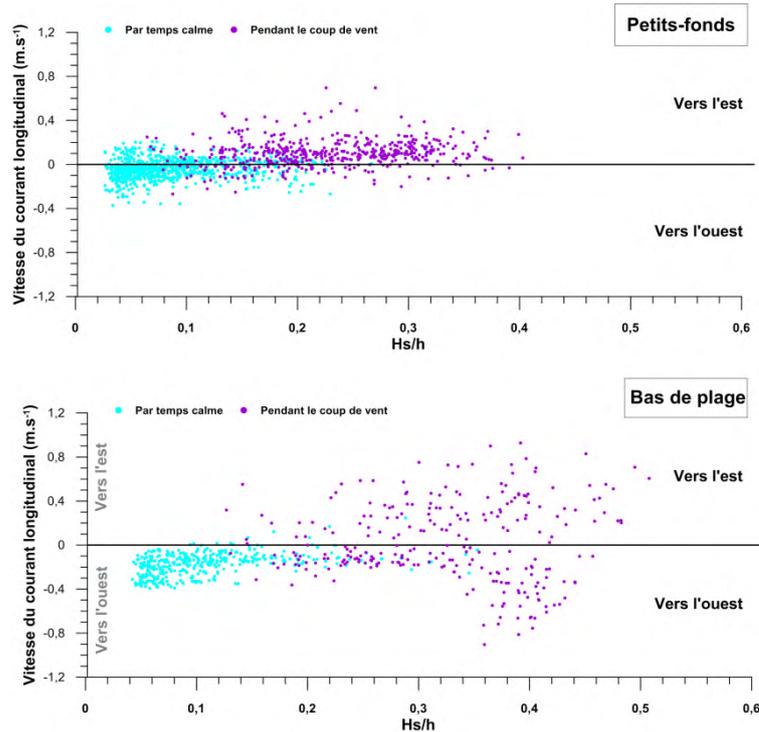


Figure VII.20 Vitesses des courants dans les petits-fonds et en bas de plage sur la composante est-ouest

Sur la composante nord-sud à présent (Figure 21), on observe dans les petits-fonds que les courants associés à des hauteurs relatives inférieures à 0,20 et 0,25, sont les plus faibles de la série de données avec des valeurs ne dépassant pas 0,4 m/s vers le nord et à peine 0,2 m/s vers le sud. Il est cependant possible de remarquer que plus les hauteurs relatives de vagues augmentent (de 0,02 à 0,22), plus les vitesses vers le nord tendent à augmenter, tandis que celles vers le sud diminuent pour devenir inférieures à 0,1 m/s. Cette tendance à l'augmentation des vitesses de courants vers le nord en lien avec l'augmentation des hauteurs relatives des vagues est bien identifiable pendant le coup de vent. Une nette élévation des vitesses de courants vers le nord (0,66 m/s) a effectivement été enregistrée. Les hauteurs relatives correspondantes dépassent les 0,25, suggérant que l'appareil de mesure était proche de la zone de déferlement. Il est par conséquent possible de conclure que la proximité du déferlement des vagues provoque une intensification des courants vers le large. Ces courants correspondent vraisemblablement à des courants de retour en réponse à l'action énergétique des hautes vagues dans de faibles tranches d'eau.

Sur le bas de plage, les courants sont quasiment systématiquement orientés vers le nord, que ce soit par temps calme ou agité. Par temps calme on observe que les vitesses n'excèdent pas 0,35 m/s. Au-delà d'une hauteur relative de vague de 0,25 m, l'augmentation des vitesses de courants vers le nord est nette, en lien avec un enregistrement des données à l'approche de la zone de déferlement. Comme dans les petits-fonds, les vagues énergétiques dans une faible tranche d'eau engendrent l'intensification des courants vers le nord.

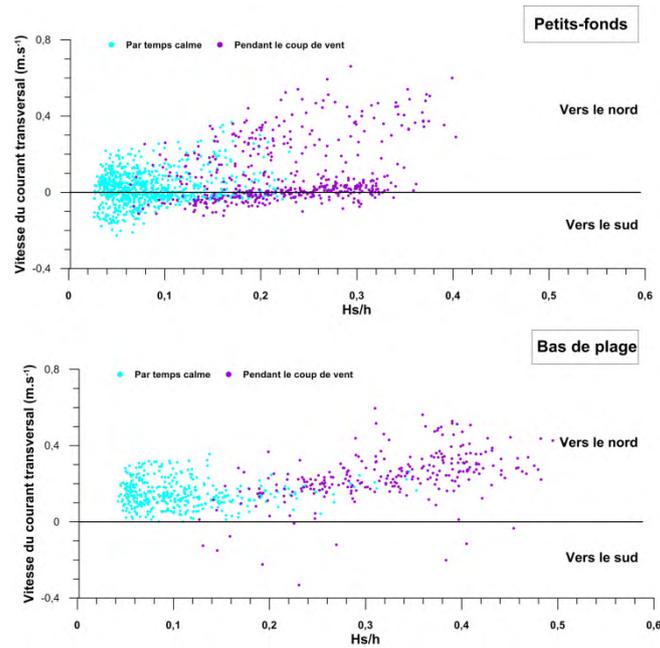


Figure VII.21 Vitesses des courants dans les petits-fonds et en bas de plage sur la composante nord-sud

3.2.3. Seuil de mise en mouvement du sédiment

Afin de mettre en évidence les moments pendant lesquels un transport de sédiment a pu se produire en bas de plage et dans les petits-fonds, l'analyse des vitesses critiques de mise en mouvement des particules sous l'action combinée des vagues et des courants a été effectuée (Figure VII.22).

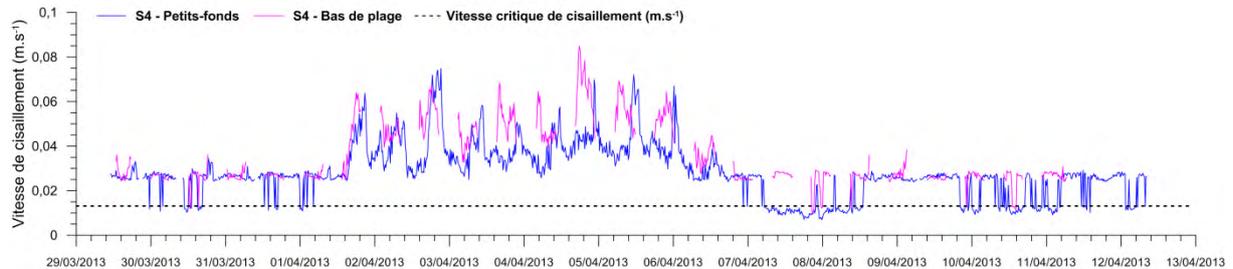


Figure VII.22 Vitesses de cisaillements enregistrées dans les petits fonds et sur le bas de l'estran

La vitesse critique de mise en mouvement des particules est de 0,013 m/s que ce soit dans les petits-fonds ou en bas de plage en raison d'un grain moyen similaire. On remarque que par temps calme du 29/03 au 01/04 et du 06/04 au 12/04, les vitesses de cisaillement dans les petits-fonds sont très souvent supérieures à la vitesse critique mais dépassent rarement un seuil d'environ 0,025 m/s. La vitesse de cisaillement n'est pas suffisante pour mettre en suspension les particules au cours du 07/04 et à d'autres moments très brefs de la marée pendant l'étale de courant par exemple. L'action combinée d'une marée de vives-eaux ou d'une marée moyenne et d'une hauteur de houle modeste engendre des vitesses de cisaillement suffisantes pour mettre en suspension les particules dans les petits-fonds. Cette observation est également valable en bas de plage où on observe une

vitesse de cisaillement supérieure à la vitesse critique dès que le secteur est immergé. Comme pour les petits-fonds, cette vitesse dépasse très rarement 0,025 m/s.

Lors de la période agitée du 01/04 au 06/04, les vitesses de cisaillements augmentent significativement dans les faibles profondeurs (Figure VII.22). Des pics de vitesses à 0,075 m/s maximum ont pu être enregistrés. Le rôle des vagues est donc clairement mis en évidence, d'autant plus que l'événement coïncide avec des marées de mortes-eaux. En bas de plage, c'est également au cours du coup de vent que les vitesses de cisaillements sont plus élevées, dépassant très largement la vitesse critique. Cette analyse met donc en évidence que l'action de la marée seule est suffisante pour mettre en mouvement les sédiments dans les petits-fonds ou en bas de plage. Néanmoins, l'action d'une forte houle semble plus efficace pour remobiliser le sédiment. Ces observations sont cohérentes avec d'autres travaux effectuées dans la région (Sedrati & Anthony, 2007; Héquette *et al.*, 2008b; Cartier & Héquette, 2015) soulignant le rôle des vagues dans la mise en mouvement des sédiments. En réponse à de forts courants dirigés vers le NO en bas de plage mais également vers le NE dû à des courants de retour, une partie du sable mis en suspension est exporté dans ces deux directions. Dans les petits-fonds, en se basant sur les observations de directions du courant, le sable mis en suspension va donc être transporté vers l'est ainsi que vers le nord.

3.3. Synthèse de la campagne hydrodynamique

Les résultats obtenus dans cette section mettent en évidence le comportement hydrodynamique du site après les travaux de rechargement lors de conditions de vents de secteur nord-est qui, le long de cette côte soufflent en moyenne environ 11% du temps. Lors de conditions calmes, l'action de la marée domine avec une alternance des courants tidaux vers le SE lors du flot et vers le NO pendant le jusant. Sur le bas de plage, une unique direction vers le NO caractérise l'orientation des courants par temps calme, que ce soit lors de la marée montante ou descendante. Il est donc possible qu'un courant de gyre en aval dérive de la digue et du rechargement soit à l'origine de cette circulation du courant vers le NO uniquement. Ce contre-courant avait déjà été mis en évidence par (Bertier, 2009) de 2003 à 2005 bien avant les travaux de rechargement, lors d'une campagne de mesures hydrodynamiques en mars 2014 se caractérisant par des conditions de vents similaires à celles que nous avons observé c'est-à-dire de secteurs nord-est à est. La digue seule était donc responsable d'un gyre, que le rechargement a vraisemblablement renforcé. Une image satellite prise lors de conditions de vents d'est-nord-est à est le 11/09/2015 (Figure VII.23), soit deux ans après la campagne de mesures hydrodynamiques en mars 2013, atteste de la présence d'un contre-courant qui est souligné par les sédiments en suspension à l'est de l'ouvrage.

D'autre part, l'impact des fortes vagues pendant le coup de vent de secteur NE a pu être mis en évidence par le biais d'une modification de la vitesse des courants et de leur circulation. Des courants de retour vers le nord ont été mis en évidence dans les petits-fonds et vers le NE en bas de plage. Le renforcement des courants oscillatoires lors d'une forte houle engendre une intensification des courants. De plus, l'augmentation de la mise en suspension des sédiments lors d'une forte houle a également été clairement mise en évidence. Un transport sédimentaire plus important vers l'est dans les petits fonds, combinés à un transport vers le nord se produit tandis que sur le bas de plage, on observe un transport vers le NO et le NE.



Figure VII.23 Image satellitaire du 11/09/2015 montrant la présence du contre-courant lors de conditions de vents de secteur est-nord-est à nord-est (Source : *Google Earth*)

4. Analyse de l'évolution des petits-fonds et du bas de plage

La bathymétrie du site après les travaux de rechargement a été suivie grâce à sept levés bathymétriques effectués de mars 2013 à avril 2017. L'emprise des levés bathymétriques déborde sur le bas de plage permettant également de suivre l'évolution morphologique de cette zone. Il a été choisi d'analyser ces deux secteurs, bas plage et zone subtidale, en même temps.

La Figure VII.24 synthétise l'ensemble des MNT effectués à partir des levés dans la zone subtidale et en bas de plage. Des profils topo-bathymétriques ont été extraits de ces MNT (Figure VII.25). Les profils 2 et 4, perpendiculaires à l'arête ouest de la digue et faisant face au nord nord-ouest dont la pente est relativement forte (2,02 % pour le P2 et 1,94 % pour le P4, pente calculé entre $x = 400$ et 1000 m), illustrent la plus grande exposition aux houles du large de ce secteur, les vagues n'étant dissipées qu'à l'approche immédiate de la côte. Les profils 6 et 8, situés dans la partie est du rechargement, ont des pentes beaucoup plus faibles (0,40% pour le P6 et 0,86 % pour le P8, pente calculé entre $x = 400$ et 1000 m), ce qui favorise une plus grande dissipation de l'énergie des houles incidentes. Le Profil 6 orienté sud-ouest nord-est, caractérise la bathymétrie du fond entre le rechargement et l'extrémité ouest du banc de Mardyck. La Figure VII.26 illustre les cartes de différentiels altimétriques entre deux dates consécutives permettant ainsi de mieux visualiser l'évolution du site et sur la Figure VII.27 sont indiquées les variations volumétriques entre deux dates calculées sur des emprises communes. Afin de différencier l'évolution de la zone subtidale de celle du bas de plage, la position de l'isobathe 0 m CM a été indiquée sur les cartes de différentiels altimétriques.

4.1. Evolution de mars 2013 à octobre 2013

4.1.1. Evolution entre mars et mai 2013

Cet intervalle de temps très court rend compte de l'évolution du rechargement dans les faibles profondeurs et en bas de plage au cours des trois premiers mois après la fin des travaux. Le

levé bathymétrique de mars 2013 (Figure VII.24-A) a l'avantage d'être le premier juste après les travaux de rechargement mais présente l'inconvénient de ne recouvrir qu'une surface très restreinte du site, jusqu'à des profondeurs de -4,5 m CM seulement. Le levé de mai 2013 (Figure VII.24-B) offre un aperçu un peu plus large de la zone subtidale, jusqu'à des profondeurs de -12 m CM. Au nord-est de l'emprise, on devine l'extrémité ouest du banc de Mardyck. La carte de différentiel altimétrique entre ces deux dates (Figure VII.26-A) montre qu'en l'espace de ce court intervalle de temps, des variations morphologiques comprises entre -1,4 m et + 1,5 m se sont produites. Dans la zone subtidale, des zones d'accrétion et d'érosion se succèdent d'ouest en est. La situation en bas de plage est plus uniforme avec une érosion quasi généralisée de -1 m à -1,5 m, excepté aux extrémités ouest et est du rechargement, ce qui laisse supposer un début de remaniement longitudinal du rechargement.

4.1.2. Evolution entre mai 2013 et octobre 2013

La réorganisation du stock sableux est bien visible sur la deuxième période de levés (Figure VII.26-B). En effet des zones d'accrétion se localisent encore une fois à l'ouest et à l'est de l'emprise d'étude, que ce soit dans la zone subtidale ou en bas de plage. A l'est, la zone en engraissement est plus étendue que lors de la période précédente et l'accumulation atteint localement +1,20 m. Dans le secteur central, le bas de plage a subi un abaissement général de - 0,50 m, qui peut atteindre très localement -1 m. Le profil P2 extrait des MNT (Figure VII.25-A) met également en évidence une tendance à la baisse du niveau du bas de plage et dans les petits-fonds jusqu'à environ - 4 m CM, et cela depuis mars 2013. A l'approche du secteur plus à l'est, le profil P4 (Figure VII.25-B) révèle une certaine stabilité de la zone subtidale. Concernant cette zone subtidale, hormis les zones d'accumulation sableuse de part et d'autre du rechargement, il est possible de constater des changements morphologiques notables dans le secteur nord-est de l'emprise à proximité de l'extrémité ouest du banc de Mardyck (Figure VII.26-B Réf n°1). Une zone d'engraissement de +1,25 m au maximum présentant une forme convexe vers le nord-ouest est mise en évidence par le MNT différentiel (Figure VII.26-B). Une légère érosion au sud-est de cette accumulation sableuse est de plus observable indiquant que des variations morphologiques s'initient entre le rechargement sédimentaire et le banc de Mardyck.

C'est à partir du levé de mai 2013 qu'une emprise commune a été déterminée à tous les levés afin de calculer les variations volumétriques (Figure VII.27) (voir section 1.1.1.1 pour le détail de la méthodologie dans le Chapitre V). La période qui s'échelonne entre le troisième et le huitième mois du rechargement se caractérise par un bilan sédimentaire positif avec + 26 000 m³ sur l'emprise commune (Figure VII.27-A). Deux secteurs, un secteur à l'ouest du rechargement (secteur 1) et un secteur à l'est (secteur 3) se caractérisent par un bilan sédimentaire positif de + 28 300 m³ et +37 700 m³ respectivement. Cette observation concorde avec les variations morphologiques observées où une accumulation préférentielle du sable au niveau des deux extrémités du site a été mise en évidence. Le secteur central (secteur 2) est en revanche caractérisé une perte de sable qui atteint -39 700 m³. Le bilan global n'en demeure pas moins positif (Figure VII.27-A).

Cette période est caractérisée par des vents et vagues modérés, comme l'a montré l'analyse des conditions météo-marines entre mai 2013 et fin octobre 2013 ce qui peut expliquer cette évolution.

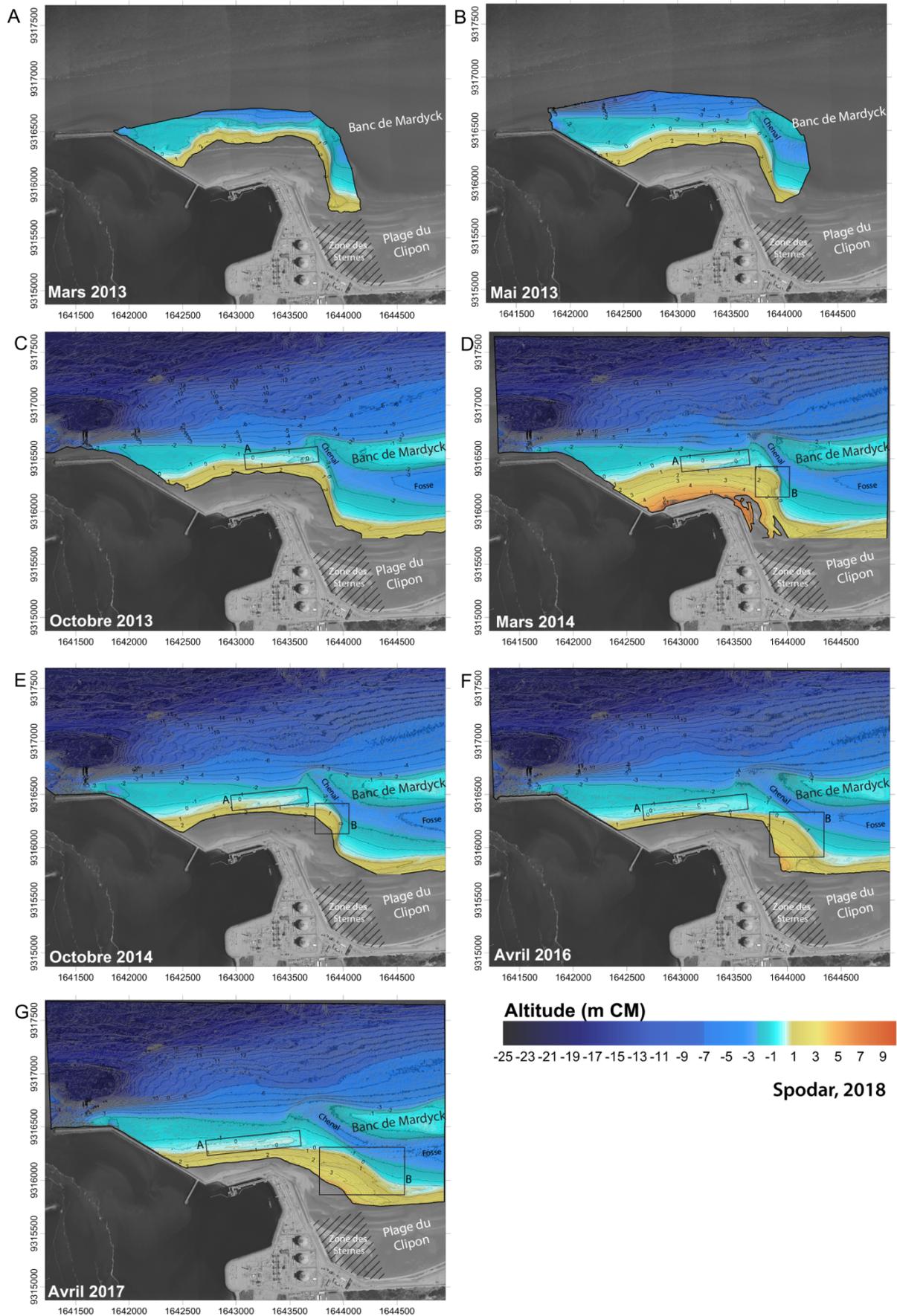
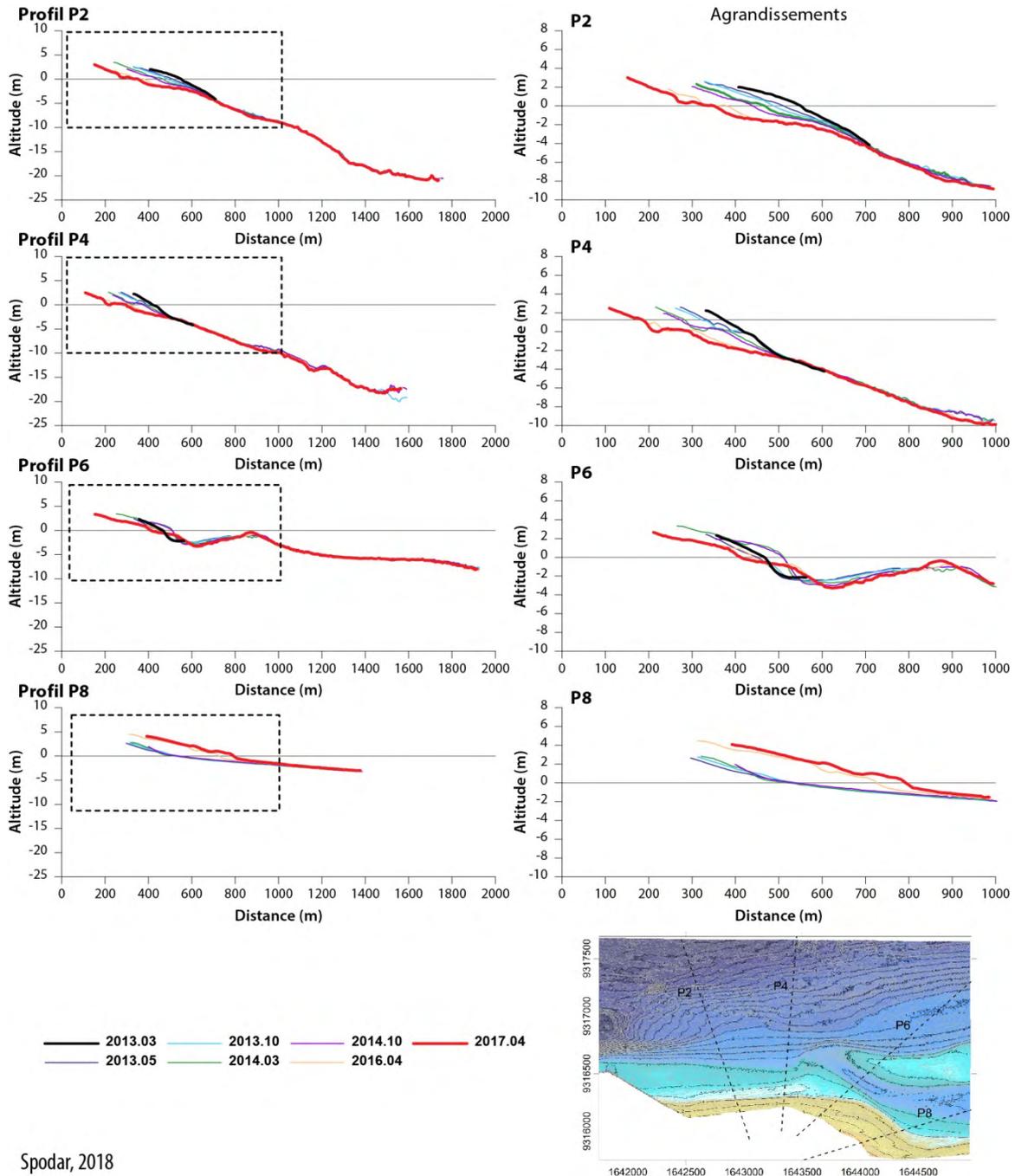


Figure VII.24 Levés bathymétriques effectués entre mars 2013 et avril 2017 illustrant l'évolution morphologique du rechargement



Spodar, 2018
Figure VII.25 Evolution de profils topo-bathymétriques (P2-P4-P6-P8) extraits depuis les MNT entre mars 2013 et avril 2017

4.2. Evolution de octobre 2013 à mars 2014

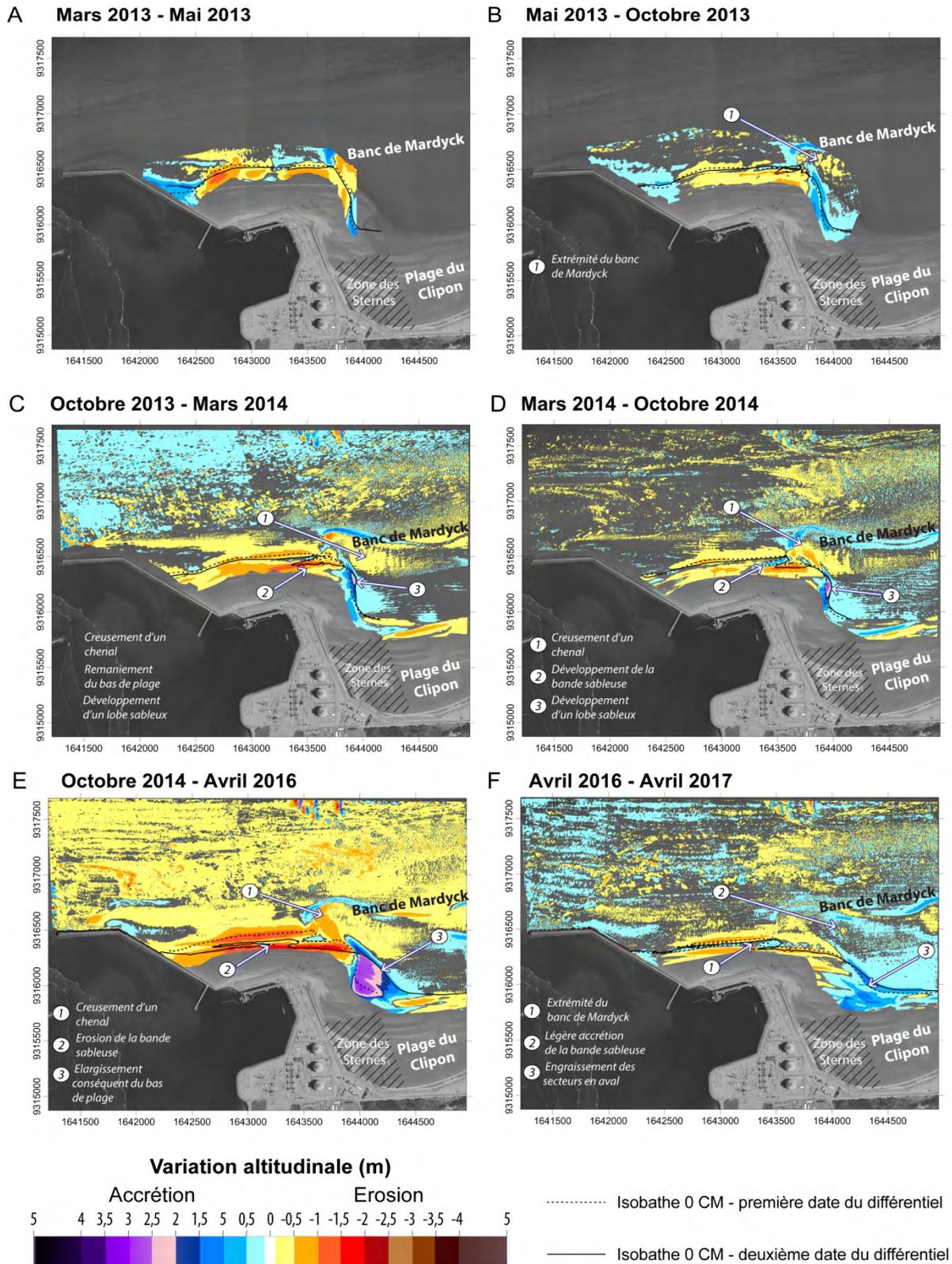
Sur le différentiel altimétrique (Figure VII.26-C) on constate que tout le bas de plage dans le secteur ouest et central du rechargement a subi une érosion qui atteint -1 m voire -1,5 m comme le montrent également les profils P2 et P4 (Figure VII.25 A et B). A noter que dans le secteur compris entre les coordonnées 1643300 et 1643760 (Figure VII.26-C - Réf n° 2), il est possible de constater un remaniement du stock sableux et l'alternance de zones d'érosion et d'engraissement. Ce remaniement engendre en l'espace de six mois la formation en bas de plage d'une langue sableuse longitudinale dont la forme rappelle celle d'une flèche littorale (encadré A sur la Figure VII.24-D).

Concernant la partie subtidale du secteur ouest et central, une érosion de l'ordre de -1 m a touché les faibles profondeurs de l'avant-plage jusqu'à environ -4 m CM. A l'extrémité ouest du banc de Mardyck, les variations morphologiques se sont accentuées (Figure VII.26-C - n° 1), laissant supposer le creusement d'un chenal entre le banc de Mardyck et la côte comme le montre également le profil P6 (x=660 m) (Figure VII.25-C). Pour ce qui est du reste de l'évolution du site, un engraissement est encore une fois visible dans le secteur est de la zone subtidale ainsi qu'en bas de l'estran, avec une accumulation pouvant atteindre + 2,5 m (Figure VII.26-C n°3 et Profil 8 Figure VII.25). Cela se traduit par un élargissement de l'estran comme le montre l'avancée vers le large de l'isobathe 0 m CM. Un lobe sableux commence nettement à se former au niveau de l'angle est du rechargement en mars 2014 (encadré B, Figure VII.24-D). Cette accumulation dans le secteur est, observé dès mai 2013, indique vraisemblablement un transport sédimentaire vers l'est en réponse à une dérive littorale orientée nord-ouest sud-est.

Les variations volumétriques sur l'emprise commune (Figure VII.27-B) révèlent un déficit sédimentaire de - 132 000 m³ entre octobre 2013 et mars 2014 dans les faibles profondeurs et le bas de plage. Cette perte importante en l'espace de cinq mois est probablement liée au passage de plusieurs tempêtes au cours de l'hiver 2013-2014, dont la tempête Christian de secteur SO qui a généré le 28 octobre des vagues au large atteignant 3,8 m. Il a de plus été montré qu'au cours de cette période, pendant les mois de décembre 2013, janvier et février 2014 notamment, qu'un nombre important de vagues puissantes coïncidant avec de bas niveaux d'eau se sont produits (section 2.5), expliquant vraisemblablement les variations morphologiques observées. Dans le détail, dans les secteurs 1 et 2, on constate un bilan volumétrique négatif de -34 400 m³ et -106 100 m³, tandis que dans le secteur 3 un léger gain de sable de + 9 000 m³ a été calculé, soit + 0,02 m³/m², ce qui est peu significatif et dans la marge d'erreur.

4.3. Evolution de mars 2014 à octobre 2014

Pendant cette période les mêmes variations morphologiques observées lors de la période précédente se sont produites (Figure VII.26-D). La partie ouest du rechargement, le bas de plage et les faibles profondeurs de la zone subtidale (jusque -4 m CM) se caractérisent par une érosion de - 0,50 m globalement, atteignant localement -1 m comme l'illustre également l'évolution des profils P2 et P4 (Figure VII.25 A et B). Entre les coordonnées 1642750 et 1643290, la langue sableuse identifiée en mars 2014 (encadré A sur Figure VII.24-D) s'est engraisée et s'est légèrement rapprochée vers le bas de plage (Figure VII.26-D Réf n°2). A proximité de l'extrémité est de cette barre sableuse, une zone d'érosion bien marquée de -1,3 m au maximum est visible à la jonction entre le bas de plage et de la zone subtidale. Dans le secteur est, une importante zone d'accumulation est visible avec une accumulation atteignant jusqu'à + 3 m (Figure VII.26-D - Réf n°3). Cette évolution morphologique semble illustrer une migration d'une partie des sables du rechargement vers l'est ce qui rejoint les précédentes observations. Cette accumulation entraîne l'élargissement du bas de plage comme le montre la position de l'isobathe 0 m CM qui avance d'une cinquantaine de mètres en l'espace de sept mois. Cette avancée de l'estran associée au déplacement vers l'est du stock sableux est bien visible sur le MNT d'octobre 2014 avec le développement notable du lobe sableux (encadré B, Figure VII.24-E). A l'extrémité ouest du banc de Mardyck, les zones d'érosion et d'accumulation correspondent à un déplacement de sable vers le NO (Figure VII.25-B) et un creusement du chenal entre le banc de Mardyck et le rechargement (Figure VII.26-D Réf n°1).



Spodar, 2018

Figure VII.26 MNT différentiel entre deux dates consécutives de levés bathymétriques au droit de la digue du Ruytingen

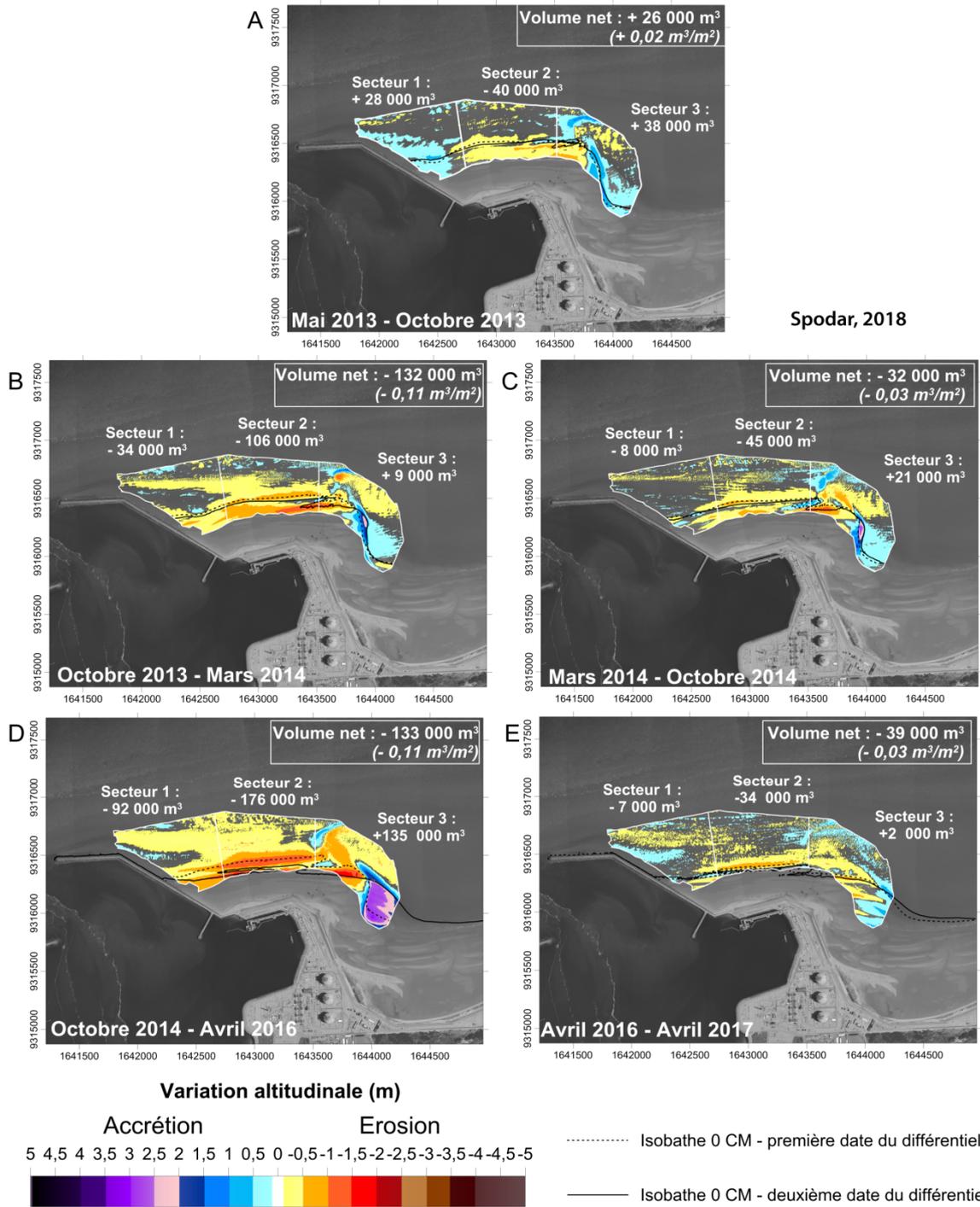


Figure VII.27 MNT différentiel entre deux dates consécutives sur une emprise commune de levés bathymétriques au droit de la digue du Ruytingen

Sur le plan volumétrique, une perte de $-32\,000\text{ m}^3$ a été calculée sur l'emprise commune (Figure VII.27-C). Des variabilités ouest-est sont observables, avec toujours une érosion dans les secteurs 1 et 2. Une perte de sable modeste caractérise le secteur le plus à l'ouest, avec $-8\,000\text{ m}^3$, puis la perte de sable devient plus conséquente dans le secteur central avec $-45\,000\text{ m}^3$. Encore une fois, le secteur 3 bénéficie d'un gain en sable de $+21\,000\text{ m}^3$. Les conditions météo-marines globalement calmes entre le 27.03.2014 et le 15.10.2014 n'ont donc pas empêché l'érosion du site, particulièrement à l'ouest et au centre du rechargement.

4.4. Evolution de octobre 2014 à avril 2016

Au cours de ce long laps de temps qui sépare les deux levés, encore une fois on observe les mêmes variations morphologiques que celles décrites précédemment mais ces variations sont plus marquées (Figure VII.24-E). Le bas de l'estran dans le secteur ouest et central du rechargement a subi une importante érosion provoquant un abaissement du niveau du bas de plage de -2 m à certains endroits (Profils P2 et P4, Figure VII.25). Un recul significatif de l'isobathe 0 m CM d'environ 70 à 80 m est à noter, illustrant un rétrécissement de la zone intertidale. La barre sableuse est toujours présente mais moins bien individualisée et tend à se souder au bas de plage (Figure VII.24-F encadré A). Dans le secteur est, on constate un engraissement important, avec une accumulation qui atteint $+3\text{ m}$ (Figure VII.26-Réf n°3 et Figure VII.25). Cette accumulation sableuse a entraîné une avancée conséquente de l'isobathe 0 m CM attestant d'un élargissement important du bas de plage. Le lobe sableux identifié en octobre 2014 (Figure VII.24-E encadré B) s'est développé vers l'est (Figure VII.24-F encadré B).

Un déficit sédimentaire de $-133\,000\text{ m}^3$ sur l'emprise commune caractérise cette longue période de 18 mois (Figure VII.27-D). Cette période se distingue par des fréquences élevées de vents modérés à forts avec pour rappel $18,9\%$ de vents au large compris entre 12 et 16 m/s et près de 10% de vents $\geq 10\%$. Les vagues les plus hautes sont plus fréquentes également au cours de cette période. Dans le détail, ce sont surtout les deux périodes automnales et hivernales 2014-2015 et 2015-2016 qui se sont révélées être les plus énergétiques. Ces deux sous-périodes se sont également distinguées en termes d'événements combinant houles puissantes et bas niveaux d'eau, accentuant donc probablement les variations morphologiques dans les petits fonds et en bas de plage. Il est de plus normal d'observer des variations morphologiques plus importantes au cours de cette période du fait de sa plus longue durée.

4.5. Evolution de avril 2016 à avril 2017

Au cours de la dernière période de suivi, l'érosion du bas de plage et dans les faibles profondeurs dans le secteur ouest et central du rechargement s'est poursuivie, avec une baisse du niveau altitudinal de $-0,5\text{ m}$ à -1 m . A noter qu'à la jonction entre la zone subtidale et le bas de plage, une petite accumulation de $+0,5\text{ m}$ est néanmoins visible et semble correspondre à un léger engraissement de la barre sableuse identifiée en bas de plage (Figure VII.26-F Réf n°2). Cette baisse du niveau altitudinal, sur le bas de plage et dans les petits-fonds jusqu'à des profondeurs de -4 m CM est notable sur les profils P2 et P4 (Figure VII.25 A-B). Dans les profondeurs plus importantes, la situation est plus contrastée avec une succession de zones d'engraissement et d'érosion de l'ordre de $-0,5\text{ m}$ à $+0,5\text{ m}$ (Figure VII.26-F). Dans le secteur est, l'évolution en bas de plage et dans faibles profondeurs sur le profil P8 met en évidence que l'accrétion se poursuit, avec une élévation maximale sur ce profil de $+1,5\text{ m}$ à la jonction entre les zones intertidales et subtidales (Figure VII.25-

D). La migration des sédiments vers l'est se poursuit et c'est désormais le secteur au nord de la zone des Sternes qui bénéficie d'un important apport en sable qui peut atteindre localement +1,5 m (Figure VII.26-F Réf n°3). La zone d'engraissement s'étend même au-delà de l'anse du Clipon. Le stock sableux continue donc sa progression de l'ouest vers le sud-est le long de la façade portuaire. Les variations morphologiques à l'extrémité du banc de Mardyck sont moins nettes et c'est plutôt une tendance à l'accrétion qui caractérise le chenal entre le banc et le rechargement.

Entre avril 2016 et avril 2017, le déficit sédimentaire est de -39 000 m³ (Figure VII.27- E). Le secteur le plus à l'ouest se caractérise par une stabilité avec un léger déficit de - 7 000 m³, ce qui ne représente que -0,02 m³/m² et n'est donc pas significatif. En revanche, vers le secteur central, l'érosion est plus importante avec -34 000 m³, alors que dans le secteur le plus à l'est on constate une relative stabilité. La large zone d'accumulation au nord de la plage du Clipon est en effet exclue de l'emprise commune sur laquelle sont calculées les variations volumétriques, impliquant un faible volume en accrétion.

4.6. Synthèse

4.6.1. Synthèse de la variation de position des isobathes

La position de l'isobathe 0 m CM a été évoquée précédemment à plusieurs reprises. Les positions de cette isobathe à différentes dates ont été superposées afin de mieux rendre compte de son évolution entre mars 2013 et avril 2017. Le même principe a été appliqué aux isobathes -1m CM, -2 m CM, -3 m CM et -4 m CM (Figure VII.28).

L'analyse de la localisation de l'isobathe 0 m CM au fil des mois montre clairement un rétrécissement de la zone intertidale dans le secteur central du rechargement alors que dans le secteur est les isobathes progressent vers le large indiquant une accumulation sableuse dans ce secteur (Figure VII.28-A). Dans le détail, dans le secteur ouest (jusque x=1642550), il est possible de constater qu'entre mars 2013 et octobre 2013, l'isobathe 0 m CM a avancé d'environ 70 m témoignant d'une redistribution du sable du rechargement vers l'ouest. A partir d'octobre 2013 néanmoins, un recul de cette isobathe est constaté pour retrouver en avril 2017 une position proche de celle de mars 2013. Dans le secteur central, entre les abscisses 1642550 et 1643330, un recul d'environ de 120 m en moyenne du 0 m CM est constaté pour atteindre au maximum 200 m. Entre octobre 2013 et mars 2014, une langue sableuse s'est formée, puis s'est déplacée au fil du temps et s'est progressivement accolée au bas de plage. Dans le secteur le plus à l'est, une avancée constante de l'isobathe 0 m CM et donc de la partie intertidale est observable.

Le démaigrissement du stock sédimentaire dans la partie centrale du site ainsi que l'étalement du rechargement de part et d'autre est visible avec l'évolution des isobathes -1 m CM et -2 m CM (Figure VII.28-B). L'isobathe -1 m CM devient de plus en plus rectiligne entre mars 2013 et avril 2017. Le banc de Mardyck à proximité du rechargement est mis en évidence. Le rechargement et le banc sont d'ailleurs reliés à des profondeurs avoisinant -2 m CM avec une jonction bien visible en mai 2013 (Figure VII.28-C). Le creusement d'un chenal entre le banc et le rechargement a été évoqué précédemment et est encore une fois mis en évidence avec un déplacement progressif de la position de l'isobathe - 2 m CM vers le NO et cela dès octobre 2013.

La localisation des isobathes - 3m CM et surtout -4 m CM (Figure VII.28-D&E) démontrent une certaine stabilité des zones concernées. Au-delà de -4 m CM, les variations morphologiques sont effectivement très limitées, ce que l'on constate également sur les profils topo-bathymétriques (Figure VII.25).

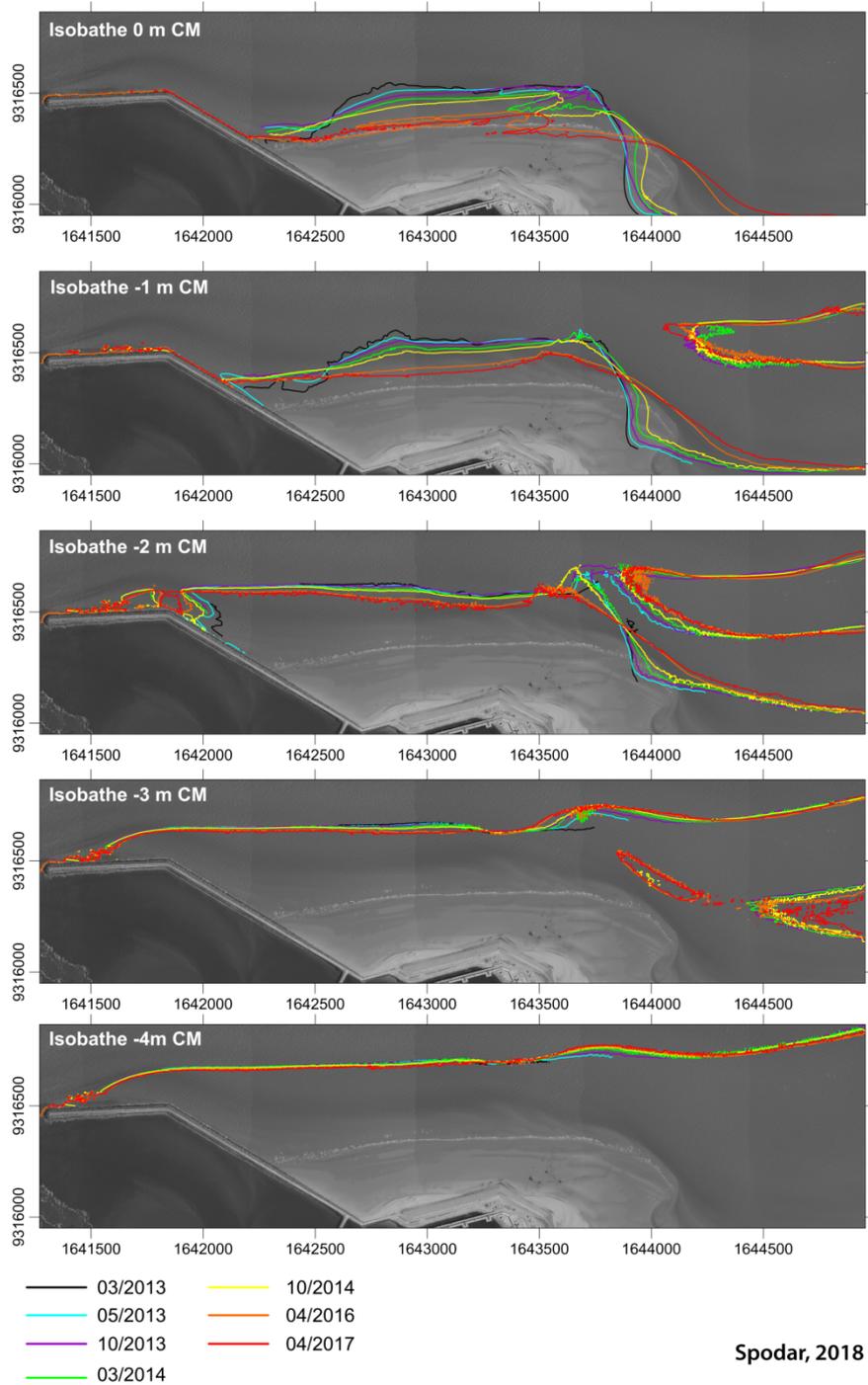


Figure VII.28 Position des isobathes 0, -1, -2, -3 et -4 m CM en mars 2013, mai 2013, octobre 2013, mars 2014, octobre 2014, avril 2016 et avril 2017

4.6.2. Synthèse des variations volumétriques dans les faibles profondeurs et en bas de plage

4.6.2.1 Variabilité temporelle

Les bilans sédimentaires évoqués précédemment ont été exprimés en mètre cube par mois afin que les évolutions entre les périodes soient comparables (Tableau VII.4). Entre mai et octobre 2013, le bilan volumétrique est positif avec + 26 000 m³, soit + 5 300 m³/mois. Cette courte période est la seule à se caractériser par un volume positif sur l'emprise commune. La période la plus

déficitaire de toutes est celle comprise entre octobre 2013 et mars 2014 avec -26 400 m³/mois, soit-132 000 m³. Ce volume perdu est quasiment égal aux pertes qui se sont produites en 18 mois entre octobre 2014 et avril 2016. Cette période entre octobre 2013 et mars 2014 se distingue des autres d'un point de vue des variations volumétriques étant donné qu'elle englobe le passage de plusieurs tempêtes en cours de l'hiver 2013-2014, ce qui explique les pertes conséquentes en l'espace de trois mois.

	Volume net		Volume total	
	m ³	m ³ /mois	m ³	m ³ /mois
Mai 2013 - Octobre 2013 (5 mois)	26 000	5 300	180 000	35 900
Octobre 2013 - Mars 2014 (5 mois)	-132 000	-26 400	278 000	55 500
Mars 2014 - Octobre 2014 (6,5 mois)	-32 000	-4 900	208 000	32 000
Octobre 2014 - Avril 2016 (18 mois)	-133 000	-7 400	630 000	35 000
Avril 2016 - Avril 2017 (12 mois)	-39 000	-3 200	163 000	13 600

Tableau VII.4 Variations volumétriques nettes et totales entre deux dates consécutives de levés bathymétriques (calculs effectués sur une emprise commune)

De mars 2014 à octobre 2014, le bilan volumétrique est négatif avec une perte de -32 000 m³ au total, soit un volume net de -4 900 m³/mois, et ce, malgré des conditions météo-marines globalement calmes au cours de cette période.

La longue période de plus d'un an qui s'étend de octobre 2014 à avril 2016 se solde par une importante érosion avec une perte de -133 000 m³ sur l'emprise commune. Ramenée à un rythme mensuel, l'érosion représente -7 400 m³/mois, ce qui permet de relativiser les pertes observées. Cette période reste cependant la deuxième période la plus érosive après celle comprise entre octobre 2013 et mars 2014 (Tableau VII.4).

Enfin au cours de la dernière année entre avril 2016 et avril 2017, le déficit sédimentaire est de -39 000 m³, soit -3 200 m³/mois, ce qui en fait la période la moins déficitaire des cinq. L'analyse des conditions météo-marines avait clairement mis en évidence cette période comme étant caractérisée par des conditions de vents et de vagues plus modérés et donc moins potentiellement morphogènes.

4.6.2.2 Variabilité spatiale

Les variations volumétriques ont été calculées sur trois secteurs afin de mettre en évidence d'éventuelles variations ouest-est en accord avec les observations morphologiques. Les volumes calculés mettent effectivement en évidence un secteur ouest (secteur 2) presque systématiquement en érosion sauf au cours de la première période de suivi (Figure VII.29). C'est en revanche dans le secteur central (secteur 2) que l'érosion a été la plus sévère, quel que soit l'intervalle de temps considéré. Le dernier secteur le plus à l'est est le seul à se caractériser systématiquement par un engraissement. Ce gain indique vraisemblablement un apport de sable en provenance du secteur plus central du site. Un transport sédimentaire vers l'est se produit alors en réponse à une dérive littorale vers le sud-est. Ce gain en sable dans le troisième secteur ne compense pas cependant les pertes dans les secteurs 1 et 2 étant donné que l'emprise globale se solde à chaque fois par un déficit sédimentaire sauf pendant la première période. Il est possible qu'une partie du sable ait été exportée vers l'est au-delà de la zone de calcul des volumes. On peut également supposer que lors d'événement énergétiques du NE, comme ce qui a été observé pendant la campagne hydrodynamique, des courants de retour exportent les sédiments vers le large.

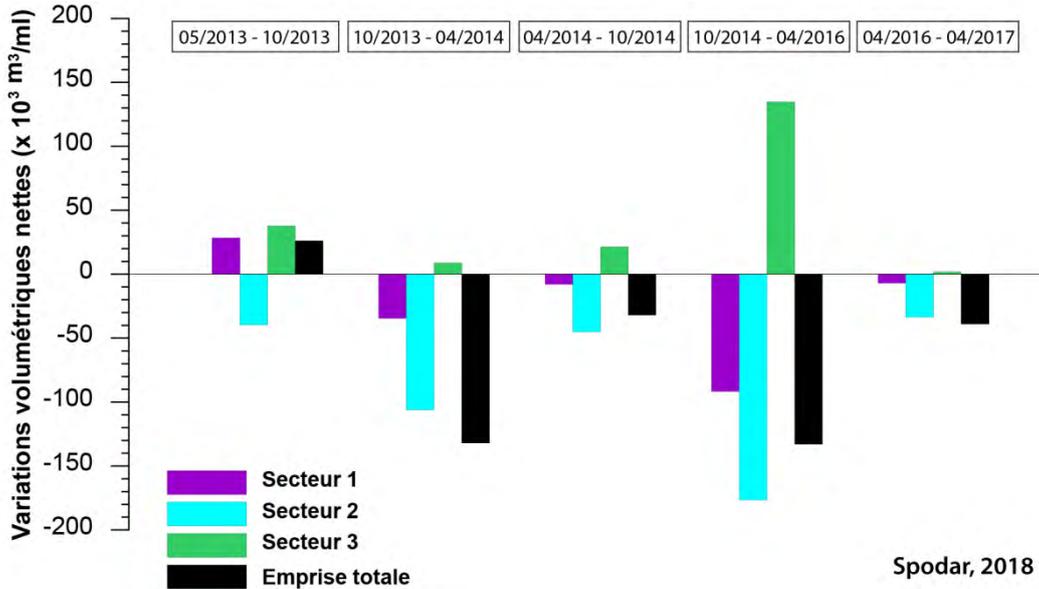


Figure VII.29 Variations volumétriques nettes sur l'emprise commune ainsi que sur les secteurs 1, 2 et 3

5. Impacts des puissances de houles sur le bas de plage et les faibles profondeurs de l'avant-plage

Comme pour le rechargement de plage au droit de la digue des Alliées, l'influence de la houle sur le rechargement subtidal devant la digue du Ruytingen a été analysée. Pour cela les variations volumétriques dans la zone subtidale du site ont été comparées au forçage engendré par les vagues en utilisant les données de houle enregistrées au large à la station Sandettie. La même démarche que celle utilisée pour le rechargement de plage au droit de la digue des Alliées a été menée. Les variations volumétriques nettes absolues et totales calculées à partir des MNT différentiels entre deux dates de levés ont été calculées. Dans cette analyse, les puissances moyennes et cumulées des vagues ont également été calculées (Figure VII.30).

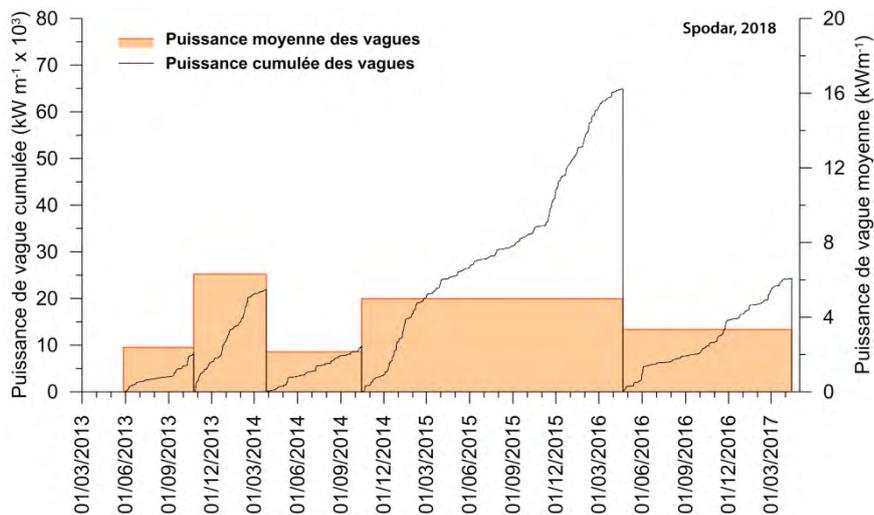
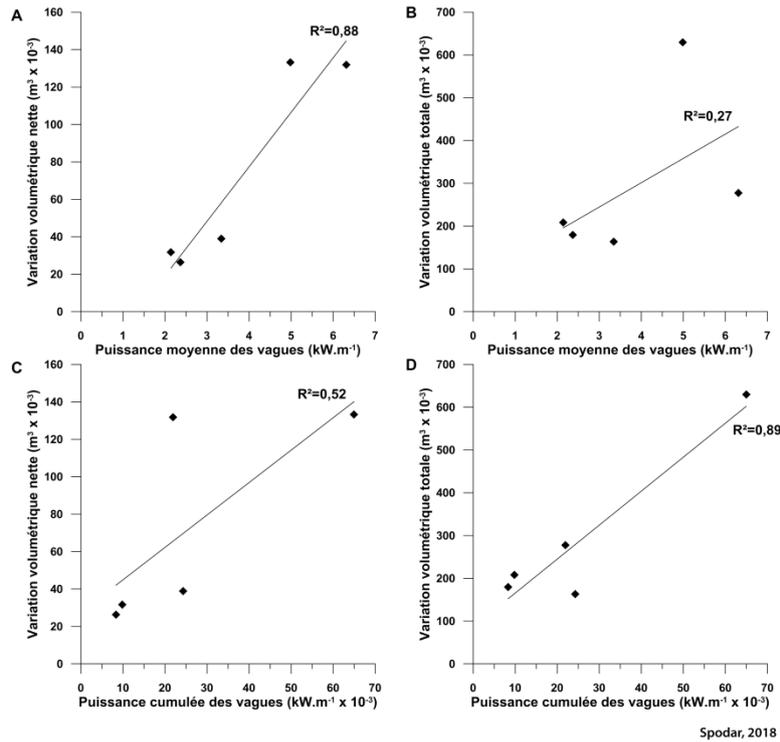


Figure VII.30 Puissance moyenne et cumulée des vagues entre deux levés bathymétriques consécutifs

Les puissances cumulées entre deux dates de levés oscillent entre $8,31 \times 10^3 \text{ kW.m}^{-1}$ et $64,95 \times 10^3 \text{ kW.m}^{-1}$. De telles différences s'expliquent en partie par l'intervalle de temps plus ou moins long qui s'écoule entre deux dates, mais également par la période de l'année concernée. Effectivement la première période, entre le 28.05.2013 et le 24.10.2013 correspond au printemps et à l'été et se caractérise par une puissance cumulée bien moins élevée, de $8,31 \times 10^3 \text{ kW.m}^{-1}$, que celle calculée entre le 24.10.2013 et le 27.03.2014 qui correspond aux périodes automnales et hivernales avec des puissances qui atteignent $21,91 \times 10^3 \text{ kW.m}^{-1}$ (Figure VII.30). Ces deux périodes sont cependant de même durée. La période présentant la puissance cumulée des vagues la plus élevée dure plus d'une année, d'où la valeur si importante qui dépasse $60 \times 10^3 \text{ kW.m}^{-1}$. Concernant les puissances moyennes de vagues, si l'on reprend l'exemple des deux premières périodes de durée à peu près égale, on remarque que les puissances moyennes de vagues correspondantes sont très différentes : à peine plus de 3 kW.m^{-1} entre fin mai 2013 et fin octobre 2013, et un peu plus de 6 kW.m^{-1} entre fin octobre 2013 et fin mars 2014. Cette différence s'explique par le fait que la deuxième période correspond aux tempêtes de l'hiver 2013-2014. C'est d'ailleurs cette période qui se caractérise par la puissance moyenne de vagues la plus élevée de l'ensemble des périodes étudiées.

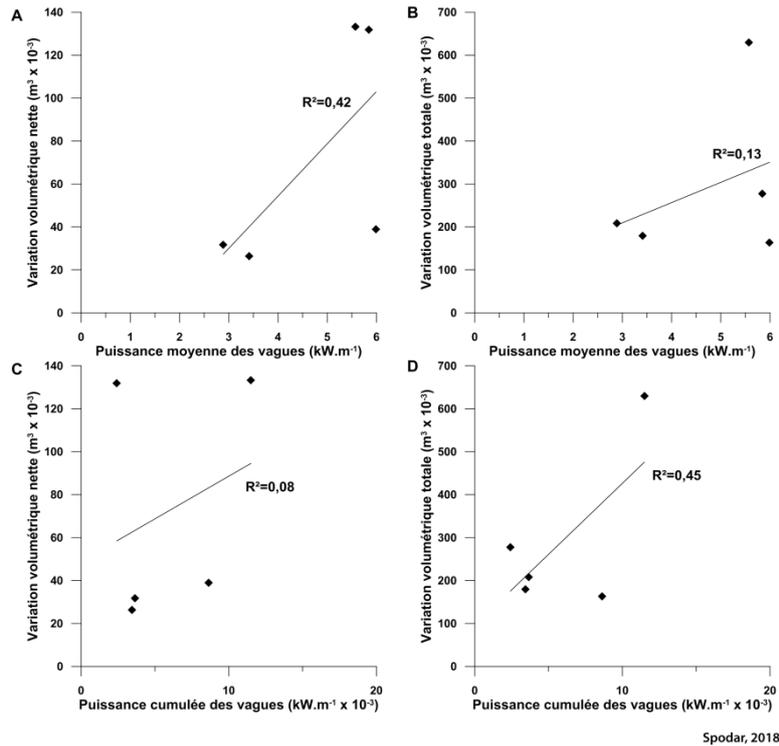
La Figure VII.31 synthétise les quatre comparaisons possibles entre les deux types de variations volumétriques et les deux types de puissances de vagues (moyennes ou cumulées). On note que la relation entre les puissances de vagues cumulées est plus forte avec les variations volumétriques totales ($R^2 = 0,89$) qu'avec les variations volumétriques nettes ($R^2 = 0,52$) (Figure VII.30-C et D). Concernant les puissances moyennes, la différence de la significativité de la relation avec les variations volumétriques nettes ($R^2=0,88$) et totales ($R^2=0,27$) est plus notable (Figure VII.31-A et B). Bien que basées sur un faible nombre de points, les relations significatives entre puissances de vagues cumulées et variations volumétriques totales, d'une part, ainsi que puissances de vagues cumulées et variations volumétriques nettes d'autre part permettent donc de mettre en évidence l'influence de la houle sur l'évolution des petits-fonds. Lors de conditions très énergétiques avec des houles globalement puissantes en moyenne sur la période ou dont le cumul atteint des valeurs élevées, d'importantes variations morphologiques se produisent. Cela rejoint les analyses qui découlent de la campagne hydrodynamique, dans laquelle le forçage des vagues dans la mise en suspension des sédiments a été mis en évidence.



Spodar, 2018

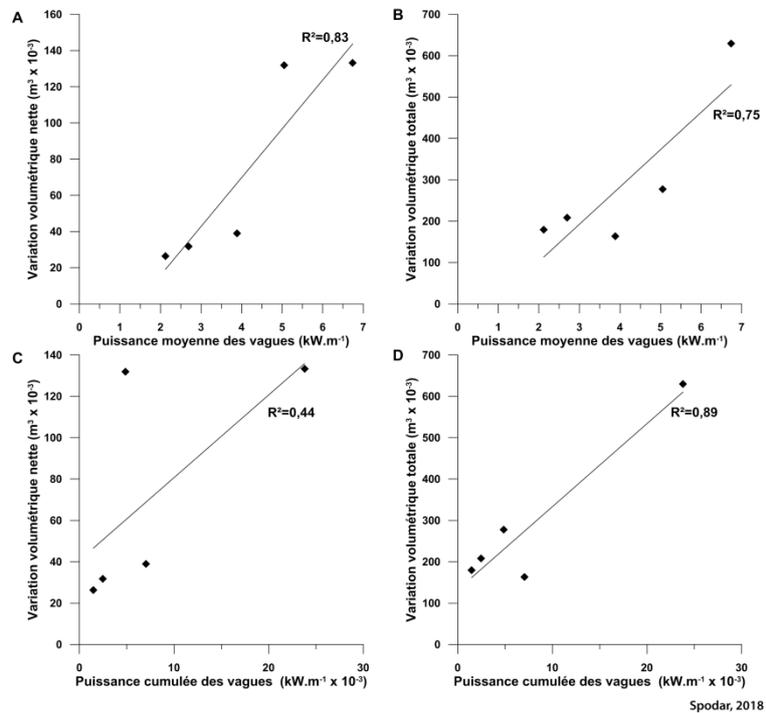
Figure VII.31 Relations entre les puissances moyennes des vagues et les variations volumétriques nettes (A) et totales (B) et relation entre les puissances cumulées des vagues et les variations volumétriques nettes (C) et totales (D) de la zone subtidale au droit de la digue du Ruytingen

L'analyse a été approfondie en cherchant à mettre en évidence l'éventuelle influence prépondérante des vagues en provenance d'un secteur en particulier. Pour rappel, les directions de vagues ne sont pas disponibles à la station Sandettie d'où proviennent les données, c'est pourquoi les directions de vents également enregistrées à la station Sandettie ont été utilisées pour filtrer les données de vagues à défaut d'avoir directement leurs directions. Il est alors possible de remarquer une absence de relations pour deux des comparaisons avec les vagues associées aux vents de secteurs nord-est à savoir la relation entre puissance moyenne des vagues et variations volumétriques totales (Figure VII.32-B) et puissances de vagues cumulées et variations volumétriques nettes (Figure VII.32-C). On remarque que le degré de relation pour les deux autres combinaisons n'est pas très élevé non plus avec un coefficient de détermination que ne dépasse pas 0,50. En revanche, les vagues associées à des vents d'ouest semblent être beaucoup plus influentes. En effet on remarque sur la Figure VII.33 que trois relations présentent des coefficients de détermination élevés ($R^2 \geq 0,75$) suggérant une influence beaucoup plus nette sur les variations volumétriques.



Spodar, 2018

Figure VII.32 Relations entre les puissances moyennes et cumulées des vagues associées à des vents de secteur nord-est et les variations volumétriques nettes (A et C) et totales (B et D) de la zone subtidale au droit de la digue du Ruytingen



Spodar, 2018

Figure VII.33 Relations entre les puissances moyennes et cumulées des vagues associées à des vents de secteur ouest et les variations volumétriques nettes (A et C) et totales (B et D) de la zone subtidale au droit de la digue du Ruytingen

Les vagues associées à des vents de secteur ouest semblent donc avoir une influence prépondérante sur l'évolution morphologique des petits-fonds et du bas de plage comparativement à celles associées à des vents de nord-est. Le rechargement subtidal est en effet peu protégé des houles dominantes venant de l'ouest. De plus, du fait des fortes pentes de l'avant-plage et des plus grandes profondeurs dans ce secteur, la puissance des vagues atteint des valeurs plus élevées pour les houles associées à des vents de secteur ouest, par rapport à celles venant du NE, qui sont davantage dissipées avant d'atteindre le rivage, ce explique vraisemblablement l'importante érosion de la partie centrale du rechargement.

6. Analyse de l'évolution morphologique de l'estran

Cette analyse repose sur la comparaison de levés topographiques effectués sur une large couverture spatiale, ainsi que sur l'étude de profils de plage. L'une des contraintes de cette analyse est le manque d'homogénéité dans les surfaces topographiques couvertes par les MNT réalisés à partir des grands levés. Autre inconvénient déjà mentionné, aucun levé n'a été effectué sur l'estran en mars 2013 à la fin des travaux de rechargement. Le premier levé topographique disponible date de mars 2014, soit un an après la fin des travaux. Impossible donc d'avoir un aperçu de l'évolution de la zone intertidale au cours de la première année du rechargement. Il convient de rappeler que la réalisation de profils de plage dans le cadre de la thèse n'a démarré que début 2015, soit un peu moins de deux ans après la fin des travaux de rechargement. C'est donc la troisième (du 03.2015 au 02.2016) et la quatrième année (du 03.2016 au 02.2017) post-rechargement qui ont fait l'objet d'un suivi topographique plus intensif.

La Figure VII.34 synthétise la localisation de différents éléments utiles à la compréhension de l'analyse qui va être menée. La digue du Ruytingen a été découpée selon trois entités correspondant aux arêtes Ouest, centrale et Est. Les éléments morphologiques indiqués (plateformes et zone sablo-vaseuses) concernant uniquement l'année 3 et 4 (observations visuelles sur le terrain et photos aériennes), il conviendra de se référer à cette figure pour la localisation de ces différents éléments.

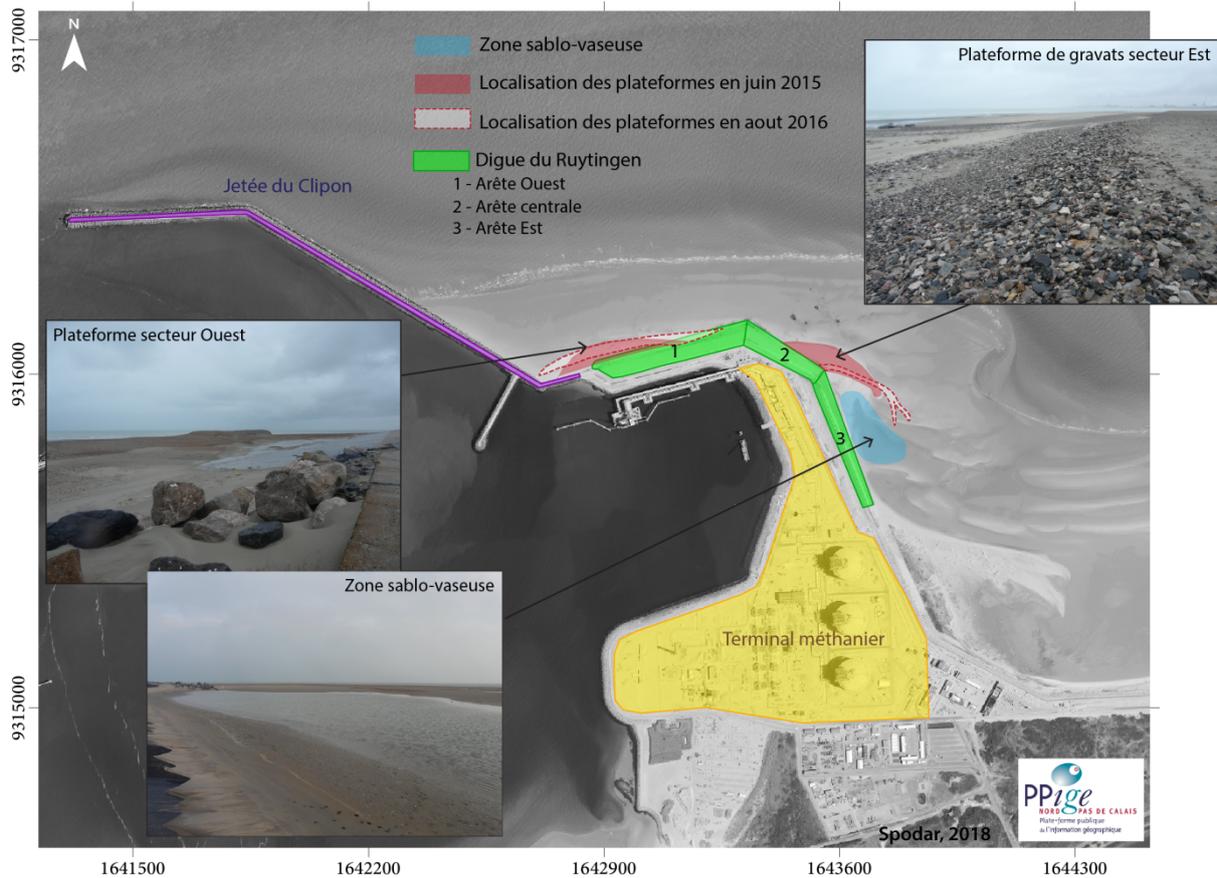


Figure VII.34 Localisation schématique des différents éléments du site

6.1. Deuxième année post- rechargement : mars 2014 – février 2015

La Figure VII.35 illustre les MNT topographiques effectués en mars 2014 et avril 2015, ainsi que le MNT différentiel sur une emprise maximale entre les deux dates afin de pouvoir visualiser les variations morphologiques sur une zone la plus large possible. A des fins de comparaison entre les années, les variations morphologiques et les volumes correspondants analysés sur une emprise commune à l'ensemble des MNT sont figurés sur la Figure VII.35-D.

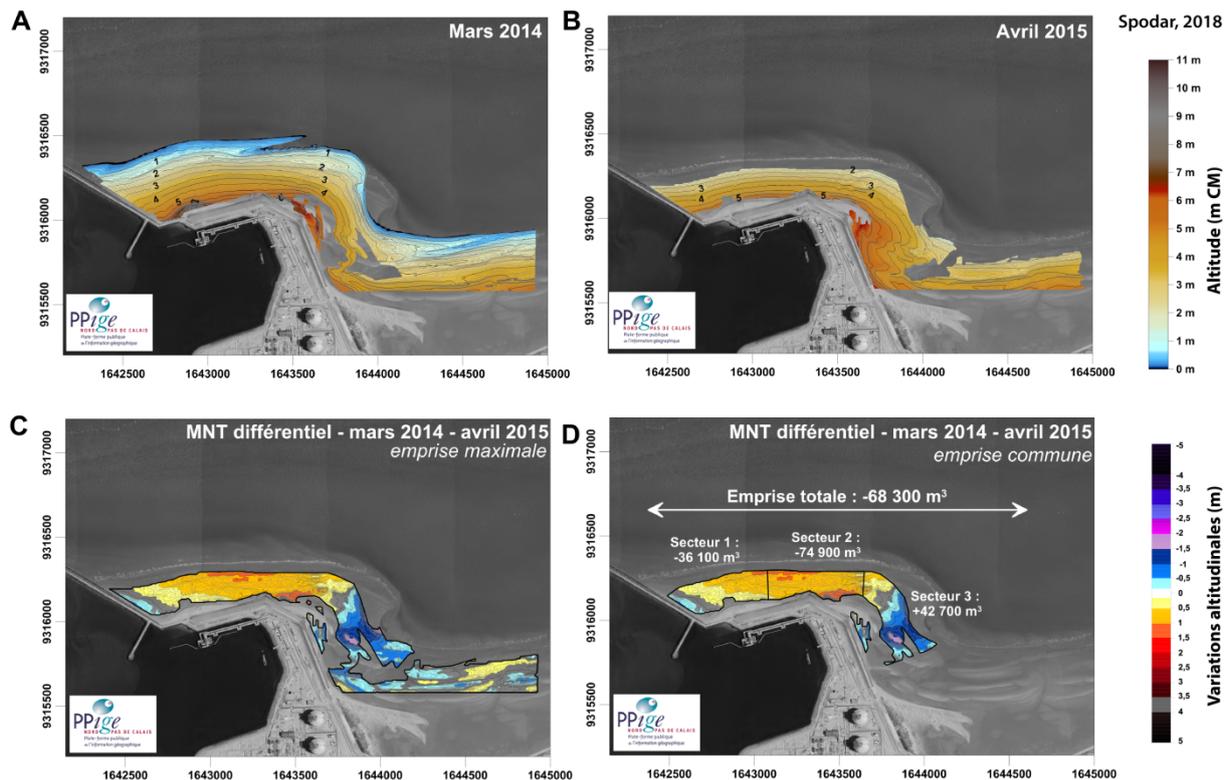


Figure VII.35 MNT de l'estran en mars 2014 (A) et avril 2015 (B), MNT différentiel entre les deux dates (C) et MNT différentiel sur une emprise commune (D)

Entre mars 2014 et avril 2015 (Figure VII.35- A et B), on note la formation d'une flèche sablo-graveleuse au niveau de l'angle nord-est de la digue (Figure VII.35 B). Une grande partie de l'estran a cependant subi une érosion comprise entre -0,5 m et -1 m. La carte des variations altimétriques (Figure VII.35 C) met en effet en évidence une érosion assez uniforme sur la portion d'estran au droit des arêtes ouest et centrale de la digue. On remarque que l'abaissement du niveau de la plage s'accroît progressivement de l'ouest vers la partie centrale du site. Quelques secteurs se caractérisent par une baisse plus importante du niveau de la plage, le premier est localisé dans la partie centrale du site sous le niveau moyen de la mer et atteint - 1,2 m. La seconde zone d'érosion sévère est localisée en haut de plage ($x = 1643500$), ce qui est probablement dû en partie à un déplacement vers l'est de la flèche de gravats (Figure VII.35 B). A l'est, face à l'arête est de la digue, la partie de l'estran en accretion est beaucoup plus importante (+2 m en moyenne). Malgré l'absence de levés topographiques sur certaines portions d'estran en mars 2014 et février 2015 (Figure VII.35 A-B), il est possible de constater que les zones en accumulation s'étendent jusqu'au nord de la zone des Sternes qui bénéficie alors d'apports sableux. Cette accumulation notable résulte vraisemblablement d'un transport sédimentaire dominant vers le sud est, comme ce qui a été observé dans la zone subtidale. En dehors de ces variations morphologiques, aucun autre remaniement particulier comme la formation de barres et de bâches n'est observable sur la zone intertidale à l'issue de la deuxième année.

Comme évoqué précédemment, une emprise commune à toutes les dates la plus large possible a été sélectionnée afin de pouvoir calculer les volumes sur une surface cohérente et comparable. Les variations volumétriques mettent en évidence un déficit sédimentaire de -68 300 m³ sur l'ensemble de l'emprise entre mars 2014 et avril 2015 (Figure VII.35-D). On constate que dans le

secteur central du rechargement où l'érosion a été la plus sévère, le volume de sable perdu est de - 74 900 m³. Dans le secteur ouest, où un secteur en accumulation a pu être identifié, le volume net est tout de même négatif avec -36 100 m³. Seul le secteur à l'est, où les variations morphologiques ont montré d'importantes zones d'accrétion, se solde par un bilan volumétrique positif qui atteint +42 700 m³. On observe donc bien un transfert de sable d'ouest en est.

6.2. Troisième année post-rechargement : mars 2015 – février 2016

6.2.1. Analyse des profils de plage au cours de la troisième année du rechargement - 03.2015 au 02.2016

Dans le secteur ouest et central, du P1 au P6 (Figure VII.36), c'est une érosion se traduisant par un abaissement de l'estran qui caractérise le site entre janvier 2015 et février 2016. L'érosion s'intensifie du P1 au P5 comme l'indiquent les variations volumétriques (Figure VII.38). L'érosion de l'estran est assez uniforme du haut vers le bas de plage entre le P1 et le P3, avec un abaissement du niveau de la plage qui varie entre - 0,50 m sur le P1 à - 1 m sur le P3 (Figure VII.36 A-B-C). L'estran dans ce secteur ouest est resté très rectiligne, avec une pente de 1,8 % sur le P1, 1,9 % sur le P2 et 2,1 % sur le P3. Du P4 au P6, on remarque une érosion plus marquée dans la partie supérieure du profil que vers le bas de plage (Figure VII.36 D-E-F).

Au total entre janvier 2015 et février 2016, la portion de plage au contact de la digue sur le P4 a perdu -1,5 m. L'érosion sévère du haut de plage d'environ -2 m caractérisant les profils P5 et le P6 s'expliquent par la migration vers le sud-est de la flèche de gravats qui a complètement disparu le long du profil P5 dès décembre 2015 (Figure VII.36-E), tandis que son rebord a reculé d'environ 75 m le long du P6 entre janvier 2015 et février 2016. Les photographies aériennes de juin 2015 et août 2016 permettent d'illustrer les changements morphologiques qui s'opèrent (Figure VII.37). La flèche de gravats et de sable, très massive en 2015 (Figure VII.37-A), s'est progressivement déplacée vers le sud-est, et s'est allongée et amincie (Figure VII.37-B). Dès juillet 2015 on note d'ailleurs la présence dans la partie supérieure de l'estran au niveau du P7 de la pointe de la flèche qui s'étend déjà jusqu'à ce profil. Il est possible de remarquer un élargissement du bas de l'estran d'environ 150 m au niveau des BMVE. L'estran, sur les deux profils au sud-est du site (Profils P7 et P8) se caractérise par une élévation de son niveau altitudinal, l'exhaussement atteignant près de +2,5 m au maximum sur le P8 .

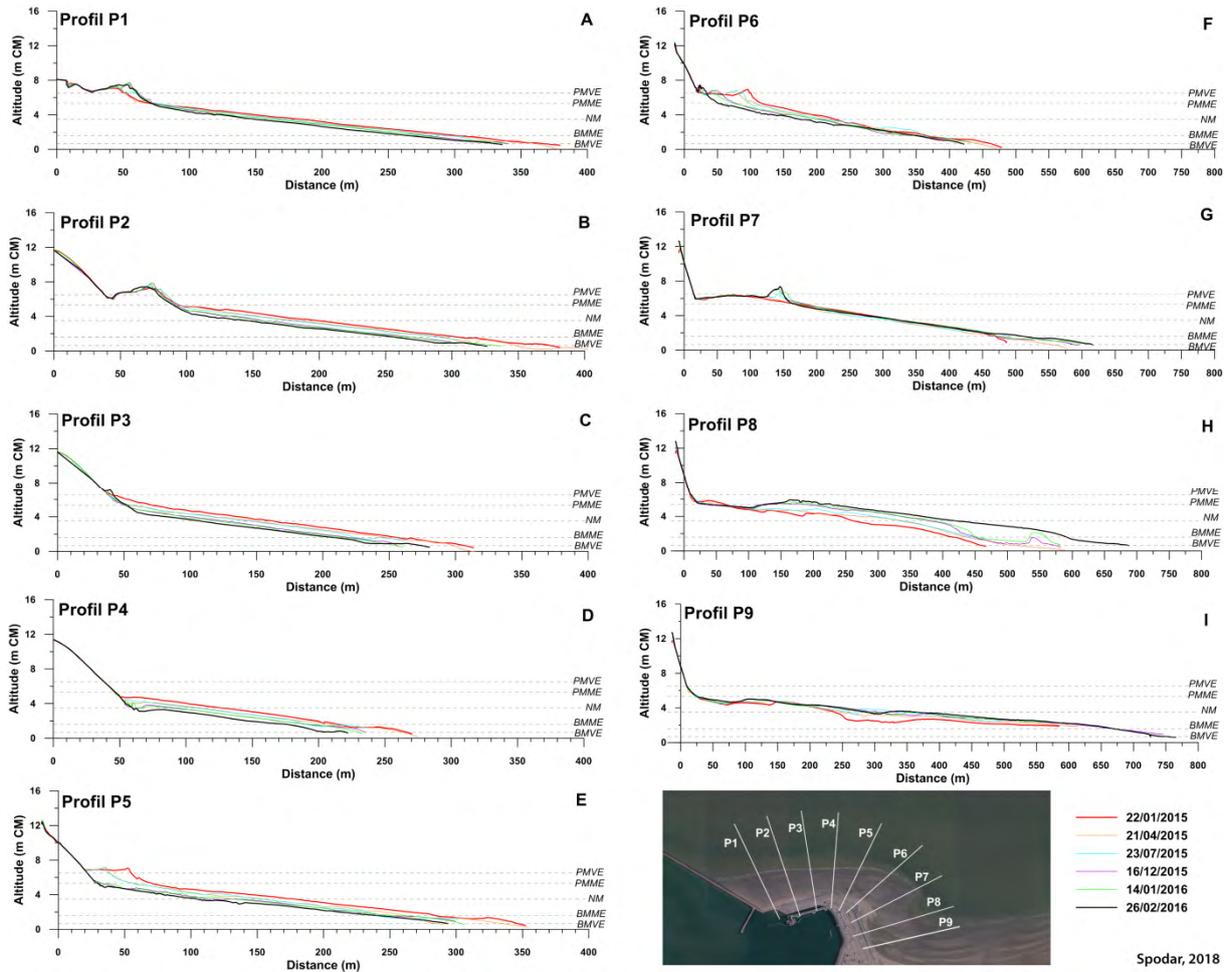


Figure VII.36 Evolution des profils de plage au droit de la digue du Ruytingen entre le 22.02.2012 et le 26.02.2016

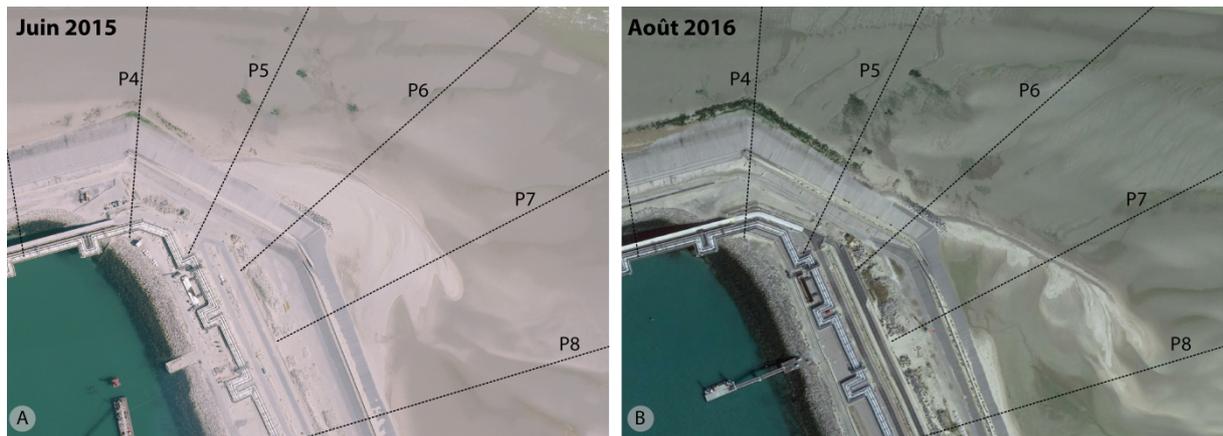
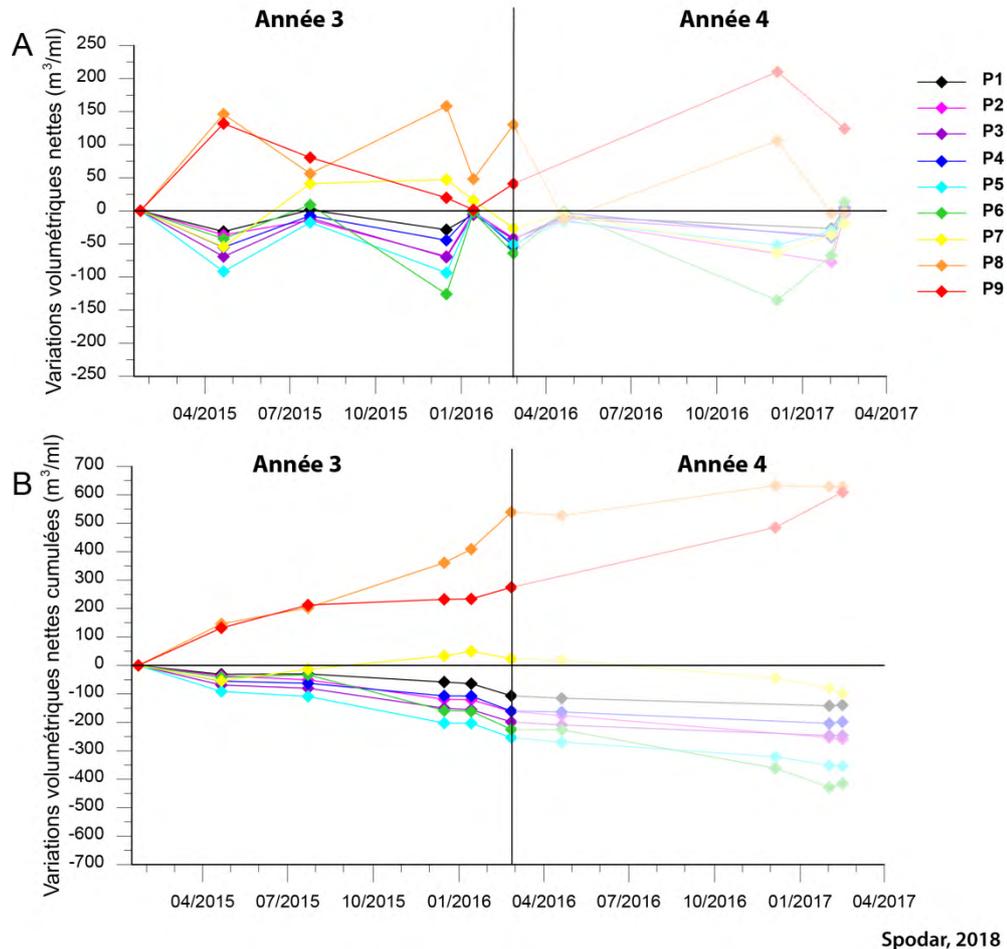


Figure VII.37 Photographies aériennes du site en juin 2015 (A) et en août 2016 (B)

Il est intéressant de remarquer qu'il se dessine un certain lien dans les gains et de pertes au cours d'une même période entre le secteur le plus à l'ouest (P1 à P6) et celui au droit de l'arête est de la digue (P7 à P9) (Figure VII.38-A). En effet, lors des périodes au cours desquelles les profils à l'ouest ont globalement subi les pertes les plus significatives (22.01.2015 - 21.04.2015, 23.07.2015 - 16.12.2015 et 14.01.2016 - 26.02.2016), les profils de plages à l'est ont en parallèle bénéficié des

gains les plus importants (Figure VII.38-A), cette évolution étant à relier avec la migration progressive de la flèche de gravats vers le sud-est.



Spodar, 2018

Figure VII.38 Variations volumétriques par profils entre deux dates de levés (A) et variations volumétriques cumulées par profils (B) au cours de la troisième année

6.2.2. Analyse des MNT topographiques

Sur l'emprise commune aux deux dates de levés (Figure VII.39-A), les variations altimétriques varient entre -1,5 m et +1,5 m. A la différence de l'année précédente, l'extrémité ouest du site est en érosion. Dans le secteur central du site, la zone intertidale est en érosion, avec une baisse notable de son niveau altitudinal compris entre -0,5 m et -1 m. Des zones d'érosion plus sévères entre -1 m et -1,5 m sont encore visibles, toujours localisées dans la partie inférieure de l'estran ainsi qu'en haut de plage. Quant à la partie est du site, un secteur, au sud-est, est caractérisé par une hausse du niveau de l'estran, avec une accumulation de + 1,5 m au maximum. On note également qu'entre avril 2015 et avril 2016, on distingue nettement la migration et l'allongement de la flèche de gravats (Figure VII.39- A et B). Enracinée au niveau de l'arête centrale en avril 2015, elle s'accroche à l'angle est de l'arête Est en avril 2016 comme l'illustre également la Figure VII.37. L'emprise moins étendue vers l'est que sur le précédent MNT différentiel ne permet pas d'affirmer qu'un exhaussement s'est produit au nord de la plage du Clipon, bien qu'il soit possible de le supposer.

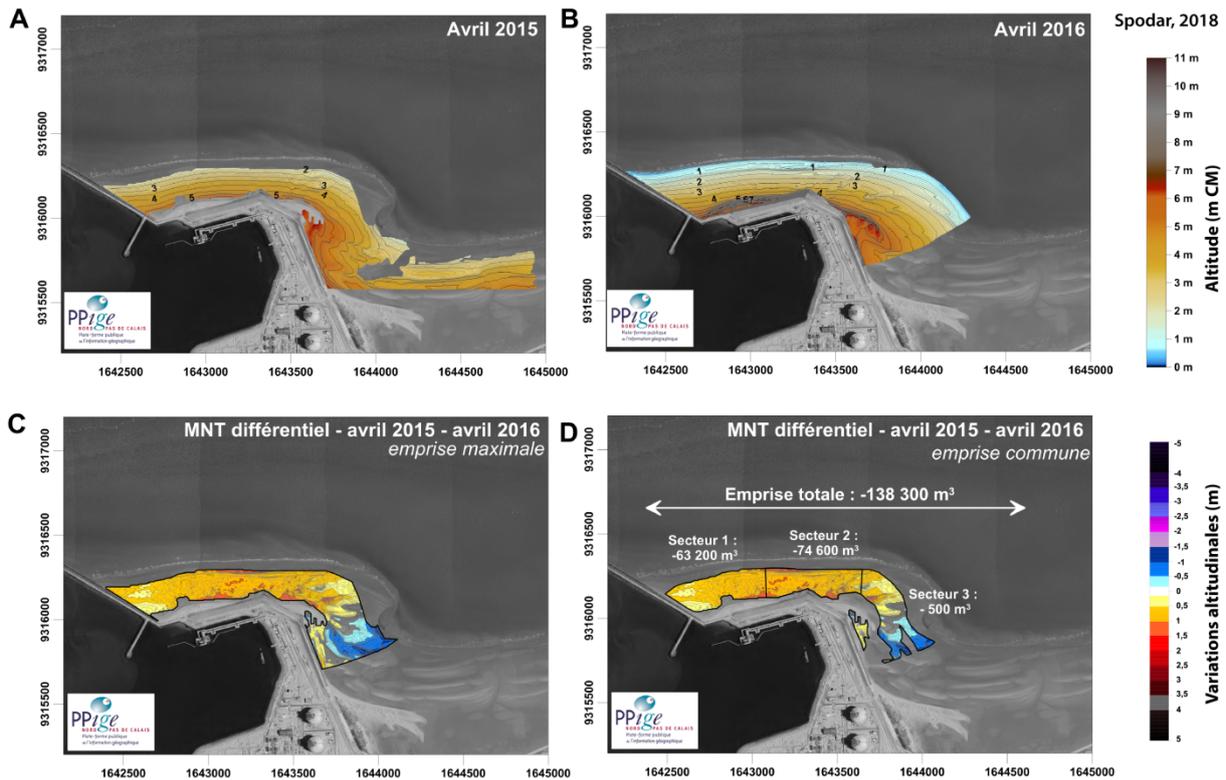


Figure VII.39 MNT de l'estran en avril 2015 (A) et avril 2016 (B), MNT différentiel entre les deux dates (C) et MNT différentiel sur une emprise commune (D)

Le bilan sédimentaire sur l'emprise commune du site entre avril 2015 et avril 2016 est négatif avec une perte de $-138\,300\text{ m}^3$ (Figure VII.39-D). Dans le secteur le plus à l'ouest (secteur 1), la perte de sable est plus importante que lors de l'année précédente avec $-63\,200\text{ m}^3$. Dans le secteur central (secteur 2) en revanche, bien que l'érosion soit sévère, la perte est restée constante avec un déficit de $-74\,600\text{ m}^3$. Le secteur le plus à l'est, présente un sédimentaire bilan à l'équilibre.

6.3. Quatrième année post-rechargement : mars 2016 – février 2017

6.3.1. Analyse des profils de plage au cours de la quatrième année du rechargement - 03.2016 au 02.2017

On constate, lors de cette quatrième année post-rechargement une variabilité spatiale sur le plan morphologique. Dans le secteur ouest et central (P1 à P6) l'évolution de l'estran se caractérise par une érosion qui est de plus en plus marquée du P1 au P6 comme l'illustre la Figure VII.40.

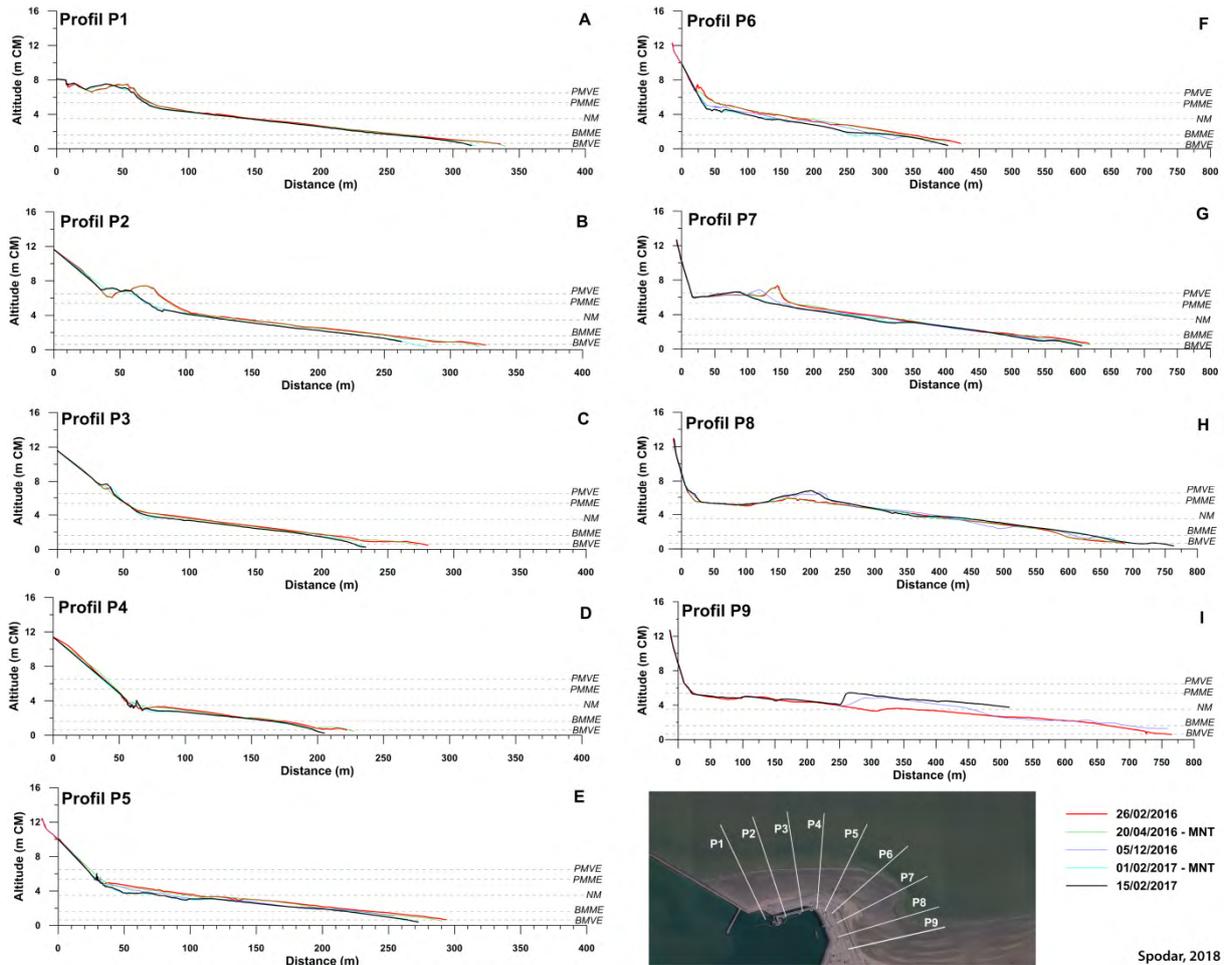


Figure VII.40 Evolution des profils de plage au droit de la digue du Ruytingen entre le 26.02.2016 et le 15.02.2017

L'analyse des variations volumétriques vient confirmer cette observation avec des pertes de sable globalement plus importantes dans le secteur central (P5 et P6) que dans le secteur plus à l'ouest (P1 à P4) (Figure VII.41). L'abaissement de l'estran le long du P1 est d'environ -0,10 m entre février 2016 et février 2017, tandis qu'il atteint -0,40 m en moyenne sur le profil P6, avec un maximum de -1,40 m en haut de plage, ce qui s'explique par la migration de la flèche de gravats (Figure VII.40-F). C'est également le haut de plage qui a été le plus touché par l'érosion sur les profils plus à l'ouest comme en témoigne le recul de la plateforme le long du P2. On note également sur l'ensemble de ces profils une diminution de la largeur du bas de plage, particulièrement bien identifiable sur le P2 et P3 notamment. Dans ce secteur ouest et central, l'estran est resté très rectiligne au fil de son abaissement du P1 au P5. Sur le P6, on note plus de variations morphologiques le long de l'estran. Globalement du P1 au P6, la variation de la pente est inférieure à 1%.

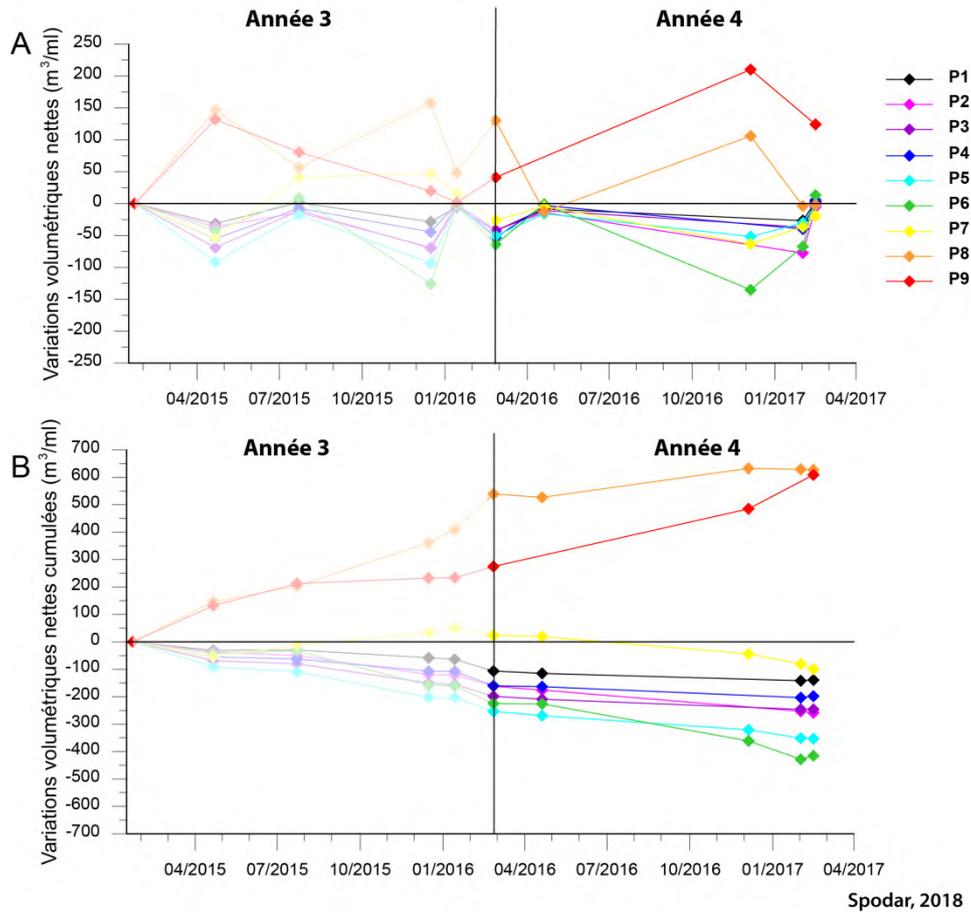


Figure VII.41 Variations volumétriques par profils entre deux dates de levés (A) et variations volumétriques cumulées par profils (B) au cours de la quatrième année

Vers le sud-est la situation est plus variable avec un bas de plage stable et un haut de plage en érosion au niveau du Profil 7 (Figure VII.40-I). Le profil de plage le long du P8 se caractérise par un engraissement, moins important cependant que celui constaté l'année précédente avec +88 m³/ml, contre +540 m³/ml. La portion supérieure de l'estran sur le P9 est restée stable, tandis que dans la partie centrale et basse du profil, les variations volumétriques révèlent une accumulation de +210 m³/ml et +124 m³/ml sur les deux périodes disponibles (Figure VII.41-B).

6.3.2. Analyse des MNT topographiques au cours de la quatrième année

D'avril 2016 à février 2017, la flèche sablo-graveleuse continue de migrer vers le sud-est (Figure VII.42 A et B). Les variations morphologiques sont cependant moins marquées que lors des deux années précédentes (Figure VII.39). En effet, il est possible de remarquer d'importantes zones pouvant être qualifiées de stables étant donné que les variations morphologiques sont comprises dans la marge d'erreur. C'est principalement un abaissement compris entre -0,2 m et -0,5 m qui prédomine sur le site. Les seules zones d'accumulation sont localisées à l'extrémité est du site. L'exhaussement à cet endroit atteint au maximum + 1,70 m. Il est probable que le large stock de sable en accumulation à l'est identifié dès la fin de la deuxième année du rechargement ait poursuivi son déplacement vers le sud-est.

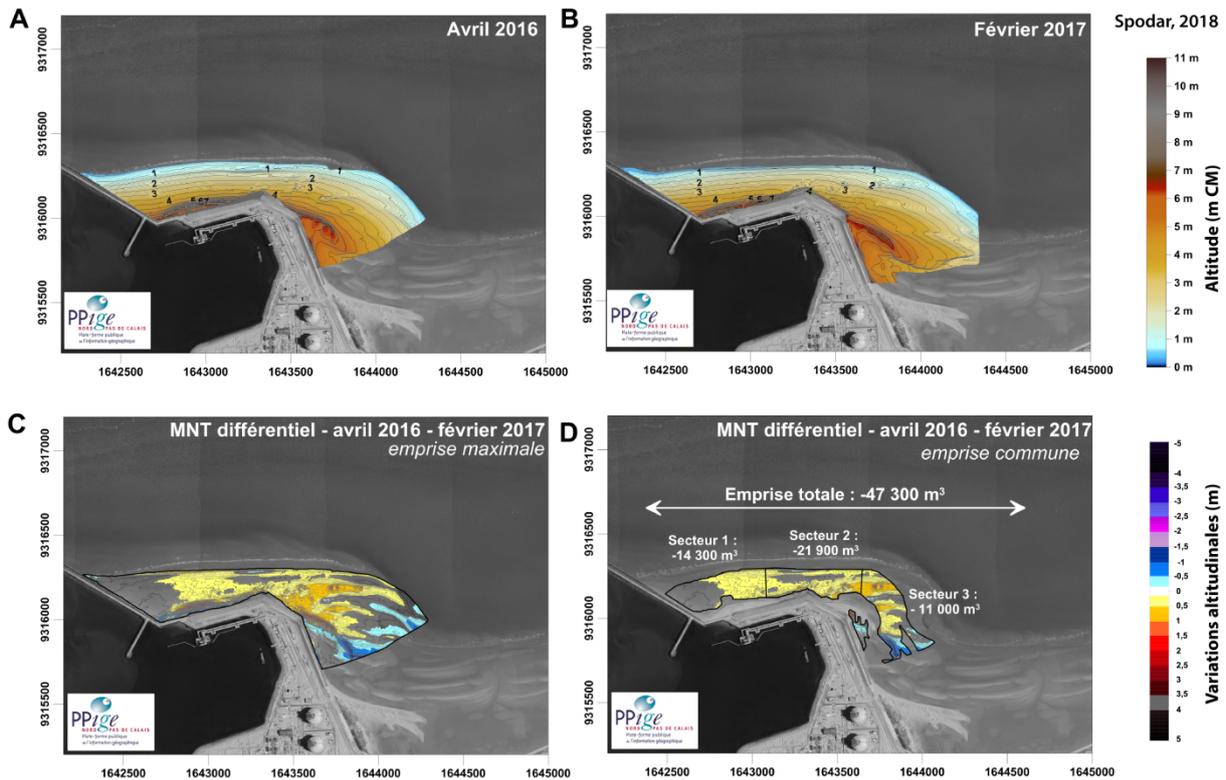


Figure VII.42 MNT de l'estran en avril 2016 (A) et février 2017 (B), MNT différentiel entre les deux dates (C) et MNT différentiel sur une emprise commune (D)

Les variations volumétriques sur l'ensemble du site représentent tout de même $-47\,300\text{ m}^3$. Sur les trois secteurs, un bilan sédimentaire négatif a pu être calculé. Même dans le secteur le plus à l'est, la perte de sable atteint $-11\,000\text{ m}^3$. Cela peut s'expliquer par le transfert de sable vers l'est-sud-est qui s'est vraisemblablement poursuivi, hors de l'emprise commune des levés topographiques.

7. Caractéristiques générales de la granulométrie de surface de l'estran

D'un point de vue granulométrique, le site est très hétérogène. On observe en haut de plage des plateformes composées de divers matériaux (gravats et sables) ainsi que d'autres secteurs composés de galets ou graviers par exemple (Figure VII.43). Des zones sablo-vaseuses ont également été identifiées dans le secteur est du site. L'analyse de la granulométrie qui va être effectuée dans cette section se concentre sur la classe des sables.



Figure VII.43 Aperçu des différents types de matériaux présents sur le site

7.1. Etat du site en avril 2015

En l'absence d'échantillonnage des sédiments de surface en 2013, à la fin des opérations de rechargement, la granulométrie initiale des sédiments de surface n'est pas connue. L'échantillonnage des sables de surface effectué en avril 2015 révèle que la majorité de l'estran se caractérise par des sables moyens (entre 0,25 mm et 0,50 mm) selon la classification de (Wentworth, 1922) (Figure VII.44-A). On observe de manière générale que les sédiments du bas de plage et du milieu de l'estran sont plus fins que ceux du haut de plage (Tableau VII.5). Les sables fins caractérisent notamment le bas de plage dans les secteurs nord-ouest et est de l'emprise-ainsi que le haut de plage le long du P8 et P9 (Figure VII.44-A).

	Grain moyen (mm)	Indice de tri (Φ)	Indice d'asymétrie (Φ)
Haut de plage (> 5,35 m)	0,32	0,67	-0,24
Milieu de plage (1,60 m - 5,35 m)	0,27	0,61	-0,14
Bas de plage (<1,60 m)	0,26	0,61	-0,19

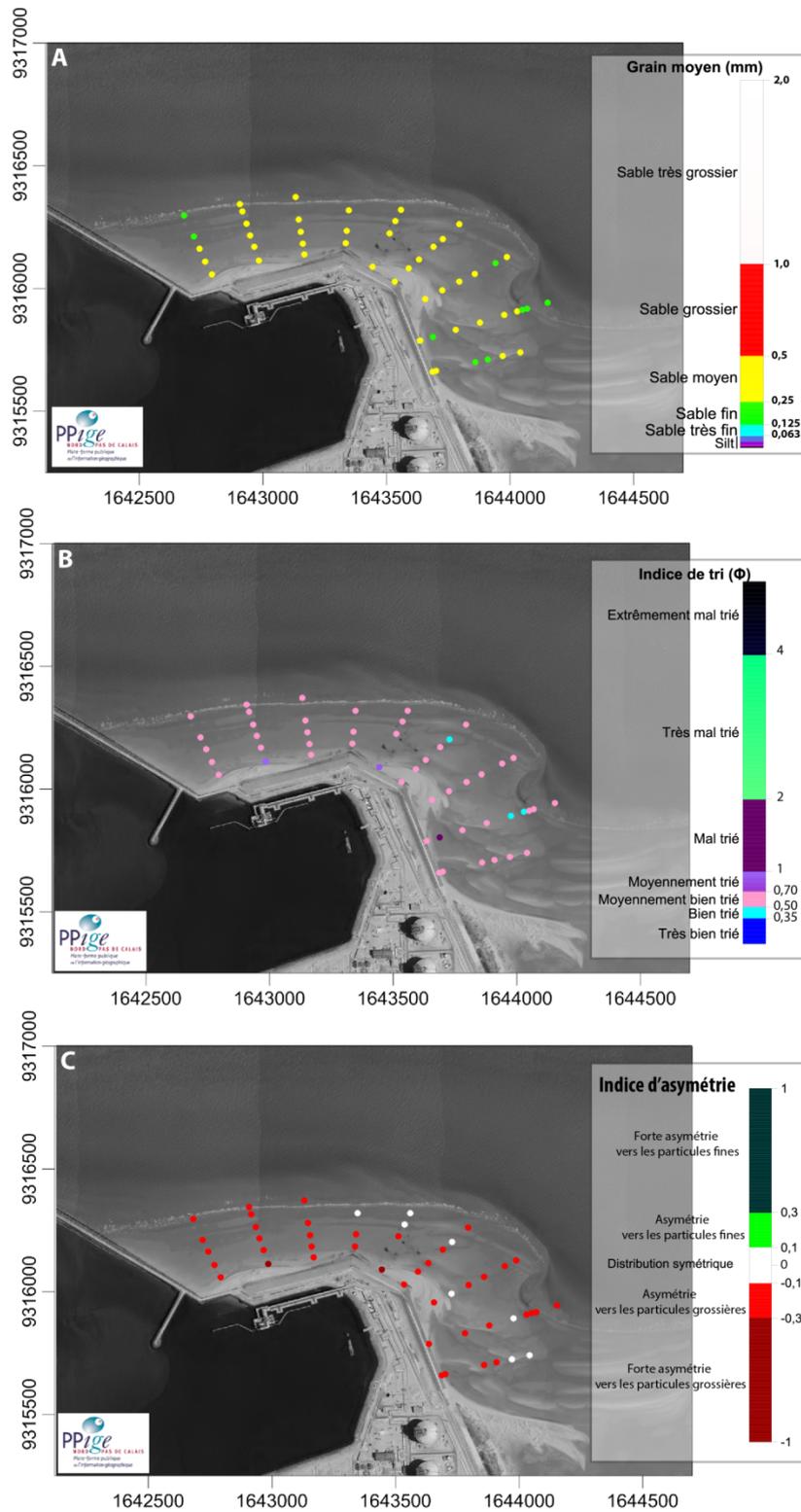
Tableau VII.5 Moyenne du grain moyen, de l'indice de tri et de l'indice d'asymétrie par secteur de plage en avril 2015

A noter cependant que malgré une moyenne de 0,32 mm sur l'ensemble des échantillons du haut de plage (~10 échantillons), les valeurs du grain moyen sont les plus hétérogènes et oscillent entre 0,25 mm et 0,43 mm. En effet certains secteurs du haut de plage dans le secteur au sud-est de l'emprise notamment se caractérisent par des zones sablo-vaseuses d'où la présence de sables fins, tandis que d'autres se rapprochent des plateformes du haut de plage constituées de matériaux plus grossiers.

La carte de répartition de l'indice de tri (Figure VII.44-B) met en évidence une certaine homogénéité dans le classement des échantillons sur une majeure partie de l'estran avec des sédiments moyennement bien triés (entre 0,50 et 0,70 Φ). Quelques secteurs se démarquent à l'est, vers le bas de plage par exemple, où se trouvent des échantillons mieux classés.

L'indice d'asymétrie montre une distribution granulométrique qui tend à s'étirer vers les particules grossières. Quelques échantillons se caractérisent cependant par une distribution

symétrique notamment dans la partie inférieure du profil de plage dans le secteur face à l'arête centrale de la digue et à l'est.



Spodar, 2018

Figure VII.44 Cartes de la répartition du grain moyen (A), de l'indice de tri (B) et de l'indice d'asymétrie (C) en avril 2015

7.2. Evolution de la granulométrie entre avril 2015 et février 2017

Deux autres échantillonnages des sables de surface effectués en février 2016 et février 2017 vont permettre de mettre en évidence l'évolution de la granulométrie du site. La Figure VII.45-A synthétise la valeur moyenne des grains moyens des sables échantillonnés en haut, milieu et bas plage. Entre avril 2015 et février 2016, on remarque que les moyennes du grain moyen des trois secteurs tendent à s'uniformiser, tandis qu'au cours de la période suivante, on observe de nouveau plus de différences. Quelle que soit l'année, on observe toujours, en moyenne, une taille du grain moyen qui s'affine du haut vers le bas de plage. Le grain moyen en haut de plage reste en effet systématiquement légèrement plus grossier avec des valeurs moyennes qui oscillent entre 0,30 mm et 0,33 mm.

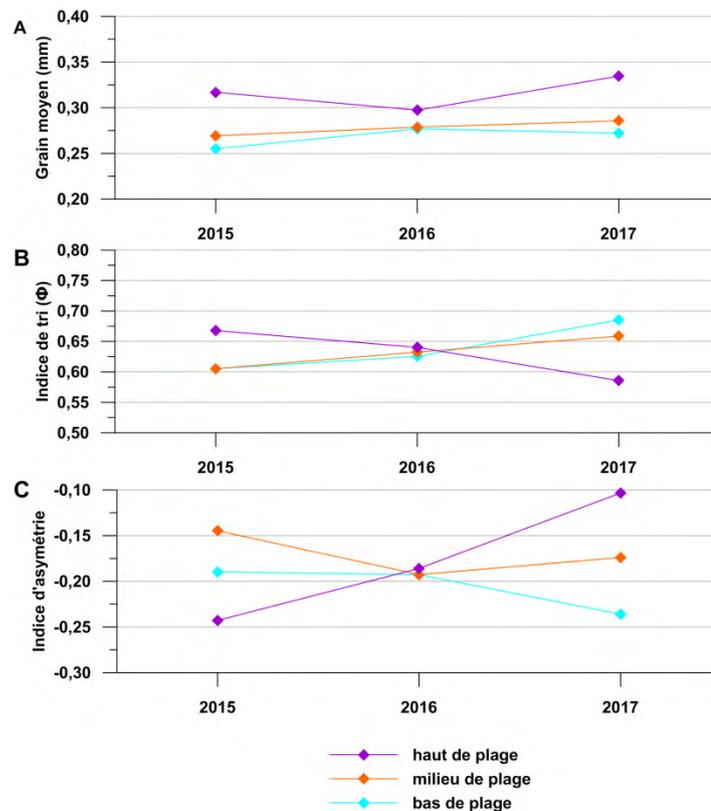


Figure VII.45 Evolution du grain moyen (A), de l'indice de tri (B) et de l'indice d'asymétrie (C) selon différents niveaux sur l'estran

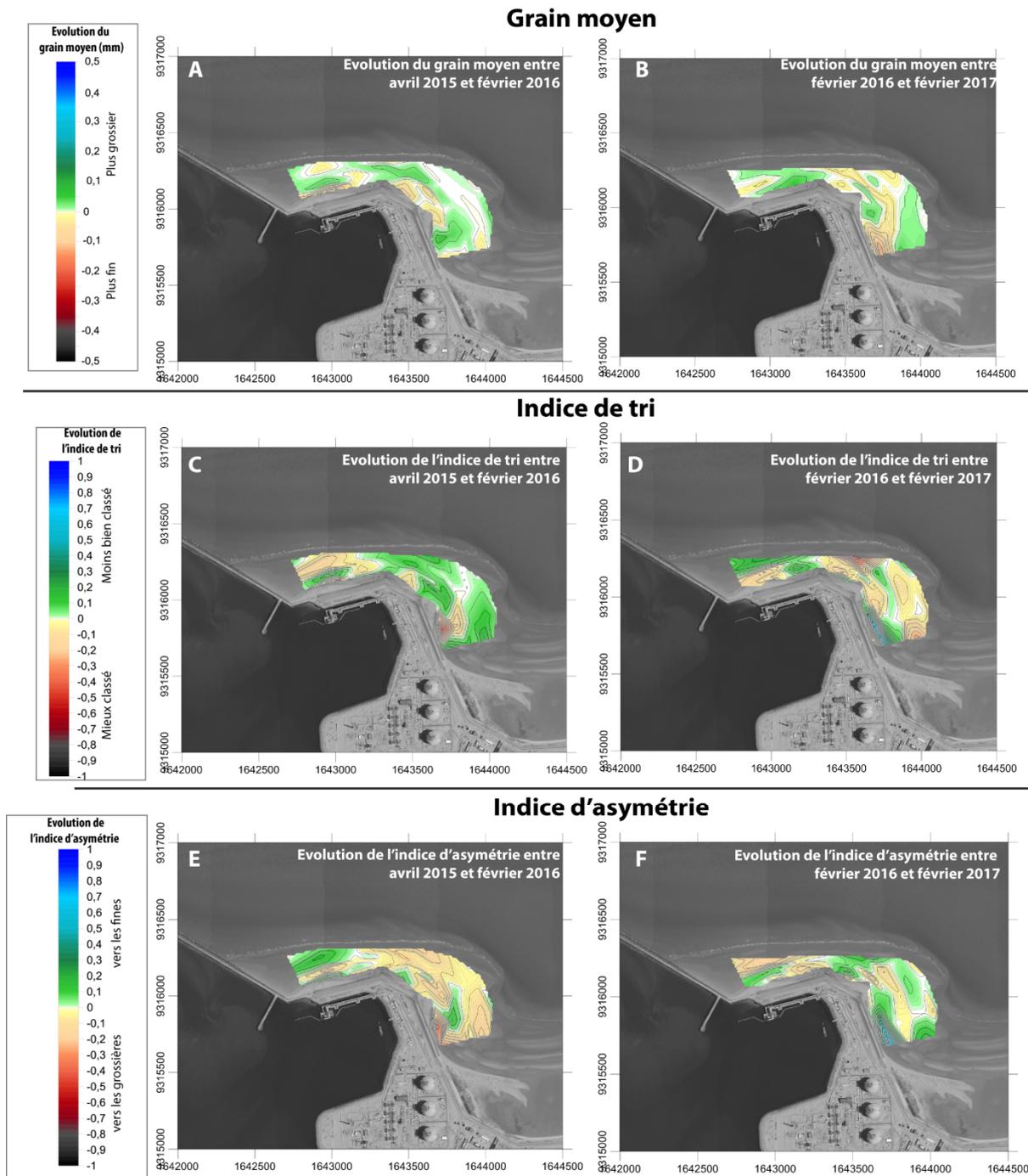
Les moyennes de l'indice de tri (Figure VII.45-B) montrent qu'en avril 2015, la moyenne de l'indice de tri en haut de plage (0,67 Φ) est supérieure à celle du milieu et bas de plage (0,61 Φ), indiquant donc un sable moins bien trié en haut de plage. L'évolution montre qu'au fil du temps les échantillons du haut de plage tendent à devenir mieux triés, tandis qu'à l'inverse en milieu et bas de plage les échantillons deviennent moins bien triés. L'évolution de l'indice de tri n'en demeure pas moins modeste puisqu'en moyenne les échantillons se caractérisent toujours comme étant moyennement bien triés.

Enfin l'analyse de l'indice d'asymétrie montre qu'en haut de plage, le sable tend à s'approcher d'une distribution symétrique au fil des trois échantillonnages pour passer de -0,24 en avril 2015 à -0,10 en février 2017. En milieu de plage, l'évolution moyenne varie assez peu avec un sable présentant une prépondérance des particules grossières tout comme en bas de plage où les valeurs moyennes de l'indice d'asymétrie sont restées comprises entre -0,19 en mars 2015 et -0,24 en février 2017.

Malgré ces tendances générales, des disparités spatiales sont observables entre les deux périodes de suivi d'avril 2015 à février 2016, et de février 2016 à février 2017. L'évolution spatiale des paramètres granulométriques sur le site révèle que la variation du grain moyen est très modeste avec des valeurs qui oscillent entre -0,10 mm et + 0,07 mm entre avril 2015 et février 2016 (Figure VII.46-A). En haut de plage, une diminution de la taille du grain moyen est observable face à l'arête Ouest et centrale de la digue, tandis que face à l'arête Est c'est une légère tendance à l'augmentation du grain moyen qui est observé. En milieu et bas de plage, aucune tendance ne se dégage réellement avec l'alternance de sous-zones présentent un affinement du grain moyen ou au contraire au grossissement du grain moyen. L'évolution spatiale de l'indice de tri montre une certaine hétérogénéité dans les variations entre 2015 et 2016 (Figure VII.46-C). Dans le secteur face à l'arête Ouest de la digue, le haut de plage présente un sable qui tend à être plus hétérogène tandis qu'en bas de plage, le sable est mieux classé. Dans les secteurs face à l'arête centrale et est c'est globalement un sable moins bien trié qui caractérise le site.

Globalement l'évolution de l'indice d'asymétrie (Figure VII.46-E) est peu significative, avec une distribution granulométrique qui tend légèrement vers une asymétrie vers les particules fines dans le secteur ouest, tandis que c'est l'évolution inverse qui caractérise la distribution granulométrique des sables face à aux arêtes centrale est de la digue.

L'analyse des variations spatiales des paramètres granulométriques au cours de la seconde période, entre février 2016 et février 2017 montre des tendances différentes, mais restent minimales. Les variations du grain moyen sont encore une fois minimales entre -0,14 mm et + 0,21 mm (Figure VII.46-B). Les évolutions de l'indice de tri et de l'indice d'asymétrie montrent une hétérogénéité sur l'ensemble du site. Seul le secteur sablo-vaseux face à l'arête est se démarque avec des évolutions des paramètres plus marquées. Dans cette zone, on remarque en effet grâce à l'indice de tri, que les échantillons deviennent mieux classés entre février 2016 et février 2017. L'indice *skewness* indique également une tendance à une asymétrie qui tend vers les particules fines.



Spodar, 2018

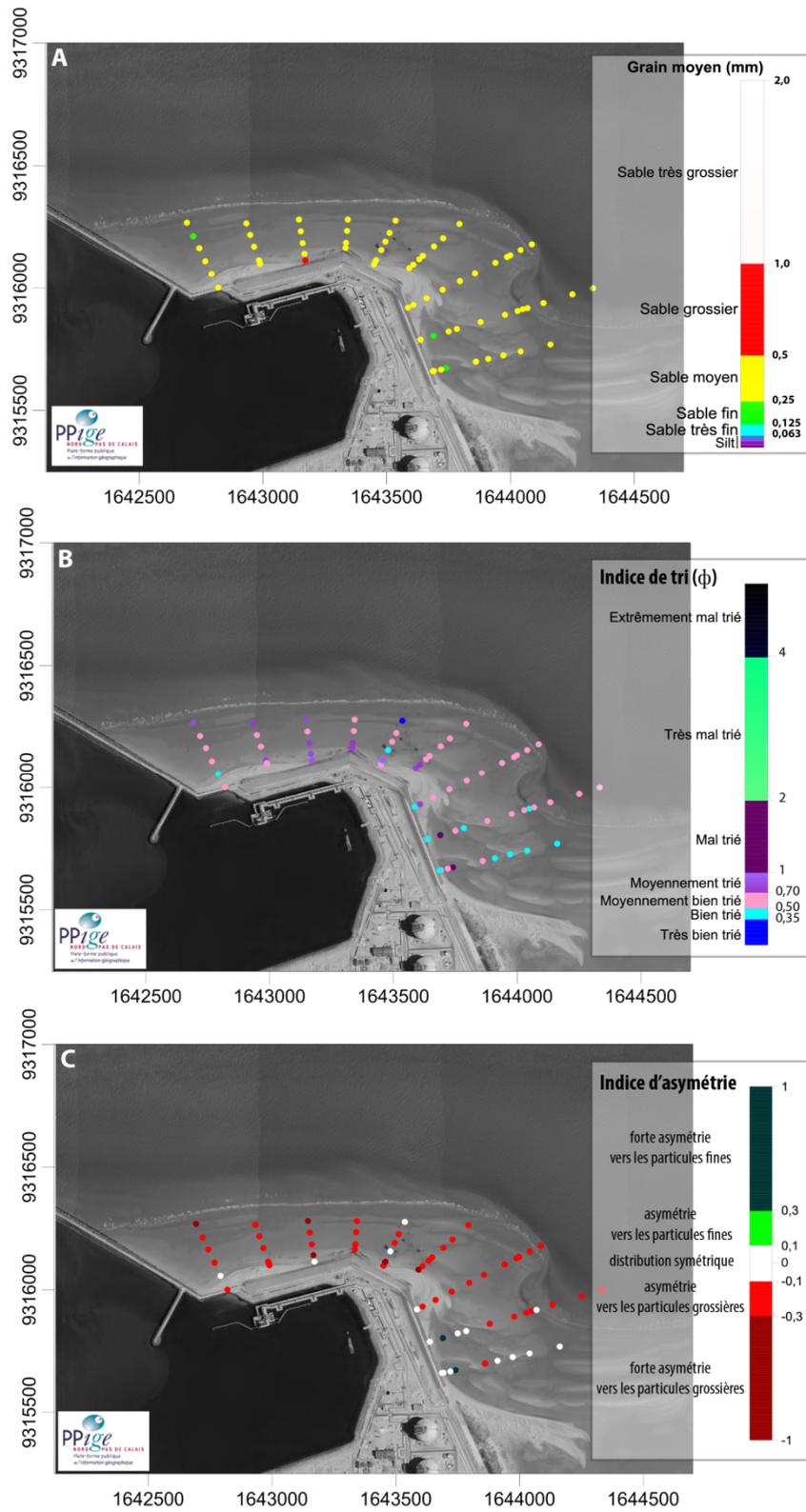
Figure VII.46 Evolution des paramètres granulométriques (grain moyen, indice de tri et indice d'asymétrie) entre avril 2015 et février 2016, et entre février 2016 et février 2017

7.3. Bilan de l'évolution granulométrique

Pour rappel, ce travail doctoral n'ayant débuté que fin 2014, l'analyse de la granulométrie des sables de surface du site ne démarre que début 2015. Globalement, l'ampleur des variations est assez faible, que ce soit le grain moyen des échantillons, les indices de tri ou d'asymétrie. A noter qu'il est fort probable que des remaniements sédimentaires plus conséquents entraînant une évolution plus notable des paramètres granulométriques se soient produits au cours de la première année du

rechargement notamment entre mars 2013 et mars 2014, mais aucun échantillonnage n'a été effectué à ces dates.

La répartition des paramètres granulométriques en février 2017 sont synthétisés dans la Figure VII.47. Globalement, l'ensemble du site se caractérise par un sable moyen. L'indice de tri met en évidence plus de variabilité spatiale avec un sédiment moyennement trié à moyennement bien trié, et donc plutôt hétérogènes, dans le secteur ouest et central, tandis que le secteur face à l'arête est de la digue présente plus d'échantillons bien triés. Une sous-zone proche de la digue se caractérise néanmoins par un sable mal trié. Cette observation s'explique probablement par la présence d'une zone sablo-vaseuse, entraînant ainsi une certaine hétérogénéité granulométrique dans les échantillons prélevés. Cette zone se détache encore une fois sur le reste du site avec une forte prépondérance vers les particules fines. Sur le profil P9 le plus à l'est la quasi-totalité des échantillons présentent une distribution symétrique.



Spodar, 2018

Figure VII.47 Cartes de la répartition du grain moyen (A), de l'indice de tri (B) et de l'indice d'asymétrie (C) en février 2017

8. Synthèse de l'évolution du rechargement subtidal

8.1. Bilan de l'évolution bathymétrique

L'évolution générale des petits fonds et du bas de plage a montré une forte tendance à l'érosion principalement dans le secteur central du site avec un abaissement du niveau altitudinal qui atteint au maximum -4 m entre mai 2013 et avril 2017 (Figure VII.48), le déficit sédimentaire dans ce secteur se soldant par une perte de 401 000 m³. A l'ouest, une petite zone en accumulation de +0,5 m voire +1 m est observable le long de la jetée du Clipon mais le bilan volumétrique dans ce secteur 1 n'en demeure pas moins négatif avec -113 000 m³. C'est à l'extrémité est du rechargement (secteur 3) qu'une zone d'engraissement massif s'est produite entre mai 2013 et avril 2017. Dans ce secteur le bilan sédimentaire est largement positif avec + 205 000 m³. Un transport sédimentaire vers l'est est donc vraisemblablement à l'origine de cette évolution. Au total, de mai 2013 à avril 2017, ce sont près de 310 000 m³ de sable qui ont été perdus dans les petits fonds et en bas d'estran.

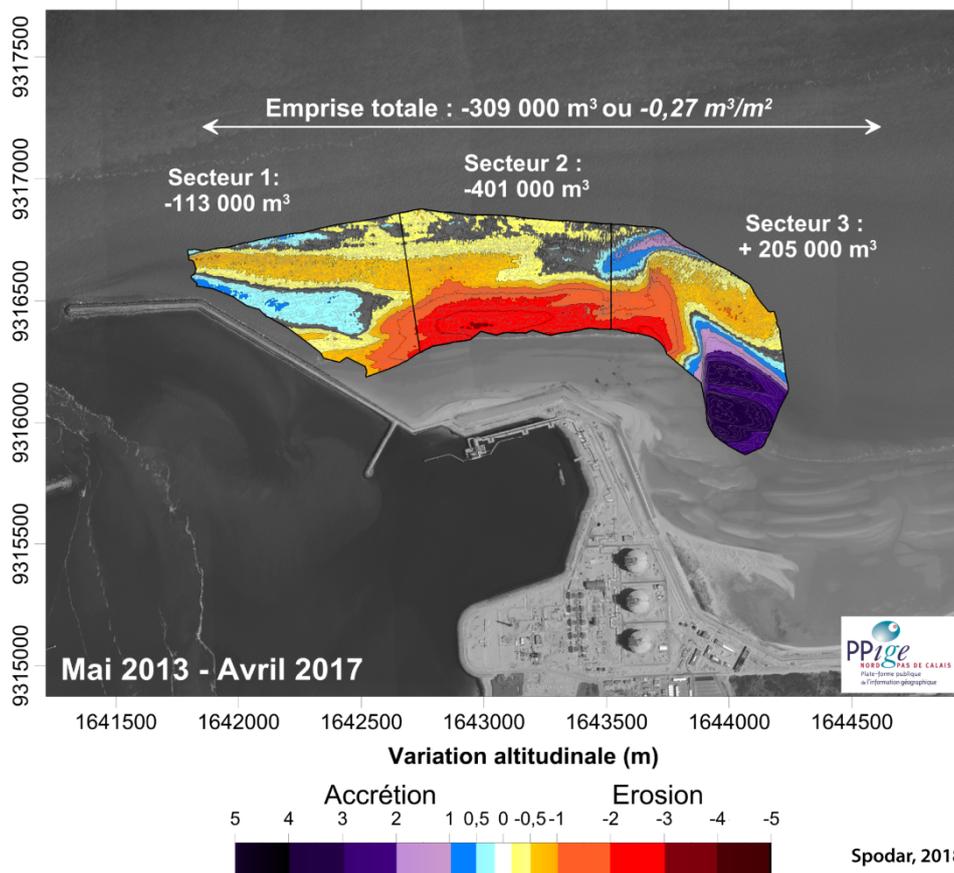


Figure VII.48 Evolution morphologique et volumétrique entre mai 2013 et avril 2017 dans les petits-fonds et le bas de plage sur l'emprise commune

8.2. Bilan de l'évolution topographique

L'analyse a mis en évidence que l'estran (du haut de plage jusqu'à + 2 m CM) est caractérisé par érosion importante (Figure VII.49) entre mars 2014 et février 2017. La baisse du niveau de la plage est un peu moins importante à l'extrémité ouest du site (-0,5 à -1 m), puis s'accroît vers la partie centrale du site (-5 m au maximum). En revanche la partie à l'est du site, au nord de la zone

des Sternes, se caractérise par un gain de sable notable entraînant une élévation du niveau de l'estran qui atteint par endroits jusqu'à +3 m. Malgré cela, l'emprise d'étude se solde par un déficit sédimentaire qui atteint - 254 000 m³.

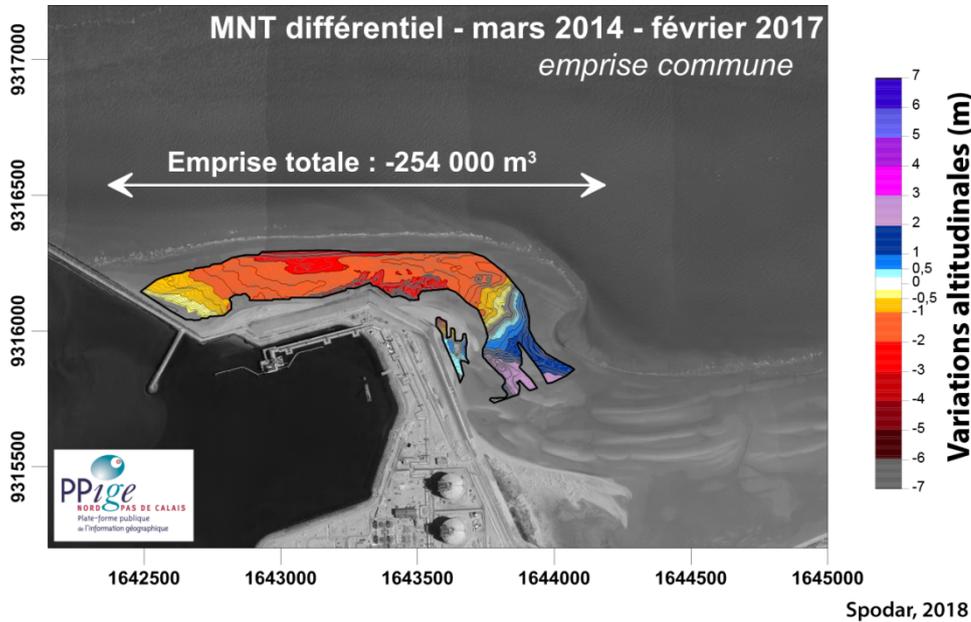


Figure VII.49 MNT différentiel entre mars 2014 et février 2017

L'analyse précédemment effectuée des profils de plage a montré la même réponse morphologique avec une érosion de l'estran le long des profils les plus à l'ouest ainsi que dans la partie centrale du site tandis qu'un engraissement a pu être constaté sur les deux profils les plus à l'est.

Le développement d'une flèche sablo-graveleuse et sa migration vers le sud-est a pu être mise en évidence au cours de cette analyse (Figure VII.50). Cette flèche, de forme massive apparaît dès 2015. Elle migre progressivement vers le sud-est, son point d'ancrage se déplaçant le long de l'arête centrale de la digue. En 2016 elle se caractérise par une forme beaucoup plus mince et plus longue, se terminant par des crochets successifs. Enfin en mai 2017, elle a de nouveau progressé vers le sud-est, mais s'est élargie. La formation et l'évolution de cette flèche est liée à une dérive littorale vers le sud-est, en réponse à la réfraction des vagues incidentes à l'approche de la digue.



Spodar, 2018

Figure VII.50 Photographies satellitaires du site entre septembre 2015 et mai 2017 illustrant le développement et la migration vers le sud-est d'une nouvelle flèche sablo-graveleuse (©Google Earth)

8.3. Lien entre la zone intertidale et subtidale

Pour rappel, l'analyse de l'évolution de la zone subtidale et du bas de plage du site a montré globalement une tendance générale se caractérisant par un déficit sédimentaire, sauf entre mai et octobre 2013. Il a néanmoins été mis en évidence que le secteur le plus l'est était systématiquement en engraissement, très vraisemblablement en réponse à un transport sédimentaire vers l'est. Le bilan volumétrique négatif dans les petits-fonds a néanmoins soulevé la question d'un éventuel transfert de sable vers la zone intertidale, en plus du déplacement identifié vers l'est. La Figure VII.51 rassemble les bilans volumétriques par périodes disponibles dans la zone subtidale et intertidale. Quelle que soit la période, c'est un déficit sédimentaire qui caractérise la plage de manière générale comme l'indiquent les variations volumétriques calculées à partir des MNT différentiels (Figure VII.51-B). Dans le secteur ouest et central, l'analyse des cartes de différentiels altimétriques a montré que l'estran se caractérise globalement par un abaissement de son niveau altitudinal. A noter, que l'analyse des profils topographiques levés sur le terrain à une fréquence plus élevée que les MNT n'a pas révélé de périodes avec des conditions météo-marines particulièrement propices à l'engraissement des secteurs ouest et central.

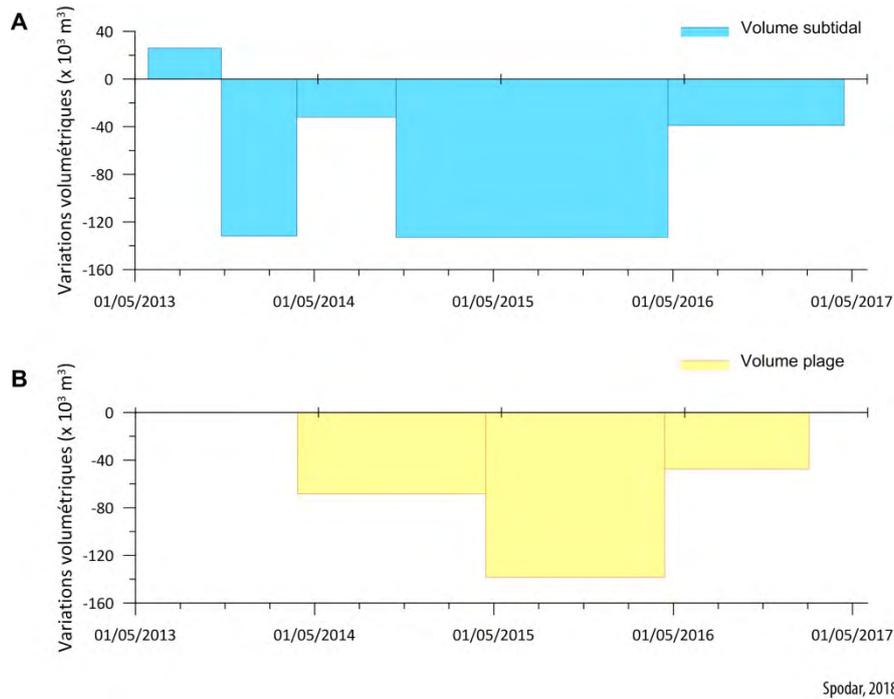


Figure VII.51 Synthèse des bilans sédimentaires dans la zone intertidale et subtidale

L'hypothèse d'un éventuel apport de sable en provenance des petits-fonds ne semble pas se vérifier. Seule la partie intertidale dans le secteur est bénéficiée d'apports en sable probablement dû à l'érosion de la partie intertidale en amont. Il a été possible de remarquer que le gain en sable dans le secteur 3 tendait à diminuer au fil des années. Il est probable que le sable continue son déplacement vers l'est et se situe désormais en dehors de l'emprise de calcul des volumes.

Il convient de préciser que pondérés par la surface des emprises des deux zones, les volumes perdus sont plus importants sur l'estran que dans les petits fonds et le bas de plage quelle que soit la période (Tableau VII.6). Encore une fois il faut préciser que les dates des levés bathymétriques ne coïncident pas avec celles des levés topographiques sur l'estran.

Seule la dernière période disponible, entre avril 2016 et février 2017 pour la partie intertidale et entre avril 2016 et avril 2017 pour la partie subtidale, permet de comparer (à deux mois près) l'évolution conjointe de la zone subtidale et de l'estran. On remarque alors que la perte de sable a été plus importante sur l'estran avec $-0,17 \text{ m}^3/\text{m}^2$ contre $-0,03 \text{ m}^3/\text{m}^2$ en zone subtidale.

Subtidal et bas de plage		Estran (> de + 2 m CM)	
Période	Volume net / surface (m3/m2)	Période	Volume net / surface (m3/m2)
Mai 2013 - Octobre 2013 (5 mois)	0,02	27/03/2014 - 15/04/2015	-0,24
Octobre 2013 - Mars 2014 (5 mois)	-0,11	15/04/2015 - 10/04/2016	-0,49
Mars 2014 - Octobre 2014 (6,5 mois)	-0,03	10/04/2016 - 01/02/2017	-0,17
Octobre 2014 - Avril 2016 (18 mois)	-0,11		
Avril 2016 - Avril 2017 (12 mois)	-0,03		

Tableau VII.6 Evolution volumétrique par unité de surface en zone subtidale et intertidale

Il est donc probable que les variations morphologiques majeures du site soient essentiellement dues à un transport sédimentaire longitudinal vers l'est que ce soit en zone subtidale

ou intertidale. Dans la zone subtidale, l'action des courants de marées mais aussi de la houle qui peut augmenter les contraintes de cisaillements au niveau du fond et ainsi favoriser la mise en suspension des sédiments, est vraisemblablement responsable de ce transport sédimentaire vers l'est. Dans la zone intertidale, ce sont surtout les vagues et la dérive littorale dominante vers l'est, en réponse aux vents dominants du secteur ouest, qui induisent un transfert des matériaux sableux vers l'est.

Chapitre VIII. Synthèse et perspectives

Introduction du chapitre

Ce dernier chapitre s'attache à comparer l'évolution des deux rechargements sédimentaires massifs mis en œuvre sur la façade portuaire du GPMD. Cette comparaison va permettre de déterminer l'efficacité respective des deux rechargements. La question de la pertinence de la mise en œuvre de telles opérations sera discutée dans une vision à long terme de gestion du littoral dans un contexte de changement climatique. Des propositions de gestion seront également apportées.

1. Bilan et comparaison de l'efficacité des deux rechargements

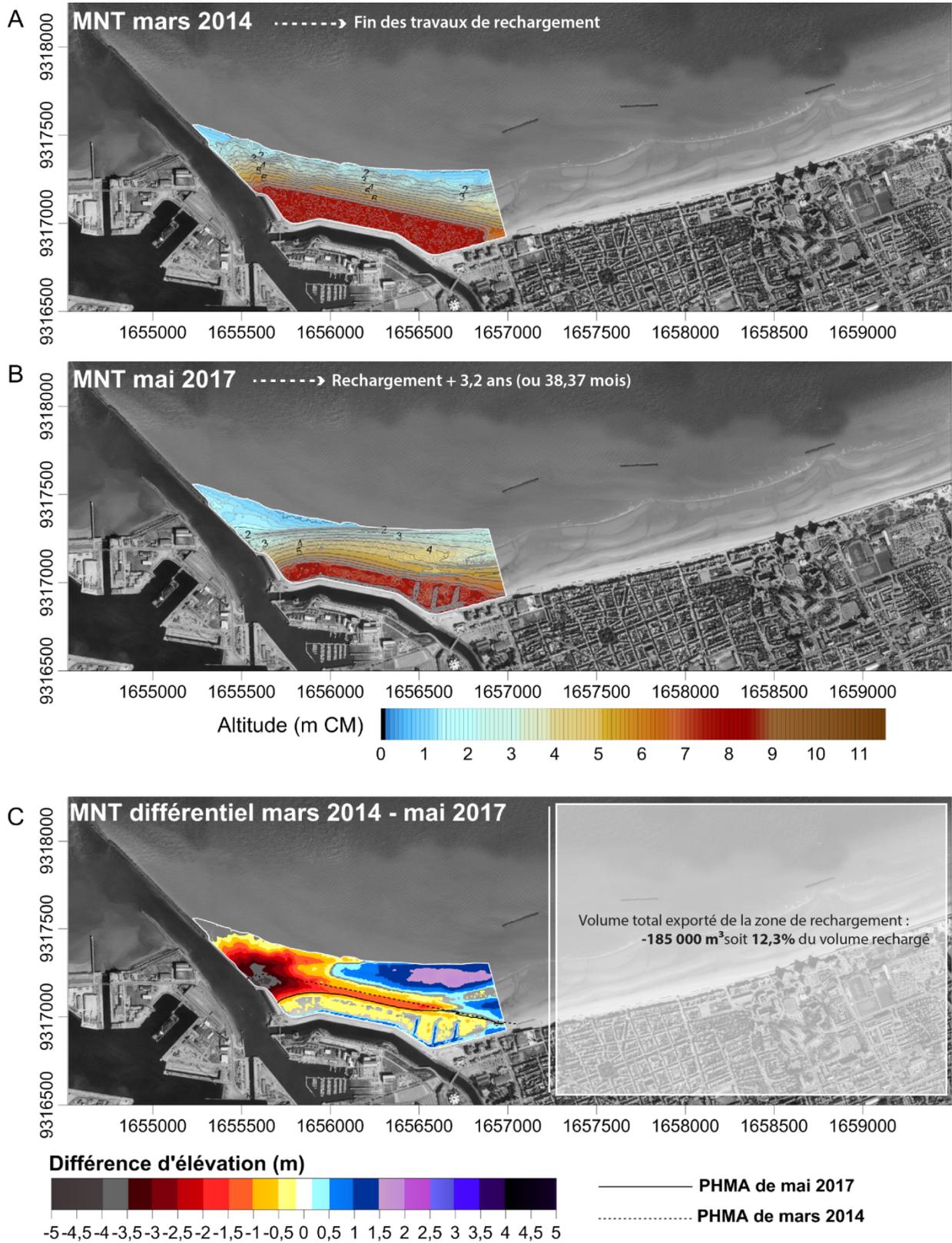
L'évolution des deux rechargements sédimentaires (Tableau VIII.1) mis en œuvre sur la façade portuaire de Dunkerque a été comparée.

Site	Type de rechargement	Volume rechargé	Année
Digue du Ruytingen	Rechargement intertidal et subtidal plage	3,00 Mm ³	Travaux en discontinu sur un peu plus d'un an - de janvier 2012 à mars 2013
Digue des Alliés	Rechargement de plage	1,50 Mm ³	Travaux en deux étapes - intervention d'urgence en 2011 et rechargement massif en 2011

Tableau VIII.1 Rappel des caractéristiques principales des deux rechargements sédimentaires

1.1. Bilan de l'efficacité des deux rechargements

Les Figure VIII.1 et Figure VIII.2 synthétisent l'évolution morphologique et volumétrique globale des deux rechargements sédimentaires. A noter que l'évolution des deux opérations n'est pas comparée sur la même période temporelle, de mai 2013 à mars 2017 pour celui devant la digue du Ruytingen et de mars 2014 à mai 2017 pour celui réalisé devant la digue des Alliés. Le nombre d'années d'évolution n'est pas donc le même pour les deux opérations, environ 4 ans et 3 ans respectivement.



Spodar, 2018

Figure VIII.1 Synthèse de l'évolution volumétrique et morphologique du rechargement de plage au droit de la digue des Alliés entre mars 2014 et mai 2017

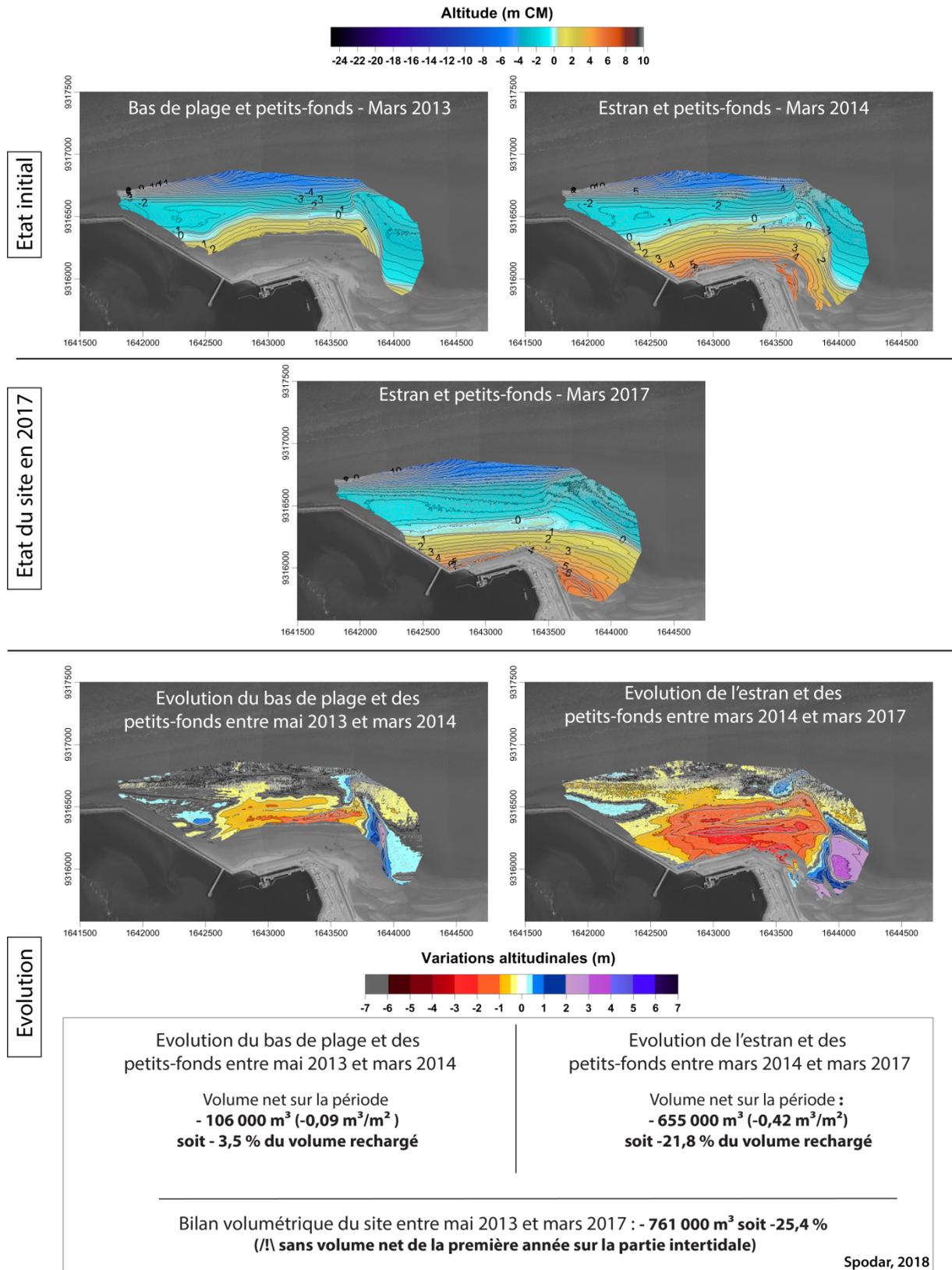


Figure VIII.2 Synthèse de l'évolution volumétrique et morphologique du rechargement sédimentaire au droit de la digue du Ruytingen entre mai 2013 et mars 2017

1.1.1. Le cas du rechargement de plage à Malo-les-Bains

Dans ce premier cas, celui de Malo-les-Bains, le bilan sédimentaire du rechargement de plage se caractérise par un déficit de -185 000 m³ à l'issue des trois années qui suivent sa mise en œuvre. Ce volume représente alors une perte de 12,3 % du volume initialement rechargé de 1,5 Mm³ (Figure VIII.1). En pondérant ce volume par la superficie de l'emprise concernée, une érosion de -0,33 m³/m² est estimée.

L'évolution des variations volumétriques montre une atténuation progressive de l'érosion au fil des années pour passer de -5,1 % du volume rechargé (-76 000 m³) à l'issue de la première année à -3,1 % du volume rechargé (-48 000 m³) à l'issue de la troisième année de suivi (Figure VIII.3-A). Ce qui avait été mis en évidence par (Spodar *et al.*, 2017) concernant l'atténuation de l'érosion en se basant uniquement sur les deux premières années disponibles se confirme au cours de la troisième année avec une perte de sable qui a encore diminué.

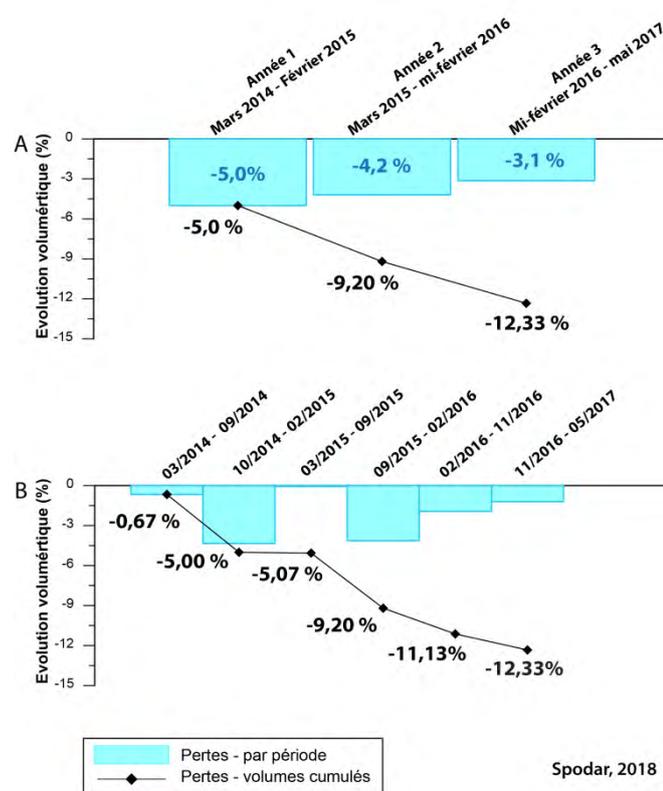


Figure VIII.3 Evolution volumétrique par année (A) et par période (B) par rapport au volume rechargé

Il a été mis en évidence que les conditions météorologiques et hydrodynamiques ont été de manière générale plus intenses au cours de la deuxième année, entre mars 2015 et mi-février 2016 (et notamment pendant la période hivernale), que pendant les deux autres années. Or c'est au cours de la première année que les pertes en sable ont été les plus importantes (Figure VIII.3). Il est possible que le déficit sédimentaire substantiel au cours de la première année soit dû à un remaniement conséquent du stock de sable et un export plus notable en réponse à un rééquilibrage important. Un tel phénomène se caractérisant par des pertes significatives peu de temps après la réalisation du rechargement a également été observé pour d'autres opérations de rechargements dans le monde (Psuty & Moreira, 1992; Andrade *et al.*, 2006; Marcomini & López, 2006; De Schipper *et al.*, 2014).

1.1.2. Le cas du rechargement sédimentaire à l'avant-port Ouest

Concernant le rechargement sédimentaire au droit de la digue de Ruytingen, il convient tout d'abord d'insister sur le fait que le bilan sédimentaire entre mai 2013 et mars 2017 est sous-estimé car il ne prend pas en compte l'évolution volumétrique dans la partie intertidale au cours de la première année post-rechargement entre mars 2013 et mars 2014 (Figure VIII.2). Ce bilan sédimentaire global résulte donc de l'addition 1) des variations volumétriques de $-106\,000\text{ m}^3$ ($-0,09\text{ m}^3/\text{m}^2$) entre mai 2013 et mars 2014 dans la zone subtidale et le bas de plage uniquement et 2) des variations volumétriques sur l'estran et la zone subtidale (voir Chapitre V – section 1.1.1.1) entre mars 2014 et mars 2017 qui s'élèvent à $-655\,000\text{ m}^3$ ($-0,42\text{ m}^3/\text{m}^2$) (Figure VIII.2). Le bilan sédimentaire atteint par conséquent $-761\,000\text{ m}^3$ en quatre ans, soit 25,4 % du volume rechargé.

Pour cette opération il est assez délicat d'émettre des conclusions quant à l'évolution des volumes au fil des années, étant donné que les dates des levés et le manque de certaines données ne permettent pas d'identifier clairement les variations volumétriques annuelles (Figure VIII.4). Pour la première année, le manque de mesures sur l'estran sous-estime le volume perdu qui est de -3,5 % et de plus l'année 2 et 3 doivent être regroupées étant donné l'absence de levés bathymétriques en 2015, soit -17,2 % du volume initial ou -8,6% en moyenne au cours de la deuxième et troisième année. La dernière période entre avril 2016 et avril 2017 semble être celle lors de laquelle les pertes de sables ont été les moins importantes (Figure VIII.4). Il est donc possible que globalement une diminution des pertes soit constatée au fil du temps, mais les dates des levés ne permettent pas de le confirmer.

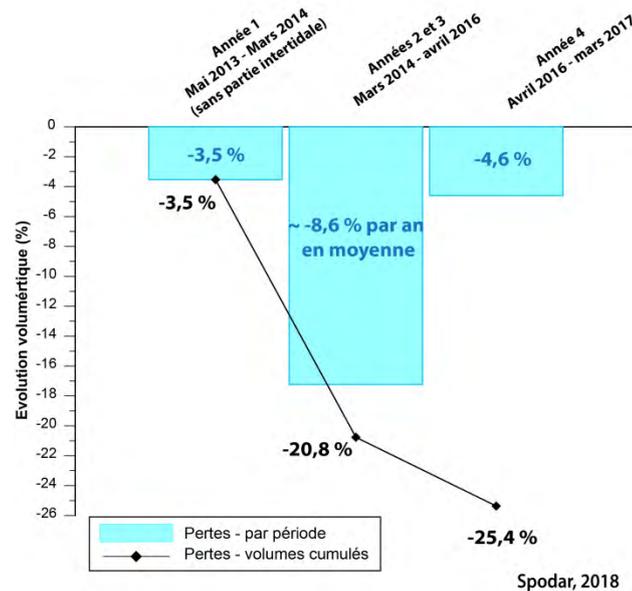


Figure VIII.4 Evolution volumétrique par année par rapport au volume rechargé sur le site de la digue du Ruytingen

1.1.3. Comparaison sur une période temporelle commune entre début 2014 et début 2017

L'évolution globale des deux rechargements sédimentaires tend à montrer que celui face à la digue du Ruytingen a perdu le plus de sable avec -25,4 % du volume rechargé, contre -12,3 % pour celui de la digue des Alliés. Cependant, l'analyse de l'évolution du rechargement de Ruytingen inclut

une année de plus, celle de 2013 à 2014. C'est pourquoi il convient de sélectionner une période commune pour que la comparaison soit plus appropriée. Une période commune de mesures de trois ans, à deux mois près, peut être utilisée pour cette analyse, celle située entre mars 2014 et avril 2017 pour le rechargement d'avant-plage et celle comprise entre mars 2014 et mai 2017 pour le rechargement de plage de la digue des Alliés ce qui correspond à la période globale de suivi.

Les pertes restent donc les mêmes pour le rechargement de la digue des Alliés avec **-12,3 %** (-185 000 m³) tandis que pour le rechargement d'avant-plage de Ruytingen, les variations volumétriques négatives représentent **-21,8 %** (-655 000 m³) du volume initialement rechargé (Tableau VIII.2). La proportion de sable perdu est donc **près de deux fois plus importante** dans le cas du rechargement face à la digue de Ruytingen comparativement à celui effectué à Malo-les-Bains. En pondérant cette fois les volumes par la superficie des emprises concernées, l'érosion reste plus importante dans le cas du rechargement de l'avant-port ouest avec -0,42 m³/m² contre -0,32 m³/m² pour le rechargement à Malo-les-Bains.

	Rechargement de plage	Rechargement de profil
	digue des Alliés	digue du Ruytingen
Volume net (m³)	- 185 000,00	- 655 000,00
Volume net par rapport au volume rechargé (%)	- 12,3	- 21,8
Volume net/unité de surface (m³/m²)	-0,32	-0,42

Tableau VIII.2 Comparaison de l'évolution volumétrique des deux rechargements sédimentaires entre mars 2014 et le début d'année 2017

Séparés de seulement 17 km environ, les deux rechargements sédimentaires ont subi des pertes de sable assez distinctes, avec plus du triple du volume perdu entre le rechargement de plage de Malo-les-Bains et le rechargement subtidal de l'avant-port Ouest. Plusieurs facteurs peuvent venir expliquer ces différences comme l'ampleur de la perturbation engendrée sur le site, leur localisation en zone plus ou moins exposée ou encore des conditions hydrodynamiques particulières à l'échelle de chaque site. Sur ce dernier point, les deux campagnes hydrodynamiques apportent quelques réponses. Un coup de vent de secteur NE s'est produit lors des deux expérimentations de terrain, entraînant des hauteurs de vagues au large maximales de 2,3 m lors de la campagne de mesures à l'avant-port Ouest et 3,3 m lors de celle à Malo-les-Bains. L'analyse des courants lors de la campagne hydrodynamique a montré des gammes de valeurs de vitesses de courant moyen relativement similaires dans les petits-fonds, bien que légèrement plus élevées par temps calme face à la digue des Alliés. Sur le bas de plage toujours pas temps calme, c'est à Ruytingen que les courants sont les plus forts et atteignent 0,93 m/s (coefficient de marée 104 – appareil placé à +1,3 m CM) contre 0,39 m/s sur la plage face à la digue des Alliés dans le secteur est (coefficient de marée 107 – appareil placé à +1,1 m CM). Lors de temps agité avec un coup de vent de secteur NE, les courants en bas de plage sont toujours plus intenses sur le site de la digue du Ruytingen que sur celui de Malo-les-Bains. Il est donc possible d'en conclure que lors de périodes morphogènes de secteur NE, comme nous l'avons mis en évidence dans les chapitres précédents, les courants sont plus intenses sur le site de la digue du Ruytingen, ce qui peut en partie expliquer les pertes de sable les plus importantes. Il faut toutefois

souligner que de telles conditions ne sont pas très fréquentes (11 % des observations de vent) et donc assez peu représentatives des conditions dominantes.

La configuration même des deux sites montre que le rechargement face à la digue du Ruytingen se retrouve en situation beaucoup plus exposée à un large spectre de direction de vagues de NO à ENE, ainsi qu'à celles provenant du secteur ouest. La digue du Ruytingen et la jetée du Clipon forment l'ouvrage le plus avancé de l'avant-port ouest. S'ajoute à cela une plus importante avancée du trait de côte à l'avant-port-Ouest par rapport au linéaire naturel du littoral dunkerquois. On peut également souligner que la pente de l'avant-plage est plus forte sur le front du rechargement face à la digue du Ruytingen comparativement à celle des petits-fonds devant le rechargement sur le site de Malo-les-Bains, une plus faible pente favorisant la dissipation de l'énergie de la houle alors qu'une forte pente à l'avant-plage provoque le déferlement des vagues proche du rivage. Au contraire, la digue des Alliés se localise au sud-est de l'avant-port Est ce qui lui confère une position abritée des houles de secteur ouest. Les corrélations de puissance de vagues au large filtrées par l'orientation du vent ont d'ailleurs montré des relations moins significatives entre les variations de volumes et les puissances de vagues associées à des vents d'ouest pour le secteur de la digue des Alliés que pour celui de l'avant-port Ouest. Il est donc loin d'être certain qu'un rechargement de plage comme celui de Malo-les-Bains avec une très large plateforme supratidale serait beaucoup plus efficace face à la digue du Ruytingen.

Une étude menée par (Lastrup *et al.*, 1996) s'est attachée à comparer un rechargement de plage et un rechargement subtidal de 250 000 m³ chacun à Thorsminde le long de la côte ouest du Jutland au Danemark. Séparés de 2 km seulement, les deux rechargements ont été soumis aux mêmes conditions hydrodynamiques. Il en ressort qu'après deux ans de suivis, le rechargement de plage a bien stabilisé le trait de côte et amélioré le niveau de protection côtière, cependant une tendance à la diminution de ces effets positifs a été constatée, tout comme la largeur de la plage qui n'a fait que se rétrécir au fil du temps. Au contraire, le rechargement subtidal par son effet de brise-vagues n'a fait qu'améliorer progressivement la protection côtière et la plage s'est élargie. Le rechargement de plage a été complètement érodé après 3-4 ans, tandis que le rechargement subtidal a perdu 40 % de son volume.

Dans notre cas, il est possible que la configuration des deux sites, les exposant différemment aux mêmes conditions hydrodynamiques locales explique les différences de pertes de sable. Il est également possible que la perturbation engendrée par le rechargement lui-même n'ait pas eu le même impact que sur l'hydrodynamisme à proximité du site. Le rechargement face à la digue du Ruytingen est en effet venu combler une « fosse » de -5 m CM face à la digue. Il est possible que l'importante perturbation de l'hydrodynamisme engendrée par le rechargement soit à l'origine d'une perte de sable conséquente en raison d'un rééquilibrage morphodynamique pour s'adapter aux conditions hydrodynamiques locales.

1.1.4. Comparaison de réponse morphodynamique à des événements énergétiques

Dans un souci de comparaison de l'efficacité des deux opérations, il est important d'observer leur réponse face à de mêmes forçages météo-marins de forte intensité. De manière générale, c'est au cours de l'hiver 2013-2014 quand de nombreuses tempêtes ont frappé le nord de la France, que la perte de sable a été la plus importante dans les petits-fonds et en bas de plage pour le rechargement de la digue du Ruytingen avec -132 000 m³. Même si l'érosion constatée en bas de plage laisse

supposer que le reste de l'estran a également été sévèrement touché, l'absence de levé sur la plage ne permet pas d'affirmer que cette période a également été la plus érosive sur cette partie du rechargement. D'un point de vu morphologique, un important abaissement de l'ensemble du bas de plage de -2 m au maximum face à l'arête ouest et centrale de la digue s'est produit (Chapitre VII - Figure VII.26). Les petits-fonds ont également été touchés avec une érosion de l'ordre de -1 m. En opposition à ces secteurs affectés par l'érosion, on note que le bas de plage et les petits-fonds face à l'arête est ont bénéficié d'un apport de sable comme l'indiquent les zones d'accumulations sableuses dans ce secteur.

Un événement commun aux deux opérations a été identifié pour comparer leur réponse morphologique : la tempête Egon. Cette tempête qui a frappé les deux rechargements du 12 au 13 janvier 2017 met en évidence une évolution différente des profils de plages (Figure VIII.5). Pour rappel la tempête Egon a engendré un niveau d'eau de +6,93 m CM au marégraphe du port Est de Dunkerque le 14/01/2017 à 01:00. Les vagues au large pendant cette tempête de secteur NO ayant atteint des hauteurs maximales de 2,4 m, les niveaux d'eau ont dû être supérieurs sur les plages à l'extérieur du port en raison de la surcote due au déferlement (*wave set-up*). Lorsqu'on examine l'évolution morphologique des deux profils les plus touchés sur les deux rechargements sédimentaires, on constate que sur le rechargement de plage de Malo-les-Bains, c'est le profil P2 dans le secteur ouest qui a été le plus érodé avec une perte de sable de -44 m³/ml entre le 6 et le 18 janvier 2017 (Figure VIII.5-A). L'érosion se localise principalement en haut de plage (> PMME) et un recul de la plateforme supratidale d'environ 30 m a été mesuré. Concernant le site de la digue du Ruytingen, l'intervalle de temps entre les deux levés topographiques est un peu plus long, soit entre le 05/12/2016 et le 01/02/2017. L'évolution morphologique du profil de plage P6, le plus touché par l'érosion, montre un abaissement du niveau de la plage pouvant atteindre -0,80 m. Cette érosion s'est soldée par un bilan volumétrique négatif de -62 m³/ml. L'absence de mesures bathymétriques lors de cette période ne permet cependant pas d'estimer l'impact de cette tempête sur le rechargement à l'avant-plage. On peut toutefois noter que si l'érosion a principalement affecté le haut du rechargement de plage face à la digue des Alliés, la tempête a touché l'ensemble du profil face à la digue du Ruytingen et que le volume de sable perdu le long du profil le plus érodé sur les deux sites est sensiblement plus important face à la digue du Ruytingen que face à la digue des Alliés.

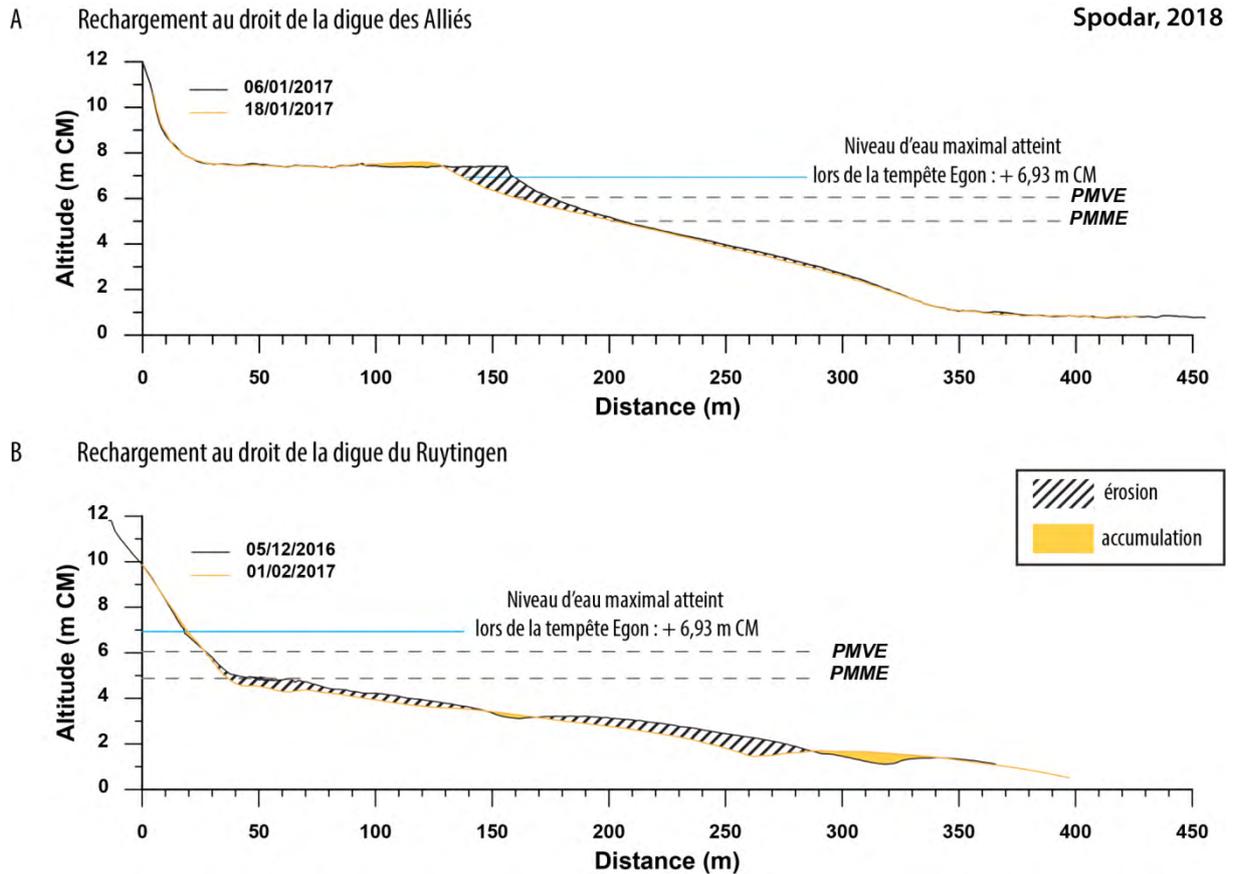


Figure VIII.5 Evolution morphologique d'un profil de plage suite au passage de la tempête Egon pour le cas du rechargement de plage de la digue des Alliés (évolution entre le 6 et 18 janvier 2017) (A) et pour le cas du rechargement d'avant-plage de la digue du Ruytingen (évolution entre le 05/12/2016 et le 01/02/2017) (B)

1.1.5. Réponses morphodynamiques des rechargements pendant les périodes de plus forte énergie

De manière générale, il a été mis en évidence que c'est au cours des périodes les plus énergétiques se caractérisant par des houles puissantes au large, que les variations morphologiques ont été les plus importantes. Le cas du rechargement face à la digue du Ruytingen montre effectivement des variations volumétriques plus conséquentes lors d'épisodes énergétiques, notamment entre octobre 2013 et mars 2014 avec le passage de tempêtes hivernales, comme l'a montré la corrélation entre les volumes et les puissances de vagues au large.

Dans le cas du rechargement de plage de Malo-les-Bains, la tendance clairement identifiée à la diminution des pertes de sable au fil des années est ponctuée par des phases de variations morphologiques marquées dues à des événements particulièrement énergétiques. Pour rappel c'est d'octobre 2014 à février 2015 et de mi-septembre 2015 à mi-février 2016, que les pertes de sables ont été les plus importantes, avec $-4,33\%$ et $-4,13\%$ du volume rechargé respectivement (Figure VIII.3-B). L'analyse des corrélations entre puissances de vagues au large et variations volumétriques a effectivement mis en évidence que les profils de plages sont caractérisés par des variations volumétriques significatives lors de périodes avec une houle énergétique. Notre analyse des variations de volumes en fonction des puissances des houles au large s'est inspirée de l'approche développée par l'étude (de Schipper *et al.*, 2016), où des résultats similaires ont été trouvés pour l'évolution du *Sand Motor*. Les résultats de ces travaux ont montré des degrés de corrélations

significatifs entre les variations volumétriques et les puissances moyennes et cumulées de vagues avec un coefficient de détermination qui atteint 0,90. Pour rappel, dans notre étude les corrélations entre variations volumétriques nettes et totales et les puissances cumulées de vagues ont montré également des degrés de relations élevés ($R^2= 0,75$ et $R^2= 0,84$ respectivement). Pour le rechargement subtidal, de bonnes relations ont également été obtenues, la meilleure d'entre elles étant entre les variations volumétriques totales et les puissances de vagues cumulées. Ces résultats indiquent donc, comme pour l'évolution du *Sand Motor*, que les périodes les plus énergétiques coïncident avec une érosion du site, tandis que lors de périodes calmes, les variations volumétriques sont plus limitées. D'autres études s'accordent sur cette observation comme celles de (Wang *et al.*, 2003; Elko & Wang, 2007; De Schipper *et al.*, 2012) ce qui vient moduler l'hypothèse de l'évolution d'un rechargement en fonction du temps (Browder & Dean, 2000; Dean, 2002). La notion de temps n'est évidemment pas totalement fautive étant donné que, dans le cas de la digue des Alliés notamment, la tendance générale à une diminution progressive de la perte de sable sur l'emprise du secteur rechargé au fil des trois années est ponctuée par des phases d'érosion plus significatives lors d'épisodes énergétiques morphogènes.

1.2. Identifications des secteurs les plus soumis à l'érosion

1.2.1. Le cas du rechargement de plage à Malo-les-Bains

L'érosion est principalement localisée dans le secteur ouest du rechargement, au contact entre la plateforme supratidale et la jetée Est (Figure VIII.7). Le recul progressif de la plateforme supratidale au fil du temps est bien visible sur la Figure VIII.6 montrant le site à marée haute en septembre 2015 (Figure VIII.6-A) et en mai 2017 (Figure VIII.6). Le niveau des PHMA de mars 2014 (juste après les travaux de rechargement) et mai 2017 a été plaqué sur ces photos satellitaires, ce qui permet de visualiser l'érosion conséquente dans ce secteur.

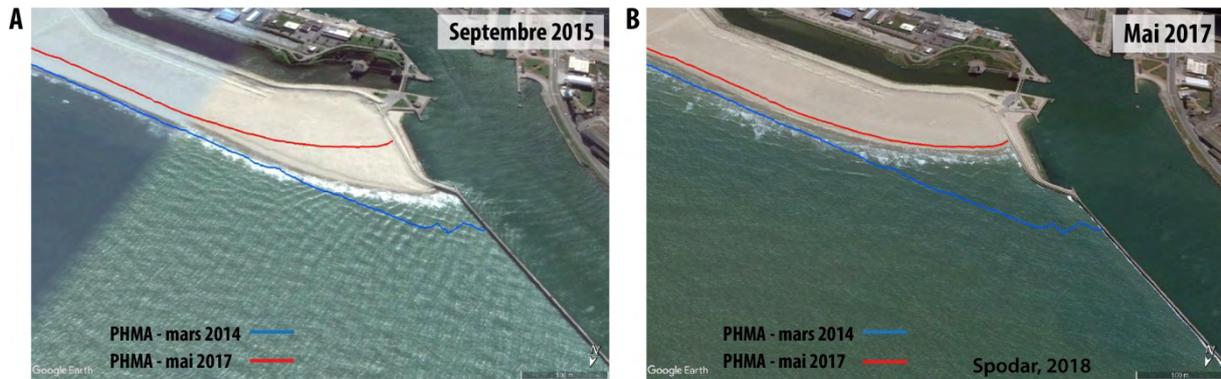


Figure VIII.6 Recul progressif de la plateforme supratidale au niveau de la jonction entre la digue des Alliés et la jetée de l'Est (Source : Google Earth)

Ce recul de la plateforme supratidale s'accompagne d'un déficit sédimentaire qui s'élève à - 294 000 m³ dans ce secteur (secteur 1 dans les analyses précédentes) entre mars 2014 et mai 2017. Le long de la jetée Est, c'est un linéaire d'environ 250 m, initialement protégé par la plateforme supratidale en mars 2014, qui est à nouveau atteint à haute mer (Figure VIII.7-C).

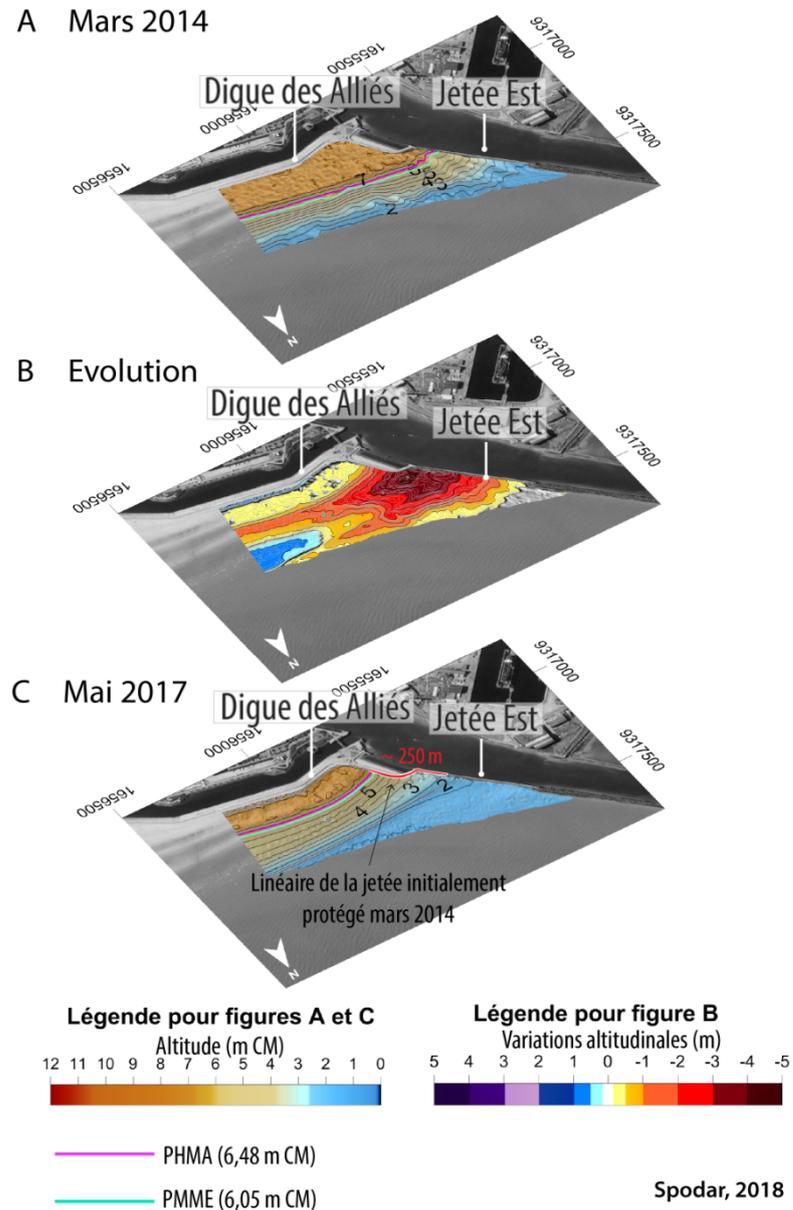


Figure VIII.7 Evolution du secteur ouest du rechargement au contact avec la jetée Est entre mars 2014 et mai 2017

On note en revanche que la digue des Alliés est toujours hors d'atteinte des hauts niveaux d'eau et des vagues en mai 2017, mais l'érosion qui perdure risque d'affecter le secteur à la jonction entre cet ouvrage et la jetée Est. Il est donc fort probable que le secteur ouest de la digue des Alliés sera le premier tronçon de l'ouvrage à être de nouveau exposé aux vagues lors de hauts niveaux d'eau, bien que la situation soit loin d'être comparable avec celle de 2011.

1.2.2. Le cas du rechargement de plage à l'avant-port Ouest

C'est une vaste zone, face aux arêtes Ouest et centrale de la digue du Ruytingen, qui subit d'une sévère érosion (Figure VIII.2 - Figure VIII.8). L'abaissement du niveau de sable entre mars 2014 et avril 2017 peut atteindre - 3 m, principalement en bas de plage. Les petits-fonds se caractérisent également par une forte érosion qui peut atteindre - 2 m. Un aperçu du site à marée haute met en évidence qu'une grande partie de l'ouvrage est atteinte par les vagues à haute mer.

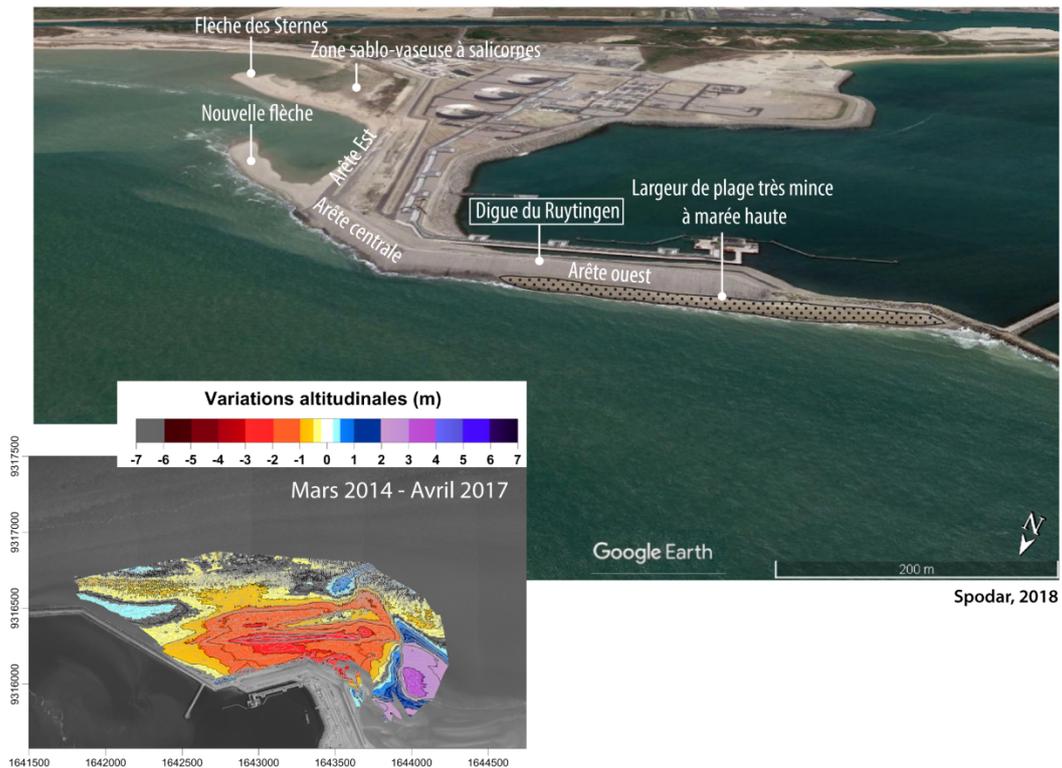


Figure VIII.8 Aperçu du site lors d'une marée haute le 10/05/2017 (coefficient 82) – Source : *Google Earth* et rappel de l'évolution morphologique du site entre mars 2014 et avril 2017

Face à l'arête Ouest de la digue, une mince bande de sable d'une largeur d'environ 30 m est encore émergée lors des hautes mers. L'arête centrale, dont la base était initialement protégée par une flèche sablo-graveleuse a été progressivement exposée à l'attaque des vagues à marée haute au fur et à mesure de la migration vers l'est de la flèche. Actuellement l'arête centrale est atteinte par la mer à marée haute (Figure VIII.8).

1.2.3. Hypothèses de l'origine de l'érosion

En plus d'une importante érosion probablement due à un départ d'un surplus du sable rechargé dans le cas du rechargement face à la digue du Ruytingen et d'une plus forte exposition aux vagues, il est possible que la localisation des deux rechargements sédimentaires en bordure de cellule littorale explique en partie ces phénomènes d'érosion très localisés. Ces deux rechargements ont en effet été mis en œuvre le long de la première plage d'une cellule littorale, l'UG4 pour le rechargement face à la digue du Ruytingen et l'UG5 pour celui face à la digue des Alliés, ces cellules hydro-sédimentaires ayant été déterminées dans le rapport PLAGE (Syndicat Mixte de la Côte d'Opale, 2003). Une cellule littorale (ou hydro-sédimentaire), se caractérise comme étant une portion de littoral indépendante qui n'interagit pas avec d'autres portions adjacentes (Imman & Frautschy, 1966). Les limites qui bornent ces cellules peuvent être fixes, ce qui peut être dû à des obstacles naturels (cap rocheux par exemple) ou anthropiques (jetée, épis), mais également mobiles et sont déterminées de manière générale comme étant un point où le transport sédimentaire longitudinal est nul. (May & Tanner, 1973) ont défini différents secteurs relatifs aux variations de transport sédimentaire longitudinal au sein d'une cellule (Figure VIII.9). Ces cellules comportent en effet des

sous-entités appelées sources et puits. En début de chaque cellule littorale se trouve une source qui se caractérise par une érosion qui va alimenter les secteurs en aval. Lorsqu'une cellule est limitée par un obstacle (limite fixe), comme c'est le cas ici avec les jetées portuaires, la zone source ne reçoit aucun apport sédimentaire longitudinal et est par conséquent généralement en déficit sédimentaire.

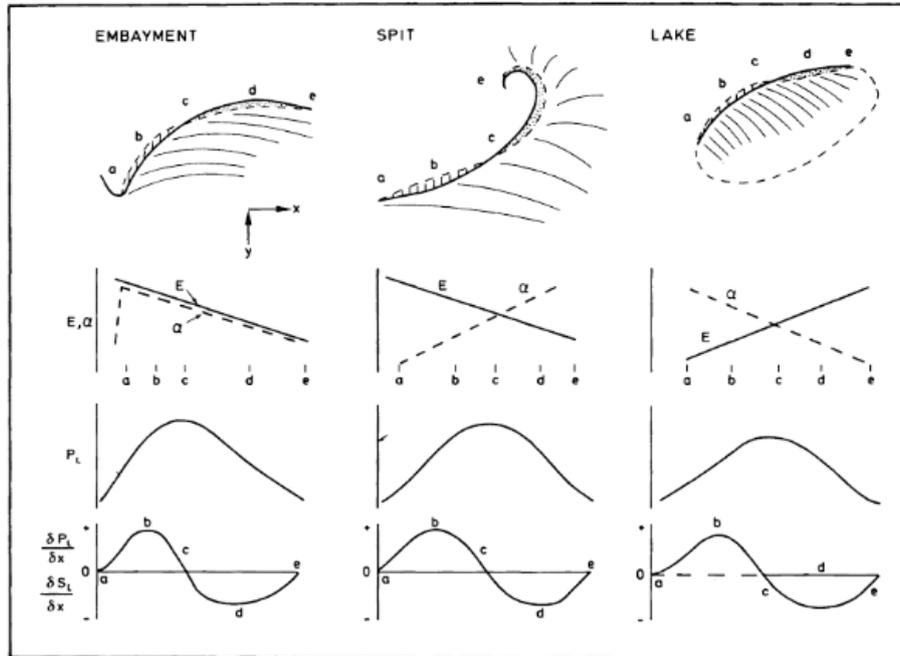


Figure 103. Three basic types of coastal cell. The embayment cell shows a decreasing longshore angle of wave approach (α_b) (following an abrupt rise at the headland) and wave energy (E). The spit cell incorporates increasing α_b and falling E, while the lake cell involves increasing E and declining α_b . All three cell models give similar P_L and $\partial P_L / \partial x$ structures. The a, b, c, . . . terminology follows May and Tanner (1973).

Figure VIII.9 Concept de cellule littorale avec les différentes sous-zones associées aux différents rythmes de transport sédimentaire

Cette hypothèse applicable au secteur de la plage face à la digue des Alliés et de la digue du Ruytingen peut vraisemblablement expliquer en partie l'importante érosion qui caractérise le secteur ouest juste au contact de la jetée Est ainsi que la large zone face à aux arêtes ouest et centrale de la digue du Ruytingen. A noter que dans le cas de Malo-les-Bains, (Le Gorgeu & Guitonneau, 1954) avait déjà émis l'hypothèse d'une rupture de transit sédimentaire longitudinal suite à la création de l'avant-port est étant donné la perte de sable qui avait déjà commencé à se manifester sur la plage face à la digue des Alliés dès l'allongement de la jetée Est. De plus, les phénomènes de réflexion de la houle incidente au contact avec la jetée de l'Est, accentuent certainement le déficit sédimentaire comme il l'a été montré dans le chapitre 6. Dans le secteur de Ruytingen, c'est un transfert sédimentaire vers le sud-est qui est probablement en partie responsable du déficit sédimentaire ainsi qu'un contre-courant mis en évidence lors de conditions de vents de NE.

1.2.4. Un bilan sédimentaire négatif à relativiser

Les pertes de sable constatées sur les zones rechargées qui pourraient être considérées comme conséquentes doivent être relativisées si on se rapporte au principe de Leonard *et al.*, (1990b). Selon ces auteurs, la durée de vie d'un rechargement de plage se définit comme le temps nécessaire entre la mise en œuvre de l'opération et l'érosion de 50 % du volume rechargé. Dans le cas du rechargement au droit de la digue des Alliés, les 12,3 % de sable perdu en un peu plus de trois ans

indique que l'opération se caractérise par une certaine performance. Dans l'étude de Leonard *et al.*, (1990b), la proportion de rechargements dont le volume perdu a dépassé 50 % en à peine un an après la mise en œuvre de l'opération s'élève à 18% sur la façade pacifique, 26% sur la façade atlantique et 15 % sur le long du Golfe du Mexique. La proportion de rechargements dont la durée est comprise entre 1 et 5 ans représente 55% des opérations sur la façade pacifique, 62% le long de la côte atlantique et 75 % le long du Golfe du Mexique. Concernant le cas du rechargement au droit de la digue du Ruytingen, les 25,4 % du volume de sable rechargé qui ont été érodés en 4 ans sont également à relativiser à la lumière de ces chiffres.

Au-delà de la notion de l'érosion du volume rechargé, c'est surtout le temps pendant lequel les objectifs du rechargement sont assurés qui pourront le qualifier d'efficace ou non. Même avec un volume rechargé qui diminue légèrement au fil du temps, le rechargement au droit de la digue des Alliés assure toujours son rôle de zone tampon. Seul le secteur ouest au contact entre le rechargement est la jetée Est requiert une attention particulière.

1.3. Où part le sable érodé

1.3.1. Le cas du rechargement de plage à Malo-les-Bains

L'hypothèse d'un départ de sable vers le large peut être envisagée. Or, l'analyse des levés bathymétriques a montré l'absence de variations morphologiques majeures que ce soit à proximité du rechargement ou plus à l'est face au perré de Malo-les-Bains. L'analyse des profils topographiques a également mis en évidence la très grande stabilité du bas de plage, sous le niveau des BBMM. Pourtant, il a été mis en évidence au cours de la campagne hydrodynamique que lors de certaines conditions météorologiques, lors de coup de vent de secteur NE notamment, des courants de retour enregistrés en bas de plage étaient initiés vers le nord et le nord-est. Combinées aux fortes houles lors d'un tel événement, ces courants étaient largement suffisants pour la mise en suspension des sédiments et les transporter vers les petits-fonds. Néanmoins il a été déduit des analyses que les courants dans les petits-fonds reprennent vraisemblablement ces sables pour les transporter principalement vers l'est en raison de la dissymétrie des courants de marée. L'absence de changements morphologiques majeurs laissent néanmoins supposer soit que 1) le sable transporté dans les petits-fonds vers l'est est rapidement exporté hors de la zone de suivi, 2) la quantité de sable transporté est relativement restreinte et au vue de la large surface dans les petits-fonds et donc que son éventuel dépôt dans le fond est difficilement perceptible.

Un transport sédimentaire vers l'est dans la zone intertidale a cependant pu être clairement identifié au vu des variations morphologiques sur les plages en aval-dérive. La Figure VIII.10 synthétise ces évolutions morphologiques et les variations volumétriques associées sur les zones à l'est du rechargement. Tout d'abord, dès la première année, une nette opposition entre le secteur ouest en érosion et le secteur est en accrétion laissait supposer un transfert du sable d'ouest en est. Puis, la poursuite du transport sédimentaire vers l'est a pu être identifiée avec des gains conséquents de + 30 000 m³ dans le secteur 3 dès la deuxième année (Figure VIII.10).

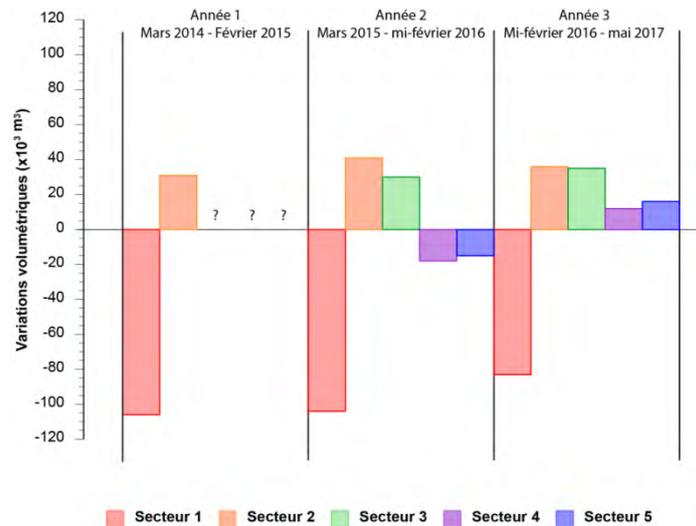


Figure VIII.10 Variations volumétriques par secteurs au cours des trois ans

Ce transport vers l'est est en adéquation avec les directions dominantes des courants en bas de plage mises en évidence lors de la campagne hydrodynamique ainsi qu'avec la direction de la dérive littorale dominante. En février 2016, il semble néanmoins que le sable issu du rechargement n'avait pas encore atteint les secteurs les plus en aval de la zone de suivi (secteurs 4 et 5). Les larges bandes sableuses en accréation s'étendaient en effet uniquement jusqu'en milieu de secteur 3. Au cours de la troisième année, il est fort probable que le transport longitudinal vers l'est se soit poursuivi au vu des variations volumétriques positives des secteurs les plus en aval.

1.3.2. Le cas du rechargement subtidal à l'avant-port Ouest

Les rechargements d'avant-plage peuvent potentiellement alimenter la plage directement par transfert de sable ou par leur effet brise-vague en cassant l'énergie des vagues (van Duin *et al.*, 2004; Grunnet & Ruessink, 2005). L'analyse des variations morphologiques du rechargement sédimentaire de l'avant-port Ouest, montrant un secteur intertidal et subtidal en forte érosion face aux arêtes ouest et centrale de la digue, n'a pas permis d'identifier des transferts sédimentaires transversaux entre les petits-fonds et l'estran. Il est délicat de comparer l'évolution du rechargement subtidal face à la digue du Ruytingen avec d'autres opérations de ce type étant donné que de manière générale les rechargements subtidaux sont effectués sur une barre externe, ce qui n'est pas le cas de celui à l'étude, où l'apport massif de sable a été effectué sur toute une portion d'avant-plage et de plage.

Les analyses ont cependant mis évidence un transfert de sable vers l'est face à l'arête Est de la digue au vu des zones d'accumulations sableuses et des variations volumétriques systématiquement positives dans le secteur est que ce soit dans les petits-fonds ou l'estran. Ce transport majoritairement vers l'est est également mis en évidence par les variations morphologiques illustrées par la migration rapide d'une flèche sablo-graveleuse vers l'est. Ce transport majoritairement vers l'est est lié à une dérive littorale dans cette direction.

A noter que lors de certaines conditions météorologiques, de secteur NE notamment, un contre-courant à l'est de la digue et du rechargement caractérise le site tandis que des courants de retour vers le large ont pu être identifiées lors de conditions plus agitées, toujours de secteur NE. Il

est donc possible d'en conclure que des courants dirigés vers le large pouvaient également être observés et impliquer des départs de sable vers le large. A noter cependant que comme à Malo-les-Bains, les petits-fonds au-delà de 5 m de profondeur sont remarquablement stables.

1.3.3. Rôle de l'environnement macrotidal

Le long des côtes macrotidales, les fluctuations du niveau d'eau induisent un déplacement des différentes zones hydrodynamiques sur le profil côtier (zone de surf, de déferlement, etc..) qui agissent donc peu de temps au même endroit. Le bas de plage n'est de ce fait soumis que pendant un court laps de temps chaque jour aux processus énergétiques du déferlement, ce qui peut en partie expliquer sa stabilité. De plus, lorsque les vagues déferlent en bas de plage, leur énergie a été plus dissipée qu'à marée haute en raison des faibles profondeurs de l'avant-côte à marée basse. Le haut de plage est lui aussi soumis à l'action des vagues pendant un temps limité à marée haute. La partie supérieure d'un rechargement en milieu macrotidal serait donc plus « stable » car peu souvent touchée par les vagues par rapport à des sites micro ou mésotidaux. Ceci pourrait peut-être expliquer la relative bonne stabilité du rechargement de la digue des Alliés par rapport à beaucoup d'autres rechargements (Leonard *et al.*, 1990a). La présence d'un courant de marée dominant vers l'est, dont le rôle peut être important dans les petits fonds, mais beaucoup moins sur l'estran en raison de l'amortissement des courants de marée vers la côte, peut être également évoquée dans le cas du rechargement subtidal afin d'expliquer le déficit sédimentaire.

Dans le cas spécifique du rechargement de plage à Malo-les-Bains, un remaniement du stock sableux a été observé dans la partie est du rechargement. La formation de barres et de bâches a été observée dès la deuxième année au cours de la période printanière et estivale en lien avec un adoucissement progressif de la pente de plage (suite à une érosion en haut de plage et un engraissement dans la partie inférieure du profil), une faible pente de l'estran étant une des conditions nécessaires à la formation d'un système de barres et de bâches (King & Williams, 1949; Masselink *et al.*, 2006). La réadaptation morphologique de ce secteur est du rechargement tend alors à retrouver un équilibre hydrodynamique face aux conditions locales (Sipka, 1998; Oblinger, 2008; Oblinger & Anthony, 2008). Des barres plus volumineuses en haut de plage ont été identifiées, tandis que celles en bas de plage sont beaucoup plus planes, ce qui atteste encore une fois de la réorganisation du stock sableux tel qu'observé dans d'autres études locales (Sipka & Anthony, 1999; Reichmüth & Anthony, 2002) voire sur d'autres plages se caractérisant par un environnement macrotidal similaire (Masselink & Anthony, 2001; Stépanian, 2002).

Dans le premier secteur en aval du rechargement, un important développement du système barres et bâches, déjà présent initialement, a été constatée au fil du temps notamment au cours des périodes printanières et estivales (Figure VIII.11). Les profils de plage extraits des MNT à différentes dates montrent clairement la présence de barres dès février 2015. A partir d'octobre 2016, le développement des barres est déjà notable, mais c'est surtout en mai 2017 qu'une barre volumineuse se forme et tend à migrer vers le haut de plage.

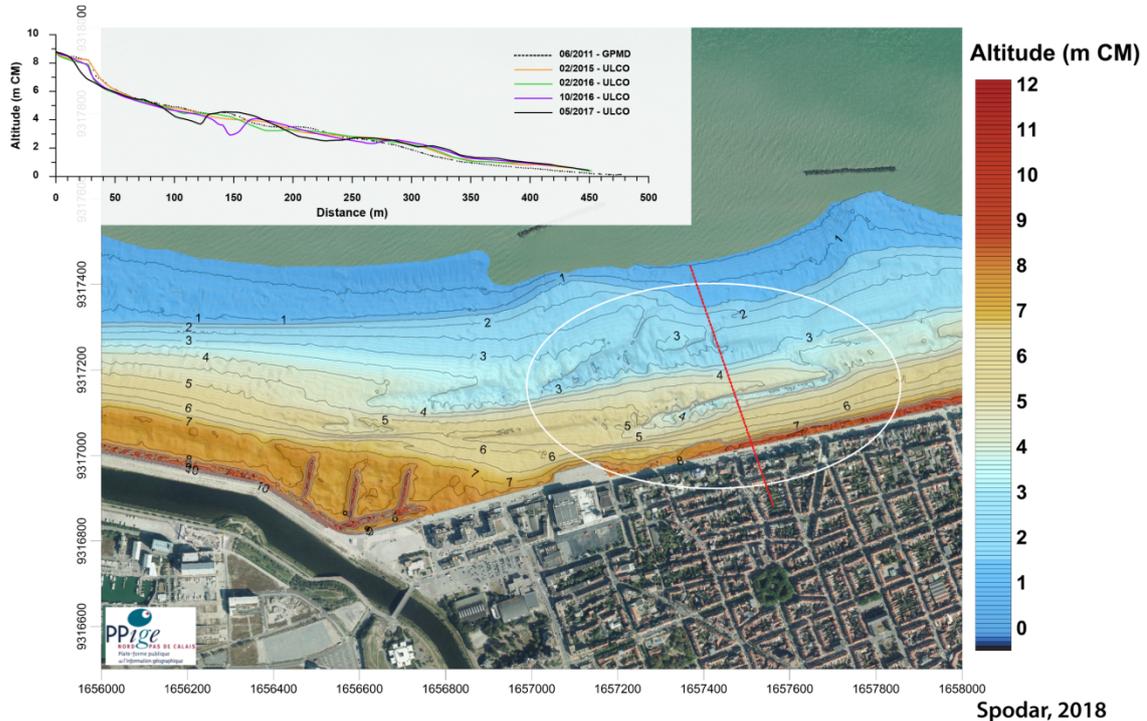


Figure VIII.11 Localisation de la barre sableuse en haut de plage en mai 2017 et profil topographique associé

Les conditions d'agitation qui précèdent ce dernier levé attestent de conditions de faibles énergies auxquelles s'ajoute la redistribution en sable en provenance du rechargement qui se poursuit. Il est probable que cette évolution morphologique marquée de barres et de bâches résulte du transport sédimentaire longitudinal avec du sable issu de la zone rechargée qui représente alors une véritable source d'approvisionnement. Il a en effet été montré dans plusieurs travaux antérieurs qu'un excédent en sable était fortement propice à la formation de barres bien développées (King & Williams, 1949; Orford & Wright, 1978; Anthony *et al.*, 2004).

1.3.4. Bilan : un apport bénéfique pour les secteurs en aval dérive

Il convient d'insister sur le fait que ces « pertes » de sable ne doivent pas forcément être considérées en tant que telles, étant donné la redistribution sédimentaire longitudinale. Effectivement, les « pertes » de sable dans le secteur ouest du rechargement de plage face à la digue des Alliés sont redistribuées en aval dérive, vers le secteur est du rechargement dans un premier temps, puis au-delà face au perré de Malo-les-Bains. Par temps calme, les courants les plus forts sont effectivement principalement orientés vers l'est, entraînant dans cette direction les sédiments. Le forçage tidal est suffisant pour mettre en suspension les particules bien que les variations morphologiques soient plus restreintes que lors de périodes agitées où se combine l'action de la houle. Le secteur est du rechargement (secteur 2 dans les précédentes analyses) se caractérise par un bilan sédimentaire positif de + 108 000 m³ entre mars 2014 et mai 2017 ce qui renforce l'hypothèse d'un transport sédimentaire vers l'est. Le déplacement du sable est également bénéfique au-delà de la zone de rechargement le long du perré de Malo-les-Bains comme il a été possible de le constater avec les gains en sable observés. Ainsi l'érosion dans le secteur ouest et les pertes de sable engendrées doivent être considérées comme un apport bénéfique pour les secteurs de plage en aval qui se retrouvent donc alimentés « naturellement » grâce aux agents hydrodynamiques qui viennent

redistribuer le sable. On retrouve ici la philosophie qui caractérise l'opération appelé *Sand Motor* aux Pays-Bas. Comme évoqué dans la Chapitre II, ce méga-rechargement de 21 Mm³ a pour vocation d'alimenter progressivement et en douceur 10 km de littoral situé en aval dérive. Par cette expérimentation, les Pays-Bas montrent encore une fois leur capacité à anticiper les problèmes relatifs à l'érosion du littoral. Concernant le *Sand Motor*, 70 % des pertes de sable de la péninsule ont été retrouvés dans les secteurs adjacents et les dunes après 18 mois. Dans le cas de la digue des Alliés, en se basant sur les deux dernières années de suivis avec les bilans sédimentaires de février 2015 à mai 2017 des plages en aval-dérive, on remarque que 73 % des pertes du secteur ouest se retrouvent redistribuées en aval-dérive. Pour Ruytingen, en reprenant les secteurs Ouest, central et Est de l'analyse, ce sont uniquement 40 % des sables perdus du secteur ouest et central que l'on retrouve dans le secteur est sur la période mars 2013 – avril 2017. A noter qu'il est probable que ce sable ait été progressivement transporté au-delà de la zone de calcul des volumes. Cet apport de sable pourrait donc être bénéfique pour la façade portuaire au niveau de la plage du Clipon mais également plus en aval.

Que ce soit pour le rechargement à Malo-les-Bains ou à l'avant-port Ouest, la redistribution de sable n'était pas l'objectif n°1, contrairement au *Sand Motor*, mais fait partie des points bénéfiques qui ont motivé la mise en œuvre des opérations notamment dans le cas de Malo-les-Bains avec l'effet positif sur la zone la plus fréquentée de la station balnéaire en aval dérive du rechargement.

1.4. Comparaison avec les modélisations

1.4.1. Le cas du rechargement de plage de Malo-les-Bains

Les résultats de la modélisation effectuée par le bureau d'études DHI lors de l'étude de conception du dispositif de protection (Danish Hydraulic Institute, 2012) correspondent à l'évolution morphologique réelle du rechargement de plage. En effet, la formation d'une zone d'érosion sévère dans le secteur ouest du rechargement, à la jonction avec la jetée Est avait clairement été identifiée lors de la modélisation (chapitre VI – section 1.2). Comme évoqué précédemment, un abaissement significatif de l'estran s'est en effet produit combiné à un recul et même une disparition de la plateforme supratidale dans ce secteur. Le bureau d'études DHI avait alors expliqué cette érosion par un réalignement de la nouvelle plage rechargée, orientée ONO-ESE parallèlement à la digue, à l'orientation naturelle des plages de l'est dunkerquois OSO-ENE. Ce phénomène correspondant donc à un rééquilibrage du rechargement se soldant alors par une perte de sable dans le secteur ouest. DHI (2012) avait mentionné l'augmentation des pertes de sable liée à la nouvelle orientation de la plage rechargée. L'érosion chronique ayant été estimée à 10 000 m³/an, un surplus de 35 000 m³/an a été ajouté, engendrant donc une perte de 45 000 m³/an dans le secteur ouest. En comparant ce volume à celui calculé à partir des mesures de terrain, il est possible de constater que la modélisation a nettement sous-estimé les pertes de sable du secteur ouest, celles-ci variant entre -106 000 m³ et -84 000 m³ par année. Même en comparant les pertes estimées à celles de l'ensemble de la zone rechargée, on remarque que les volumes calculés depuis les mesures de terrain sont encore une fois supérieurs.

Année	Pertes estimées par la modélisation	Pertes calculées dans le secteur Ouest	Pertes calculées dans l'ensemble de la zone rechargée
Année 1	-45 000	-106 000	-75 000
Année 2	-45 000	-104 000	-63 000
Année 3	-45 000	-84 000	-48 000

Tableau VIII.3 Pertes estimées par la modélisation et pertes calculées à partir des levés de terrain dans le secteur ouest et dans l'ensemble de la zone rechargée

Une atténuation de l'érosion semble néanmoins se produire, que ce soit sur la zone de rechargement ou uniquement dans le secteur ouest. On observe alors, que les pertes calculées sur l'emprise du rechargement tendent à se rapprocher des pertes modélisées. En revanche, le volume négatif du secteur ouest reste bien supérieur, peu importe l'année, à celui calculé par DHI (2012). Une perte de 225 000 m³ en moyenne au bout de cinq ans avait été estimée. C'est sur ce déficit sédimentaire que ce sont basés les rechargements d'entretien.

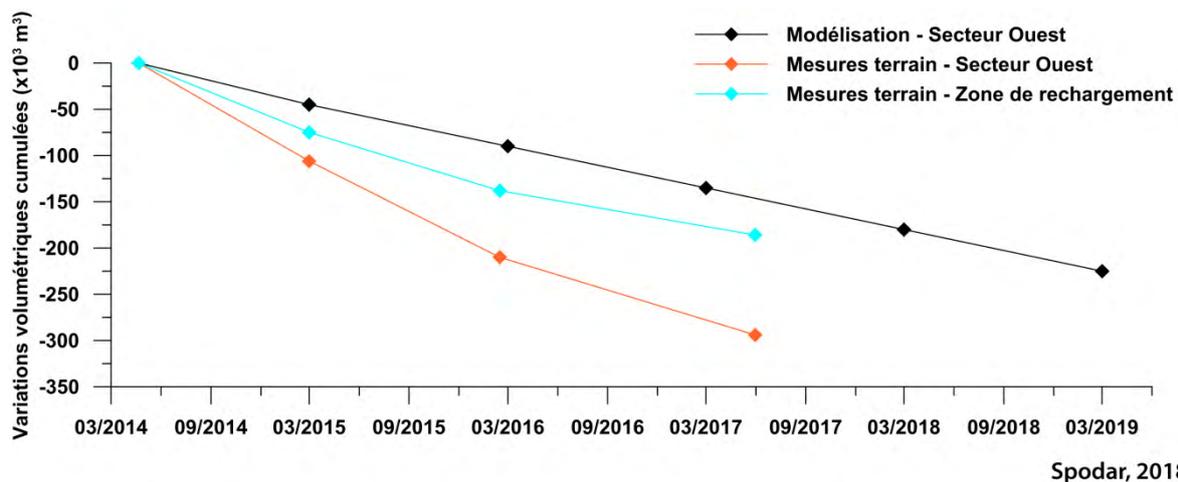


Figure VIII.12 Evolution volumétrique estimée d'après la modélisation (courbe noire) et évolution volumétrique calculée à partir des mesures de terrain pour le secteur ouest (courbe orange) et pour l'ensemble du secteur rechargé (courbe bleue)

Nos analyses ont mis en évidence, dès la première année, un volume perdu dans le secteur ouest supérieur à celui estimé par la modélisation, de -106 000 m³ contre les 45 000 m³ prédits, soit une sous-estimation de -61 000 m³. Même en comparant le volume estimé avec le volume net de l'ensemble du secteur rechargement, on obtient une différence de -30 000 m³. Quelle que soit l'année, l'érosion de 45 000 m³ a été sous-estimée que ce soit en la comparant avec les volumes perdus du secteur ouest ou avec celui de toute la zone rechargée (Tableau VIII.3). Le cumul des sous-estimations entraîne une assez grande différence au bout de trois ans entre le volume qui aurait dû être perdu d'après la modélisation, soit -135 000 m³, et les pertes réelles de - 294 000 m³ dans le secteur ouest et -186 000 m³ sur l'ensemble du secteur rechargé.

Ces différences peuvent être dues à une multitude de possibilités. Lors de la modélisation, les simulations d'évolution du rechargement ont été effectuées avec un grain médian de 0,30 mm (DHI, 2012). En émettant l'hypothèse que le sable rechargé ne correspondait pas exactement à cette taille ou que le grain médian du sable prélevé soit en réalité légèrement plus fin, il est possible que les pertes de sable aient été plus importantes que celles estimées. Dans ce qui était prévu les sables des zones prélevées devaient se caractériser par un grain médian compris entre 0,25 mm et 0,40 mm, ce qui peut déjà engendrer quelques différences entre la modélisation et les variations morphologiques réelles.

Lors de la modélisation, un transport de sable vers les plages en aval-dérive vers l'est avait été mis en évidence. Les variations morphologiques se concentraient de plus sur l'estran et aucun départ vers les petits-fonds n'avait été identifié dans le cas d'un rechargement de plage. Cela correspond effectivement à ce que nous avons observé avec un transport sédimentaire longitudinal sur l'estran uniquement.

1.4.2. Le cas du rechargement subtidal de l'avant-port ouest

Une étude menée par Sogreah a été effectuée en 2009 afin d'identifier les impacts hydro sédimentaires du rechargement face à la digue du Ruytingen. Cette analyse se base sur un volume de rechargement de 750 000 m³ avec des travaux effectués en 15 jours permettant ainsi un certain maintien du volume rechargé. La simulation a montré un abaissement conséquent des fonds sur la zone rechargée face à la digue. Un étalement des sédiments principalement vers l'est sous l'action du flot a été mentionné dans cette étude. Il est également indiqué qu'un étalement vers l'ouest des sables allait, dans une moindre mesure, se produire. C'est ce qui a pu être observé d'après les mesures de terrain au cours des premiers mois de suivis seulement. Il est de plus indiqué dans cette étude que l'évolution morphologique du rechargement risquait d'être plus marquée au cours des premières années avant de s'atténuer. A court terme, le déficit sédimentaire du rechargement avait été estimé à 170 000 m³ soit 22% du volume initial. Ce rechargement subtidal selon les simulations devait venir alimenter les secteurs en aval. Les tendances observées sur le terrain sont les mêmes que celles modélisées, mais il est délicat d'approfondir la comparaison étant donné que les volumes rechargés de la modélisation et ceux réellement refoulés ne sont très différents, 750 000 m³ au lieu des 3 Mm³ rechargés. Cependant notre étude montre que 25 % du sable rechargé a été perdu ce qui correspond assez bien à ce qui avait été estimé. Le sable du rechargement a par ailleurs effectivement alimenté en sable le secteur au sud-est de la digue.

1.5. Synthèse de l'évolution des deux rechargements sédimentaires

La Figure VIII.13 synthétise l'évolution morphologique et hydrodynamique du site à Malo-les-Bains. L'évolution morphologique du rechargement intertidal et subtidal est synthétisée dans la Figure VIII.14. La circulation hydrodynamique n'a pas été indiquée étant donné que le déploiement des instruments lors de l'expérimentation de terrain a été effectué dans le secteur est du site uniquement.

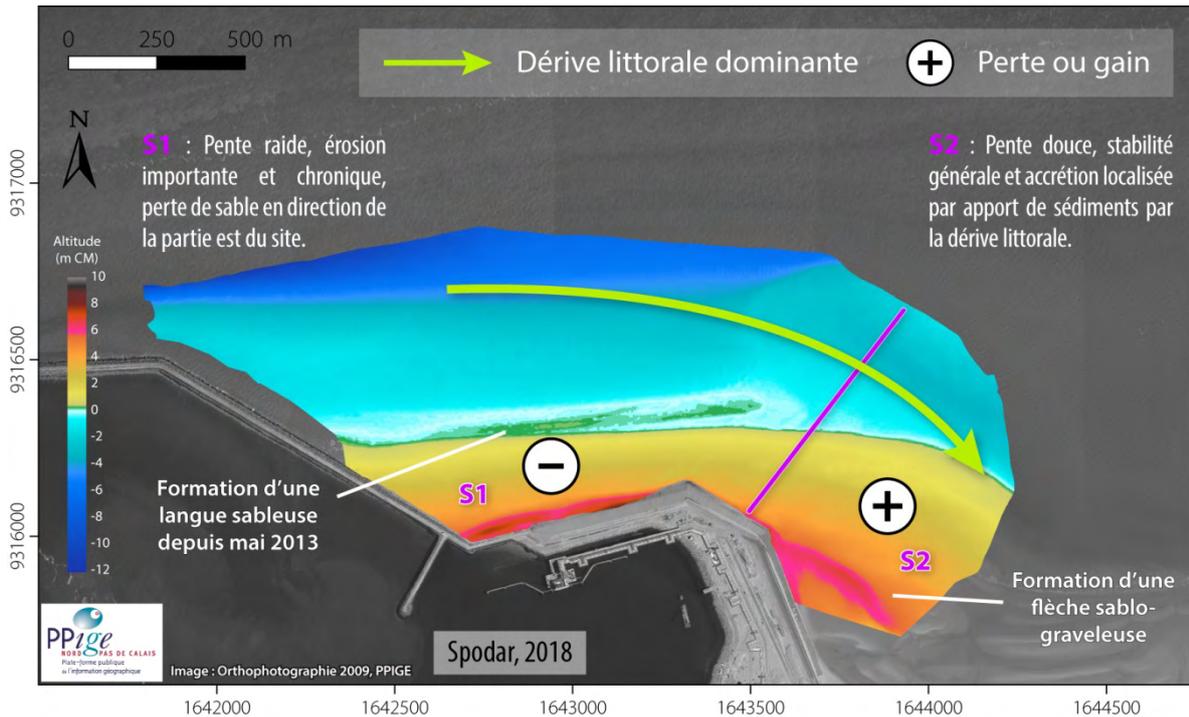


Figure VIII.14 Schéma de synthèse de l'évolution morphologique du site face à la digue du Ruytingen

2. Recommandations de gestions

L'ensemble de ces travaux a permis de dresser des recommandations et propositions de gestion afin d'aiguiller les futures actions du GPMD en matière de mise en œuvre de rechargements sédimentaires. Avant de passer en revue ces propositions de gestion, quelques recommandations plus techniques nécessaires dans le cadre des futurs suivis vont être listées.

2.1. Recommandations techniques

Concernant les prochains rechargements sédimentaires qui seront effectués, que ce soit sur de nouveaux sites ou sur les deux sites suivis dans ce travail doctoral lors de rechargements d'entretien, quelques recommandations techniques méritent d'être mentionnées.

- **Un levé initial dès l'implantation d'une opération**

Il est primordial d'effectuer dès l'implantation d'une opération **un levé complet initial** de la partie intertidale et subtidale ainsi qu'un échantillonnage de la granulométrie de surface. Ces levés représenteront l'état initial à partir duquel pourront être comparés les levés suivants afin d'apporter un suivi le plus complet possible.

- **La réalisation de mesures sur une emprise commune d'une superficie minimale**

Pendant le suivi d'un rechargement, il est nécessaire que les levés recouvrent **une emprise commune**. Concernant la partie intertidale il est important que les levés topographiques soient effectués lors de grands coefficients de marée afin de recouvrir la surface la plus grande possible de l'estran. Concernant le cas du rechargement de Ruytingen, il est également important que l'ensemble

du haut de plage soit levé pour un suivi rigoureux et précis, même les zones sablo-vaseuses et les plateformes de gravats.

- **Mesures complémentaires**

Dans le cas spécifique du rechargement subtidal devant la digue du Ruytingen, il serait judicieux d'effectuer des levés complémentaires sur la **flèche des Sternes et la zone à salicornes**. En effet, notre étude a montré qu'en réponse à un transport sédimentaire longitudinal vers le sud-est une zone d'accumulation se situait au nord la flèche des Sternes. Des mesures topographiques permettraient de voir si ce secteur est effectivement en accrétion. Des mesures topographiques de l'estran sur l'ensemble de la plage du Clipon et de la plage face à la digue du Break permettraient également d'avoir un aperçu de la redistribution de sable le long de cette cellule sédimentaire limitée à l'ouest comme à l'est par des jetées portuaires.

2.2. Propositions de gestion à différentes échelles de temps

Les éléments d'évolution des deux types de rechargements sédimentaires mis en évidence au sein de cette thèse ont permis de déterminer des mesures de gestion adaptés aux particularités du site. Ces propositions et recommandations de gestion - à court, moyen et long termes - vont permettre de fournir des outils afin d'orienter les futures actions du GPMD en lien avec la problématique de valorisation des sables de dragage par rechargements sédimentaires.

2.2.1. Propositions de gestion à court terme

Ces propositions de gestion à court terme concernent les deux rechargements sédimentaires suivis dans le cadre de ce travail doctoral. En effet au vu des résultats issus des analyses, il serait nécessaire par sécurité de mettre en œuvre une opération d'urgence sur les deux sites.

- A Malo-les-Bains

L'objectif du rechargement de Malo-les-Bains est de conforter la digue des Alliés. Or le secteur ouest au contact entre la plateforme et la jetée Est subit une érosion sévère qui augmente le risque de contact des hauts niveaux d'eau avec l'ouvrage dans ce secteur, plus que sur le reste du site. En mai 2017, la digue des Alliés n'était pas encore atteinte par les hautes mers, mais les tempêtes qui risquent de se produire pendant le reste de l'hiver 2017-2018 pourraient accroître encore plus le déficit sédimentaire du secteur. Pour cela, un volume à recharger d'environ 80 000 m³ représentant les pertes de la troisième année dans le secteur ouest permettrait de revenir à la situation plus acceptable de mi-février 2016 en termes de protection de la digue.

- A l'avant-port Ouest

Le cas du rechargement au droit de la digue du Ruytingen est plus délicat, car c'est une large zone qui est affectée par un important déficit sédimentaire (0,70 km² environ entre mars 2014 et avril 2017). En effet, le pied de digue dans le secteur central est de nouveau atteint par les vagues lors des hautes mers. Au vu du déficit sédimentaire observé à l'issue des quatre ans, l'intervention d'urgence coïncide finalement avec le rechargement d'entretien à effectuer rapidement (voir section suivante).

2.2.2. Propositions de gestion à moyen terme

2.2.2.1 Entretien des rechargements sédimentaires

Les résultats de la thèse ont permis de définir des **secteurs d'interventions prioritaires - secteur ouest du rechargement à Malo-les-Bains (Figure VIII.7) et secteur central à l'avant-port Ouest (Figure VIII.8)** - au vu de leur rythme d'érosion plus importante que les autres. Les rechargements d'entretien devront cibler principalement ces zones.

- A Malo-les-Bains

Une révision de la fréquence et volumes des rechargements d'entretien doit être faite. En effet dans le rapport « Etudes hydrauliques et de conception d'un dispositif de confortement de la Digue des Alliés » de DHI (2012), les rechargements d'entretiens ont été prévus sur une base de 225 000 m³ tous les 5 ans (révisables en fonction des études de suivis). A l'issue de la troisième année, ce sont 185 000 m³ de sable qui ont été exportés de l'ensemble du secteur rechargé. Si on se concentre sur le secteur ouest qui a subi une érosion sévère, les pertes observées à l'issue des trois ans atteignent - 293 000 m³ avec une moyenne de 100 000 m³/an (entre -106 000 m³ et - 84 000 m³). Une partie de ce sable est redistribuée dans le secteur est du rechargement, d'où un bilan sédimentaire négatif de la zone rechargée moins notable. Il n'en demeure pas moins que c'est dans le secteur ouest que l'érosion a été la plus conséquente. Il nous semble donc judicieux de proposer d'effectuer des rechargements d'entretien **de 300 000 m³ tous les trois ans**. Ces rechargements d'entretien devront être effectués dans le **secteur d'intervention prioritaire « Ouest »** du site afin de compenser les pertes constatées. Ce volume proposé, basé sur les pertes sévères du secteur ouest, devra être éventuellement réévalué au fil des années et en fonction de nouveaux secteurs à recharger. Il est vraisemblable qu'il faudra par la suite prévoir de consacrer une part des volumes des rechargements d'entretien à l'ensemble la plateforme supratidale afin de la redessiner selon sa configuration de mars 2014, avec un nivellement à 7,5 m CM notamment.

A noter que l'entretien de ce rechargement de plage est primordial pour maintenir son niveau d'efficacité optimale, d'autant plus que le PPRL a été révisé en prenant en compte le rôle protecteur du rechargement de plage face à la digue.

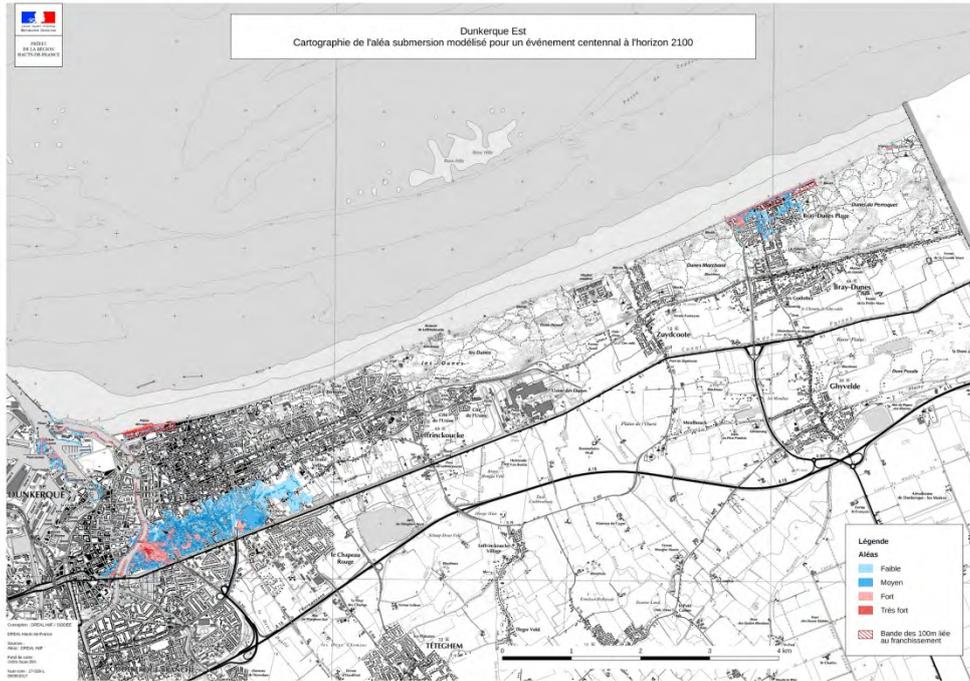


Figure VIII.15 Cartographie révisée en 2017 de l'aléa submersion marine modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100 (source : DREAL Hauts-de-France)

- A l'avant-port ouest

Aucune fréquence concernant les rechargements d'entretien n'était initialement prévue pour le rechargement devant la digue du Ruytingen. En se basant sur les résultats issus de cette étude, un rechargement sédimentaire d'au minimum 800 000 m³ devrait être effectué pour compenser les pertes depuis mars 2013. Un volume un peu moins important, mais plus fréquent, pourrait par la suite être envisagé, de l'ordre de 650 000 m³ tous les trois ans.

2.2.2.2 Intervention post-tempêtes

Il serait également judicieux de prévoir des interventions de rechargement post-tempêtes. Les conditions météorologiques doivent en effet être surveillées et des inspections visuelles de l'état des sites après le passage des tempêtes permettraient d'intervenir en cas d'érosion trop importante qui remettrait en cause l'efficacité des rechargements, en particulier celui de Malo-les-Bains, censé former une zone tampon entre les hauts niveaux d'eau et l'ouvrage. Il conviendrait donc de s'inspirer de la méthode mise en place par la Belgique pour la gestion de ces rechargements. En effet, des interventions post-tempête sont effectuées sur la côte belge afin d'entretenir les rechargements après le passage d'une tempête. Par exemple, suite au passage de la tempête Xaver le 6 décembre 2013, 323 000 m³ de sable ont été refoulés sur la plage de Le Coq-Wenduine et 176 000 m³ sur la plage de Knokke-Heist (<http://afdelingkust.be/>). Ces interventions témoignent d'un certain dynamisme dans la pratique et d'une vigilance face aux déficits sédimentaires des opérations. De plus le long de la côte belge, un levé Lidar permet tous les ans de suivre l'évolution des rechargements et d'identifier les secteurs en érosion.

2.2.2.3 Mesures d'accompagnements

Plusieurs éléments pourraient être mis en place afin de stabiliser les stocks de sable des rechargements sédimentaires existants.

- A à Malo-les-Bains

- Gestions des barres et bâches

A la fin de la période printanière 2017, le développement d'une bache importante dans la partie supérieure de l'estran face au perré de Malo-les-Bains a été constaté (Figure VIII.11). En termes de recommandations pour la gestion de ce phénomène, il serait nécessaire de procéder à une sensibilisation de la population qui n'est peut-être pas habituée à ce genre de système bien développé sur la plage de Malo-les-Bains contrairement à d'autres plages de la région comme) Wissant (Sedrati, 2006) ou encore à Merlimont (Anthony *et al.*, 2004). Plusieurs moyens peuvent être mis en œuvre comme des communications dans la presse locale afin d'informer la population du fonctionnement de ce système morphologique. En complément, des panneaux peuvent également être installés sur le perré afin, encore une fois, de livrer aux usagers des informations sur les caractéristiques de ce type de plage de manière générale. En complément, des informations pratiques sous formes de fiches régulièrement mises à jour pourraient également être placées aux niveaux des différents postes de secours concernant la localisation des bâches et leurs profondeurs par exemple. En plus de cela, les bâches doivent être matérialisées par des bouées afin d'être clairement identifiables.

- Gestions envols éoliens

Plusieurs mesures liées à la gestion des envols éoliens peuvent être mises en œuvre sur ce site. Dans un premier temps, il serait nécessaire d'implanter des structures brise-vents à la jonction entre la digue des Alliés et la jetée Est dans la continuité des premières installations afin de capter le sable dans ce secteur. Pour le moment seules des structures en haut de la digue ont été ajoutées en décembre 2016. Dans un second temps, il serait nécessaire d'effectuer un entretien des filets déjà existants afin de remplacer ceux qui ont été déchirés pour maintenir un niveau d'efficacité optimale. S'ajoute à ce volet consacré à l'entretien des filets brise-vent, deux options possibles : le nettoyage des filets brise-vents ou la stabilisation des sables piégés par plantations d'oyats.

En effet, la nécessité de nettoyer plus régulièrement les filets brise-vents le long de la digue. Installés en décembre 2014, certains filets étaient remplis dès avril 2015. Or une fois remplis l'efficacité des structures diminue (Grafals-Soto & Nordstrom, 2009). (Tresca, 2013) qui a travaillé sur cette problématique sur la façade portuaire du GPMD indique que dès qu'une valeur d'enfouissement de 50% de la hauteur de la structure est atteinte, l'efficacité de ces structures commence à diminuer. Un nettoyage régulier serait donc à effectuer. La question du dépôt du sable piégé se pose alors. L'une des possibilités était de replacer ce sable dans le secteur ouest (IDRA, 2013). Le secteur étant en fort déficit sédimentaire et le sable issu des filets brise-vent étant fin, il y a un risque d'érosion rapide de ce sable. Nettoyé une première fois en novembre 2015, le sable a été réparti sous forme de petits tas de manière aléatoire en milieu et bas de plage sur l'ensemble du secteur est du rechargement. Il est fort probable que ces opérations ne correspondent pas à une gestion optimale de ce sable éolien.

C'est pourquoi une autre forme de gestion, également mentionnée (IDRA, 2013) est proposée, il s'agit de laisser en place le stock de sable piégé une fois les filets pleins, puis de le fixer par la plantation d'oyats. Ce mode de gestion par plantation de végétaux a montré de bons résultats dans des secteurs proches de celui-ci, que ce soit à Dunkerque Est (Ruz & Anthony, 2008) ou sur la façade même du port au niveau de la zone du Clipon (Tresca *et al.*, 2014). Le développement de

végétaux contribuerait alors à piéger et fixer les nouveaux envols éoliens. Une mesure test a déjà été menée début 2016, avec la plantation d'oyats sur environ 1 885 m² à l'angle entre la digue des Alliés et le perré de Malo-les-Bains afin de limiter les envols de sable dans le canal exutoire ou sur le parking situé en arrière. Un peu plus d'un an après, l'oyat s'est bien développé sur ce secteur. Il est possible d'observer depuis cette plantation le développement d'oyats à d'autres endroits sur la plateforme supratidale témoignant de pollinisation par le vent. Ce type d'intervention par la fixation du sable piégé par les filets contribuerait à la renaturation du site et permettrait d'améliorer la qualité paysagère de cette partie de la plage, dont la fréquentation pourrait augmenter dans les prochaines années suite au projet de construction de complexe de balnéothérapie à proximité du site.

- Gestions du transfert massif de sable en aval

Concernant le site de Ruytingen, une gestion du transfert de sable vers la flèche des Sternes et la zone sablo-vaseuse à salicornes doit être menée afin d'éviter un comblement de ce secteur. De plus, si un trop plein de sable fin arrive sur cette flèche sablo-graveleuse, il est possible qu'elle ne soit plus utilisée par les sternes naines, étant donné que cette espèce niche dans des zones composées majoritairement de sédiments grossiers. Une surveillance de ce secteur doit par conséquent être effectuée et des rechargements de matériaux grossiers pourraient être envisagés sur la flèche afin de favoriser la présence de ces oiseaux protégés. Par contre, la formation d'une nouvelle flèche pourrait constituer une nouvelle zone de nidification.

2.2.2.4 Propositions de sites prioritaires à recharger

Plusieurs sites sur la façade portuaire mais également à proximité, vu de leur évolution morphologique récente et de leurs enjeux, pourraient représenter des sites potentiels pour la mise en œuvre de rechargement sédimentaires.

- Secteurs de rechargement sur l'UG4 (façade portuaire)

Les sables de dragage du GPMD, en plus d'être utilisés pour l'entretien des deux rechargements massifs, pourraient être injectés prioritairement sur le secteur central de l'UG4, au niveau de la station d'atterrage du gazoduc (Statoil). Ce secteur très sensible du fait de la présence de la station se caractérise par une érosion importante depuis plusieurs années (Bertier, 2009; Héquette *et al.*, 2015). Plusieurs aménagements ont été effectués comme l'implantation d'enrochements au début des années 2000 (Bertier, 2009) et plus récemment des rechargements en haut de plage afin de créer un remblai de protection. Un rechargement de 88 400 m³ a été effectué en 2012, puis 60 000 m³ ont été déposés en 2014. Un rechargement en février 2015 a également été effectué dont le volume n'est cependant pas connu (Figure VIII.16). A cette dernière opération s'ajoute la mise en place de gravats face au dépôt de sable. Ce secteur à risque nécessite un rechargement beaucoup plus massif afin de le protéger durablement.



Figure VIII.16 Rechargement de haut de plage pour conforter le secteur de la station d'atterrage du gazoduc

Cette problématique et l'enjeu du secteur se rapprochent de ceux de la commune de Bacton sur la côte Est de l'Angleterre où un complexe de terminaux de gaz va prochainement (probablement en 2018) être protégé par un rechargement massif de 2 Mm³. La Figure VIII.17 donne un aperçu du site avant et après les travaux qui vont apporter une protection massive au site face au complexe de terminaux de gaz. C'est ce type d'intervention qui serait nécessaire afin de protéger la station Statoil. De petits rechargements ponctuels comme cela a déjà été le cas ne représentent pas une solution durable. Compte tenu néanmoins de l'exposition du site en question, il est probable que les variations morphologiques se fassent de manière plus rapide que sur le site de Malo-les-Bains. La possibilité que ce secteur soit rechargé est d'ailleurs à l'étude dans le Plan de Gestion des Sédiments de l'UG4 en cours de finalisation.



Figure VIII.17 Aperçu du site avant et après (photo-montage) le rechargement massif face au complexe de terminaux de gaz à Batcon (<https://www.royalhaskoningdhv.com>)

- Proposition de sites de rechargements sédimentaires sur l'UG3

Le littoral du Platier d'Oye, localisé sur l'UG3 à quelques kilomètres à l'ouest du GPMD (Figure VIII.18), présente une érosion de la partie centrale de son cordon dunaire. Cette évolution est d'autant plus préoccupante qu'un lotissement, les Ecardines, situé sous le niveau des plus hautes mers, est localisé juste en arrière de ce cordon. Des aménagements ont été installés afin de tenter d'enrayer cette érosion comme la construction de trois épis en 1998, l'implantation d'un quatrième épi en 2000 associée à la construction d'un brise-lames (Aubry & Ruz, 2008) et de plusieurs casiers brise-vents en 2010.



Figure VIII.18 Localisation du platier d'Oye par rapport à l'avant-port Ouest.

Ces structures ont permis un ralentissement du rythme d'érosion au droit du lotissement (Crapoulet, 2015; Ruz *et al.*, 2016). Cependant, lors de la tempête Xaver de décembre 2013, le versant dunaire a reculé de plus de 2 m dans certains secteurs et il a de nouveau été érodé lors de la tempête Egon en janvier 2017. L'une des solutions qui pourraient être envisagées est donc un réensablement massif du site en haut de plage afin de conforter ce cordon dunaire et de protéger le lotissement d'une éventuelle submersion marine.

- Proposition de sites de rechargements sédimentaires sur l'UG5

Sur l'UG5, qui s'étend de la jetée Est de l'avant-port Est à la frontière belge, des secteurs à risques pourraient également bénéficier de rechargements sédimentaires. L'un des sites, appelé localement le quartier du Grand Pavois, est localisé en aval-dérive du rechargement de plage au droit de la digue des Alliés. Il a été mis en évidence dans les analyses que ce secteur commence progressivement à bénéficier du sable en provenance du rechargement de la digue des Alliés, mais le haut de plage face à ce quartier reste pour le moment quasi-inexistant à marée haute, ce qui accroît les risques de fragilisation du perré et de l'affouillement de sa base.



Figure VIII.19 Localisation du quartier du Grand Pavois (Malo-les-Bains) et aperçu du site à marée haute (©Google Earth)

La tempête Xaver, qui a engendré des submersions marines le long du perré de Malo-les-Bains, a également provoqué des dégâts notables à proximité du secteur du Grand Pavois (Figure VIII.20). C'est pourquoi, un rechargement en haut de plage dans ce secteur permettrait de conforter l'ouvrage.



Figure VIII.20 Dégâts engendré par la tempête Xaver dans la nuit du 5 au 6 décembre 2013 à proximité du secteur du Grand Pavois (photo : Arnaud Héquette)

Toujours dans l'UG5, le littoral de l'est dunkerquois présente également des secteurs où un recul du trait de côte a été constaté, au niveau de la dune Dewulf notamment. La tendance évolutive de ce cordon dunaire est en effet à l'érosion comme l'ont démontré plusieurs travaux (Maspataud *et al.*, 2011; Crapoulet *et al.*, 2017). Récemment, l'impact de la tempête Egon de janvier 2017 a accentué cette érosion (Figure VIII.21).



Figure VIII.21 Aperçu de la dune Dewulf après le passage de la tempête Egon de janvier 2017 (photo : Géodunes)

A Zuydcoote un immeuble a été construit en front de mer, protégé par un perré d'environ 45 m (Figure VIII.22). Le recul des versants dunaires de part et d'autre du perré pourrait mettre en danger les habitations. Aussi un rechargement sédimentaire en haut de plage à des fins de confortement du cordon dunaire et de protection du perré pourrait être envisagé dans ce secteur.



Figure VIII.22 Photographie satellitaire de l'immeuble en front de mer à Zuydcoote (©Google Earth)

2.2.3. Les rechargements sédimentaires : une solution viable de protection du littoral pour l'avenir ?

Les stratégies de protection littorale doivent plus que jamais intégrer les effets du changement climatique dont l'élévation du niveau marin est l'une des conséquences. Le cinquième rapport du GIEC a estimé cette hausse du niveau marin comprise entre 0,26 m et 0,82 m d'ici 2100 en prenant les fourchettes les plus basses et hautes des différents scénarios (IPCC, 2013). A noter que ces projections fournies par le GIEC font partie de celles les plus probables de se produire, alors que d'autres estimations plus importantes mais moins probables seraient également à prendre en compte (Hinkel *et al.*, 2015). De plus, des variations entre les projections et la réalité des observations peuvent se produire, comme par exemple l'accélération du rythme d'élévation du

niveau marin dans les années 90 qui est passé à 3 mm/an, ce qui est supérieur à ce qui avait été projeté par le GIEC (Church & White, 2011; Rahmstorf *et al.*, 2012). Outre l'élévation du niveau moyen de la mer, c'est également la fréquence des niveaux extrêmes susceptibles de causer de l'érosion et des submersions marines qui augmentera dans le futur (Haigh *et al.*, 2011; Wahl *et al.*, 2017). L'élévation du niveau marin n'est évidemment pas la seule conséquence du changement climatique, une modification du régime des houles (Bertin *et al.*, 2013) est à craindre tout comme des changements possibles dans la fréquence et l'énergie des tempêtes (Wu *et al.*, 2011; Yin, 2005).

Plusieurs types de solutions d'adaptation sont possibles, allant de la fixation du trait de côte à l'aide d'ouvrages lourds (souvent au détriment des secteurs en aval-dérive qui se retrouvent en érosion) au recul stratégique, en passant par la mise en œuvre de méthodes douces dont font partie les rechargements sédimentaires. Les rechargements sédimentaires présentent l'intérêt d'être viables face au changement climatique (Dean & Houston, 2016). Effectivement, face à l'élévation du niveau marin, les rechargements sédimentaires présentent l'avantage d'être « modulables », avec des volumes à mettre en œuvre qui peuvent se caller au rythme de la hausse du niveau d'eau et avec une adaptation possible de volumes des rechargements d'entretien. Plusieurs études présentent d'ailleurs des projections de volumes à mettre en œuvre selon les différents scénarios d'élévation du niveau marin du GIEC. C'est le cas des travaux de (Yoshida *et al.*, 2014) sur le littoral japonais. Les projections de volumes nécessaires pour la mise en œuvre de rechargements sédimentaires sur 77 plages du littoral afin de maintenir la position du trait de côte actuel oscillent selon les scénarios entre 3 700 Mm³ et 5 200 Mm³. A ces estimations de volumes souvent très conséquents pour faire face à l'élévation du niveau marin sont souvent associées des estimations de coûts relatifs aux opérations comme c'est par exemple le cas en Australie. Selon le niveau de risque pris en compte, le coût des rechargements sédimentaires au cours du 21^{ème} siècle, avec des prélèvements au large, entraîneraient des coûts de 15 à 85 millions de dollars (soit 12,7 à 72,2 millions d'euros) dans le Queensland du Sud-Est et de 11 à 89 millions (soit 9,35 à 75,7 millions d'euros) en Nouvelle Galles du Sud (Langedijk, 2011). A noter qu'en plus de l'élévation du niveau marin, l'augmentation de la fréquence des tempêtes et du régime des vagues peuvent venir modifier les pronostics de volumes à prévoir pour l'utilisation de rechargements sédimentaires. Mais encore une fois, cette méthode présente l'avantage d'être flexible en termes d'adaptation au changement climatique.

Il est donc important de se doter d'un plan d'action à long terme afin d'anticiper les conséquences du changement climatique. Les stratégies d'adaptation des pays voisins le long de la côte méridionale de la mer du Nord, la Belgique et les Pays-Bas, démontrent une politique de gestion à long terme basée sur la prévention des aléas climatiques. La question de la pertinence de la mise en œuvre de rechargements sédimentaires pour prévenir l'érosion du littoral due à l'élévation du niveau marin n'est pas nouvelle, car dès 1993 (Stive *et al.*, 1991) discutaient de ce sujet. En 2008, les Pays-Bas ont développé leur nouvelle stratégie d'adaptation face à une élévation future du niveau marin estimée entre 0,65 m et 1,3 m d'ici 2100, et entre 2,0 m et 4,0 m d'ici 2200 (Kabat *et al.*, 2009). Ils se sont pour cela basés sur les plus hautes valeurs d'élévation du niveau marin déterminées par le GIEC afin de garantir des mesures de protection optimales. La nouvelle commission Delta de 2008 prévoit d'augmenter les volumes de rechargement pour passer de 12 Mm³/an actuellement à plus de 80 Mm³/an d'ici 2100 (Kabat *et al.*, 2009; Stive *et al.*, 2013). Le rechargement sédimentaire est également envisagé pour créer des bancs de sable artificiels face aux côtes de la Zélande, dont l'objectif est d'atténuer l'énergie des vagues lors de surcotes coïncidant avec de fortes marées. Evoqué à plusieurs

reprises, le Sand Motor s'inscrit directement dans cette vision à long terme et d'anticipation des problèmes d'érosion. A noter que le concept de méga-rechargement commence également à inspirer d'autre pays comme la Grande-Bretagne (Vikolainen *et al.*, 2017). Un programme appelé «*Sandscaping*» vise à implémenter la notion de «*Building with nature*» du Sand Motor dans les protections du littoral de la Grande-Bretagne. Plusieurs secteurs, 19 au total, ont ainsi été identifiés sur la côte anglaise et galloise (Flikweert, 2017). Le projet le plus avancé, bien que les travaux prévus pour 2018 n'aient pas encore démarrés, se localise dans le district du North Norfolk dans la commune de Bacton où se trouve un complexe de terminaux de gaz. Le rechargement de plage de 2 Mm³ devrait avoir une durée de vie de 20 ans (Vikolainen *et al.*, 2017). La Jamaïque est également intéressée par ce concept afin de protéger la plage de Négril sur la côte ouest du pays (<https://www.ecoshape.org/>).

En Belgique, immédiatement après l'approbation du Plan directeur de Sécurité côtière (*Master Plan for Coastal Safety*) en 2011, la mise en œuvre des rechargements sédimentaires a démarré. Suite à l'implantation de ce programme, ce sont près de 8 Mm³ qui ont alimenté les plages entre 2011 et 2015 assurant donc une protection optimale de la côte (<http://afdelingkust.be/>). En juillet 2010, une nouvelle étape a été lancée avec l'annonce par le ministère flamand de l'environnement du financement d'une étude de faisabilité de «*Vlaamse baaien 2100*» (les «*Baies flamandes 2100*») qui prévoit la création d'îles artificielles au large de la côte belge (Van den Eynde *et al.*, 2009). Pour ce projet, les sables de dragages des chenaux d'accès aux ports belges et des chenaux de navigation seraient refoulés sur les bancs au large de la côte afin de créer progressivement des îles artificielles qui représenteraient à terme 6 000 hectares. C'est en 2020 que la première étape du projet va être lancée, à 1,2 km au large des plages de Knokke-Heist, avec la création d'une île de 40 hectares qui au fil des travaux pourrait atteindre 450 hectares. En plus de protéger le littoral de l'érosion, ces îles ont également pour vocation de devenir des refuges pour les animaux marins (source : le Figaro article du 04/10/2016).

Il est vrai qu'en comparaison de la France, le linéaire côtier de la Belgique n'est que de 67 km, et les Pays-Bas possèdent un linéaire de côte de 350 km permettant d'envisager des rechargements sédimentaires réguliers sur l'ensemble de leur littoral. A l'échelle de la France métropolitaine, la situation est plus complexe en raison d'une plus grande diversité de types de côtes (rocheuses, à falaises etc), mais également à cause d'un linéaire côtier beaucoup plus long, avec plus de 2 300 km de côtes sableuses.

A l'heure actuelle, la mise en œuvre de rechargements sédimentaires en France est souvent associée à une intervention ponctuelle en réponse à une problématique locale, les problèmes d'érosion étant traités les uns indépendamment des autres, et un manque de vision à une échelle plus régionale voire nationale est notable. Cette vision tend à changer progressivement avec une prise de conscience de l'Etat et des régions. En 2012 a été mise en place une stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte accompagnée de programme d'actions pour la période 2012-2015, qui tend à encourager l'utilisation des méthodes douces. Dans la continuité de cette approche, l'une des recommandations stratégiques du nouveau programme d'actions 2017-2019 indique qu'il est important d'«*inciter à l'expérimentation et à l'innovation en privilégiant des méthodes et des techniques de gestion souple*». De plus, l'une des sous-actions s'inscrit directement dans la thématique de rechargements de plages : «*élaborer, lorsque cela s'avère pertinent, un plan de gestion des plages à l'échelle plus adaptée, incluant les éventuels programmes de rechargements de plages*».

soumises à l'érosion, et s'inscrivant dans les schémas de gestion des granulats marins élaborés dans le cadre des documents stratégiques de façade ». La vision de la protection du littoral en France tend donc progressivement à changer. Néanmoins, il serait nécessaire de se doter d'un plan de gestion national, comme en Belgique et aux Pays-Bas, intégrant l'élévation du niveau de la mer afin d'avoir une vision à long terme de la protection des côtes, en prenant en compte des événements tempétueux avec une période de retour millénaire (pour rappel en France la période de retour prise en compte est de 100 ans). Comme pour les Pays-Bas, une certaine position du trait de côte pourrait être définie et maintenue coûte que coûte. Une évaluation du volume nécessaire pourrait donc être estimée selon cette position du trait de côte.

Certains programmes tendent à favoriser une prise de conscience concrète avec l'élaboration de plan de gestion à l'échelle régionale. En prenant uniquement l'exemple du Languedoc-Roussillon, un Plan de Gestion des Sédiments a été élaboré en 2013 (Raynal *et al.*, 2013) afin d'apporter des éléments de réflexion sur les volumes de sable à mettre en jeu pour protéger le littoral de la région à court et à moyen terme. Pour cela deux propositions de scénarii sont mentionnées (Figure VIII.23). Le premier est fondé sur le postulat de maintien de la position du trait de côte de 2009, tandis que le deuxième scénario propose de se rapprocher de la position la plus avancée du trait de côte sur la période 1985-2009. Les propositions de volumes à mettre en œuvre qui en découlent permettent donc d'avoir un ordre de grandeur des volumes à recharger avec une valeur minimale (celui scénario n°1) ainsi qu'une valeur maximale (celui du scénario n°2). A noter qu'à ces deux scénarii se combinent trois méthodes de calcul des volumes. La première méthode (volume n°1) est basée sur le calcul des variations volumétriques de l'avant-côte. La deuxième méthode (volume n°2) se base sur la position du trait de côte et de la largeur de la plage souhaitée en conservant la pente de la plage. Enfin la troisième méthode (volume n°3) est similaire à la deuxième méthode sans conserver la pente initiale ce qui conduit à un raidissement du profil. D'après cette étude cette dernière méthode de calcul est la moins satisfaisante étant donné la pente créée non adaptée au régime hydrodynamique local.

	Volume 1 issu du budget sédimentaire réellement constaté	Volume 2 calculé à partir de la position du trait de côte. Préservation de la pente moyenne de la plage	Volume 3 calculé à partir de la position du trait de côte. Non- préservation de la pente moyenne de la plage
Scénario de gestion N°1 Maintien de la position actuelle du trait de côte	6,9 Mm ³ / 5 ans	930 000 m ³ / 5 ans	500 000 m ³ / 5 ans
Scénario de gestion N°2 Retour à la position du trait de côte la plus avancée entre 1895 et 2009	40,8 Mm ³	33,8 Mm ³	19 Mm ³

Figure VIII.23 Volumes à mettre en œuvre pour les rechargements sédimentaires en Languedoc-Roussillon pour appliquer les différents scénarii en fonction des différents volumes (Raynal *et al.*, 2013)

Ainsi pour toute la région Occitanie (ex-Languedoc-Roussillon) :

- pour le maintien de la position actuelle du trait de côte, les volumes à mettre en œuvre oscillent entre 930 000 m³ et 6,9 Mm³ tous les 5 ans

- tandis que pour un retour à la position du trait de côte la plus avancée sur la période 1985-2009, les volumes sont compris entre 33,8 Mm³ et 40,8 Mm³

En fonction de la stratégie de gestion adoptée, les gammes de volumes à mettre en œuvre sont complètement différentes. Si on ajoute en plus à cela une vision à long terme, ce plan de gestion indique qu'un maintien de la situation actuelle sur une période de 30 ans nécessiterait entre 6,5 Mm³ (méthode de calcul du volume n°2) et 48,3 Mm³ (méthode de calcul du volume n°1). Une dernière proposition est faite combinant d'une part un retour à la position du trait de côte la plus avancée de la période 1985-2009, et d'autre part un maintien de cette position pendant 30 ans, ce qui amène le volume nécessaire à 39,4 Mm³ (méthode de calcul du volume n°2) et 82,2 Mm³ (méthode de calcul du volume n°1). Ces volumes importants soulèvent le problème des sources de sables à identifier, en prenant en compte la contrainte de la compatibilité granulométrique entre le site de prélèvement et le site à recharger. D'autres études dans la région font également avancer les connaissances en matière de sédimentologie (Raynal *et al.*, 2015) ce qui est un point essentiel pour avoir une vision des matériaux disponibles et de leur volume en vue de potentiels travaux de rechargements sédimentaires.

A l'échelle nationale cette fois, les travaux de Augris et Simplet (2013) rendent compte des ressources de granulats marins disponibles le long de la côte française. Sur les façades de la Manche (Figure VIII.12) et de l'Atlantique (jusqu'à la limite de la zone économique exclusive française), les ressources de sédiments meubles ont été évaluées à 540 milliards de mètres cubes.

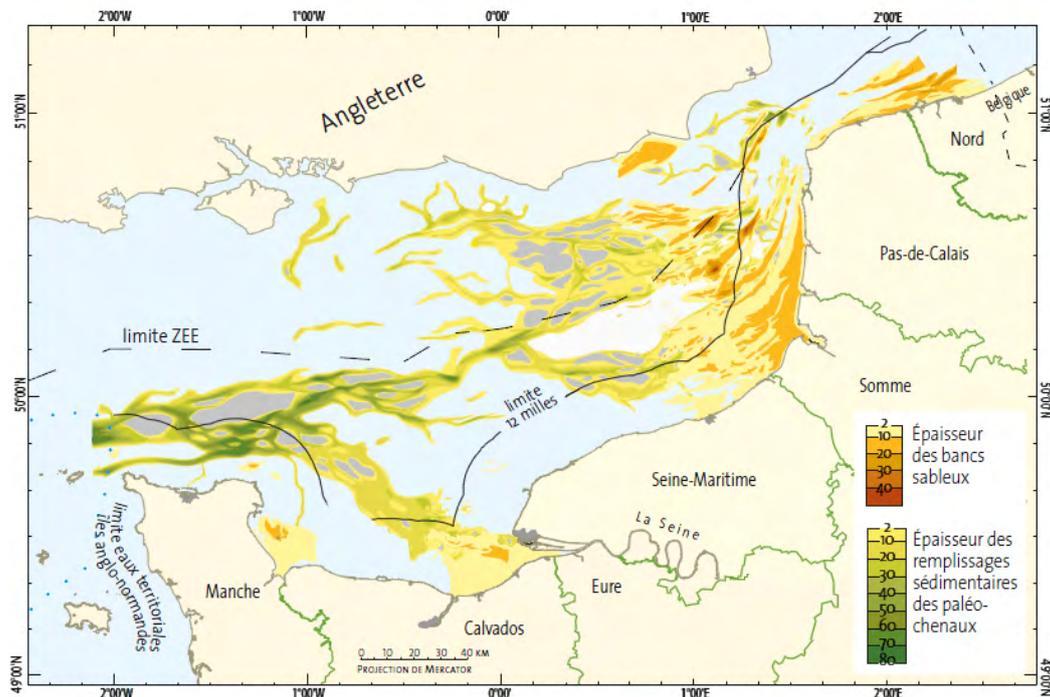


Figure VIII.24 Cartographie des ressources en matériaux marins en Manche orientale (Augris & Simplet, 2013)

Les réserves exploitables ne seraient que de 2% soit, environ 10,8 milliards de mètres cubes, à cause de différentes contraintes d'exploitations (profondeur des gisements, zones protégées etc). Au large du littoral de la Côte d'Opale, ces ressources ne sont pas exploitées et se révèlent donc être une source potentielle pour la mise en œuvre de rechargements sédimentaires.

Pour revenir au cas spécifique du littoral dunkerquois, de futurs travaux d'agrandissement du GPMD vont libérer des quantités considérables de sédiments, dont la partie sableuse se révèle être une véritable opportunité afin de protéger les secteurs du littoral en érosion. Ces travaux, entrepris dans le cadre du projet CAP2020 (GPMD, 2017), correspondent à la création d'un nouveau bassin au port Ouest afin d'accueillir les porte-conteneurs les plus grands du monde. Ces travaux pourraient libérer jusqu'à 30 Mm³ de sédiments. Une partie devrait être utilisée comme remblai pour la construction de zones logistiques et industrielles. Mais les sables sains ont pour vocation d'être utilisés à des fins de protection du littoral et des infrastructures portuaires via des rechargements sédimentaires. S'ajoute à cela les dragages d'entretien annuels qui mettent régulièrement des sables à disposition. Un Plan de Gestion des sédiments de l'unité hydrosédimentaire UG4 est actuellement en cours de finalisation afin de proposer des solutions de lutte contre l'érosion du trait de côte en valorisation des sables de dragage. Cet outil de planification va permettre les futures actions du GPMD en matière de valorisation de ces sables.

Conclusion générale

Dans ce travail doctoral, un état des connaissances sur les rechargements sédimentaires a été abordé ainsi qu'un aperçu des pratiques dans le monde. Les Etats-Unis, premier pays à utiliser massivement cette méthode à des fins diverses (protection du littoral, tourisme etc.), auraient mis en œuvre près de 1 milliard de mètre cube de sable depuis 1922. En Europe, les Pays-Bas et la Belgique ont intégré les rechargements sédimentaires au cœur de leur stratégie nationale de protection du littoral en prenant en compte le changement climatique témoignant d'une pratique dynamique et d'une vision à long terme. Aux Pays-Bas, les volumes prévus pour ces opérations devraient atteindre des valeurs de 80 Mm³/an d'ici 2100. L'innovation de ces deux pays en termes de protection du littoral est également à souligner avec la création de nouveaux concepts tels le « *Building with nature* » qui accompagne la mise en œuvre du *Sand Motor* aux Pays-Bas ou encore les « *Vlaamse baaien 2100* » qui prévoit la création d'îles artificielles au large de la côte belge.

En France, aucun plan de protection du littoral d'une telle ampleur n'est pour le moment en vigueur. Depuis 2012, une stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte a cependant été mise en place et le nouveau programme d'actions sur la période 2017-2019 incite l'utilisation des méthodes douces, dont les rechargements sédimentaires. Dans ce travail doctoral, la mise à jour de l'inventaire des opérations de rechargements a permis d'évaluer le volume consacré à cette pratique à 30,27 Mm³ au total en France métropolitaine. Ce volume est très vraisemblablement sous-estimé étant donné la difficulté de trouver des informations même auprès des services de l'Etat concernés par cette pratique. De manière générale, le recours à des rechargements sédimentaires semble en augmentation après 2002, date du premier état des lieux complet effectué par Pupier-Dauchez (2002). Bien que l'on note toujours la mise en œuvre de petits volumes, le nombre de vastes projets ou de rechargements massifs tend à augmenter (plage du Pyla, rechargements sédimentaires dans la Baie d'Aigues Mortes, Lido de Sète etc.). Le cas d'Anglet dans les Pyrénées-Atlantiques se démarque néanmoins avec une utilisation massive de rechargements sédimentaires dès 1965 liés à des activités de dragage de l'entrée du port de Bayonne. C'est le cas également de Dunkerque qui est la seconde commune à utiliser massivement les rechargements sédimentaires, toujours en lien avec les activités de dragage et cela depuis l'extension du port dans les années 70.

La valorisation des sables issus des activités de dragage s'avère effectivement être une méthode pertinente afin de conjuguer réutilisation d'une ressource et la réponse à un besoin de protection du littoral. Le problème des ressources en sable est évidemment l'une des premières préoccupations dans le cadre d'opération de rechargements sédimentaires. Des études sur les ressources en granulats marins permettent donc d'anticiper ce problème. Cependant, la question du prélèvement au large dans des zones parfois profondes et l'acheminement jusqu'à la côte représentent une autre contrainte. C'est pourquoi l'exploitation de sable de dragages issus des activités portuaires s'avère être une réelle opportunité pour le rechargement d'une portion du littoral en déficit sédimentaire à proximité d'une zone portuaire.

Les rechargements sédimentaires volumineux récents à Dunkerque ont été réalisés pour conforter des ouvrages qui protègent des secteurs à forts enjeux : 1) un complexe méthanier à l'avant-port Ouest d'un côté et 2) l'arrière-pays dunkerquois de l'autre. Ce travail doctoral a permis d'apporter des éléments de compréhension de l'évolution de deux types de rechargements sédimentaires le long d'une côte macrotidale artificialisée. Concernant le rechargement de plage face à la digue des Alliés à Malo-les-Bains, un remaniement du stock sableux entre mars 2014 et mai 2017 s'est opéré, en s'initiant dès les premiers mois qui ont suivi sa mise en œuvre. Il a été mis en évidence que le secteur ouest du site était particulièrement soumis à une érosion chronique avec un abaissement du niveau de la plage et un recul notable de la plateforme supratidale tandis que le secteur plus à l'est se caractérise par un gain sédimentaire, rapidement après la mise en œuvre du rechargement, en plus d'une réorganisation du stock sableux sous forme de barres et de bâches dès la deuxième année. À l'issue des trois ans, la zone rechargée se caractérise par un bilan sédimentaire négatif, qui tend néanmoins à s'atténuer au fil des années. La plateforme supratidale assure toujours son rôle de zone tampon face à la digue des Alliés ; seul le secteur ouest se distingue par une érosion importante à surveiller.

Sur le site de l'avant-port Ouest, le rechargement subtidal et intertidal se caractérise par une large zone d'érosion face à aux arêtes ouest et centrale de la digue du Ruytingen entre mars 2013 et avril 2017. A l'est, c'est un engraissement qui caractérise la zone intertidale ou subtidale. Au fil du suivi, la formation d'une flèche sablo-graveleuse a été mise en évidence, et sa migration vers le sud-est a été constatée. A noter que la formation d'une telle flèche se révèle être un atout pour la biodiversité du site, étant donné que la première flèche qui s'est développée dans les années 1980 (actuellement localisée dans l'anse du Clipon) est devenue par la suite une zone de nidification de sternes naines.

La localisation de ces deux rechargements en début de cellule littorale leur confère les caractéristiques d'une zone source expliquant en partie leur déficit sédimentaire. Dans le cas du rechargement de plage à Malo-les-Bains, il est de plus probable que des phénomènes de réflexion sur la jetée Est lors de certaines conditions météorologiques accentuent l'érosion du secteur ouest. A l'avant-port Ouest, la présence d'une vaste zone d'érosion peut vraisemblablement être expliquée par le fait que le site est très exposé aux houles de secteur NO à N. La présence d'une pente raide sur l'avant-plage peut également expliquer en partie cette forte érosion sur cette partie du site. Il convient de rappeler qu'un départ de sable après la mise en œuvre du rechargement est naturel, ce procédé n'ayant pas la vocation de stopper totalement l'érosion, mais plutôt de maintenir une dynamique naturelle tout en confortant une zone du littoral.

Associée à ces pertes de sable dans des secteurs assez localisés, une redistribution sédimentaire vers les secteurs en aval-dérive sur les deux sites a été observée. Sur la plage de Malo-les-Bains, la partie de la plage la plus fréquentée de la station balnéaire a vu son bilan sédimentaire devenir positif à partir de la deuxième année après la mise en œuvre du rechargement, et le sable issu du rechargement semble avoir atteint les secteurs les plus éloignés à l'issue de la troisième année. On peut donc en conclure un impact positif du rechargement sur les secteurs en aval-dérive. La formation de barres bien développées lors de périodes calmes représente un autre point positif compte tenu du fait que les vagues peuvent ainsi déferler lors de périodes agitées sur ces formes morphologiques, ce qui protège la partie supérieure de l'estran et le perré de Malo-les-Bains.

A l'avant-port Ouest, un déplacement de sable vers l'est a également été observé, sur la zone intertidale et subtidale au niveau de l'anse du Clipon. Les levés topo-bathymétriques limités en superficie ne permettent pas d'affirmer que la redistribution du sable gagne également la façade portuaire, néanmoins l'hypothèse d'une alimentation vers ces secteurs bien au-delà de la zone rechargée est probable.

En conclusion, les résultats de cette étude ont montré que le rechargement de plage en zone d'abri était plus stable que le rechargement intertidal et subtidal qui est plus exposé aux houles d'un large secteur nord. L'importance de la configuration du site dans lequel va être mis en œuvre les futurs rechargements est bel et bien mise en évidence ici. En effet, malgré des conditions météorologiques similaires, les spécificités très locales à proximité des deux sites (ouvrages, exposition, pente de l'avant-plage, etc.) influent dans l'évolution des secteurs rechargés. Cette étude a également permis d'identifier les secteurs d'intervention prioritaire pour les rechargements d'entretien à effectuer, ce type d'opération étant primordiale afin de maintenir un niveau d'efficacité optimale. L'évolution des deux opérations est concluante sous réserve d'un entretien afin de maintenir un stock de sable suffisant permettant d'assurer la protection des ouvrages.

Bibliographie

- ADRIAANSE, L. A. & COOSEN, J., (1991), Beach and dune nourishment and environmental aspects, *Coastal Engineering*, vol. 16, n°1, p. 129-146.
- ALEXANDRE, A., MALLET, C. & DUBREUILH, J., (2003), *Etude de l'érosion de la Côte Basque. Synthèse bibliographique* (n°BRGM/RP-52370-FR), 125 p.
- ALZIEU, C., (1999), *Dragages et environnement marin - État des connaissances*, IFREMER, 225 p.
- ANDRADE, C., LIRA, F., PEREIRA, M. T., RAMOS, R., GUERREIRO, J. & FREITAS, M. C., (2006), Monitoring the nourishment of Santo Amaro estuarine beach (Portugal). Dans : *Journal of Coastal Research Special Issue*. n° 39, p. 776-782.
- ANTHONY, E. J., (2013), Storms, shoreface morphodynamics, sand supply, and the accretion and erosion of coastal dune barriers in the southern North Sea, *Geomorphology*, vol. 199, p. 8-21.
- ANTHONY, E. J. & COHEN, O., (2007), Gravel beach erosion and nourishment in Nice, French Riviera, *Méditerranée*, vol. 108, p. 99-103.
- ANTHONY, E. J., COHEN, O. & SABATIER, F., (2011), Chronic offshore loss of nourishment on Nice beach, French Riviera: A case of over-nourishment of a steep beach?, *Coastal Engineering*, vol. 58, n°4, p. 374-383.
- ANTHONY, E. J. & HEQUETTE, A., (2007), The grain size characterisation of coastal sand from the Somme estuary to Belgium: sediment segregation processes and sources consideration., *Sedimentary Geology*, vol. 202, n°3, p. 369-382.
- ANTHONY, E. J., LEVOY, F., MONFORT, D. & DEGRYSE-KULKARNI, C., (2005), Short-term intertidal bar mobility on a ridge-and-runnel beach, Merlimont, northern France, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 30, n°1, p. 81-93.
- ANTHONY, E. J., LEVOY, F. & MONFORT, O., (2004), Morphodynamics of intertidal bars on a megatidal beach, Merlimont, Northern France, *Marine Geology*, vol. 208, n°1, p. 73-100.
- ARAGONES, L., GARCIA-BARBA, J., GARCIA-BLEDA, E., LOPEZ, I. & SERRA, J. C., (2015), Beach nourishment impact on *Posidonia oceanica*: Case study of Poniente Beach (Benidorm, Spain), *Ocean Engineering*, vol. 107, p. 1-12.
- ARENS, S. M., MULDER, J. P. M., SLINGS, Q. L., GEELEN, L. H. W. T. & DAMSMA, P., (2013), Dynamic dune management, integrating objectives of nature development and coastal safety: Examples from the Netherlands, *Geomorphology*, vol. 199, p. 205-213.
- ARRIAGA, J., RUTTEN, J., RIBAS, F., FALQUES, A. & RUESSINK, G., (2017), Modeling the long-term diffusion and feeding capability of a mega-nourishment, *Coastal Engineering*, vol. 121, p. 1-13.
- AUBRY, A. & RUZ, M.-H., (2008), Effects of groynes on the morphodynamics of a barred macrotidal beach, northern France, *Zeitschrift Für Geomorphologie Supplementary Issues*, vol. 52, n°3, p. 145-166.
- AUGRIS, C., CLABAUT, P. & VICAIRE, O., (1990), *Le domaine marin du Nord-Pas-de-Calais : nature, morphologie et mobilité des fonds*, IFREMER, 95 p.
- AUGRIS, C. & SIMPLET, L., (2013), Les matériaux marins, *Géosciences*, n°17, p. 82-89.
- AZOR, R., DE J., SENEVIRATNE, M. T. M. R. I. C., SARANYA, R., THENUGAADEVY, P., GAMAGE, G. S. M., PREMASIRI, H. M. R. & RATNAYAKE, N. P., (2015), Evaluation of the beach nourishment project at Palliyawatta-

Uswetakeiyawa Sri-Lanka. Dans : *International Conference on Multidisciplinary Approaches iCMA 2015*. Boralasgamuwa, Sri Lanka.

BAKKER, W. T., KERSTING, N. F. & NIEMEYER, H. D., (1995), Line-Modeling of Shoreface Nourishment., In : *Coastal Engineering 1994*, p. 1797-1811.

BATTIAU-QUENEY, Y., FAUCHOIS, J., DEBOUDT, P. & LANOY-RATEL, P., (2001), Beach-dune systems in a macrotidal environment along the northern French coast., *Journal of Coastal Research Special Issue*, n°34, p. 580-592.

BECK, C., CLABAUT, P., DEWEZ, S., VICAIRE, O., CHAMLEY, H., AUGRIS, C., HOSLIN, R. & CAILLOT, A., (1991), Sand bodies and sand transport paths at the English Channel-North Sea border: Morphology, hydrodynamics and radioactive tracing, *Oceanologica Acta*, vol. 11, p. 111-121.

BELDERSON, R. H., JOHNSON, M. A. & KENYON, N. H., (1982), Bedforms. Dans : *Offshore Tidal Sands: Processes and deposits*, Stride A.H. (ed), p. 27-57.

BENEDET, L., CAMPBELL, T., FINKL, C. W., STIVE, M. J. & SPADONI, R., (2005), Impacts of Hurricanes Frances and Jeanne on two nourished beaches along the southeast Florida coast, *Shore & Beach*, vol. 73, n°2, p. 43-48.

BERNIER, J., MIQUEL, M., DARAS, M. & CHERUBINI, P., (1979), *Prévision des surcotes dans l'Avant-Port de Dunkerque-Est* (Rapport n°HE042/79-09), EDF, Direction des Etudes et Recherches, 26 p.

BERTIER, J., (2009), *Analyse multi-échelle de la morphodynamique d'une plage artificielle, Avant-port Ouest de Dunkerque (Nord de la France)*. Thèse de Doctorat. Université du Littoral Côte d'Opale, Wimereux, 315 p.

BERTIN, X., PROUTEAU, E. & LETETREL, C., (2013), A significant increase in wave height in the North Atlantic Ocean over the 20th century, *Global and Planetary Change*, vol. 106, p. 77-83.

BIRD, E., (2011), *Changes on the coastline of Port Phillip Bay.*, East Melbourne, Vic.: Dept. of Sustainability and Environment, 64 p.

BIRD, E. & LEWIS, N., (2014), *Beach Renourishment*, Springer, 143 p.

BONNEFILLE, R., LEPETIT, J., GRAFF, M. & LEROY, J., (1971), *Nouvel Avant-Port de Dunkerque* (Rapport HC042/05), EDF, Direction des Etudes et Recherche, 35 p.

BORG, J. A., GAUCI, M., MAGRO, M. & MICALLEF, M., (2006), Environmental monitoring at St. George's Bay (Malta) in connection with beach replenishment works. Dans : *Proceedings of the 2nd International Conference on the Management of Coastal Recreational Resources*, Gozo, Malta, p. 25-33.

BRIERE, C., (2006), *Etude de l'hydrodynamique d'une zone côtière anthropisée: l'embouchure de l'Adour et les plages adjacentes d'Anglet*. Thèse de Doctorat. Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau, 253p.

BRIQUET, A., (1930), *Le littoral du Nord de la France et son évolution morphologique*, Paris. Thèse de Doctorat. Université de Paris, Paris, 431p.

BROWDER, A. E. & DEAN, R. G., (2000), Monitoring and comparison to predictive models of the Perdido Key beach nourishment project, Florida, USA, *Coastal Engineering*, vol. 39, n°2-4, p. 173-191.

BROWN, J. M., PHELPS, J. J. C., BARKWITH, A., HURST, M. D., ELLIS, M. A. & PLATER, A. J., (2016), The effectiveness of beach mega-nourishment, assessed over three management epochs, *Journal of Environmental Management*, vol. 184, p. 400-408.

- BRUUN, P., (1954), *Coast Erosion and the Development of Beach Profiles*, U.S. Beach Erosion Board, 79 p.
- CAI, F., DEAN, R. G. & LIU, J., (2010), Beach nourishment in China: Status and prospects. Dans : *Proceedings of the 32nd International Conference on Coastal Engineering*, Shanghai, China, n°32.
- CAMPBELL, T. J. & BENEDET, L., (2006), Beach nourishment magnitudes and trends in the US, *Journal of Coastal Research Special Issue*, vol. 39, p. 57-64.
- CAPOBIANCO, M., HANSON, H., LARSON, M., STEETZEL, H., STIVE, M. J. F., CHATELUS, Y., AARNINKHOF, S. & KARAMBAS, T., (2002), Nourishment design and evaluation: applicability of model concepts, *Coastal Engineering*, vol. 47, n°2, p. 113-135.
- CARTIER, A., (2011), *Évaluation des flux sédimentaires sur le littoral du Nord-Pas de Calais : vers une meilleure compréhension de la morphodynamique des plages macrotidales*. Thèse de Doctorat. Université du Littoral Côte d'Opale, Wimereux, 408p.
- CARTIER, A., (2014), *Analyse de l'évolution morphodynamique du rechargement de la plage et de l'avant-côte au droit de la Digue du Ruytingen - Analyse des suivis bathymétriques de Janvier 2012 à Octobre 2013* (Rapport n° 2014_01_GPMD), Géodunes, Dunkerque, 49 p.
- CARTIER, A. & HEQUETTE, A., (2013), The influence of intertidal bar-trough morphology on sediment transport on macrotidal beaches, northern France, *Zeitschrift für Geomorphologie*, vol. 57, n°3, p. 325-347.
- CARTIER, A. & HEQUETTE, A., (2015), Vertical distribution of longshore sediment transport on barred macrotidal beaches, northern France, *Continental Shelf Research*, vol. 93, p. 1-16.
- CARTIER, A., TRESCA, A., GRUNNET, N., MICHARD, B., FORAIN, N. & VIAL, T., (2014), Confortement d'un ouvrage de prévention des inondations et des submersions marines : l'exemple de la digue des Alliés à Dunkerque. Dans : *XIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil*, Dunkerque, Editions Paralia, p. 641-648.
- CASTELLE, B., MARIEU, V., BUJAN, S., SPLINTER, K. D., ROBINET, A., SENECHAL, N. & FERREIRA, S., (2015), Impact of the winter 2013-2014 series of severe Western Europe storms on a double-barred sandy coast: Beach and dune erosion and megacusp embayments, *Geomorphology*, vol. 238, p. 135-148.
- CEREMA, (2017), *Dynamiques et évolution du littoral - Synthèse des connaissances des côtes françaises de la frontière belge à la pointe du Hourdel - Chapitre 5 Interventions humaines le long du littoral*, Rapport, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 72 p.
- CERTAIN, R., (2005), *Les rechargements sédimentaires d'avant-côte : une nouvelle méthode de lutte contre l'érosion côtière*, Programme Liteau II, 165 p.
- CHARLIER, R. H., CHAINEUX, M. C. P. & MORCOS, S., (2005), Panorama of the history of coastal protection, *Journal of Coastal Research*, vol. 21, n°1, p. 79-111.
- CHARLIER, R. H. & DE MEYER, C. P., (1995), New Developments on Coastal Protection along the Belgian Coast, *Journal of Coastal Research*, vol. 11, n°4, p. 1287-1293.
- CHAVAND, M. & MIGNIOT, C., (1992), Exemple de protection du littoral : Reconquête de la plage de Saint-Aygulf (département du Var), *La Houille Blanche*, n°4, p. 315-321.
- CHAVEROT, S., (2006), *Impact des variations récentes des conditions météo-marines sur les littoraux meubles du Nord-Pas-de-Calais*. Thèse de Doctorat. Université du Littoral Côte d'Opale, Wimereux. 266p.

- CHAVEROT, S., HEQUETTE, A. & COHEN, O., (2008), Changes in storminess and shoreline evolution along the northern coast of France during the second half of the 20th century, *Zeitschrift Für Geomorphologie, Supplementary Issues*, vol. 52, n°3, p. 1-20.
- CHURCH, J. A. & WHITE, N. J., (2011), Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century, *Surveys in Geophysics*, vol. 32, n°4-5, p. 585-602.
- CLABAUT, P., (1988), *Dynamique sédimentaire dans le détroit du Pas-de-Calais (large des côtes françaises)*. Thèse de Doctorat. Université des Sciences et Technologiques de Lille I, Lille. 251p.
- CLABAUT, P., (1991), *Analyse des observations de houle au large de Dunkerque*. Rapport : Cabinet de Géologie littorale et marine, 8 p.
- CLABAUT, P., CHAMLEY, H. & MARTEEL, H., (2000), Évolution récente des dunes littorales à l'est de Dunkerque (Nord de la France) / Recent coastal dunes evolution, East of Dunkirk, Northern France, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 6, n°2, p. 125-136.
- CLAYTON, T. D., (1991), Beach Replenishment Activities on U.S. Continental Pacific Coast, *Journal of Coastal Research*, vol. 7, n°4, p. 1195-1210.
- COBURN, A. S., (2012), Beach nourishment in the United States. Dans : *Pitfalls of Shoreline Stabilization: Selected Case Studies*, ANDREW, G., COOPER, G. & PILKEY, O. H. (eds), Springer, Dordrecht, p. 105-120.
- COHEN, O., (2014), Trente-huit ans de rechargements sur la plage de Nice, Côte d'Azur : une synthèse statistique. Dans : XIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, Dunkerque, Editions Paralia, p. 281-288.
- COOKE, B. C., JONES, A. R., GOODWIN, I. D. & BISHOP, M. J., (2012), Nourishment practices on Australian sandy beaches: a review, *Journal of Environmental Management*, vol. 113, p. 319-327.
- CORBAU, C., (1995), *Dynamique sédimentaire en domaine macrotidal : exemple du littoral du nord de la France (Dunkerque)*. Thèse de Doctorat. Université des Sciences et Technologiques de Lille I, Lille. 200p.
- CORBELLA, S. & STRETCH, D. D., (2012), Coastal defences on the KwaZulu-Natal coast of South Africa: a review with particular reference to geotextiles, *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, vol. 54, n°2, p. 55-64.
- COSTA, S. & DAVIDSON, R., (2004), Ouvrages transversaux portuaires et impacts hydrosédimentaires : le cas du port de Dieppe (Haute Normandie) (Impact of the harbour management at Dieppe, Northern Normandy, France), *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, vol. 81, n°3, p. 321-333.
- CRAPOULET, A., (2015), *Évolution du trait de côte, bilans sédimentaires et évaluation des zones à risques sur le littoral du Nord-Pas-de-Calais : analyse multi-échelles par LiDAR aéroporté*. Thèse de Doctorat. Université du Littoral Côte d'Opale, Wimereux. 345p.
- CRAPOULET, A., HEQUETTE, A., MARIN, D., LEVOY, F. & BRETTEL, P., (2017), Variations in the response of the dune coast of northern France to major storms as a function of available beach sediment volume, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 42, n°11, p. 1603-1622.
- DANISH HYDRAULIC INSTITUTE, (2012), *Etudes hydrauliques et de conception d'un dispositif de confortement de la Digue des Alliés (n° 1)*, 469 p.
- DAUBORD, C., (2014), *Caractérisation de 7 événements de tempête de l'automne-hiver 2013-2014 à partir des données disponibles au SHOM (n° 001/2014)*, SHOM.

DAVIS JR, R. A., WANG, P. & SILVERMAN, B. R., (2000), Comparison of the performance of three adjacent and differently constructed beach nourishment projects on the Gulf Peninsula of Florida, *Journal of Coastal Research*, vol. 16, n°2, p. 396–407.

DAVISON, A. T., NICHOLLS, R. J. & LEATHERMAN, S. P., (1992), Beach nourishment as a coastal management tool: an annotated bibliography on developments associated with the artificial nourishment of beaches, *Journal of Coastal Research*, p. 984–1022.

DE ALEGRIA-ARZABURU, A. R., MARIÑO-TAPIA, I., SILVA, R. & PEDROZO-ACUÑA, A., (2013), Post-nourishment beach scarp morphodynamics, Dans : *Proceedings of the 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England)*, *Journal of Coastal Research, Special Issue*, vol. 65,p. 576–581.

DE LA TORRE, Y., BALOUIN, X., MOUROUX, R., BELON, R., MALDAN, F., BODERE, G., LONGUEVILLE, F., SIBERT, V., DAILLOUX, L. & SABARICH, L., (2015), *Observatoire de la côte sableuse catalane - OBSCAT: rapport technique d'année 2*. Rapport BRGM, n° BRGM/RP-64945-FR, 170 p.

DE LA TORRE, Y., BELON, R., BALOUIN, Y. & STEPHANIAN, A., (2014a), *Inventaire et analyse des solutions douces de gestion de l'érosion côtière et applicabilité au littoral corse*. Rapport BRGM, n° BRGM/RP-63034-FR, 59 p.

DE LA TORRE, Y., DE SANTIS, C., BALOUIN, X., BELON, R. & MALDAN, F., (2014b), *Observatoire de la côte sableuse catalane - OBSCAT: rapport technique d'année 1* . Rapport BRGM, n° BRGM/RP-63774-FR, 251 p.

DE SCHIPPER, M. A., (2014), Alongshore variability of nourished and natural beaches. PhD thesis. Delft University of Technology. 205p.

DE SCHIPPER, M. A., DE VRIES, S., RANASINGHE, R., RENIERS, A. J. H. M. & STIVE, M. J. F., (2012), *Morphological developments after a beach and shoreface nourishment at Vlugtenburg beach*. Dans : *Proceedings of the Jubilee conference*, Enschede, The Netherlands. p.114-118.

DE SCHIPPER, M. A., DE VRIES, S., RUESSINK, G., DE ZEEUW, R. C., RUTTEN, J., VAN GELDER-MAAS, C. & STIVE, M. J. F., (2016), Initial spreading of a mega feeder nourishment: Observations of the Sand Engine pilot project, *Coastal Engineering*, vol. 111, p. 23-38.

DE SCHIPPER, M. A., DE VRIES, S., STIVE, M. J. F., DE ZEEUW, R. C., RUTTEN, J., RUESSINK, B. G., ... OTHERS, (2014), *Morphological Development of a Mega-Nourishment: First Observations at the Sand Engine*. Dans : *34th International Conference on Coastal Engineering*, Coastal Engineering Research Council, Seoul, Korea.

DEAN, R. G., (1974), Compatibility of borrow material for beach fills. Dans : *Proceedings of 14th Conference on Coastal Engineering*, Copenhagen, Danemark, n°14, p.1319-1333.

DEAN, R. G., (1986), Coastal armoring: effects, principles and mitigation. Dans : *Proceedings of 20th Conference on Coastal Engineering*, Taipei, Taiwan, n°20, p. 1843–1857.

DEAN, R. G., (1988), Realistic economic benefits from beach nourishment. Dans : *Proceedings of 21th Conference on Coastal Engineering*, Torremolinos, Spain, n°21, p.1558-1572.

DEAN, R. G., (1991), Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications, *Journal of Coastal Research*, vol. 7, n°1, p.53-84.

DEAN, R. G., (2002), *Beach Nourishment: Theory and Practice*, World Scientific, 426 p.

DEAN, R. G. & HOUSTON, J. R., (2016), Determining shoreline response to sea level rise, *Coastal Engineering*, vol. 114, p. 1-8.

- DELOFFRE, J., VERNEY, R., LAFITE, R., LESUEUR, P., LESOURD, S. & CUNDY, A. B., (2007), Sedimentation on intertidal mudflats in the lower part of macrotidal estuaries: Sedimentation rhythms and their preservation, *Marine Geology*, vol. 241, n°1-4, p. 19-32.
- DERONDE, B., HOUTHUYS, R., DEBRUYN, W., FRANSAER, D., LANCKER, V. V. & HENRIET, J.-P., (2006), Use of Airborne Hyperspectral Data and Laserscan Data to Study Beach Morphodynamics along the Belgian Coast, *Journal of Coastal Research*, vol. 225, p. 1108-1117.
- DEWEZ, S., CLABAUT, P., VICAIRE, O., BECK, C., CHAMLEY, H. & AUGRIS, C., (1989), Transits sédimentaires résultants aux confins Manche-mer du Nord, *Bulletin de la Société Géologique de France*, vol. 5, n°1043-1053, p. 1043-1053.
- DIAS, J., MATIAS, A., FERREIRA, Ó. & WILLIAMS, A., (1999), Integrated dune/beach nourishment on Cacela Peninsula, Portugal. Dans : *Proceedings of the 4th Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Processes*, New York, US, p. 2165-2175.
- DIXON, K. L. & PILKEY, O. H., (1991), Summary of Beach Replenishment on the U.S. Gulf of Mexico Shoreline, *Journal of Coastal Research*, vol. 7, n°1, p. 249-256.
- DOBRONIK, C., (2005), Morphological evolution and management proposals in the Authie Estuary, northern France. Dans : *Proceedings "Dunes and Estuaries 2005"*, Koksijde, Belgique, p. 537-545.
- ELKO, N. A., (2005), Management of a beach nourishment project during the 2004 hurricane season, *Shore & Beach*, vol. 73, n°2&3, p.49-54.
- ELKO, N. A. & WANG, P., (2007), Immediate profile and planform evolution of a beach nourishment project with hurricane influences, *Coastal Engineering*, vol. 54, n°1, p. 49-66.
- FATTAL, P., ROBIN, M., PAILLART, M., MAANAN, M., MERCIER, D., LAMBERTS, C. & COSTA, S., (2010), Effets des tempêtes sur une plage aménagée et à forte protection côtière: la plage des Éloux (côte de Noirmoutier, Vendée, France), *Norois. Environnement, aménagement, société*, n°215, p. 101-114.
- FATTAL, P. & WALKER, P., (2008), Le drainage de plage: une méthode douce de stabilisation d'un littoral meuble - Etude de cas aux Sables d'Olonne (Vendée), *Revue du Centre Français du Littoral*, p. 243-252.
- FAUCHOIS, J., (1998), *L'intérêt de la cartographie à grande échelle dans l'étude géomorphologique des littoraux dunaires du littoral du Nord-Pas-de-Calais*. Thèse de Doctorat. Université des Sciences et Technologies de Lille 1, Lille. 272p.
- FICHAUT, B. & SUANEZ, S., (2008), Le rechargement de la plage de Sainte-Anne-du-Portzic (Brest-Finistère) : quand la recherche fondamentale se met au service d'une gestion cohérente du littoral, *Norois. Environnement, aménagement, société*, n°208, p. 29-44.
- FINKL, C. W., (1996), What Might Happen to America's Shorelines if Artificial Beach Replenishment is Curtailed: A Prognosis for Southeastern Florida and Other Sandy Regions Along Regressive Coasts, *Journal of Coastal Research*, vol. 12, n°1, p. 3-9.
- FINKL, C. W. & WALKER, H. J., (2005), Beach Nourishment. Dans : M. L. SCHWARTZ (ed.), *Encyclopedia of Coastal Science*, Springer Netherlands, p. 147-161.
- FLIKWEERT, J., (2017), Sandscaping: Making Innovative Coastal Management Work. Dans : *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering*, ICE Publishing.
- FOLK, R. L., (1954), The Distinction between Grain Size and Mineral Composition in Sedimentary-Rock Nomenclature, *The Journal of Geology*, vol. 62, n°4, p. 344-359.

- FOLK, R. L. & WARD, W., (1957), Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters, *Journal of Sedimentary Petrology*, n°27, p. 3-26.
- FRIHY, O. E., EL SAYED, E. E., DEABES, E. A. & GAMAI, I. H., (2010), Shelf Sediments of Alexandria Region, Egypt: Explorations and Evaluation of Offshore Sand Sources for Beach Nourishment and Transport Dispersion, *Marine Georesources & Geotechnology*, vol. 28, n°3, p. 250-274.
- GARES, P. A., WANG, Y. & WHITE, S. A., (2006), Using LIDAR to Monitor a Beach Nourishment Project at Wrightsville Beach, North Carolina, USA, *Journal of Coastal Research*, p. 1206-1219.
- GRAND PORT MARITIME DE DUNKERQUE (2017), *Débat public sur le projet de nouveau bassin pour le conteneur CAP2020 - Dossier du maître d'ouvrage*, Rapport de présentation du projet. 122p.
- GRAFALS-SOTO, R. & NORDSTROM, K., (2009), Sand fences in the coastal zone: intended and unintended effects, *Environmental Management*, vol. 44, n°3, p. 420-429.
- GRANT, W. D. & MADSEN, O. S., (1986), The Continental-Shelf Bottom Boundary Layer, *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 18, n°1, p. 265-305.
- GREENE, K. E., (2002), *Beach nourishment: a review of the biological and physical impacts*, Atlantic States Marine Fisheries Commission, Washington, 179 p.
- GREGOIRE, P., (2004), *Modèle conceptuel d'aide à la décision multicritère pour le choix négocié d'un scénario de dragage maritime*. Thèse de Doctorat. Université d'Artois, Arras. 299p.
- GRUNNET, N., KRISTENSEN, S. E., DRØNEN, N., DEIGAARD, R., TESSIER, C. & FORAIN, N., (2012), Evaluation of nourishment schemes based on long-term morphological modeling. Dans : *Proceedings of 33rd Coastal Engineering*, Santander, Spain, n°33, p. 1-11.
- GRUNNET, N. M. & RUESSINK, B. G., (2005), Morphodynamic response of nearshore bars to a shoreface nourishment, *Coastal Engineering*, vol. 52, n°2, p. 119-137.
- GUERBER, E., LE COZANNET, G. & PEDREROS, R., (2008), Modélisation statistique du vent. Influence du changement climatique sur le transport éolien. Dans : *Xèmes Journées Nationales Génie Côtier-Génie*, Sophia Antipolis, Editions Paralia, p. 467-476.
- GUILCHER, A. & HALLEGOUET, B., (1991), Coastal Dunes in Brittany and Their Management, *Journal of Coastal Research*, vol. 7, n°2, p 517-533.
- GUIMARÃES, A., LIMA, M., COELHO, C., SILVA, R. & VELOSO-GOMES, F., (2016), Groin impacts on updrift morphology: Physical and numerical study, *Coastal Engineering*, vol. 109, p. 63-75.
- HAIGH, I., NICHOLLS, R. & WELLS, N., (2011), Rising sea levels in the English Channel 1900 to 2100, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering*, vol. 164, n°2, p. 81-92.
- HALL JR, J. V., (1952), Artificially nourished and constructed beaches. Dans : *Proceedings of the 3rd Conference on Coastal Engineering*, Cambridge, USA, n°3, p. 119-136.
- HAMM, L., CAPOBIANCO, M., DETTE, H. H., LECHUGA, A., SPANHOFF, R. & STIVE, M. J. F., (2002), A summary of European experience with shore nourishment, *Coastal engineering*, vol. 47, n°2, p. 237-264.
- HANSON, H., BRAMPTON, A., CAPOBIANCO, M., DETTE, H. H., HAMM, L., LAUSTRUP, C., LECHUGA, A. & SPANHOFF, R., (2002), Beach nourishment projects, practices, and objectives—a European overview, *Coastal Engineering*, vol. 47, n°2, p. 81-111.

HEALY, T. R., KIRK, R. M. & DE LANGE, W., (1990), Beach renourishment in New Zealand, *Journal of Coastal Research Special Issue*, n°6, p. 77-90.

HEQUETTE, A. & AERNOUTS, D., (2010), The influence of nearshore sand bank dynamics on shoreline evolution in a macrotidal coastal environment, Calais, northern France, *Continental Shelf Research*, vol. 30, n°12, p. 1349-1361.

HEQUETTE, A. & CARTIER, A., (2016), Theoretical and Observed Breaking Wave Height on a Barred Macrotidal Beach: Implications for the Estimation of Breaker Index on Beaches with Large Tidal Range, *Journal of Coastal Research*, vol. 75, n°1, p. 861-866.

HEQUETTE, A., CARTIER, A., RUZ, M.-H., MARIN, D. & SIPKA, V., (2015), *Suivi morpho-sédimentaire de l'UG4 (Grand Port Maritime de Dunkerque) - Bilan 2010-2014*, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, Dunkerque. 331p.

HEQUETTE, A., HEMDANE, Y. & ANTHONY, E. J., (2008a), Determination of sediment transport paths in macrotidal shoreface environments: a comparison of grain-size trend analysis with near-bed current measurements, *Journal of Coastal Research*, vol.24, n°3, p. 695-707.

HEQUETTE, A., HEMDANE, Y. & ANTHONY, E. J., (2008b), Sediment transport under wave and current combined flows on a tide-dominated shoreface, northern coast of France, *Marine Geology*, vol. 249, n°3-4, p. 226-242.

HEQUETTE, A. & RUFIN-SOLER, C., (2007), *Programme INTERREG IIIa « Plages A Risque (PAR) / Beaches At Risk (BAR) » phase 2 (2005-2007)*. Rapport scientifique final. 226 p.

HEQUETTE, A., RUZ, M.-H., CARTIER, A. & SIPKA, V., (2013), *Analyse de la circulation hydrodynamique au droit de la digue du Ruytingen et de la zone des Sternes*, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, Dunkerque, 22 p.

HEQUETTE, A., RUZ, M.-H., MASPATAUD, A. & SIPKA, V., (2009), Effects Of Nearshore Sand Bank And Associated Channel On Beach Hydrodynamics: Implications For Beach And Shoreline Evolution, *Journal of Coastal Research Special Issue*, vol. 56, p. 59-63.

HERBERT, V., MAILLEFERT, M., PETIT, O. & ZUINDEAU, B., (2009), Risque environnemental et action collective : l'exemple de la gestion du risque d'érosion à Wissant (Côte d'Opale), *Vertigo*, n°9, n°3.

HERMAN, S., GLASER, D., PIETERS, A., GREGOIRE, P., PRIEZ, C., DESMOULIN, D. & GUGLIEMETTI, D., (2014), Cinq ans de valorisation des sédiments contaminés extraits du Port de Dunkerque (France). Dans : *XIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil*, Dunkerque, Editions Paralia, p. 987-998.

HILLYER, T., (2003), *The Corps of Engineers and Shore Protection - History, projects, costs*, U.S. Army Corps of Engineers, Alexandria, US, 80p.

HINKEL, J., JAEGER, C., NICHOLLS, R. J., LOWE, J., RENN, O. & PEIJUN, S., (2015), Sea-level rise scenarios and coastal risk management, *Nature Climate Change*, vol. 5, n°3, p. 188-190.

HOUBOLT, J. J. H. C., (1968), Recent sediments in the Southern Bight of the North Sea, *Geologie*, vol. 47, n°4, p.245-273.

IBE, A. C., AWOSIKA, L. F., IBE, C. E. & INGBEDION, L. E., (1991), Monitoring of the 1985/86 Beach Nourishment Project at Bar Beach, Victoria Island, Lagos, Nigeria. Dans : *Proceedings of Coastal Zone '91*, American Society of Civil Engineers, New-York, USA, p. 534-552.

IDRA ENVIRONNEMENT, (2013), *Etude de mise en oeuvre de filets brise-vent le long de la digue des Alliés*. Rapport d'études pour le Grand Port Maritime de Dunkerque. 66p.

- IDRA ENVIRONNEMENT, (2009), *Dossier réglementaire de demande d'autorisation pour l'aménagement de la plateforme d'accueil d'un terminal méthanier*. Rapport d'études pour le Grand Port Maritime de Dunkerque. 896p.
- IMMAN, D. L. & FRAUTSCHY, J. D., (1966), Littoral processes and the development of shorelines. Dans: *Proceedings of Coastal Engineering Speciality Conference*, Santa Barbara, Californie, p. 511-536.
- IPCC (2013), *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, New York, 1535 p.
- JAMES, W. R., (1975), *Techniques in Evaluating Suitability of Borrow Material for Beach Nourishment*, U.S. Army, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, 81 p.
- JEANSON, M., (2009), *Morphodynamique du littoral de Mayotte - Des processus au réseau de surveillance*. Thèse de Doctorat. Université du Littoral Côte d'Opale, Wimereux. 347 p.
- JONES, A. R., MURRAY, A., LASIAK, T. & MARSH, R., (2008), The effects of beach nourishment on the sandy-beach amphipod *Exoediceros fossor*: Impact and recovery in Botany Bay, New South Wales, Australia, *Marine Ecology*, vol. 29, n°1, p. 28-36.
- KABAT, P., FRESCO, L. O., STIVE, M. J. F., VEERMAN, C. P., VAN ALPHEN, J. S. L. J., PARMET, B. W. A. H., ... KATSMAN, C. A., (2009), Dutch coasts in transition, *Nature Geoscience*, vol. 2, n°7, p. 450-452.
- KAMPHUIS, J. W., (2010), *Introduction to Coastal Engineering and Management*, World Scientific, 564 p.
- KING, C. A. M. & WILLIAMS, W. W., (1949), The Formation and Movement of Sand Bars by Wave Action, *The Geographical Journal*, vol. 113, p. 70-85.
- KRUMBEIN, W. C., (1957), *A Method for Specification on Sand for Beach Fill Evaluation*. U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, 43 p.
- KRUMBEIN, W. C. & JAMES, W. R., (1965), *A lognormal size distribution model for estimating stability of beach fill material*, U. S. Army Coastal Engineering Research Center, Washington, D.C., 17p.
- KUANG, C., PAN, Y. & HE, L., (2011a), Beach nourishment projects in China. Dans: *Proceedings of the 6th International Conference on Asian and Pacific Coasts*, Hong Kong, Chine, p. 147-161
- KUANG, C., PAN, Y., ZHANG, Y., LIU, S., YANG, Y., ZHANG, J. & DONG, P., (2011b), Performance Evaluation of a Beach Nourishment Project at West Beach in Beidaihe, China, *Journal of Coastal Research*, vol. 274, p. 769-783.
- KUNZ, H., (1990), Artificial beach nourishment on norderney, a case study. Dans : *Proceedings of 22nd Conference on Coastal Engineering*, Delft, The Netherlands, n°22, p.3254-3267
- KUROIWA, M., SHIBUTANI, Y., MATSUBARA, Y., KUCHISHI, T. & ABUALTYEF, M., (2011), Numerical model of 3D morphodynamic after offshore nourishment. Dans : *Proceedings of 32nd Conference on Coastal Engineering*, Shanghai, China, n°32, p. 1-14.
- LAHOUSSE, P. & PIERRE, G., (2003), The Retreat of Chalk Cliffs at Cape Blanc-Nez (France): Autopsy of an Erosional Crisis, *Journal of Coastal Research*, vol. 19, n°2, p. 431-440.
- LAMB, H. & FRYDENDAHL, K., (1991), *Historic Storms of the North Sea, British Isles and Northwest Europe*, Cambridge University Press, 232 p.

- LANGEDIJK, J., (2011), *Beach Nourishment to Mitigate the Impact of Sea Level Rise in Southeast Australia*, TU Delft, Civil Engineering and Geosciences, Hydraulic Engineering. 105p.
- LAUSTRUP, C., MADSEN, H. T., SORENSEN, P. & BROKER, I., (1996), Comparison of beach and shoreface nourishment Torsminde Tange, Denmark. Dans: *Proceedings of 25th Conference on Coastal Engineering*, n°25, p.2927-2940
- LE BOT, S. & TRENTESAUX, A., (2004), Types of internal structure and external morphology of submarine dunes under the influence of tide- and wind-driven processes (Dover Strait, northern France), *Marine Geology*, vol. 211, n°1, p. 143-168.
- LE GORGEU, V. & GUITONNEAU, R., (1954), Reconstruction de la digue de l'Est à Dunkerque. Dans: *Proceedings of 5th Conference on Coastal Engineering*, Grenoble, France, n°5, p. 555-586.
- LEEWIS, L., VAN BODEGOM, P. M., ROZEMA, J. & JANSSEN, G. M., (2012), Does beach nourishment have long-term effects on intertidal macroinvertebrate species abundance?, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 113, p. 172-181.
- LEMBRECHTS, J., AMBAGTS, Z. & VAN EIJSBERGEN, E., (2012), The Sand Motor : Building with Nature, *Views and experiences*, p. 20-25.
- LEONARD, L. A., CLAYTON, T. & PILKEY, O., (1990a), An Analysis of Replenished Beach Design Parameters on U.S. East Coast Barrier Islands, *Journal of Coastal Research*, vol. 6, n°1, p. 15-36.
- LEONARD, L. A., DIXON, K. L. & PILKEY, O. H., (1990b), A comparison of beach replenishment on the US Atlantic, Pacific, and Gulf Coasts, *Journal of Coastal Research Special Issue*, vol. 6, p. 127-140.
- LEONARD, L., PILKEY, O. H. & CLAYTON, T., (1988), An assessment of parameters critical to beach replenishment. Dans : TAIT, L.S. (Ed.), *Florida Shore and Beach Proceedings*, Tallabasse, USA, p. 115-124.
- LIN, P. C.-P., HANSEN, I. & SASSO, R. H., (1996), Combined sand bypassing and navigation improvements at Hillsboro Inlet, Broward County, Florida: The importance of a regional approach. Dans : Tait, L.S. (Ed.), *The Future of Beach Nourishment*, p. 43-59.
- LÖFFLER, M. & COOSEN, J., (1995), Ecological impact of sand replenishment. Dans : HEALY, M.G. & DOODY, J.P. (Ed.) *Directions in European coastal management*. Samara Publishing: Cardigan. p.291-299.
- LOTHE, M., BALOUIN, Y., PALVADEAU, E., STEPANIAN, A., BELON, R., MALDAN, F., BODERE, G., LAPATY, A., BOUVIER, C., SIBERT, V., DAILLOUX, D. & SABARICH, L., (2016), *Observatoire de la côte sableuse catalane - OBSCAT: rapport technique d'année 3*. Rapport final. 226 p.
- L'YVANC, J., ALZIEU, C. & MAUVAIS, J-L., (1999), Les dragages sur le littoral français. Dans : ALZIEU, C., *Dragages et environnement marin - État des connaissances*, IFREMER, p.27-35.
- MADSEN, H. T., KNUDSEN, S. B. & SOERENSEN, P., (2011), Detailed planning of beach nourishment based on monitoring of coastline undulations and dune erosion. Dans : *Proceedings of 32nd Conference on Coastal Engineering*, Shanghai, China, n°32, p. 1-10
- MAGALHÃES, F., ÂNGELO, C. & TABORDA, R., (2004), Towards the adoption of adequate coastal protection strategies in Portugal, *Thalassas*, vol. 20, n°2, p. 23-29.
- MANZANERA, M., PEREZ, M. & ROMERO, J., (1998), Seagrass mortality due to oversedimentation: an experimental approach, *Journal of Coastal Conservation*, vol. 4, n°1, p. 67-70.

- MARCOMINI, S. C. & LOPEZ, R. A., (2006), Evolution of a beach nourishment project at Mar del Plata, *Journal of Coastal Research Special Issue*, n°39, p. 834-837.
- MARGOTTA, J., TRENTESAUX, A. & TRIBOVILLARD, N., (2016), Tidally-modulated infilling of a large coastal plain during the Holocene; the case of the French Flemish Coastal plain. Dans : *Contributions to Modern and Ancient Tidal Sedimentology: Proceedings of the Tidalites 2012 Conference*, Caen, France, p. 243-260
- MASPATAUD, A., (2011), *Impacts des tempêtes sur la morphodynamique du profil côtier en milieu macrotidal*. Thèse de Doctorat. Université du Littoral Côte d'Opale, Wimereux. 516p.
- MASPATAUD, A., RUZ, M.-H. & HEQUETTE, A., (2011), Storm-driven shoreline evolution on a macrotidal coast: short- to medium-term spatial variability. A case study on the northern coast of France. Dans : *The Proceedings of the Coastal Sediments 2011*, World Scientific Publishing Company, Miami, USA, p. 927-940.
- MASPATAUD, A., RUZ, M.-H. & VANHEE, S., (2013), Potential impacts of extreme storm surges on a low-lying densely populated coastline: The case of Dunkirk area, Northern France, *Natural Hazards*, vol. 66, n°3, p. 1327-1343.
- MASSELINK, G. & ANTHONY, E. J., (2001), Location and height of intertidal bars on macrotidal ridge and runnel beaches, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 26, n°7, p. 759-774.
- MASSELINK, G., CASTELLE, B., SCOTT, T., DODET, G., SUANEZ, S., JACKSON, D. & FLOC'H, F., (2016), Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along the Atlantic coast of Europe, *Geophysical Research Letters*, vol. 43, n°5, p. 2135-2143
- MASSELINK, G., KROON, A. & DAVIDSON-ARNOTT, R. G. D., (2006), Morphodynamics of intertidal bars in wave-dominated coastal settings — A review, *Geomorphology*, vol. 73, n°1-2, p. 33-49.
- MAY, J. P. & TANNER, W. F., (1973), The littoral power gradient and shoreline changes, In : *Coastal Geomorphology*, Coates D. R., p. 43-61.
- MCCAVE, I. N., (1971), Sand waves in the North Sea off the coast of Holland, *Marine Geology*, vol. 10, n°3, p. 199-225.
- MCRORBIE, A., SPENCER, T. & GERRITSEN, H., (2005), The Big Flood: North Sea storm surge, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 363, n°1831, p. 1263-1270.
- MENN, I., JUNGHANS, C. & REISE, K., (2003), Buried alive: Effects of beach nourishment on the infauna of an erosive shore in the North Sea, *Senckenbergiana Maritima*, vol. 32, n°1-2, p. 125-145.
- MERTENS, T., DE WOLF, P., VERWAEST, T., TROUW, K., DE NOCKER, L. & COUDERE, K., (2008), An integrated master plan for Flanders future coastal safety. Dans : *Proceedings of the 31st International Conference on Coastal Engineering*, Hamburg, Germany, n°31, p. 4017-4028.
- MERTENS, T., VERWAEST, T., DELGADO, R., TROUW, K. & DE NOCKER, L., (2010), Coastal management and disaster planning on the basis of flood risk calculations, *Proceedings of the 32nd International Conference on Coastal Engineering*, Shanghai, China, n°32, p. 1-8.
- MEUR-FEREC, C. & RUZ, M.-H., (1998), Edification et évolution de dunes bordières le long d'une côte artificialisée, Port Ouest de Dunkerque, France. Poster. Colloque « Espaces littoraux en mutation », Dunkerque, Université du Littoral Côte d'Opale.

- MIAL-LR (MISSION INTERMINISTERIELLE D'AMENAGEMENT DU LITTORAL DE LA REGION LANGUEDOC-ROUSSILLON) (2003), *Orientations stratégiques pour la gestion de l'érosion en Languedoc-Roussillon*. Rapport final. 24 p.
- MILLER, D. C., MUIR, C. L. & HAUSER, O. A., (2002), Detrimental effects of sedimentation on marine benthos: what can be learned from natural processes and rates?, *Ecological Engineering*, vol. 19, n°3, p. 211-232.
- MILLER, M. C., MCCAIVE, I. N. & KOMAR, P., (1977), Threshold of sediment motion under unidirectional currents, *Sedimentology*, vol. 24, n°4, p. 507-527.
- MINISTERE DE L'ECOLOGIE, DU DEVELOPPEMENT DURABLE, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT, (2010), *La gestion du trait de côte*, Quæ, 308p.
- MINISTERE DE L'ECOLOGIE & DU DEVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ENERGIE, (2016), *Développer la connaissance et l'observation du trait de côte - Contribution nationale pour une gestion intégrée*. Brochure. 24p.
- MIOSSEC, A., (1993), *La gestion de la nature littorale en France atlantique, étude comparative (Royaume-Uni, Pays-Bas, Espagne, Etats-Unis)*, Thèse de Doctorat. Université de Bretagne occidentale, Brest. 623p.
- MONTAGUE, C. L., (1993), Ecological Engineering of Inlets in Southeastern Florida: Design Criteria for Sea Turtle Nesting Beaches, *Journal of Coastal Research Special Issue*, n°18, p. 267-276.
- MONTAUDOUIN, X., CAJERI, P. & LAVESQUE, N., (2009), *Rechargement et restauration des plages du Pyla sur Mer: impact sur les peuplements benthiques (année 6)*. Rapport, Station Marine d'Arcachon, 48p.
- MOORE, B. D., (1982), *Beach Profile Evolution in Response to Changes in Water Level and Wave Height*, University of Delaware, 328 p.
- MOSES, C. & WILLIAMS, B. G. R., (2008), Artificial beach recharge: The South East England experience, *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues*, vol. 52, p. 107-124.
- MRANI-ALAOU, M. & ANTHONY, E. J., (2011), New data and a morphodynamic perspective on mid- to late-Holocene palaeoenvironmental changes in the French Flanders coastal plain, southern North Sea, *The Holocene*, vol. 21, n°3, p. 445-453.
- MULDER, J. P. M., HOMMES, S. & HORSTMAN, E. M., (2011), Implementation of coastal erosion management in the Netherlands, *Ocean & Coastal Management*, vol. 54, n°12, p. 888-897.
- MULDER, J. P. M., KREEKE, J. VAN DE & VESSEM, P. VAN, (1994), Expérimental shoreface nourishment, Terschelling (NL), *Proceedings of the 24th Conference on Coastal Engineering*, Kobe, Japan, n°24, p.2886-2899.
- NAMVRINE, P., (1996), *L'essor de la Croisette (1870-1914)*, Mémoire de maîtrise. Faculté des Lettres de Nice. 40p.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL, (1995), *Beach Nourishment and Protection*, National Academies Press, Washington, 334 p.
- NEGM, A., MASRIA, A., ISKANDER, M. & SAAVEDRA, O., (2015), Towards a Sustainable Stability of Coastal Zone at Rosetta Promontory/ Mouth, Egypt, *Journal of Oceanography and Marine Research*, vol. 3, n°1, p. 2332-2632.

- NELSON, W., (1988), An Overview of the Effects of Beach Nourishment on the Sand Beach Fauna. Dans: *Proceedings of Beach preservation technology 88*, Gainesville, USA, p. 295-310.
- NEWELL, R., SEIDERER, L. & HITCHCOCK, D., (1998), The impact of dredging works in coastal waters: a review of the sensitivity to disturbance and subsequent recovery of biological resources on the sea bed, *Oceanography and marine biology*, vol. 36, p. 127-178.
- NGUYEN, H., TINH, N., VIET, N. & TANAKA, H., (2015), Estimation of total sediment volume for beach nourishment in the northern port of Nha Trang. Dans : *Vietnam-Japan Workshop on estuaries, coasts and rivers 2015*, Hoi An, Vietnam, p.73-79
- NICHOLLS, R., WOODROFFE, C., BURKETT, V., HAY, J., WONG, P. P. & NURSE, L., (2011), Scenarios for coastal vulnerability assessment. Dans : WOLANSKI, E. & MCLUSKY, D.S., *Treatise on estuarine and coastal science: Ecological economics of estuaries and coasts*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, p. 289-303.
- NIEMEYER, H. D., LAUSTRUP, C., MULDER, J. P. M. & VAN DER KREKE, J. J., (1995), General aims of the NOURTEC-project - Effectiveness and execution of beach and shoreface nourishments. Dans : *Proceedings of COPEDEC IV*, Rio de Janeiro, Brazil, p. 311-325.
- NISHI, R. & DEAN, R. G., (2005), Project scale and cost of beach nourishment in Japan. Dans : *Ocean Development Symposium in Japan 2005*. Abstract. 2p.
- OBLINGER, A., (2008), *Caractérisation morphodynamique des sites de Malo-Les-Bains et de Calais-Hoverport, Nord de la France : spécificités de deux sites macrotidaux originaux du sud de la Mer du Nord*, Thèse de Doctorat. Université du Littoral Côte d'Opale, Wimereux. 169p.
- OBLINGER, A. & ANTHONY, E. J., (2008), Wave attenuation and intertidal morphology of a multi-barred macrotidal beach behind a breakwater, *Zeitschrift fur Geomorphologie Supplement Issue*, vol. 52, p. 167-177.
- ORFORD, J. D. & WRIGHT, P., (1978), What's in a name? — Descriptive or genetic implications of 'ridge and runnel' topography, *Marine Geology*, vol. 28, n°1, p.1-8.
- OSPAR COMMISSION, (2009), *Assessment of the impact of coastal defence structures*. London, Ospar Commission. 31p.
- PASKOFF, R. & PRAT, M.-C., (2004), *Le réensablement de la plage de Châtelailon*. Rapport d'atelier de terrain, EUCC-France, Châtelailon. 2 p.
- PAXION, K. & COHEN, O., (2002), La baie de Wissant: cent ans d'évolution en images, *Mappemonde*, vol. 67, n°3, p. 24-27.
- PERROW, M. R. & DAVY, A. J., (2002), *Handbook of Ecological Restoration*, Cambridge University Press, 632 p.
- PETERSON, C. H. & BISHOP, M. J., (2005), Assessing the Environmental Impacts of Beach Nourishment, *BioScience*, vol. 55, n°10, p. 887-896.
- PIERRE, G., (2006), Processes and rate of retreat of the clay and sandstone sea cliffs of the northern Boulonnais (France), *Geomorphology*, vol. 73, n°1, p. 64-77.
- PILKEY, O. H. & CLAYTON, T., (1987), Beach replenishment : the national solution ? Dans : *Proceedings of Coastal zone '87*, Seattle, USA, p. 1408-1419.

- PILKEY, O. H. & CLAYTON, T. D., (1989), Summary of Beach Replenishment Experience on U.S. East Coast Barrier Islands, *Journal of Coastal Research*, vol. 5, n°1, p.147-159.
- PIN, X., NAU, F. & GARCIN, J.-L., (2007), *Mise hors d'eau du polder des waterings dans le Nord et le Pas-de-Calais*. Rapport public. Conseil général des ponts et chaussées. 79p.
- PRUSZAK, Z., (2004), Polish coast-two cases of human impact, *Baltica*, vol. 17, n°1, p. 34–40.
- PSUTY, N. P. & MOREIRA, M. E. S., (1992), Characteristics and longevity of beach nourishment at Praia da Rocha, Portugal, *Journal of Coastal Research*, vol. 8, n°3, p. 660–676.
- PUPIENIS, D., JARMALAVICIUS, D., ŽILINSKAS, G. & FEDOROVIC, J., (2014), Beach nourishment experiment in Palanga, Lithuania, *Journal of Coastal Research Special Issue*, n°70, p. 490-495.
- PUPIER-DAUCHEZ, S., (2002), *Le rechargement sédimentaire: de la défense des côtes à l'aménagement du littoral: Analyse des pratiques sur la côte atlantique française*. Thèse de Doctorat. Université de Bretagne occidentale, Brest. 510p.
- PUPIER-DAUCHEZ, S., (2008), Le rechargement sédimentaire des plages charentaises et vendéennes : vers une gestion globale du littoral? Dans: *Actes du Colloque international pluridisciplinaire "Le littoral : subir, dire, agir"*, Lille, France.
- RAHMSTORF, S., FOSTER, G. & CAZENAVE, A., (2012), Comparing climate projections to observations up to 2011, *Environmental Research Letters*, vol. 7, n°4, 5p.
- RAKOCINSKI, C. F., HEARD, R. W., LECROY, S. E., MCELLELAND, J. A. & SIMONS, T., (1996), Responses by macrobenthic assemblages to extensive beach restoration at Perdido Key, Florida, USA, *Journal of Coastal Research*, vol. 12, n°1, p. 326–353.
- RAMANA MURTHY, M. V., MANI, J. S. & SUBRAMANIAN, B. R., (2008), Evolution and Performance of Beach Fill at Ennore Seaport, Southeast Coast of India, *Journal of Coastal Research*, vol. 24, n°1, p. 232-243.
- RAYNAL, O., CERTAIN, R., BRUNEL, C., ALEMAN, N., ROBIN, N., GUERINEL, B. & MONTEL, L., (2015), *LITTOSIS - Analyse volumétrique et granulométrique du prisme sableux littoral du Languedoc-Roussillon*, Rapport final LITTOSIS, 46 p.
- RAYNAL, O., CERTAIN, R. & GUERINEL, B., (2011), *Les pratiques de gestion des sédiments dans le Languedoc-Roussillon*, Rapport de tâche A1 du Plan de gestion des sédiments du Languedoc-Roussillon, DREAL LR & UPVD, 49p.
- RAYNAL, O., CERTAIN, R. & GUERINEL, B., (2013), *Elaboration des éléments sédimentologiques de référence du PLGSLR : évaluation du bilan sédimentaire et proposition de gestion des sédiments par cellule sédimentaire*, Rapport de tâche C du Plan de Gestion des Sédiments du Languedoc-Roussillon, DREAL LR & UPVD, 56 p.
- REICHMÜTH, B., (2003), *Contribution à la connaissance de la morphodynamique des plages à barres intertidales: approche expérimentale*, Côte d'Opale, Nord de la France. Thèse de Doctorat. Université du Littoral Côte d'Opale, Wimereux. 247p.
- REICHMÜTH, B. & ANTHONY, E. J., (2002), The variability of ridge and runnel beach morphology: examples from northern France, *Journal of Coastal Research Special Issue*, n°36, p. 612–621.
- REICHMÜTH, B. & ANTHONY, E. J., (2007), Tidal influence on the intertidal bar morphology of two contrasting macrotidal beaches, *Geomorphology*, vol. 90, n°1–2, p. 101-114.

- REICHMÜTH, B. & ANTHONY, E. J., (2008a), Dynamics of intertidal drainage channels on a multi-barred macrotidal beach, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 33, n°1, p. 142-151.
- REICHMÜTH, B. & ANTHONY, E. J., (2008b), Seasonal-scale morphological and dynamic characteristics of multiple intertidal bars, *Zeitschrift Für Geomorphologie Supplementary Issues*, vol. 52, n°3, p. 79-90.
- REY-VALETTE, H., FRAYSSE, N., RICHARD, A. & CARBONNEL, P., (2013), Perception des plages et des politiques de recharge: réflexions à partir du cas du golfe d'Aigues Mortes (Hérault/Gard), *Espace populations sociétés. Space populations societies*, n°2013/1-2, p. 177-192.
- ROELAND, H. & PIET, R., (1995), Dynamic preservation of the coastline in the Netherlands, *Journal of Coastal Conservation*, vol. 1, n°1, p. 17-28.
- ROELSE, P., (1990), Beach and dune nourishment in the Netherland. Dans : *Proceedings of the 31st International Conference on Coastal Engineering*, Delft, The Netherlands, vol. 22, p. 1984-1997.
- RUZ, M.-H. & ANTHONY, E., (2008), Sand trapping by brushwood fences on a beach-foredune contact: the primacy of the local sediment budget, *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementary Issues*, vol. 52, p. 179-194.
- RUZ, M.-H., ANTHONY, E. J. & FAUCON, L., (2005), Coastal Dune Management on a Shoreline Subject to Strong Human Pressure: The Dunkirk Area, Northern France. Dans : *Proceedings 'Dunes and Estuaries 2005' - International Conference on Nature Restoration. Practices in European Coastal Habitats*, HERRIER J.-L., MEES J., SALMAN A. , SEYS J., VAN NIEUWENHUYSE H. ET DOBBELAERE I. (Eds), Koksijde, Belgium, p. 441-449.
- RUZ, M.-H., HEQUETTE, A., MARIN, D., SIPKA, V., CRAPOULET, A. & CARTIER, A., (2017), Development of an incipient foredune field along a prograding macrotidal shoreline, northern France, *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, vol. 23, n°1, p. 37-50.
- RUZ, M.-H., HEQUETTE, A. & MASPATAUD, A., (2009), Identifying forcing conditions responsible for foredune erosion on the northern coast of France, *Journal of Coastal Research Special Issue*, n°56, p. 356-360.
- RUZ, M.-H., MARIN, D. & SIPKA, V., (2016), Evolution du platier d'Oye du XIXième siècle à nos jours. Dans : *Le littoral du Nord-Pas-de-Calais : Dunkerque (Nord) et Platier d'Oye (Pas de Calais)*. Présentation. Atelier EUCC-France, Dunkerque.
- RUZ, M.-H. & MEUR-FEREC, C., (2004), Influence of high water levels on aeolian sand transport: upper beach/dune evolution on a macrotidal coast, Wissant Bay, northern France, *Geomorphology*, vol. 60, n°1, p. 73-87.
- SALMAN, A., LOMBARDO, S. & DOODY, P., (2004), *Living with coastal erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability*, EuroSION project reports. 54p.
- SANCHEZ, J. C., ESPINAL, J. C. & MORAN, D., (2011), The hydrodynamic response of beach nourishment in the Cancun Beach, Quintana Roo, México. Dans : *Coastal Processes II*, BENASSAL, G., BREBBIA, C.A., & RODRIGUEZ, G.R. (Eds), p. 215-226.
- SANCHEZ-BADORREY, E., LOSADA, M. A. & RODERO, J., (2008), Sediment transport patterns in front of reflective structures under wind wave-dominated conditions, *Coastal Engineering*, vol. 55, n°7, p. 685-700.
- SAVAGE, R. P. & WOODHOUSE JR, W. W., (1969), Creation and stabilization of coastal barrier dune. Dans : *Proceedings of the 11th International Conference on Coastal Engineering*, n°11, p. 671-700.

SCOTT, T., MASSELINK, G., O'HARE, T., SAULTER, A., POATE, T., RUSSELL, P., DAVIDSON, M. & CONLEY, D., (2016), The extreme 2013/2014 winter storms: Beach recovery along the southwest coast of England, *Marine Geology*, vol. 382, p. 224-241.

SEDRATI, M., (2006), *Morphodynamique transversale et longitudinale de plages à barres intertidales en domaine macrotidal et en conditions de forte agitation : Baie de Wissant, nord de la France*. Thèse de Doctorat. Université du Littoral Côte d'Opale, Wimereux. 197p.

SEDRATI, M. & ANTHONY, E. J., (2007), Storm-generated morphological change and longshore sand transport in the intertidal zone of a multi-barred macrotidal beach, *Marine Geology*, vol. 244, n°1, p. 209-229.

SERVICE HYDROGRAPHIQUE ET OCEANOGRAPHIQUE DE LA MARINE, (2012), *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique)*, Rapport n° X005HYI, 160p.

SERVICE HYDROGRAPHIQUE ET OCEANOGRAPHIQUE DE LA MARINE, (2017), *Références altimétriques maritimes (RAM) - Références verticales*, Rapport n° X027HYI, 116 p.

SEYMOUR, R., GUZA, R. T., O'REILLY, W. & ELGAR, S., (2005), Rapid erosion of a small southern California beach fill, *Coastal Engineering*, vol. 52, n°2, p. 151-158.

SHIBUTANI, Y., MATSUBARA, Y. & KUROIWA, M., (2013), Effect of the coastal conservation due to beach nourishment of Totori sand dune coast. Dans : *Proceedings of the 7th International Conference on Asian and Pacific Coasts*, Bali, Indonesia, p. 79-84.

SILVEIRA, T. M., SANTOS, C. F. & ANDRADE, F., (2013), Beneficial use of dredged sand for beach nourishment and coastal landform enhancement-the case study of Tria, Portugal, *Journal of Coastal Conservation*, vol. 17, n°4, p. 825-832.

SIPKA, V., (1998), *Les plages macrotidales du nord pas de calais contexte environnemental et caractérisation morphodynamique*. Thèse de Doctorat. Université du Littoral Côte d'Opale. 207p.

SIPKA, V. & ANTHONY, E. J., (1999), Morphology and Hydrodynamics of a Macrotidal Ridge and Runnel Beach Under Modal Low Wave Conditions, *Journal de Recherche Océanographique*, n°24, p. 25-31.

SOGREAH, (2009), *Etude hydro-sédimentaire des Golfes de Lerins*. Rapport final.

SOMME, J., (1975), *Les plaines du Nord de la France et leur bordure. Etude géomorphologique*, Thèse de Doctorat. Université de Paris I, Paris. 810p.

SPENCER, T., BROOKS, S. M., EVANS, B. R., TEMPEST, J. A. & MÖLLER, I., (2015), Southern North Sea storm surge event of 5 December 2013: Water levels, waves and coastal impacts, *Earth-Science Reviews*, vol. 146, p. 120-145.

SPEYBROECK, J., BONTE, D., COURTENS, W., GHESKIERE, T., GROOTAERT, P., MAELFAIT, J.-P., MATHYS, M., PROVOOST, S., SABBE, K., STIENEN E. W. M., VAN LANCKER, V., VINCX, M. & DEGRAER, S., (2006), Beach nourishment: an ecologically sound coastal defence alternative? A review, *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, vol. 16, n°4, p. 419-435.

SPODAR, A., HEQUETTE, A., RUZ, M.-H., CARTIER, A., GREGOIRE, P., SIPKA, V. & FORAIN, N., (2017) [sous presse], Evolution of a beach nourishment project using dredged sand from navigation channel, Dunkirk, northern France, *Journal of Coastal Conservation*.

STAUBLE, A. V. & HOEL, J., (1986), *Guidelines for beach restoration projects : Part II-Engineering*, Report, Florida Sea Grant College, 100 p.

- STAUBLE, D. K., (2005), A review of the role of grain size in beach nourishment projects. Dans : *Proceedings of the National Conference on Beach Preservation Technology 2004, Destin, USA*
- STEPANIAN, A., (2002), *Evolution morphodynamique d'une plage macrotidale à barres : Omaha beach (Normandie)*. Thèse de Doctorat. Université de Caen/Basse-Normandie. 283p.
- STIVE, M. J. F., DE SCHIPPER, M. A., LUIJENDIJK, A. P., AARNINKHOF, S. G., VAN GELDER-MAAS, C., VAN THIEL DE VRIES, J. S., HENRIQUEZ, M., MARX, S. & RANASINGHE, R., (2013), A new alternative to saving our beaches from sea-level rise: The sand engine, *Journal of Coastal Research*, vol. 29, n°5, p. 1001–1008.
- STIVE, M. J. F., NICHOLLS, R. J. & VRIEND, H. J., (1991), Sea-level rise and shore nourishment : a discussion, *Coastal Engineering*, n°16, p. 147-163.
- STRIDE, A. H., (1982), *Offshore tidal sands: processes and deposits*, Routledge, Chapman & Hall, Incorporated, 268 p.
- SYNDICAT MIXTE DE LA COTE D'OPALE, (2003), *Plan Littoral d'Actions pour la Gestion de l'Erosion sur le littoral de la Côte d'Opale*. Région Nord-Pas-de-Calais, Ministère de l'Équipement, MEDD, 185p.
- TAAL, M., MULDER, J., CLEVERINGA, J. & DUNSBERGEN, D., (2006), 15 years of coastal management in the Netherlands: policy, implementation and knowledge framework, The Hague, Rijkswaterstaat, National Institute for Coastal and Marine Management/RIKZ.
- TABORDA, R., MAGALHÃES, F. & ÂNGELO, C., (2005), Evaluation of coastal defence strategies in Portugal. Dans : ZIMMERMANN, C., DEAN, R. G., PENCHEV, V. & VERHAGEN, H. J. (Eds) *Environmentally Friendly Coastal Protection*. NATO Science Series, vol. 53, Springer, p. 255-265.
- TEBRAKE, W. H., (2002), Taming the Waterwolf: Hydraulic Engineering and Water Management in the Netherlands During the Middle Ages, *Technology and Culture*, vol. 43, n°3, p. 475-499.
- TEMMERMAN, S., MEIRE, P., BOUMA, T. J., HERMAN, P. M. J., YSEBAERT, T. & DE VRIEND, H. J., (2013), Ecosystem-based coastal defence in the face of global change, *Nature*, vol. 504, n°7478, p. 79-83.
- THIELER, E. R., PILKEY JR, O. H., YOUNG, R. S., BUSH, D. M. & CHAI, F., (2000), The use of mathematical models to predict beach behavior for US coastal engineering: a critical review, *Journal of Coastal Research*, vol. 16, n°1, p. 48–70.
- THOMPSON, J., (1973), *Ecological effects of offshore dredging and beach nourishment : a review*. U.S. Army, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, 54 p.
- TOMLINSON, R., LAZAROW, N., CASTELLE, B. & MARTY, G., (2006), Impact of beach nourishment on Coolangatta Bay morphology over the period 1995-2005. Dans : *Proceedings of the 15th NSW Coastal Conference*, Coffs Harbour, Australia, p.1-12.
- TRAYNUM, S. B., KANA, T. W. & SIMMS, D. R., (2010), Construction and performance of six template groins at Hunting Island, South Carolina, *Shore & beach*, vol. 78, n°3, p. 21.
- TREMBANIS, A. C. & PILKEY, O. H., (1998), Summary of beach nourishment along the US Gulf of Mexico shoreline, *Journal of Coastal Research*, vol. 14, n°2, p. 407–417.
- TRESCA, A., (2013), *Contrôle souple de la dynamique éolienne le long d'un littoral artificialisé et propositions de gestion: le cas de la façade maritime du Grand Port Maritime de Dunkerque*. Thèse de Doctorat. Université du Littoral Côte d'Opale, Dunkerque. 399p.

- TRESCA, A., RUZ, M.-H. & GREGOIRE, P., (2014), Coastal dune development and sand drifting management along an artificial shoreline: the case of Dunkirk harbour, northern France, *Journal of Coastal Conservation*, vol. 18, n°5, p. 495-504.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, (2002), *Coastal Engineering Manual (CEM)*, U.S. Army Corps of Engineers, Washington. (6 volumes).
- VALLONI, R. & BARSANTI, M., (2007), Artificial Beach Nourishment Projects in Italy. Dans : *Rapport du 38^e Congrès de la CIESM*, vol.38, p.706-706.
- VALVERDE, H. R., TREMBANIS, A. C. & PILKEY, O. H., (1999), Summary of Beach Nourishment Episodes on the U.S. East Coast Barrier Islands, *Journal of Coastal Research*, vol. 15, n°4, p. 1100-1118.
- VAN DEN EYNDE, D., DE SUTTER, R., DE SMET, L., FRANCKEN, F., HAELTERS, J., MAES, F., MALFAIT, E., OZER, J., POLET, H., PONSAR, S., REYNS, J., VAN DER BIEST, K., VANDERPERREN, E., VERWAEST, T., VOLCKAERT, A. & WILLEKENS, M., (2009), *Evaluation of climate change impacts and adaptation responses for marine activities CLIMAR*. Rapport final, Belgian Science Policy Office 2011, 121 p.
- VAN DER SPEK, A. & ELIAS, E., (2013), The effects of nourishments on autonomous coastal behaviour, In : *Coastal Dynamics, Proceedings of the 7th International Conference on Coastal Dynamics*, p. 1753-1763.
- VAN DUIN, M. J. P., WIERSMA, N. R., WALSTRA, D. J. R., VAN RIJN, L. C. & STIVE, M. J. F., (2004), Nourishing the shoreface: observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands, *Coastal Engineering*, vol. 51, n°8-9, p. 813-837.
- VAN KONINGSVELD, M. & MULDER, J. P. M., (2004), Sustainable Coastal Policy Developments in The Netherlands. A Systematic Approach Revealed, *Journal of Coastal Research*, vol. 20, n°2, p. 375-385.
- VAN LEEUWEN, S., DODD, N., CALVETE, D. & FALQUES, A., (2007), Linear evolution of a shoreface nourishment, *Coastal Engineering*, vol. 54, n°5, p. 417-431.
- VAN RIJN, L. C., (2010), *Coastal erosion control based on the concept of sediment cells*. CONSCIENCE, Deltares, the Netherlands. 80p.
- VAN VEEN, J., (1962), *Dredge, drain, reclaim: the art of a nation*, The Hague Martinus Nijhoff, La Haye, 220 p.
- VANDEN EEDE, S., (2013), *Impact of beach nourishment on coastal ecosystems with recommendations for coastal policy in Belgium*. PhD Thesis. Ghent University. 333p.
- VANHEE, S., (2002), *Processus de transport éolien à l'interface plage macrotidale-dune bordière : le cas des plages à barres intertidales, Côte d'Opale, nord de la France*. Thèse de Doctorat. Université du Littoral Côte d'Opale, Wimereux. 223p.
- VANROYE, C., (2008), La protection du littoral du Golfe d'Aigues-Mortes. Dans : *X^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier-Génie*, Sophia Antipolis, Editions Paralia, p. 14-16.
- VANROYE, C. & BARTHAZ, B., (2010), Monitoring d'un rechargement massif: la plage de Carnon (Languedoc-Roussillon), Dans : *XI^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil*, Sable d'Olonne, Editions Paralia, p. 433-438.
- VASSEUR, B. & HEQUETTE, A., (2000), Storm surges and erosion of coastal dunes between 1957 and 1988 near Dunkerque (France), southwestern North Sea, *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 175, n°1, p. 99-107.

- VERA-CRUZ, D., (1972), Artificial nourishment of Copacabana beach, Dans : *Proceedings of 13th Conference on Coastal Engineering*, Vancouver, Canada, n°13, p. 1451-1463.
- VERHAGEN, H. J., (1993), Method for artificial beach nourishment. Dans : *Proceedings of 23rd Conference on Coastal Engineering*, Venice, Italy, n°23, p. 2474–2485.
- VERHAGEN, H. J., (1996), Analysis of beach nourishment schemes, *Journal of Coastal Research*, vol. 12, n°1, p. 179–185.
- VERWAEST, T., DEWOLF, P., MERTENS, T., MOSTAERT, F. & PIRLET, H., (2015), Safety against flooding. Dans : *Compendium for Coast and Sea 2015: An integrated knowledge document about the socio economic, environmental and institutional aspects of the coast and sea in Flanders and Belgium*, Ostend, Belgium, p. 211-222.
- VICAIRE, O., (1991), *Dynamique hydro-sédimentaire en Mer du Nord méridionale : du Cap Blanc-Nez à la frontière belge*. Thèse de Doctorat. Université de Lille 1, Lille. 264p.
- VIKOLAINEN, V., FLIKWEERT, J., BRESSERS, H. & LULOFS, K., (2017), Governance context for coastal innovations in England: The case of Sandscaping in North Norfolk, *Ocean & Coastal Management*, vol. 145, p. 82-93.
- VLASBLOM, W., (2003), Introduction to dredging equipment. Dans : *Dredging equipment and technology*. Delft University of Technology. 27p.
- WAHL, T., HAIGH, I. D., NICHOLLS, R. J., ARNS, A., DANGENDORF, S., HINKEL, J. & SLANGEN, A. B. A., (2017), Understanding extreme sea levels for broad-scale coastal impact and adaptation analysis, *Nature Communications*, vol. 8, p.1-12.
- WALKER, H. J., (2012), *Artificial Structures and Shorelines*, Springer Science & Business Media, 700 p.
- WANG, P., EBERSOLE, B. A. & SMITH, E. R., (2003), Beach-Profile Evolution under Spilling and Plunging Breakers, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 129, n°1, p. 41-46.
- WENTWORTH, C. K., (1922), A scale of grade and class terms for clastic sediments, *The Journal of Geology*, vol. 30, n°5, p. 377–392.
- WIEGEL, R. L., (1994), Ocean beach nourishment on the USA Pacific Coast, *Shore & Beach*, vol. 62, n°1, p.11-36.
- WU, Y., TING, M., SEAGER, R., HUANG, H. P. & CANE, M. A., (2011), Changes in storm tracks and energy transports in a warmer climate simulated by the GFDL CM2.1 model, *Climate Dynamics*, vol. 37, n°1, p. 53-72.
- YIN, J. H., (2005), A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate, *Geophysical Research Letters*, vol. 32, n°18, p. 1-4.
- YOSHIDA, J., UDO, K., TAKEDA, Y. & MANO, A., (2014), Framework for proper beach nourishment as an adaptation to beach erosion due to sea level rise, *Journal of Coastal Research*, vol. 70, p. 467-472.
- ZAWADZKA, E., (1997), Coastal zone dynamics during artificial nourishment. Dans : *Proceedings of 25th Conference on Coastal Engineering*, Orlando, USA, n°25, p. 2955–2968.

Liste des figures et tableaux

Liste des figures

Figure I.1. Classification des rechargements selon leur position sur le profil de plage (d'après Van Rijn, 2010).....	10
Figure I.2 Redistribution des sédiments par les agents hydrodynamiques après un rechargement subtidal (d'après Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, 1998).....	11
Figure I.3 Classification des rechargements (d'après de Schipper, 2014).....	13
Figure I.4 Exemple d'allure de pente du profil rechargé par rapport au profil initial selon différentes granulométries (d'après Dean, 1991).....	17
Figure I.5 Epis en limite de rechargement, Oregon Inlet, Caroline du Nord (U.S. Army Corps of Engineers, 2002).....	23
Figure I.6 Schéma des différents organismes et de leurs activités le long du profil de plage potentiellement impactés par une opération de rechargement sédimentaire (Speybroeck <i>et al.</i> , 2006).....	25
Figure II.1 (A) Localisation des rechargements de plages en Chine (d'après Kuang <i>et al.</i> , 2011b) et (B) évolution des volumes au fil des années (Cai <i>et al.</i> , 2010).....	29
Figure II.2 Estimation des volumes utilisés pour les rechargements de plage aux Etats-Unis en 2006 et projection (Campbell & Benedet, 2006).....	31
Figure II.3 Les types de défenses côtières en Belgique et Pays-Bas (OSPAR, 2009).....	34
Figure II.4. Evolution des volumes annuels de rechargements de plage (en jaune) et d'avant plage (en bleu) de 1991 à 2012 (Stive <i>et al.</i> , 2013).....	36
Figure II.5 A) Sand Motor en juillet 2011 (source : Joop van Houdt / Rijkswaterstaat) et B) Sand Motor en août 2016 (source : http://www.dezandmotor.nl/).....	37
Figure II.6 : Méthodes douces et méthodes rigides le long de la côte belge (Verwaest <i>et al.</i> , 2015).....	38
Figure II.7 Evolution des volumes annuels de sable pour les rechargements sédimentaires en Belgique entre 1992 et 2014 (Verwaest <i>et al.</i> , 2015).....	39
Figure II.8 Différents éléments du Master Plan (Mertens <i>et al.</i> , 2009).....	39
Figure II.9 Aménagements réalisés à Oostende avec rechargement de la plage et rénovation du front de mer avec la création d'un ouvrage atténuateur de houles (http://afdelingkust.be).....	41
Figure III.1 Carte de la localisation des rechargements sédimentaires mis en œuvre jusqu'en 2002 ou en projet sur le territoire de la France métropolitaine (Pupier-Dauchez, 2002).....	44
Figure III.2 Inventaire des opérations de rechargements de plage réalisé dans le cadre du projet SAFE (Hanson <i>et al.</i> , 2002).....	45
Figure III.3. Carte communes ayant mis en œuvre des rechargements sédimentaires en France métropolitaine et grands secteurs géographiques (A – Façade Manche- mer du Nord, B – nord de la façade atlantique, C - sud de la façade atlantique et D façade méditerranéenne).....	49
Figure III.4 Volumes par départements, régions et façades maritimes jusqu'en 2002 (A) et de 2003 à 2016 (B).....	50
Figure III.5 Localisation des rechargements sédimentaires sur la façade Manche/Mer du Nord.....	51

Figure III.6 Dune d’Aval à Wissant, A) en septembre 2016 (source : Mylène Ruz) – B) en janvier 2017 (source : Drone Littoral – Adrien Cartier)	52
Figure III.7 Localisation des rechargements sédimentaires en Bretagne et Loire-Atlantique	54
Figure III.8 Localisation des rechargements sédimentaires en Nouvelle-Aquitaine.....	57
Figure III.9 Localisation des rechargements sédimentaires sur la façade méditerranéenne.....	59
Figure III.10 Date des premiers rechargements par départements.....	61
Figure III.11 Localisation des rechargements sédimentaires en France métropolitaine.....	63
Figure III.12 Bilan des volumes par départements et par périodes.....	64
Figure IV.1 Localisation et cartographie du littoral de la Côte d’Opale.....	70
Figure IV.2 Photographie du système barres-bâches à Malo-terminus (secteur situé à 3 km à l’est de l’un des sites de suivis) (<i>Photo : Drone Littoral</i>)	71
Figure IV.3 Rose des vents au large enregistrées à la station Sandettie (2012-2017)	72
Figure IV.4 Rose des vents saisonnières sur la période 1997-2007 avec un pas de temps de 10 min (Données VLIZ, Westhinder, d’après Guerber <i>et al.</i> , 2008)	73
Figure IV.5 Rose des vents trihoraires à Dunkerque sur la période 1956-2013 (données Météo-France). Le trait rouge correspond à l’orientation du littoral à Dunkerque.....	73
Figure IV.6 Rose des houles au large (bouée Westhinder 1996-2016).....	74
Figure IV.7 Carte des courants de surface au cours de la marée descendante (à gauche) et montante (à droite) (Augris <i>et al.</i> , 1990).....	76
Figure IV.8 Directions des transits sédimentaires et localisation des bancs subtidiaux entre la Manche et la mer du Nord (Houbolt, 1968; McCave, 1971; Belderson <i>et al.</i> , 1982; Stride, 1982; Dewez <i>et al.</i> , 1989; Maspataud, 2011).....	77
Figure IV.9 Façade portuaire de Dunkerque et localisation des deux sites de suivis, celui à l’avant-port Ouest face à la digue du Ruytingen (A) et celui à Malo-les-Bains face à la digue des Alliés (B)	78
Figure IV.10 Photographies prises avant (1970), pendant (1984) et après (2004) le creusement du canal des dunes (sources : archives du GPMD) (Tresca, 2013)	78
Figure IV.11 Peinture représentant la ville fortifiée de Dunkerque ainsi que les deux jetées du port au XVII ^{ème} siècle (source : musée portuaire de Dunkerque) (en haut) et carte du littoral et de l’arrière-pays en 1700 (source : archives municipales de Dunkerque) (en bas).....	79
Figure IV.12 Superposition du trait de côte actuel (de 2009) sur la carte d’Etat-Major du XIX ^{ème} siècle (d’après Tresca (2013)).....	80
Figure IV.13 Cartographie des ouvrages et éléments caractéristiques du site de Malo-les-Bains (ortho photo de 2009)	82
Figure IV.14 Photographies de la rupture de la digue, de la submersion et des inondations avec en A) la rue Paul Dufour inondée, B) un aperçu de la submersion marine, C) la brèche ouest et en D) la brèche est	83
Figure IV.15 A) Carte marine du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) et carte de l’Institut Géographique National (IGN) (source : <i>www.geoportail.fr</i>) – B) Profil topobathymétrique du site de Malo-les-Bains (profil extrait d’un MNT réalisé par GEOXYZ en 2011)	84

Figure IV.16 Photographie prise le 22/03/2015 de bourrelets sableux modelés pour protéger des hauts niveaux d'eau les cabines de plage situées en arrière pendant les grandes marées (<i>photo : Alexandra Spodar</i>)	85
Figure IV.17 Etat initial du site en 1949 avant les travaux de l'avant-port Ouest (A), en 1974 pendant la construction d'une plateforme dans la partie Est de l'avant-port Ouest (B) et en 1976 après les travaux de construction de la digue du Ruytingen et de la jetée du Clipon (C) (source des photos aériennes : IGN).....	86
Figure IV.18 Carte marine du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) et carte de l'Institut Géographique National (IGN) (source : <i>www.geoportail.fr</i>) de l'avant-port Ouest (A) et levé topo-bathymétrique de janvier 2012 avant les travaux de rechargement (B)	87
Figure IV.19 Cartographie des ouvrages et éléments caractéristiques du site à l'avant-port Ouest (orthophotographie de 2009).....	87
Figure V.1 Principe de fonctionnement pour l'acquisition de mesures topographiques à l'aide d'un DGPS <i>Leica TPS Syst1200</i> (d'après Crapoulet, 2015)	90
Figure V.2 Localisation des profils sur le site de l'avant-port Ouest (A) et à Malo-les-Bains (B)	91
Figure V.3 Système d'installation du DGPS sur un quad	92
Figure V.4 Superposition des emprises des levés topographiques de l'estran (A) et emprise commune sélectionnée et secteurs d'analyse (B)	93
Figure V.5 Aperçu des deux emprises de travail : l'emprise « rechargement » (levés de mars et octobre 2014) et l'emprise « globale » (levés à partir de 2015) (A) et aperçu des cinq secteurs (B).....	94
Figure V.6 Emprises de l'ensemble des levés bathymétriques (A), aperçu du choix de l'emprise pour le calcul des variations volumétriques (B) et de celle pour le calcul de l'évolution globale du site (C)	95
Figure V.7 Exemple d'interpolation de points pour le traçage d'un profil (profil P4 mesuré sur le site de Malo-les-Bains le 20 février 2015) avec en A) le semis de points bruts mesurés et en B) le profil tracé par <i>Profiler 3.2</i>	96
Figure V.8 Localisation de la bouée Sandettie	98
Figure V.9 Localisation du marégraphe et de la station météorologique du port Est de Dunkerque (fond de carte ©IGN source des photos : https://www.infoclimat.fr/ et http://refmar.shom.fr/)	99
Figure V.10 Photographie d'un ADCP enfoui dans le sable (A) et schéma de l'appareil (d'après Maspataud, 2011)	100
Figure V.11 Photographie d'un MIDAS Valeport enfoui dans le sable (A) et schéma de l'appareil (d'après (Cartier, 2011)).....	101
Figure V.12 Photographie d'un S4 fixé sur une structure (A) et schéma de l'appareil (B) (d'après Maspataud, 2011).....	101
Figure V.13 Plan de déploiement des appareils avec la localisation des appareils sur une ortho photo de 2013.....	102
Figure V.14 Plan de déploiement des appareils avec en A) localisation des appareils sur une ortho photo de 2013, B) localisation des appareils sur MNT topo-bathymétrique effectué par le LOG (partie topographie) et Ingeo (partie bathymétrie) et C) localisation des appareils sur un profil topo-bathymétrique de la plage et de l'avant-plage.....	103
Figure V.15 Plan d'échantillon face sur le site de l'avant-port Ouest (A) et à Malo-les-Bains (B).....	105

Figure V.16 Granulomètre laser <i>Beckman Coulter LS 230</i> (A) et exemple d'une courbe granulométrique (B)	105
Figure VI.1 Cartographie de l'aléa de submersion marine modélisé pour un événement de tempête centennal en cas de rupture de digue à l'horizon 2100 (DHI, 2011).....	110
Figure VI.2 Plans masses proposés par DHI (DHI, 2012)	111
Figure VI.3 Modélisation de l'évolution du rechargement 10 ans après sa mise en œuvre sans rechargement d'entretien (DHI, 2012)	113
Figure VI.4 – A) Localisation des zones potentielles de prélèvement à l'entrée de l'avant-port-Est et cartographie de la granulométrie des échantillons dans la zone de prélèvement et sur le site de rechargement, B) Synthèse des percentiles des 4 zones potentielles d'emprunt et du site d'accueil.....	114
Figure VI.5 Travaux de rechargement de plage en janvier 2012 (Etape 1/2) (source : Antoine Tresca) – A) Dragage connectée aux conduites de refoulement – B) Aperçu du régalaage du sable sur la plage par les engins de terrassement.....	115
Figure VI.6 Evolution du site après les deux étapes de rechargements : A) Etat initial en juin 2011 – B) Après la 1 ^{ière} étape en janvier 2012 – C) Après la 2 ^{ième} étape en mars 2014 – D) Evolution de la topographie de la plage au niveau du profil P4 de juin à mars 2014. Avec PMVE : les pleines mers de vives-eaux - PMME : les pleines mers de mortes-eaux -BMME : les basses mers de mortes-eaux et BMVE : les basses mers de vives-eaux.....	116
Figure VI.7 : MNT différentiel entre les différentes étapes des travaux – A) Etape 1 : entre juin 2011 et janvier 2012 – B) Etape 2 : entre février 2014 et mars 2014	117
Figure VI.8 Etat du site avant (A) et après (B) la deuxième étape des travaux de rechargement sédimentaire (source : A. cartier).....	118
Figure VI.9 Variations d'altitude entre juin 2011 et mars 2014 suite aux deux opérations de rechargements de plage.....	118
Figure VI.10 Rose des vents au large (station Sandettie) de mars 2014 à mai 2017 (A) et pendant les trois périodes d'étude.....	120
Figure VI.11 Fréquence par périodes des vents au large selon différentes catégories de vitesse	121
Figure VI.12 Fréquences mensuelles des vents au large ≥ 8 m/s et ≥ 16 m/s	121
Figure VI.13 Rose des vents à Dunkerque A) sur la période globale d'étude 03/2014-05/2017, B-C-D) selon les trois sous-périodes	123
Figure VI.14 Distribution des vitesses de vents à la côte par années (A) et distribution par secteurs d'origine (B)	123
Figure VI.15 Distribution des hauteurs de vagues au large enregistrées à la station Sandettie pour les trois périodes de suivi et variabilité des moyennes mensuelles de hauteurs de vagues et des valeurs maximales mensuelles enregistrées	125
Figure VI.16 : Fréquence mensuelles des lacunes dans les séries de données marégraphiques de Dunkerque de mars 2014 à mai 2017	126
Figure VI.17 Fréquence et nombre d'observations de hauts niveaux d'eaux par catégories de hauteurs par périodes	129

Figure VI.18 Hauteurs des niveaux d'eau superposés à un profil topographique transversal (P4) dans la partie centrale du rechargement.....	130
Figure VI.19 Conditions météo-marines enregistrées entre mars 2014 et mai 2017 : A) vitesses du vent enregistrées au large à la station Sandettie, B) hauteurs significatives des houles enregistrées au large à la station Sandettie, C) niveaux d'eau mesurés à Dunkerque et D) puissances des vagues calculées à partir des données de houles enregistrées à la station Sandettie.....	131
Figure VI.20 Caractéristiques météorologiques et marégraphiques enregistrées au cours de la campagne hydrodynamique à Dunkerque du 10 au 17 février 2017 avec A) les vitesses et directions de vent enregistrées à Dunkerque, B) les niveaux d'eau théoriques et observés et C) les surcotes et décotes associées.....	134
Figure VI.21 Conditions météorologiques à Dunkerque (A), hauteurs significatives des vagues au large et à la côte (B), périodes pic de la houle au large et à la côte (C) et niveau d'eau à la côte (D). Voir Chapitre IV Figure V.14 pour la localisation des appareils.....	136
Figure VI.22 Série temporelle des hauteurs significatives de vagues en bas de plage dans le secteur ouest (Valeport Ouest) et est (Valeport Est) (A) et comparaisons des hauteurs de vagues entre les deux secteurs (B).....	137
Figure VI.23 Rose des courants moyens enregistrés à 0,2 m au-dessus du fond pendant A) toute la campagne de mesure (10 au 17 février 2016) et B) lors du coup de vent de secteur NE des 14 et 15 février.....	138
Figure VI.24 Synthèse des paramètres courantologiques mesurés pendant la campagne du 10 au 17 février 2016 : courants moyens dans les petits fonds et le bas de plage(A), courants longitudinaux et transversaux en bas de plage pour le Valeport ouest (B) et le Valeport est (C) et vitesses de cisaillements dans les petits fonds (ADCP) et le bas de l'estran (Valeport Ouest) (D).....	139
Figure VI.25 Evolution des profils transversaux de la partie supra et intertidale au cours de la première année du rechargement de plage (mars 2014-février 2015).....	144
Figure VI.26 Variations volumétriques nettes (A) et totales (B) par profils et standardisation par le nombre de jours entre deux périodes (C et D) au cours de la première année du rechargement de plage.....	145
Figure VI.27 Evolution de la pente de la partie active de l'estran le long des neuf profils entre mars 2014 et février 2015.....	145
Figure VI.28 Variations d'altitude et roses des vents à la côte au cours de la première année du rechargement pour les périodes comprises entre mars et septembre 2014 (A) et entre octobre 2014 et février 2015 (B) et puissances de vagues au large combinées aux marées hautes à la côte dont les niveaux d'eau sont $\geq 6,05$ m CM (C) ou compris entre 5,00 m et 6,05 m CM (D).....	148
Figure VI.29 Caractérisation du grain moyen (A), de l'indice de tri (B) et de l'indice d'asymétrie (C) sur le secteur du rechargement en mars 2015.....	150
Figure VI.30 Variations volumétriques nettes par jours (A) et sur toute la sous-période (B) et variations volumétriques totales par jours (C) et sur toute la sous-période (D) au cours de la deuxième année du rechargement (2015-2016).....	152
Figure VI.31 Evolution des profils transversaux de la partie supra et intertidale entre mars et mi-novembre 2015.....	154
Figure VI.32 Evolution des profils transversaux de la partie supra et intertidale entre mi-novembre 2015 et fin janvier 2016.....	156

Figure VI.33 Bilan de l'évolution des profils au cours de la deuxième année du rechargement.....	158
Figure VI.34 Evolution morphologique à l'issue de la deuxième année de suivi des neuf profils de plage (06/03/2015 – 28/01/2016)	159
Figure VI.35 Evolution de la pente de la partie active de l'estran le long des neuf profils entre mars 2015 et fin janvier 2016	160
Figure VI.36 Variations morphologiques et roses des vents à la côte associées au cours de la deuxième année du rechargement pour les périodes comprises entre mars et mi-septembre 2015 (A) et entre mi-septembre 2015 et mi-février 2016 (B) et puissances de vagues au large combinées aux marées hautes à la côte dont les niveaux d'eau sont \geq à 6,05 m CM (C) ou compris entre 5,00 m et 6,05 m CM (D)	162
Figure VI.37 Caractérisation du grain moyen (A), de l'indice de tri (B) et de l'indice d'asymétrie (C) sur le secteur du rechargement en juin 2016.....	164
Figure VI.38 Variations volumétriques nettes par jours (A) et sur toute la sous-période (B) et variations volumétriques totales par jours (C) et sur toute la sous-période (D) au cours de la troisième année du rechargement (2016-2017)	166
Figure VI.39 Evolution des profils transversaux de la partie supra et intertidale entre fin janvier et mi-novembre 2016	167
Figure VI.40 Evolution des profils transversaux de la partie supra et intertidale entre mi-novembre et mi-décembre 2016.....	169
Figure VI.41 Evolution des profils transversaux de la partie supra et intertidale entre mi-décembre 2016 et mi-février 2017	170
Figure VI.42 Photographies réalisées pendant la tempête Egon à marée haute à 13h35 le 13/01/2017 sur le site de la digue des Alliés (secteur ouest ~P1 et P2)	171
Figure VI.43 Bilan de l'évolution des profils au cours de la troisième année du rechargement entre les deux dates extrêmes, fin janvier 2016 et mi-avril 2017.....	172
Figure VI.44 Evolution morphologique à l'issue de la troisième année de suivi des neuf profils de plage (28/01/2016 – 14/04/2017)	173
Figure VI.45 Variations morphologiques au cours de la troisième (et début de la quatrième) année du rechargement selon deux périodes (mi-février 2016 à mi-novembre 2016 et mi-novembre 2016 à mai 2017), roses des vents à la côte et puissances de vagues associées	175
Figure VI.46 Caractérisation du grain moyen (A), de l'indice de tri (B) et de l'indice d'asymétrie (C) sur le secteur du rechargement en février 2017	177
Figure VI.47 Levé bathymétrique effectué sur le site de Malo-les-Bains en A) Février 2014, B) Février 2016 et C) Janvier 2017	180
Figure VI.48 Evolution morphologique dans la zone subtidale A) sur la période février 2014 (avant-travaux) et février 2016 (deux ans après la mise en œuvre du rechargement) et B) sur la période février 2016 et janvier 2017 (trois ans après la mise en œuvre du rechargement).....	181
Figure VI.49 Localisation des profils P2, P4 et P9 superposés au levé bathymétrique de janvier 2017.....	182
Figure VI.50 Profil P2 extrait de levés bathymétriques effectués en février 2014, février 2016 et janvier 2017 (A) et variations altimétriques associées entre février 2014 et février 2016 (B) et février 2016 et janvier 2017 (C).....	183

Figure VI.51 Profil P4 extrait des levés bathymétriques effectués en février 2016 et janvier 2017 (A) et variations altimétriques associées (B)	184
Figure VI.52 Profil P9 extrait de levés bathymétriques effectués en février 2016 et janvier 2017 (A) et variations altimétriques associées (B)	184
Figure VI.53 Variations volumétriques nette et totales (A) et puissance des vagues moyenne et cumulée (B) entre deux levés topographiques consécutifs.....	186
Figure VI.54 Relation entre les puissances moyennes des vagues et les variations volumétriques nettes (A) et totales (B) et relation entre les puissances cumulées des vagues et les variations volumétriques nettes (C) et totales (D).....	187
Figure VI.55 Relation entre les puissances de vagues moyennes et cumulées de secteur ouest (A, B , C et D) et nord (E, F, G et H) et les variations volumétriques nettes et totales	189
Figure VI.56 Evolution des paramètres granulométriques, grain moyen (A), indice de tri (B) et indice d'asymétrie (C), entre mars 2015 et février 2017	190
Figure VI.57 Bilan général de l'évolution du secteur rechargé entre mars 2014 et mai 2017	192
Figure VI.58 Bilan de l'évolution des profils de plage entre le 21.03.2014 et le 14.04.2017	193
Figure VI.59 Bilan des variations volumétriques par profils entre le 31.03.2014 et le 14.04.2017.....	194
Figure VI.60 Image satellite, prise le 27/09/2015 montrant l'effet de la jetée Est sur les vagues à haute mer. (Source : Google Earth).....	195
Figure VI.61 Evolution morphologique et volumétrique par année sur l'ensemble du site et par secteurs	196
Figure VII.1 Photographies des travaux de rechargement à différentes dates, en mai 2012 (soit 5 mois après le lancement des travaux) (A), en octobre 2012 (soit 10 mois après le lancement des travaux) (B) et en juin 2013 (soit 4 mois après la fin des travaux) (Cartier, 2014).....	197
Figure VII.2 Morphologie du site avant travaux (A) et après les travaux de rechargement en mars 2013 (B) et en mai 2013 (C), MNT différentiel entre janvier 2012 et mars 2013 (D) et entre janvier 2012 et mai 2013 (E)	199
Figure VII.3 MNT différentiel entre janvier 2012 et mars 2014.....	200
Figure VII.4 Rose des vents au large sur la période globale de suivi.....	201
Figure VII.5 Fréquences mensuelles des données de vents horaires au large ≥ 8 m/s et ≥ 16 m/s entre mars 2013 et avril 2017	202
Figure VII.6 Roses des vents au large enregistrés à la station Sandettie par périodes. Le trait en pointillé noir correspond à l'orientation générale du site étudié.....	203
Figure VII.7 Distribution des vents au large par catégories de vitesses (A) et de provenances (B) pendant les cinq périodes de suivi	204
Figure VII.8 Roses des vents à Dunkerque au cours de la période globale de suivi et des sous-périodes d'analyse.....	205
Figure VII.9 Hauteur significative (m) des vagues enregistrées à la station Sandettie (A) et fréquences mensuelles des vagues classées par hauteur (B) entre mars 2013 et avril 2017	207

Figure VII.10 Fréquence de hauteurs de vagues par catégories pour les cinq périodes de suivi du rechargement	207
Figure VII.11 Distribution mensuelle des hauts niveaux d'eau (m CM) par catégories de hauteurs.....	209
Figure VII.12 Puissances des vagues calculées à partir des données de houles enregistrées à la station Sandettie et puissances des vagues coïncidant avec de bas niveaux d'eau < BMME.....	210
Figure VII.13 Vitesses et directions du vent au large enregistrées à la station Sandettie et vitesse de vent à Dunkerque (avant-port Ouest) (A) et niveaux d'eau mesurés dans les petits-fonds (B) entre le 29.03.2013 et le 12.04.2013.....	211
Figure VII.14 Roses des vents enregistrés à Dunkerque (avant-port Ouest) pendant toute la campagne de mesure (A), avant le coup de vent (B), pendant le coup de vent (C) et après le coup de vent (D).....	212
Figure VII.15 Caractéristiques hydrodynamiques pendant la campagne de mesures avec le niveau d'eau dans les petits-fonds (A), les hauteurs significatives au large et à la côte (B), les périodes pic de la houle dans les petits-fonds et en bas de plage (C) et direction de la houle dans les petits-fonds et en bas de plage (D).....	213
Figure VII.16 Comparaison entre les hauteurs significatives enregistrées dans les petits-fonds (S4 n°1) et celles enregistrées en milieu de plage (ADCP)	214
Figure VII.17 Rose des houles enregistrées dans les petits-fonds (S4 n°1) et en bas de plage (S4 n°2) pendant toute la campagne de mesures et pendant le coup de vent.....	215
Figure VII.18 Roses des courants dans les petits-fonds et en bas de plage à différents moments de la campagne de terrain : pendant la période calme en début et fin de campagne de mesures (A) et pendant le coup de vent du 01/04 au 06/04 (B).....	216
Figure VII.19 Synthèse des caractéristiques du courants moyens enregistrées dans les petits-fonds et en bas de plage avec : les hauteurs d'eau dans les petits-fonds (A), les vitesses (B) et directions (C) du courants moyens.....	217
Figure VII.20 Vitesses des courants dans les petits-fonds et en bas de plage sur la composante est-ouest	218
Figure VII.21 Vitesses des courants dans les petits-fonds et en bas de plage sur la composante nord-sud	219
Figure VII.22 Vitesses de cisaillements enregistrées dans les petits fonds et sur le bas de l'estran.....	219
Figure VII.23 Image satellitaire du 11/09/2015 montrant la présence du contre-courant lors de conditions de vents de secteur est-nord-est à nord-est (Source : <i>Google Earth</i>).....	221
Figure VII.24 Levés bathymétriques effectués entre mars 2013 et avril 2017 illustrant l'évolution morphologique du rechargement.....	223
Figure VII.25 Evolution de profils topo-bathymétriques (P2-P4-P6-P8) extraits depuis les MNT entre mars 2013 et avril 2017	224
Figure VII.26 MNT différentiel entre deux dates consécutives de levés bathymétriques au droit de la digue du Ruytingen.....	226
Figure VII.27 MNT différentiel entre deux dates consécutives sur une emprise commune de levés bathymétriques au droit de la digue du Ruytingen.....	227

Figure VII.28 Position des isobathes 0, -1, -2, -3 et -4 m CM en mars 2013, mai 2013, octobre 2013, mars 2014, octobre 2014, avril 2016 et avril 2017	230
Figure VII.29 Variations volumétriques nettes sur l'emprise commune ainsi que sur les secteurs 1, 2 et 3	232
Figure VII.30 Puissance moyenne et cumulée des vagues entre deux levés bathymétriques consécutifs.	232
Figure VII.31 Relations entre les puissances moyennes des vagues et les variations volumétriques nettes (A) et totales (B) et relation entre les puissances cumulées des vagues et les variations volumétriques nettes (C) et totales (D) de la zone subtidale au droit de la digue du Ruytingen.....	234
Figure VII.32 Relations entre les puissances moyennes et cumulées des vagues associées à des vents de secteur nord-est et les variations volumétriques nettes (A et C) et totales (B et D) de la zone subtidale au droit de la digue du Ruytingen.....	235
Figure VII.33 Relations entre les puissances moyennes et cumulées des vagues associées à des vents de secteur ouest et les variations volumétriques nettes (A et C) et totales (B et D) de la zone subtidale au droit de la digue du Ruytingen.....	235
Figure VII.34 Localisation schématique des différents éléments du site	237
Figure VII.35 MNT de l'estran en mars 2014 (A) et avril 2015 (B), MNT différentiel entre les deux dates (C) et MNT différentiel sur une emprise commune (D).....	238
Figure VII.36 Evolution des profils de plage au droit de la digue du Ruytingen entre le 22.02.2012 et le 26.02.2016	240
Figure VII.37 Photographies aériennes du site en juin 2015 (A) et en août 2016 (B).....	240
Figure VII.38 Variations volumétriques par profils entre deux dates de levés (A) et variations volumétriques cumulées par profils (B) au cours de la troisième année.....	241
Figure VII.39 MNT de l'estran en avril 2015 (A) et avril 2016 (B), MNT différentiel entre les deux dates (C) et MNT différentiel sur une emprise commune (D).....	242
Figure VII.40 Evolution des profils de plage au droit de la digue du Ruytingen entre le 26.02.2016 et le 15.02.2017	243
Figure VII.41 Variations volumétriques par profils entre deux dates de levés (A) et variations volumétriques cumulées par profils (B) au cours de la quatrième année.....	244
Figure VII.42 MNT de l'estran en avril 2016 (A) et février 2017 (B), MNT différentiel entre les deux dates (C) et MNT différentiel sur une emprise commune (D).....	245
Figure VII.43 Aperçu des différents types de matériaux présents sur le site	246
Figure VII.44 Cartes de la répartition du grain moyen (A), de l'indice de tri (B) et de l'indice d'asymétrie (C) en avril 2015	247
Figure VII.45 Evolution du grain moyen (A), de l'indice de tri (B) et de l'indice d'asymétrie (C) selon différents niveaux sur l'estran	248
Figure VII.46 Evolution des paramètres granulométriques (grain moyen, indice de tri et indice d'asymétrie) entre avril 2015 et février 2016, et entre février 2016 et février 2017	250
Figure VII.47 Cartes de la répartition du grain moyen (A), de l'indice de tri (B) et de l'indice d'asymétrie (C) en février 2017.....	252

Figure VII.48 Evolution morphologique et volumétrique entre mai 2013 et avril 2017 dans les petits-fonds et le bas de plage sur l'emprise commune.....	253
Figure VII.49 MNT différentiel entre mars 2014 et février 2017.....	254
Figure VII.50 Photographies satellitaires du site entre septembre 2015 et mai 2017 illustrant le développement et la migration vers le sud-est d'une nouvelle flèche sablo-graveleuse (©Google Earth)	255
Figure VII.51 Synthèse des bilans sédimentaires dans la zone intertidale et subtidale.....	256
Figure VIII.1 Synthèse de l'évolution volumétrique et morphologique du rechargement de plage au droit de la digue des Alliés entre mars 2014 et mai 2017	260
Figure VIII.2 Synthèse de l'évolution volumétrique et morphologique du rechargement sédimentaire au droit de la digue du Ruytingen entre mai 2013 et mars 2017.....	261
Figure VIII.3 Evolution volumétrique par année (A) et par période (B) par rapport au volume rechargé	262
Figure VIII.4 Evolution volumétrique par année par rapport au volume rechargé sur le site de la digue du Ruytingen	263
Figure VIII.5 Evolution morphologique d'un profil de plage suite au passage de la tempête Egon pour le cas du rechargement de plage de la digue des Alliés (évolution entre le 6 et 18 janvier 2017) (A) et pour le cas du rechargement d'avant-plage de la digue du Ruytingen (évolution entre le 05/12/2016 et le 01/02/2017) (B).....	267
Figure VIII.6 Recul progressif de la plateforme supratidale au niveau de la jonction entre la digue des Alliées et la jetée de l'Est (Source : Google Earth)	268
Figure VIII.7 Evolution du secteur ouest du rechargement au contact avec la jetée Est entre mars 2014 et mai 2017	269
Figure VIII.8 Aperçu du site lors d'une marée haute le 10/05/2017 (coefficient 82) – Source : Google Earth et rappel de l'évolution morphologique du site entre mars 2014 et avril 2017	270
Figure VIII.9 Concept de cellule littorale avec les différentes sous-zones associées aux différents rythmes de transport sédimentaire.....	271
Figure VIII.10 Variations volumétriques par secteurs au cours des trois ans.....	273
Figure VIII.11 Localisation de la barre sableuse en haut de plage en mai 2017 et profil topographique associé.....	275
Figure VIII.12 Evolution volumétrique estimée d'après la modélisation (courbe noire) et évolution volumétrique calculée à partir des mesures de terrain pour le secteur ouest (courbe orange) et pour l'ensemble du secteur rechargé (courbe bleue).....	277
Figure VIII.13 Schéma de synthèse de l'évolution morphologique et hydrodynamique du site face à la digue des Alliés	279
Figure VIII.14 Schéma de synthèse de l'évolution morphologique du site face à la digue du Ruytingen ...	280
Figure VIII.15 Cartographie révisée en 2017 de l'aléa submersion marine modélisé pour un événement centennal à l'horizon 2100 (source : DREAL Hauts-de-France).....	283
Figure VIII.16 Rechargement de haut de plage pour conforter le secteur de la station d'atterrage du gazoduc.....	286

Figure VIII.17 Aperçu du site avant et après (photo-montage) le rechargement massif face au complexe de terminaux de gaz à Batcon (https://www.royalhaskoningdhv.com)	286
Figure VIII.18 Localisation du platier d'Oye par rapport à l'avant-port Ouest	287
Figure VIII.19 Localisation du quartier du Grand Pavois (Malo-les-Bains) et aperçu du site à marée haute (©Google Earth)	288
Figure VIII.20 Dégâts engendré par la tempête Xaver dans la nuit du 5 au 6 décembre 2013 à proximité du secteur du Grand Pavois (photo : Arnaud Héquette)	288
Figure VIII.21 Aperçu de la dune Dewulf après le passage de la tempête Egon de janvier 2017 (photo : Géodunes)	289
Figure VIII.22 Photographie satellitaire de l'immeuble en front de mer à Zuydcoote (©Google Earth)....	289
Figure VIII.23 Volumes à mettre en œuvre pour les rechargements sédimentaires en Languedoc-Roussillon pour appliquer les différents scénarii en fonction des différents volumes (Raynal <i>et al.</i> , 2013)	292
Figure VIII.24 Cartographie des ressources en matériaux marins en Manche orientale (Augris & Simplet, 2013)	293

Liste des tableaux

Tableau I.1 Avantages/Inconvénients des rechargements de plage et d'avant (MEDDTL, 2010)	12
Tableau I.2 Récapitulatif des valeurs du coefficients A pour différents grains moyens (U.S. Army Corps of Engineers, 2002)	16
Tableau I.3 Influence des tempêtes sur la longévité des rechargements sédimentaires selon l'étude de (Leonard <i>et al.</i> , 1990a)	20
Tableau I.4 Estimation des coûts de différentes mesures de protection du littoral en €/mètre linéaire/an (d'après Van Rijn, 2010)	26
Tableau II.1 Synthèse des pratiques de rechargements en Europe (d'après Hamm <i>et al.</i> , 2002)	31
Tableau II.2. Volume de sables (en Mm ³) (van der Spek & Elias, 2013)	35
Tableau II.3 Tableau récapitulatif des travaux prévus dans le cadre du Master Plan (Mertens <i>et al.</i> , 2009)	40
Tableau III.1 A) Bilan des données concernant les rechargements sédimentaires jusqu'en 2002 en France issues de la thèse de Pupier-Dauchez (2002) - B) Inventaire complété et corrigé des rechargements sédimentaires en France jusqu'en 2002 (en bleu figurent les départements dont les données ont été complétées et/ou corrigées de l'inventaire de Pupier-Dauchez (2002))	46
Tableau III.2 Caractéristiques des rechargements sédimentaires par départements entre 2003 et 2016...	48
Tableau III.3 Récapitulatif des volumes mis en œuvre jusqu'en 2002, sur la période 2003-2016 et des volumes totaux par départements et régions jusqu'en 2016	62
Tableau IV.1 Distribution des hauteurs significatives de vagues enregistrées à la bouée Westhinder (1996-2016)	74

Tableau IV.2 Niveaux marins à Dunkerque calés sur le zéro hydrographique (en Cote Marine (CM)) (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, 2017)	75
Tableau V.1 Récapitulatif des dates des profils sélectionnés pour l'analyse	91
Tableau V.2 Synthèse de dates des grands levés surfaciques effectués sur le site de Malo-les-Bains (A) et de l'avant-port Ouest.....	92
Tableau V.3 Synthèse des dates des levés bathymétriques effectués sur le site de Malo-les-Bains (A) et de l'avant-port Ouest.....	95
Tableau VI.1 Fréquence (%) des hauteurs significatives par période	124
Tableau VI.2 Fréquence des niveaux d'eau observés et théoriques entre mars 2014 et mai 2017.....	127
Tableau VI.3 Fréquence des hauteurs de surcote enregistrées lors des 3 périodes, A) à tout moment de la marée confondu - B) à marée haute uniquement.....	127
Tableau VI.4 Liste des surcotes $\geq 0,75$ m. Avec en rouge les niveaux d'eau observés \geq PHMA.....	128
Tableau VI.5 Fréquence des marées hautes $\geq 6,05$ m CM combinées aux puissances de vagues par catégorie d'intensité A) pour l'ensemble de la période d'étude mars 2014 - mai 2017 et B) par années du rechargement	132
Tableau VI.6 Moyennes des hauteurs significatives des vagues au large et à la côte selon différentes périodes de la campagne hydrodynamique (avec en noir les hauteurs moyennes et en rouge les hauteurs maximales)	135
Tableau VI.7 Récapitulatif des paramètres granulométriques par secteurs.....	149
Tableau VII.1 Fréquences des vents à la côte par catégories de vitesses par périodes d'analyse.....	204
Tableau VII.2 Distribution (en %) par période des enregistrements de vagues $\geq 1,5$ m au large associés aux directions de vents au large	208
Tableau VII.3 Distribution des niveaux d'eaux par périodes de suivi.....	209
Tableau VII.4 Variations volumétriques nettes et totales entre deux dates consécutives de levés bathymétriques (calculs effectués sur une emprise commune).....	231
Tableau VII.5 Moyenne du grain moyen, de l'indice de tri et de l'indice d'asymétrie par secteur de plage en avril 2015	246
Tableau VII.6 Evolution volumétrique par unité de surface en zone subtidale et intertidale.....	256
Tableau VIII.1 Rappel des caractéristiques principales des deux rechargements sédimentaires	259
Tableau VIII.2 Comparaison de l'évolution volumétrique des deux rechargements sédimentaires entre mars 2014 et le début d'année 2017.....	264
Tableau VIII.3 Pertes estimées par la modélisation et pertes calculées à partir des levés de terrain dans le secteur ouest et dans l'ensemble de la zone rechargée.....	277
Tableau 0.1 Impacts sur l'environnement selon les seuils de classification N1 et N2 (d'après Géode, 2016)	352
Tableau 0.2 Seuils concernant les éléments traces (en mg/kg de sédiment sec analysé sur la fraction inférieure à 2 mm)	353

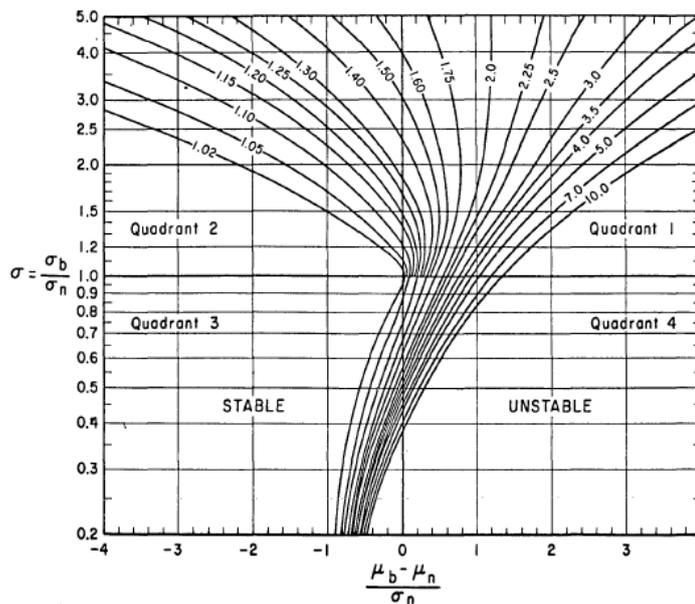
Tableau 0.3 Seuils concernant les polychlorobiphényles (PCB) (en µg/kg de sédiment sec analysé sur la fraction inférieure à 2 mm)	353
Tableau 0.4 Seuils concernant le tributylétain (TBT) (en µg/kg de sédiment sec analysé sur la fraction inférieure à 2 mm)	353
Tableau 0.5 Seuils concernant les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) (en µg/kg de sédiment sec analysé sur la fraction inférieure à 2 mm).....	353

Annexes

1) Méthode de comptabilité granulométrique : exemple de la méthode de James (1975)

Selon la méthode de James (1975), appelée *Adjusted Shore Protection Manual method*, le coefficient d'excédent R_A est obtenu graphiquement en comparant le grain médian et l'indice de tri entre le sédiment d'emprunt et celui du site d'accueil selon les formules de (Folk et Ward, 1974).

Les indices granulométriques ainsi obtenus peuvent alors être reportés sur le graphique ci-dessous ce qui permet de déterminer en fonction des isolignes tracées le coefficient R_A . Un coefficient supérieur à 1 signifie qu'il faudra plus d'une unité de sable d'emprunt pour produire une unité stable de sable sur le site à recharger.



Isolignes du coefficient d'excédent R_A (James, 1975)

De manière générale, le coefficient d'excédent R_A doit se situer entre 1 et 1,05 (U.S. Army Corps of Engineers, 2002). Un important travail de caractérisation des sources de sédiments est donc à effectuer afin de déterminer la source optimale.

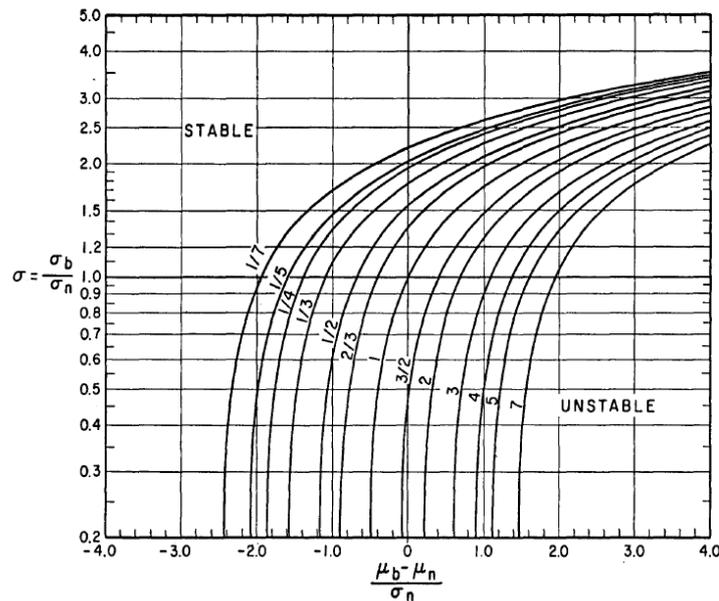
James (1975) a également élaboré un second coefficient afin d'estimer la fréquence des rechargements d'entretien nécessaire. Ce facteur correspond au ratio du taux d'érosion du sable rechargé associé à une granulométrie particulière par rapport au taux d'érosion naturel de la plage R_J selon l'équation :

$$R_J = \exp \left\{ \Delta \left(\frac{\mu_b - \mu_n}{\sigma_n} \right) - \frac{\Delta^2}{2} \left(\frac{\sigma_b^2}{\sigma_n^2} - 1 \right) \right\}$$

Équation 1

avec μ_b et μ_n le grain moyen du sable issu du site de prélèvement et d'accueil respectivement, σ_n et σ_b l'indice de tri du sable issu du site de prélèvement et d'accueil respectivement et le paramètre Δ

une grandeur sans dimension lié à la sélection des processus de tri. Ce facteur peut également être déterminé graphiquement (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).



Dean (1991)

2) Complément sur les pentes de profils rechargés

La figure ci-dessous illustre la relation entre le paramètre A et la taille du sédiment. Ainsi plus un sédiment sera grossier, plus le coefficient A sera élevé et donc plus la pente de plage sera forte. Ce principe est essentiel dans le dimensionnement d'un rechargement sédimentaire.

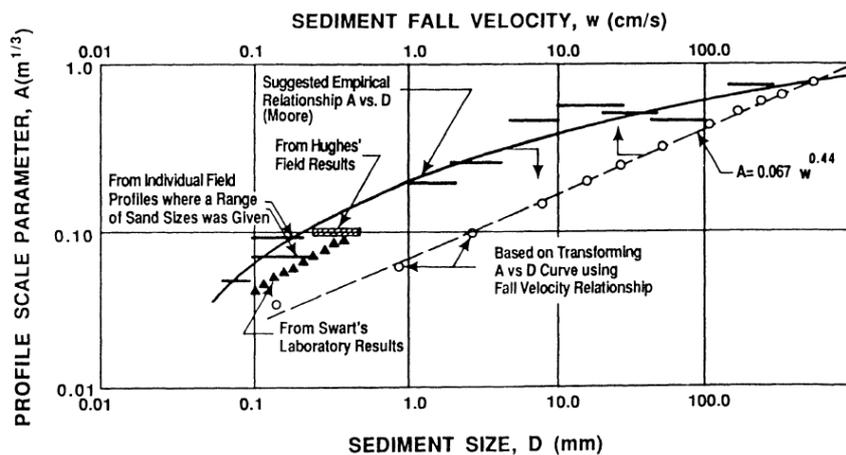


Figure 1. Beach profile factor, A, vs sediment diameter, D, and Fall velocity, w, in relationship $h = Ax^{2/3}$ (Dean, 1987a; modified from Moore, 1982).

Dans une configuration présentant un sable d'emprunt plus fin que celui de la plage d'accueil, il sera donc nécessaire de jouer sur les volumes apportés en les augmentant afin que le point d'intersection entre profil rechargé et profil initial se rapproche du trait de côte et éventuellement augmente la largeur de plage (en fonction des objectifs du projet). Une augmentation des volumes aura pour conséquence une augmentation des coûts.

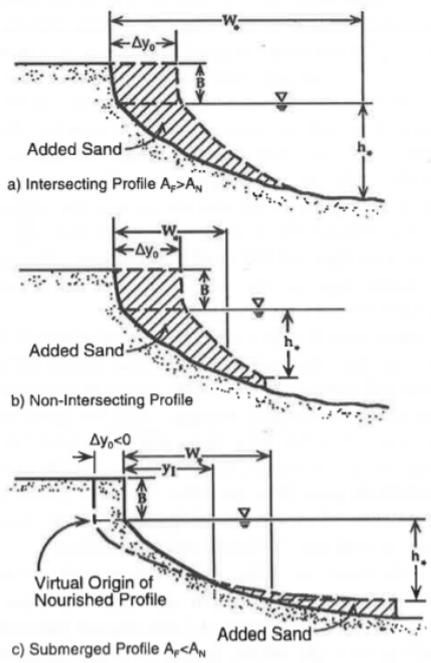


Fig. 5.2. Three generic types of nourished profiles Adapted from Dean (1991), published with permission of the *Journal of Coastal Research*.

Pentes de profils rechargés (Dean, 1991)

3) Exemple de planning de suivi

Table V-4-1
Physical Data Collection Schedule for Beach-Fill Monitoring

Phase I: Initial Placement and Project Years 1 to 3 ¹									
Monitoring Component	Initial Placement		Year 1 Following Initial Placement				Years 2 to 3		Years 1 to 3 Poststorm Contingency
	Pre-fill	Postfill	Mar	Jun	Sep	Dec	Mar	Sep	
Beach profile surveys	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Sediment sampling	X	X			X				
Aerial photography	X				X			X	
Waves and water levels					Continuous				
Phase II: Nonconstruction Years for Project Years 4 to N (N= Project Life)									
Monitoring Component	Even Number Years Following Each Construction		Odd Number Years Following Each Construction		Years 4 to N Poststorm Contingency				
	September		September						
Beach profile surveys		X		X				X	
Aerial photography				X					
Phase II: Beach Renourishment									
Monitoring Component	Renourishment		Year Following Renourishment						
	Pre-fill	Postfill	September						
Beach profile surveys	X	X						X	
Sediment sampling	X	X						X	
Aerial photography	X							X	

¹ Following Year 3, decision is made whether to continue Phase I level of monitoring

Exemple de planning de suivi (USACE, 2002)

4) Méthodes et techniques pour la réalisation d'un rechargement sédimentaire

La réalisation d'une opération de rechargement sédimentaire peut s'effectuer à l'aide de différentes techniques et équipements dont le choix va dépendre de tout un panel de paramètres comme la localisation de la source de sédiments, la configuration du site à recharger, le volume de sédiment à draguer, la distance entre le site d'emprunt et le site de dépôt, les éventuelles contraintes environnementales, mais également de l'enveloppe financière disponible pour le projet. L'apport de sédiments peut être réalisé par voie maritime ou voie terrestre. Cette partie va présenter les techniques d'extraction et les différents modes de transports et rejets possibles.

- Voie maritime

95% des volumes de sable utilisé pour la réalisation de rechargements sédimentaires proviendrait de dragages effectués au large des côtes (Dean, 2002). Le dragage serait donc la technique la plus courante dans le cadre de la mise en œuvre de rechargements sédimentaires. Etant

de plus au cœur des problématiques de ce travail doctoral, il conviendra de réaliser un inventaire sur les différents types de dragages et équipements qu'il est possible de mettre en œuvre.

□ Définition et type de dragage

Le dragage est une opération qui consiste à prélever des sédiments submergés et à les déplacer vers un nouveau secteur, dans l'eau ou hors d'eau (Bruun, 2005). Ces travaux peuvent être réalisés dans différents domaines comme les milieux marins, côtiers, portuaires ou encore fluviaux. L'objectif premier est généralement le maintien d'une profondeur adéquate pour assurer la sécurité de la navigation des navires. D'autres objectifs peuvent être mentionnés comme la mise en œuvre de travaux de construction, la protection de l'environnement avec le prélèvement de sédiments contaminés ou encore en vue d'un rechargement sédimentaire. Les sédiments extraits peuvent être de nature différente (sables, argiles, limons voire galets ou blocs) en fonction du lieu d'extraction et de l'objectif de l'opération. Cette étude s'intéresse particulièrement au domaine portuaire, nous allons donc insister ici sur les différents types de dragages au sein de ce milieu. Il est possible de mettre en évidence deux types de dragages dans le cadre des activités portuaires : les dragages d'entretien et les dragages d'aménagements (L'Yvanc et al., 1999).

Le dragage d'entretien est une activité indispensable pour le bon fonctionnement d'un port (Alzieu *et al.*, 1999). Effectivement, la sédimentation par décantation est un processus inévitable au sein de ce milieu qui présente beaucoup de zones confinées. A l'intérieur d'un tel site, les conditions hydrodynamiques très atténuées sont propices à la sédimentation des particules. Le taux de sédimentation est variable en fonction de la localisation du port - en façade maritime, à l'intérieur d'un estuaire ou en bordure de fleuve - ou encore de la configuration du domaine portuaire avec plus ou moins de zones étroites. Les dragages d'entretien se font donc de manière plus ou moins fréquente d'un port à l'autre en fonction de ce taux de sédimentation. Tous les secteurs sont susceptibles d'être dragués que ce soit les chenaux d'accès au port, ceux de navigation à l'intérieur du domaine portuaire, les bassins ou encore les darses. L'objectif des dragages d'entretien est donc de maintenir un tirant d'eau suffisant à l'entrée et à l'intérieur du port afin d'assurer son accès et la navigation des navires.

Les opérations de dragage peuvent également être entreprises dans le cadre du développement du port avec la création de nouveaux aménagements. Cela peut se traduire par l'approfondissement de certains secteurs afin d'accueillir des navires avec des tirants d'eau de plus en plus importants ou encore par la création de nouveaux bassins ou canaux. Ce type de dragages peut libérer rapidement des volumes considérables de sédiments qu'il faudra donc éliminer par immersion en mer ou valoriser grâce à différentes filières en fonction de leur granulométrie, mais surtout de leurs qualités physico-chimiques.

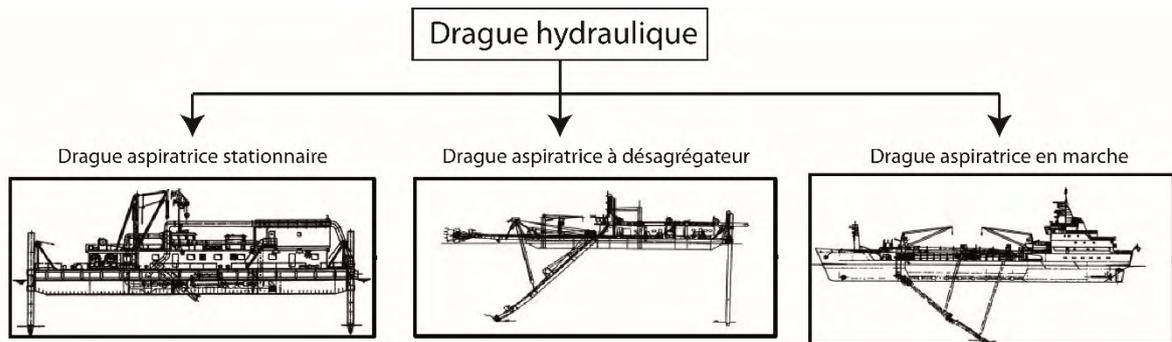
Le devenir de ces sédiments extraits est donc conditionné par leur qualité. La réglementation en matière de protection de l'environnement est à juste titre de plus en plus stricte quant aux possibilités de gestion de ces sédiments en fonction de leur degré de pollution.

□ Extraction des sédiments

Les prélèvements des sédiments sont effectués à l'aide de dragues. Une multitude de types de dragues existent, avec des modes de fonctionnement différents ainsi que des tailles variables (Vlasblom, 2003). La question de la taille et maniabilité des dragues est importante en milieu portuaire étant donné les secteurs parfois étroits et difficiles d'accès composant ce domaine. En fonction du mode d'extraction, deux grandes catégories de dragues peuvent être distinguées : les dragues hydrauliques aspiratrices et les dragues mécaniques.

□ Dragues hydrauliques aspiratrices

Le fonctionnement de ces dragues est basé sur l'aspiration d'une boue composée d'un mélange d'eau (environ 80%) et de matière solide (environ 20%) par des pompes centrifugeuses à travers une conduite d'aspiration appelée élinde. Ces dragues peuvent opérer au large, mais seulement lors de houle modérée. Il existe trois sous-catégories de dragues hydrauliques (Vlasblom, 2003) : les dragues aspiratrices stationnaires (DAS), les dragues stationnaires à désagrégateur (DSD) et les dragues aspiratrices en marche (DAM).



Les trois types de dragues hydrauliques (modifié d'après Grégoire, 2004)

Comme leur nom l'indique, les DAS sont fixées sur le fond par des pieux d'ancrage lors de l'opération. Ne disposant pas de zone de stockage à bord, il est donc nécessaire de charger le sédiment dragué sur une barge qui le transportera jusqu'au lieu de dépôt ou de déverser le sédiment dans des conduites de refoulement connectées à la drague. Ce type de drague aspiratrice est plutôt adapté à des sols assez meubles à moins qu'elle ne soit équipée d'un désagrégateur au niveau du bec d'élinde, on parlera dans ce cas d'une DSD. Ce désagrégateur rotatif va pouvoir pulvériser et fractionner les matériaux solides. L'avantage de cette drague est donc la grande variété de sols qu'il est possible de draguer y compris ceux présentant une grande résistance. Les paramètres qui vont influencer son rendement sont la vitesse du désagrégateur, sa dimension et son usure. Encore une fois ce type de drague aspiratrice doit décharger les matériaux de dragage sur une barge située à proximité ou dans des conduites de refoulement.

Autre sous-catégorie, les dragues aspiratrices en marche (DAM), également appelées dragues à élinde traînante, sont en mouvement pour effectuer le dragage. Elles ont de plus la capacité de stocker le sédiment prélevé à bord dans un puit placé dans la coque. Le mélange extrait composé d'eau et de sédiments va devoir décanter afin d'évacuer l'eau en excès par des déversoirs et de conserver uniquement le plus de matériau. Ce processus est appelé surverse. Des particules peuvent néanmoins être également évacuées avec l'eau par ce procédé, ce qui va avoir l'inconvénient d'entraîner la formation d'un panache turbide. Le volume des puits est variable et on distingue en général 4 gamme de volumes (Vidal, 2001) :

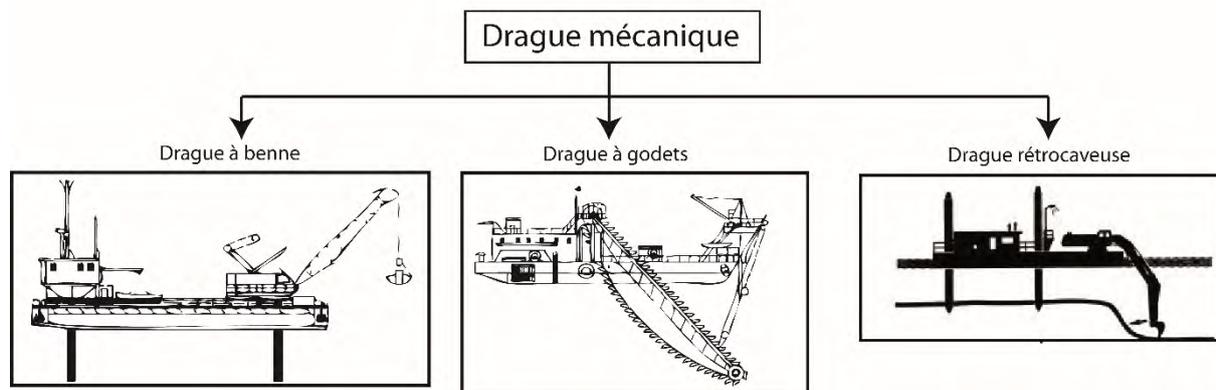
- Les petites dragues : jusque 3 000 m³
- Les dragues moyennes : entre 3 000 m³ et 8 000 m³
- Les grandes dragues : entre 8 000 et 16 000 m³
- Les dragues jumbo : à partir de 16 000 m³

Les plus grandes dragues jumbo atteignent aujourd'hui un volume de 46 000 m³. Les deux dragues atteignant ce volume sont les dragues Cristobal Colon et Leiv Eiriksson appartenant à la société luxembourgeoise Jan de Nul Group. Ces deux dragues peuvent atteindre une profondeur de

dragage maximale de 155 m. En fonction de la taille et capacité des DAM, cette profondeur sera évidemment variable. Une fois chargée, ce type de drague aspiratrice présente le gros avantage d'être flexible concernant le déchargement des matériaux. En effet étant donné sa capacité à se déplacer, plusieurs options de rejet peuvent alors être envisagées. La drague peut rejoindre elle-même le site de dépôt ou un point de connexion avec des conduites de refoulement.

□ Dragues mécaniques

Ce type de drague se caractérise par le prélèvement des sédiments par action mécanique à l'aide d'un outil. Il est possible de citer la drague à pelles (ou rétrocaveuse), la drague à godets ou encore la drague preneuse, composée d'une benne à mâchoires. Ces dragues sont stationnaires pour effectuer le prélèvement et permettent d'extraire des matériaux durs ou meubles. Une fois prélevé, le sédiment doit être chargé sur une barge qui le transportera ensuite jusqu'à la zone de rejet prévu ou via des conduites de refoulement. Ce type de drague doit être utilisé à proximité de la côte, étant donné leur incapacité à travailler en eaux profondes. Elles sont en général utilisées dans le cadre de travaux de maintenance nécessitant de la précision.



Trois des principales dragues mécaniques (modifié d'après Grégoire, 2004)

□ Le mode de transport et devenir des sédiments

Une fois le prélèvement effectué, il existe plusieurs moyens d'amener le sédiment sur le site de dépôt. Le transport peut être effectué :

- par la drague elle-même si elle en a la capacité technique comme c'est le cas des dragues aspiratrices en marche
- par une barge (non motorisée donc sous-entend la mobilisation de remorqueurs également) ou un chaland (motorisé)
- par des conduites de refoulement, flottantes ou submergées

De nombreuses combinaisons sont évidemment possibles dans les formes d'acheminement. Une fois chargé, la barge ou le chaland peut par exemple naviguer jusqu'à un point de connexion avec des conduites qui assureront donc la deuxième étape du transport. La drague peut également, en fonction de la proximité du site de dépôt, être directement connectée à des conduites ou effectuer des allers-retours entre site de prélèvement et point de connexion aux conduites. Des pompes relais peuvent éventuellement être installées dans le linéaire de conduites afin de redonner de l'impulsion au débit de la boue de dragage.

Concernant les modes de rejet à présent, le choix va encore une fois être dépendant de nombreux critères avec en priorité la qualité du sédiment dragué. Quand le sédiment doit être

immergé, le rejet peut s'effectuer par clapage. Cette opération consiste à déverser le sédiment sur les fonds marins ou côtiers (dans le cadre d'un rechargement subtidal par exemple). Le clapage peut être réalisé par la drague elle-même si elle est équipée d'une cale qui peut s'ouvrir sur le fond et déverser le sédiment, ou à l'aide d'une barge ou d'un chaland.

Le *rainbowing* est une technique de déchargement basée sur la projection en l'air du sédiment par une tuyère. Ce nom provient de la forme d'arc-en-ciel de la trajectoire de la projection. L'angle de projection de 30° a été étudié afin d'accroître la distance de portée et ainsi atteindre les secteurs les plus éloignés possibles. L'utilisation de cette technique peut avoir des objectifs variés comme la mise en œuvre de rechargements sédimentaires, subtidaux ou de plage, créer des remblais ou terre-pleins dans le cadre de l'extension d'un port par exemple. Pour maximiser le rendement, certaines dragues sont équipées de deux tuyères. Ce rendement va également dépendre de la puissance des pompes de refoulement et du diamètre des tuyères. L'un des inconvénients de cette méthode est lié au tirant d'eau. La drague doit en effet se localiser à proximité du site à recharger afin de pouvoir y projeter le sédiment. Il faut par conséquent bien prendre en considération le tirant d'eau de la drague afin qu'elle puisse se rapprocher au maximum du site de dépôt. Les conduites de refoulement en plus d'être un moyen d'acheminement peuvent également déverser le sédiment sur le lieu de dépôt.



A) Clapage réalisé par le chaland Le Guerrier (source : <http://www.jandenul.com>) - B) Rainbowing effectué par la drague Alexander Von Humboldt (source : <http://www.theartofdredging.com>) - C) Drague Juan Sebastián de Elcano et déversement sur la plage via des conduites de refoulement (source : <http://www.jandenul.com>)

□ Dragage hydrodynamique

Le dragage hydrodynamique est basé sur la remise en suspension et dispersion des matériaux sous l'influence de courants (Géode, 2012). Cette technique est traitée à part étant donné qu'elle mixe d'une certaine manière à la fois prélèvement, transport et rejet. Le dragage hydrodynamique n'a pas la vocation de sortir le sédiment de l'eau. Cette méthode sera d'autant plus efficace si les sédiments sont fins et déversés dans des zones avec de forts courants.

Il existe plusieurs variantes, la première d'entre elle étant le dragage à l'américaine. Ce type de dragage hydrodynamique constitue à prélever des sédiments à l'aide d'une drague et de déverser les sédiments qui sous l'influence de courants seront redispersés et exportés dans une zone choisie. Il est possible de citer également le dragage par courant de densité. Dans ce cas, les sédiments sont désolidarisés et remaniés via différents procédés comme l'injection d'eau ou d'air. Le fluide ainsi créé va avoir une densité supérieure à l'eau et va être transporté grâce aux courants de fond. La technique du rotodévasage est également basée sur la fluidification des sédiments de surface grâce à la rotation d'une fraise installée sur un navire qui va entraîner leur transport par les courants de fond.

- **Voie terrestre**

Les engins de chantiers comme type d'équipement pour la réalisation d'un rechargement sédimentaire ne représenteraient qu'une petite proportion des opérations (Dean, 2002). Les engins de chantier (camions, pelles mécaniques hydrauliques etc) peuvent être mis en œuvre pour l'extraction, mais également le transport et le rejet des matériaux. Les sédiments proviennent alors de sources terrestres (berges de cours d'eau, carrières, plages en excès de sable etc.).

Pratique pour la réalisation de petites opérations, certains inconvénients peuvent néanmoins être cités concernant le transport notamment. Effectivement, l'utilisation de nombreux camions-bennes pour les allers-retours entre zone de prélèvement et de dépôt peut venir causer des problèmes de trafic dans le cadre d'importants volumes à transporter. Mais surtout, l'utilisation massive de camions peut causer des perturbations d'un point de vue environnemental. A noter que les engins de terrassement sont également utilisés pour répartir le sable et redessiner le profil de plage après l'apport réalisé par des conduites de refoulement.

Beaucoup de combinaisons sont donc possibles dans le cadre d'une opération de dragage et rejet des matériaux, les choix dépendront notamment de la qualité du sédiment dans un premier temps mais également de la solution la plus économique.

1) Les différentes étapes d'un projet de rechargement sédimentaire

De nombreuses étapes séparent la volonté de réaliser un rechargement sédimentaire et sa mise en œuvre opérationnelle. Le **maitre d'ouvrage** est le commanditaire du projet. Il peut correspondre à une mairie ou à une communauté de communes par exemple. Dans le cas où ce maitre d'ouvrage ne possède pas les compétences nécessaires il peut faire appel à un **assistant à maîtrise d'ouvrage** qui va l'appuyer dans les démarches à effectuer. A noter que le maitre d'ouvrage porte le projet mais il peut être accompagné d'un comité de suivi qui va suivre et participer aux réunions à différentes étapes du projet.

- Phase en amont du projet

On distingue dans un premier temps les études préliminaires comme l'**étude de faisabilité**. Cette étude va en effet permettre de dresser différentes solutions d'aménagements littoraux envisageables et la pertinence d'un rechargement sédimentaire si cette option est privilégiée par le maitre d'ouvrage. Cette étape constitue une phase amont du projet afin de juger de la possibilité ou non de sa réalisation. Selon les attentes du maitre d'ouvrage, cette étude peut se constituer de plusieurs éléments comme :

- la caractérisation du site d'étude (conditions météo-marines, granulométrie, évolution topographique et bathymétrique, évolution du trait de côte, historique du site etc) accompagnée d'une synthèse du fonctionnement du site
- des propositions de dimensionnement du rechargement sédimentaire comme l'estimation de volumes nécessaires, sa localisation, son linéaire, l'allure du profil de plage rechargé etc
- la localisation de potentielles sources de sédiments
- une estimation de l'enveloppe financière pour chaque scénario proposé
- un phasage des opérations

L'étude de faisabilité englobe donc l'aspect technique mais également budgétaire du projet. Plusieurs propositions et scénarios peuvent être effectués dont l'objectif est d'aider le maitre d'ouvrage à se positionner sur une solution ou un dimensionnement de l'opération plus précise. Après l'analyse du contenu et propositions de l'étude de faisabilité, une idée plus précise du projet se dessine alors avec pour finalité le lancement des études d'avant-projet.

- Avant-projet

S'en suit un appel d'offre pour le choix du bureau d'études ou groupement qui réalisera les **études d'avant-projet**. Cette phase d'avant-projet plus poussée et concrète correspond à la phase préparatoire du projet. Elle va permettre d'aboutir au choix des caractéristiques de l'opération sélectionnée. Pour cela, encore une fois en fonction des attentes du maitre d'ouvrage, plus ou moins d'éléments vont composer cette étude comme (liste non exhaustive) :

- la caractérisation du site
- la synthèse des données existantes
- l'acquisition de nouvelles données (topo-bathymétrie, couratologie etc)
- une étude morphodynamique

- la modélisation du fonctionnement hydro-sédimentaire du site
- le dimensionnement d'un ou plusieurs scénarios de rechargements sédimentaires
- la modélisation de ces scénarios
- l'analyse de la comptabilité granulométrique entre site d'accueil et site de prélèvement et la détermination précise de cette zone d'extraction
- le calcul de la fréquence et des volumes des rechargements d'entretien
- mesures d'accompagnement et/ou de stabilisation du rechargement (pose de ganivelles, plantation d'oyats)
- le budget prévisionnel des différentes propositions

A noter que l'ampleur de l'étude (modélisation ou non, campagne d'acquisition de mesures etc) sera fonction du budget alloué à l'étude en question. Cette étude d'avant-projet devra aboutir après concertation entre le prestataire et le maître d'ouvrage à la sélection d'une solution de rechargement sédimentaire avec des caractéristiques précises. Il faut faire remarquer que dès cette phase, le montage du dossier réglementaire doit être effectué en parallèle (section 2)).

- **Projet**

Les **études de projet**, basées sur celles d'avant-projet, reprennent les caractéristiques de la solution finale retenue ainsi que les éléments nécessaires à sa réalisation afin de définir la conception générale du rechargement sédimentaire et de l'opération globale. L'objectif de cette étape est également de fixer les éléments plus techniques relatifs aux travaux ainsi que leur mode d'exécution. L'élaboration d'un cahier des charges pour le choix de du maître d'œuvre qui effectuera les travaux doit découler de cette phase projet. L'enveloppe financière pour la réalisation des travaux devra être fixée. A noter que l'accord pour le lancement des travaux dépend de l'autorité environnementale après analyse du dossier réglementaire.

- **Exécution des travaux**

Une fois le **maître d'œuvre** sélectionné, correspondant à l'entité chargée de la réalisation des travaux, et l'accord de l'autorité environnementale pour la mise en œuvre du rechargement sédimentaire obtenu, l'exécution du projet peut démarrer en fonction des prérogatives du projet et du cahier des charges (pas de travaux pendant l'été pour ne pas perturber les activités biologiques, les activités balnéaires etc).

Cette synthèse des différentes étapes pour la mise en œuvre d'un rechargement souligne la notion de temps et de durée auquel est soumise cette méthode de protection du littoral.

2) La procédure réglementaire

Un dossier réglementaire doit être constitué en parallèle des études d'avant-projet afin de gagner du temps et dans le but d'obtenir à terme une fois le projet concrétisé l'accord de l'autorité compétente pour la réalisation des travaux. Ce dossier réglementaire est constitué de pièces obligatoires et d'autres plus spécifiques à chaque projet. Cette sous-partie vise à lister les éléments essentiels de ce dossier.

- **Déclaration d'Intérêt Général (DIG)**

Selon l'article L 211-7 du Code de l'Environnement, dans le cadre de travaux de rechargement sédimentaire, il est nécessaire de réaliser une déclaration d'intérêt général : 5° *La défense contre les inondations et contre la mer.*

- **Demande de concession d'utilisation du Domaine Public Maritime (DPM)**

Toutes interventions ayant lieu sur le DPM nécessitent un titre d'occupation particulier (Article L2122-1 du Code Général de la Propriété des Personnes Publiques). Les rechargements sédimentaires sont également concernés par cette réglementation. C'est l'Etat, par l'intermédiaire du préfet, qui gère et réglemente l'utilisation du DPM sauf dans certains cas, notamment lors de la concession de gestion à une collectivité ou à un organisme. La demande d'utilisation du Domaine Public Maritime sera donc à transmettre à la préfecture ou à la collectivité gestionnaire (Article R2122-2 du CGPPP). Il existe différents modes de gestion selon la nature de l'intervention. Un « *rechargement de plage* » (tout comme des « *expérimentations de gestion de trait de côte* » de manière générale) nécessite une autorisation d'occupation temporaire (AOT) selon la Circulaire du 20 janvier 2012 relative à la gestion durable et intégrée du domaine maritime publique naturel.

- **Procédure d'autorisation environnementale**

Dans le cadre d'un projet de rechargement sédimentaire, le dossier d'autorisation environnementale doit comporter :

- Soit une **étude d'impact** - si le projet de rechargement est soumis à évaluation environnementale après examen au cas par cas
- Soit une **étude d'incidence environnementale** - si le projet n'est pas soumis à évaluation environnementale après examen au cas par cas – accompagnée de la décision motivée correspondante de l'autorité environnementale

- **Evaluation environnementale**

Selon l'article L 122-1 du code de l'environnement, « les projets qui, par leur nature, leur dimension ou leur localisation, sont susceptibles d'avoir des incidences notables sur l'environnement ou la santé humaine font l'objet d'une évaluation environnementale en fonction de critères et de seuils définis par voie réglementaire et, pour certains d'entre eux, après un examen au cas par cas effectué par l'autorité environnementale».

La réglementation a récemment changé, selon le décret 2016-1110 du 11 août 2016, en ce qui concerne les rechargements sédimentaires et les évaluations environnementales. Désormais, tous les projets de rechargements sont soumis à un examen au cas par cas (Code de l'environnement - Article Annexe à l'article R122-2). Même chose pour les opérations de dragage et/ou rejet y afférent en milieu marin soumises à autorisation selon la rubrique 4.1.3.0.

- **Code de l'Environnement – Loi sur l'eau**

Tout projet ayant un impact (direct ou indirect, mais également positif ou négatif) sur n'importe quel type de milieu aquatique est soumis à l'application de la Loi sur l'eau. Avec leur potentiel impact sur la zone côtière, les rechargements sédimentaires sont par conséquent concernés. Cette étape vise à déterminer si le projet est soumis à un régime d'autorisation ou de déclaration. Ce sont les articles L.241-1 à L.214.6 du Code de l'Environnement (CE) qui régissent ce point. Ainsi selon l'article L214-2 du CE, les « *installations, ouvrages, travaux et activités [...] sont soumis à autorisation ou à déclaration suivant les dangers qu'ils présentent et la gravité de leurs effets*

sur la ressource en eau et les écosystèmes aquatiques compte tenu notamment de l'existence des zones et périmètres institués pour la protection de l'eau et des milieux aquatiques ». Les projets associés à l'un des deux régimes sont considérés comme :

- Autorisation : « susceptibles de présenter des dangers pour la santé et la sécurité publique, de nuire au libre écoulement des eaux, de réduire la ressource en eau, d'accroître notablement le risque d'inondation, de porter gravement atteinte à la qualité ou à la diversité du milieu aquatique, notamment aux peuplements piscicoles » (Article L214-3)
- Déclaration : « n'étant pas susceptibles de présenter de tels dangers », mais ils « doivent néanmoins respecter les prescriptions édictées en application des articles L. 211-2 et L. 211-3 » (Article L214-3).

Certains critères permettent de déterminer à quel régime appartient le projet (R 214-I à R 214-6 du CE) :

4.1.2.0. TRAVAUX D'AMENAGEMENT PORTUAIRES ET AUTRES OUVRAGES REALISES EN CONTACT AVEC LE MILIEU MARIN ET AYANT UNE INCIDENCE DIRECTE SUR CE MILIEU :

1° D'un montant supérieur ou égal à 1 900 000 euros	Autorisation
2° D'un montant supérieur ou égal à 160 000 euros mais inférieur à 1 900 000 euros	Déclaration

4.1.3.0. DRAGAGE ET/ OU REJET Y AFFERENT EN MILIEU MARIN :

1° Dont la teneur des sédiments extraits est supérieure ou égale au niveau de référence N2 pour l'un au moins des éléments qui y figurent :		Autorisation	
2° Dont la teneur des sédiments extraits est comprise entre les niveaux de référence N1 et N2 pour l'un des éléments qui y figurent :	a) Et, sur la façade métropolitaine Atlantique-Manche-mer du Nord et lorsque le rejet est situé à 1 kilomètre ou plus d'une zone conchylicole ou de cultures marines :	I.- Dont le volume maximal in situ dragué au cours de douze mois consécutifs est supérieur ou égal à 50 000 m3	Autorisation
		II.- Dont le volume maximal in situ dragué au cours de douze mois consécutifs est inférieur à 50 000 m3	Déclaration
	b) Et, sur les autres façades ou lorsque le rejet est situé à moins de 1 km d'une zone conchylicole ou de cultures marines :	I.- Dont le volume maximal in situ dragué au cours de douze mois consécutifs est supérieur ou égal à 5 000 m3	Autorisation
		II.- Dont le volume maximal in situ dragué au cours de douze mois consécutifs est inférieur à 5 000 m3	Déclaration
3° Dont la teneur des sédiments extraits est inférieure ou égale au niveau de référence N1 pour l'ensemble des éléments qui y figurent :	a) Et dont le volume in situ dragué au cours de douze mois consécutifs est supérieur ou égal à 500 000 m3	Autorisation	
	b) Et dont le volume in situ dragué au cours de douze mois consécutifs est supérieur ou égal à 5 000 m3 sur la façade Atlantique-Manche-mer du Nord et à 500 m3 ailleurs ou lorsque le rejet est situé à moins de 1 km d'une zone conchylicole ou de cultures marines, mais inférieur à 500 000 m3	Déclaration	

Ainsi le régime d'autorisation ou de déclaration dépend de plusieurs paramètres comme le coût de l'opération, la qualité des sédiments apportés (N1 ou N2), du volume de sédiment concerné, de la localisation du site ainsi que la distance entre le rechargement et une éventuelle zone conchylicole ou de cultures marines. Si pour un projet relève des deux régimes à la consultation des deux rubriques, c'est l'autorisation qui l'emporte.

La procédure en cas d'autorisation a très récemment changé. Désormais, cette autorisation correspond à l'**autorisation environnementale**. En effet, une expérimentation a été lancée en mars 2014 visant à simplifier la procédure dans le cadre d'un projet soumis à autorisation au titre de la Loi sur l'eau. L'expérimentation a été pérennisée depuis le 1^{er} mars 2017 et a été inscrite dans le Code de l'Environnement.

3) Qualité du sédiment

Des niveaux de référence N1 et N2 relatifs à la qualité du sédiment ont été précédemment mentionnés. Ces niveaux de référence, N1 et N2 pour les sédiments marins ou estuariens, correspondent à des seuils de classifications selon leurs potentiels impacts sur l'environnement (Tableau 0.1). Les niveaux de référence de cet arrêté ont été établis par le Groupe d'Etudes et d'Observation sur le Dragage et l'Environnement (Géode). Il faut alors se référer à l'*Arrêté du 9 août 2006 relatif aux niveaux de référence à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux relevant respectivement des rubriques 2.2.3.0, 4.1.3.0 et 3.2.1.0 de la nomenclature annexée à l'article R. 214-1 du code de l'environnement* (Arrêté du 9 août 2006).

Seuils	Impacts
Inférieur à N1	« l'impact potentiel est en principe jugé d'emblée neutre ou négligeable, les teneurs étant "normales" ou comparables au bruit de fond environnemental »
Entre N1 et N2	« une investigation complémentaire peut s'avérer nécessaire en fonction du projet considéré et du degré de dépassement du niveau N1 »
Supérieur à N2	« une investigation complémentaire est généralement nécessaire car des indices notables laissent présager un impact potentiel négatif de l'opération »

Tableau 0.1 Impacts sur l'environnement selon les seuils de classification N1 et N2 (d'après Géode, 2016)

La liste des éléments nécessitant une analyse particulière sont les suivants :

- 8 éléments traces (Tableau 0.2)
- 7 polychlorobiphényles (Tableau 0.3)
- le tributylétain (Tableau 0.4)
- 16 hydrocarbures aromatiques polycycliques (Tableau 0.5)

ÉLÉMENTS TRACES	NIVEAU N1	NIVEAU N2
Arsenic	25	50
Cadmium	1,2	2,4
Chrome	90	180
Cuivre	45	90
Mercurure	0,4	0,8
Nickel	37	74
Plomb	100	200
Zinc	276	552

Tableau 0.2 Seuils concernant les éléments traces (en mg/kg de sédiment sec analysé sur la fraction inférieure à 2 mm)

PCB	NIVEAU N1	NIVEAU N2
PCB congénère 28	5	10
PCB congénère 52	5	10
PCB congénère 101	10	20
PCB congénère 118	10	20
PCB congénère 138	20	40
PCB congénère 153	20	40
PCB congénère 180	10	20

Tableau 0.3 Seuils concernant les polychlorobiphényles (PCB) (en µg/kg de sédiment sec analysé sur la fraction inférieure à 2 mm)

PARAMÈTRE	NIVEAU N 1	NIVEAU N 2
TBT	100	400

Tableau 0.4 Seuils concernant le tributylétain (TBT) (en µg/kg de sédiment sec analysé sur la fraction inférieure à 2 mm)

HAP	NIVEAU N1	NIVEAU N2
Naphtalène	160	1 130
Acénaphthène	15	260
Acénaphthylène	40	340
Fluorène	20	280
Anthracène	85	590
Phénanthrène	240	870
Fluoranthène	600	2 850
Pyrène	500	1 500
Benzo [a] anthracène	260	930
Chrysène	380	1 590
Benzo [b] fluoranthène	400	900
Benzo [k] fluoranthène	200	400
Benzo [a] pyrène	430	1 015
Di benzo [a,h] anthracène	60	160
Benzo [g,h,i] pérylène	1 700	5 650
Indéno [1,2,3-cd] pyrène	1 700	5 650

Tableau 0.5 Seuils concernant les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) (en µg/kg de sédiment sec analysé sur la fraction inférieure à 2 mm)

Ces niveaux de contaminations peuvent faire l'objet de réévaluation afin d'actualiser les valeurs de références au vue de l'avancée des connaissances dans ce domaine.

Annexe 3. Synthèse des sources utilisées pour l'inventaire des rechargements sédimentaires en France

N° dép	Dép	Rapport	Article scientifique	Services de l'Etat	Organisme	Presse	Divers
59	Nord		Pupier-Dauchez, 2002 ; Oblinger, 2008 Bertier, 2009 ; Tresca, 2013		Grand Port Maritime de Dunkerque	Voix du Nord	
62	Pas de Calais			Pôle Métropolitain Côte d'Opale			SOS Baie d'Authie
80	Somme			Communauté de Communes Opale Sud	Syndicat Mixte Baie de Somme Grand Littoral		
76	Seine-Maritime						
27	Eure						
14	Calvados						
50	Manche		Pupier-Dauchez, 2002	DDTM-50		Le Télégramme	http://www.normandie-actu.fr
39	Ille-et-Vilaine			DDTM-35			
22	Côtes d'Amor						
29	Finistère		Guilcher et Hallegouet, 1991 ; Pupier-Dauchez, 2002 ; Fichaut et Suanez, 2012	DDTM-29 , Préfecture du Finistère		Ouest France	
56	Morbihan	Schéma de prévention des risques littoraux de la presqu'île de Gâvres				Ouest France	http://www.lorient.maville.com/
44	Loire-Atlantique		Pupier-Dauchez, 2002 ; Pupier-Dauchez, 2008	DREAL			http://www.labaule-infos.net
85	Vendée	PAPI de l'île de Noirmoutier	Pupier-Dauchez, 2002 ; Pupier-Dauchez, 2008 Fattal <i>et al.</i> , 2010		Océan Marais de Monts		
17	Charente-Maritime		Pupier-Dauchez, 2002 ; Pupier-Dauchez, 2008	DDTM-17			
33	Gironde		Pupier-Dauchez, 2002 , (Montaudouin <i>et al.</i> , 2009)		Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon		
40	Landes			DDTM-40			
64	Pyrénées-Atlantiques	(Alexandre <i>et al.</i> , 2003; De la Torre <i>et al.</i> , 2014b)	Pupier-Dauchez, 2002,	Mairie Saint-Jean de Luz - Mairie Anglet - DDTM-64	Port de Bayonne		Magazine d'informations municipales Saint-Jean-de Luz
66	Pyrénées-Orientales	Raynal <i>et al.</i> , 2013	Rey-Valette <i>et al.</i> 2013			Lindependant	
11	Aude	Raynal <i>et al.</i> , 2013					
34	Hérault	Raynal <i>et al.</i> , 2013	Pupier-Dauchez, 2002 ; Rey-Valette <i>et al.</i> 2013			http://www.herauld-tribune.com/	https://www.ville-agde.fr/ - http://www.agglomero-heraultmediterranee.net/ - http://www.thau-agglo.fr
30	Gard	Raynal <i>et al.</i> , 2013	Vanroye, 2008 ; Rey - Valette <i>et al.</i> 2013				
13	Bouches-du-Rhône						
83	Var		Pupier-Dauchez, 2002				
6	Alpes-Maritimes	Sogreah, 2009	Namvrine, 1996	DDTM-06			
2B	Haute-Corse	De la Torre <i>et al.</i> , 2014a					
2A	Corse-du-Sud						

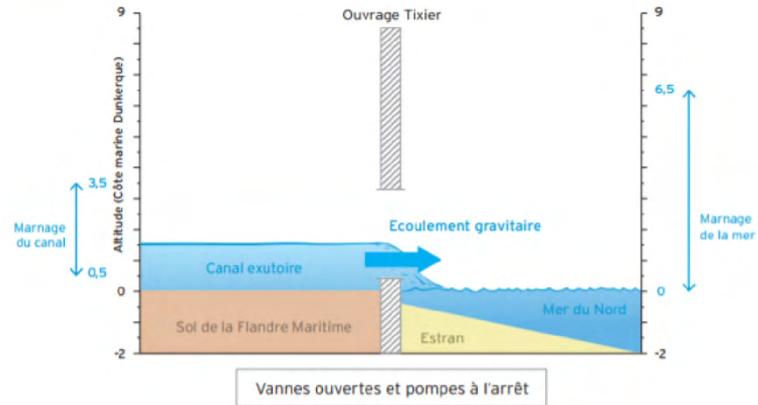
Annexe 4. Secteurs hydrauliques du territoire des Wateringues

DÉCOUPAGE DU TERRITOIRE DES WATERINGUES EN SECTEURS HYDRAULIQUES



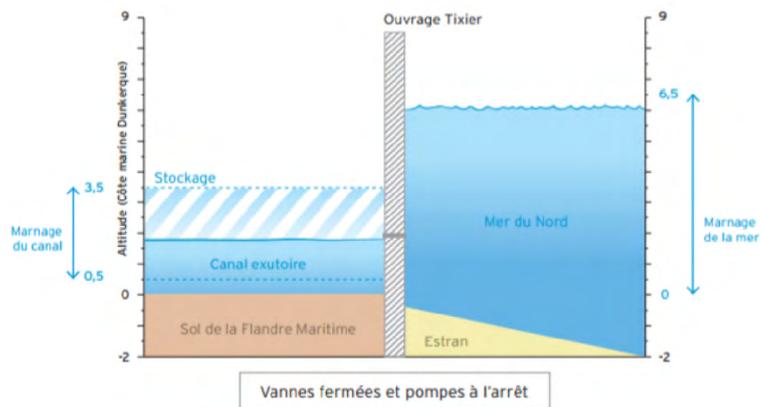
Annexe 5. Fonctionnement de l'écluse Tixier à Dunkerque

Marée basse



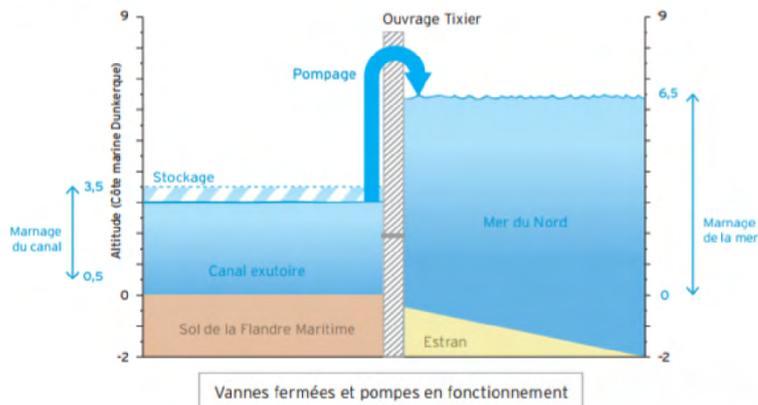
Marée haute

Situation normale



Marée haute

Situation de crue



Analyse morphodynamique de rechargements sédimentaires sur le littoral du nord de la France : le cas de la façade portuaire de Dunkerque

Résumé : Afin de lutter contre l'érosion du littoral, les phénomènes de submersion marine ou d'inondation, des rechargements sédimentaires issus de sable de dragage ont été réalisés au droit d'ouvrages clés le long de la façade maritime du Grand Port Maritime de Dunkerque (GPMD). L'objectif principal de cette étude est d'analyser l'évolution de différents types de rechargements sédimentaires le long d'ouvrages présentant un intérêt stratégique : un rechargement de plage de 1,5 millions de m³ (Mm³) face à la digue des Alliés dans la station balnéaire de Malo-les-Bains et un rechargement subtidal de 3 Mm³ face à la digue du Ruytingen à l'avant-port Ouest du GPMD. Des levés topographiques et bathymétriques successifs ont permis d'établir des bilans sédimentaires des zones rechargées. Bien que ces bilans soient négatifs dans les deux cas, les pertes de sédiments restent modérées, notamment concernant l'opération de la digue des Alliés dont le volume a diminué de 12,3 % en un peu plus de 3 ans. Une zone d'érosion marquée a été identifiée à l'ouest, tandis qu'une partie du sable est redistribué vers l'est sous l'effet des courants de marée et de la dérive littorale comme à Malo-les-Bains où la plage à l'est du rechargement bénéficie d'un apport sableux. Le rechargement subtidal a perdu une plus grande proportion de son volume de sable que le rechargement de plage. L'analyse des forçages météo-marins a montré que l'évolution morpho-sédimentaire des rechargements dépend de leur exposition aux houles, le rechargement subtidal face à la digue du Ruytingen étant plus exposé aux houles dominantes de secteur ouest que celui de Malo-les-Bains, plus influencé par les houles de nord-est.

Mots-clés : rechargements sédimentaires, évolution morphodynamique, façade portuaire, macrotidal, mer du Nord

Morphodynamic analysis of artificial replenishments on the coast of northern France: the case of the port of Dunkirk seafront

Abstract : In order to prevent coastal erosion and marine flooding, artificial replenishments using dredged sand have been carried out in front of key coastal structures along the coast of the Grand Port Maritime de Dunkerque (GPMD). The main objective of this study is to analyse the evolution of different types of artificial replenishments along structures of strategic interest of the GPMD: a beach nourishment of 1.5 million m³ (Mm³) in front of the dike called "Digue des Alliés" in the seaside resort of Malo-les-Bains and a subtidal nourishment of 3 Mm³ in front of the "Digue du Ruytingen" in the Western Port. Successive topographic and bathymetric surveys enabled to evaluate the sediment budgets of the nourished zones. Although the sediment budgets are negative in both cases, sand losses are nevertheless moderate compared to other artificial replenishments around the world, particularly for the beach fill in front of the "Digue des Alliés" where sediment volume decreased by 12.3% over three years. Significant erosion has been identified in the western part of the nourishment site, the eroded material being partly redistributed eastward along the beach of Malo-les-Bains under the influence of tidal currents and littoral drift. The subtidal replenishment lost a higher proportion of its initial sediment volume compared to the subaerial beach replenishment. Analysis of hydro-meteorological forcing showed that the morpho-sedimentary evolution of each operation strongly depends on their wave exposition, the subtidal replenishment in front of the "Digue du Ruytingen" being much more exposed to the dominant waves from W than the one in Malo-les-Bains, more influenced by waves from NE.

Key words : artificial replenishments, morphodynamic evolution, port side, macrotidal, North Sea